



TÜBINGER GEOWISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN (TGA)

Reihe C:
Hydro-, Ingenieur- und Umweltgeologie

Schriftleitung::
G. Teutsch, G. Einsele

Johannes Körner

Abflußbildung, Interflow und Stoffbilanz im Schönbuch Waldgebiet

TGA, C27, 1996

Abflußbildung, Interflow und Stoffbilanz im Schönbuch Waldgebiet

Johannes Körner

*Lehrstuhl für Angewandte Geologie
Institut für Geologie und Paläontologie
Universität Tübingen
Sigwartstraße 10
72076 Tübingen
FRG.*

Herausgeber:

Institut und Museum für Geologie und Paläontologie
der Universität Tübingen
Sigwartstraße 10, D-72076 Tübingen

Schriftleitung der Reihe C:

Lehrstuhl für Angewandte Geologie
Prof. Dr. G. Teutsch & Prof. Dr. G. Einsele

ISSN 0935-4948

TGA	Reihe C	Nr. 27	206 S., 92 Abb., 72 Tab.	Tübingen, März 1996
-----	---------	--------	--------------------------	---------------------

Abflußbildung, Interflow und Stoffbilanz im Schönbuch Waldgebiet

Johannes Körner¹

Kurzfassung: In dem naturnahen Waldgebiet Naturpark Schönbuch, südlich von Stuttgart, wurden von 1984 bis 1986 Untersuchungen zur Abflußbildung mit Separationen des Gesamtabflusses in verschiedene Teilkomponenten sowie Bilanzierungen des Wasser- und Stoffhaushaltes durchgeführt.

Das fast vollständig bewaldete Untersuchungsgebiet liegt im süddeutschen Keuperbergland und repräsentiert geologisch-geomorphologisch einen in Süddeutschland weitverbreiteten Landschaftstyp, in dem tonig - mergelige Gesteine sowie karbonatisch und kieselig gebundene Sandsteine dominieren. Das Talsystem des Goldersbachs hat ein bis 150 m eingeschnittenes Relief geschaffen, in dem Hanglagen mit Neigungen größer 3° ca. 70% der Gesamtfläche einnehmen.

Die Deckschichten setzen sich weiträumig aus zweigliedrigen, periglazialen Schuttdecken zusammen, die aus dem bis zu 0,6 m mächtigen, grobkörnigen Deckschutt (der je nach Ausgangsgestein sand- oder tonreicher ausgebildet sein kann) und dem feinkörnigen, schlechter durchlässigen Basisschutt bestehen. Der starke Unterschied der hydraulischen Leitfähigkeiten begünstigt den Interflow.

Die Niederschlagshöhe im Freiland (NF) lag 1985 mit 725 mm/a nur wenig unter dem langjährigen Mittelwert von 752 mm/a. In den acht untersuchten Einzugsgebieten korrelierten die Höhen des Gesamtabflusses (Q_t) mit der Höhe des Bestandesniederschlags (NB), der in reinen Nadelwaldgebieten (Nd) im Mittel 55%, in reinen Laubwaldgebieten (Lb) dagegen 76% des NF beträgt. Aus Regressionsgeraden konnten mittlere Grundwasserabflußhöhen von 80 mm/a für reine Nd- und 170 mm/a für reine Lb-Gebiete berechnet werden.

Die aktuelle Verdunstung in dem für den Schönbuch repräsentativen Teileinzugsgebiet Großer Goldersbach (P 1: Nd/Lb = 60/40) lag mit 596 mm/a (82% von NF) etwas über dem langjährigen Mittelwert (550 mm/a). Die Grundwasserneubildung wurde bei einem Gesamtabfluß von 161 mm/a mit 102 mm/a ermittelt.

Mit Hilfe spezieller Verfahren zur Ganglinienseparation (Verwendung der Tracer $\delta^{18}O$ und elektr. Leitfähigkeit) konnten bei Hochwasserereignissen 3 Abflußkomponenten getrennt werden: Interflow aus aktuellem Niederschlagswassers IF_e (event water) und aus Vorereignis-Bodenwasser IF_{pe} (pre-event water) sowie älteres Grundwasser GW.

Die Interflow-Höhen erreichten in Sandsteingebieten 40-50 mm/a und in Tongebieten ca. 90 mm/a. Interflow in nennenswerter Höhe tritt erst bei Bodenwassergehalten in Höhe der Feldkapazität, hauptsächlich während des Winterhalbjahrs, auf. Bei durchschnittlichen Niederschlag-Abfluß-Ereignissen fließen in Sandgebieten 40% von NB ab und in Tongebieten 46%. Die Abflußanteile durchschnittlicher Hochwasserereignisse liegen im Mittel bei 37% GW, 52% IF_{pe} und 11% IF_e in Sandgebieten und bei 19% GW, 62% IF_{pe} und 19% IF_e in Tongebieten. Bei Niederschlag-Abfluß-Ereignissen im Sommer fließen im Mittel nur 3 - 4% von NB als Gesamtabfluß (Q_t) ab. Der Interflow fließt rasch in Grobporen ab und besteht nur aus IF_e . Sein Anteil an Q_t beträgt im Mittel 40% in Sand- bzw. 60% in Tongebieten.

Die Stoffkonzentrationen im Niederschlag steigen bei der Passage des Kronenraums unter Fichten stärker an als unter Buchen. Kräftig angereichert werden K, Ca, SO_4 und NO_3 . Die pH-Werte liegen im NF bei im Mittel 4,7, im NB unter Fichten bei 3,75 und unter Buchen bei 5,0. Die Stoffkonzentrationen im Interflow steigen mit höheren mittleren Verweilzeit des abfließenden Bodenwassers. Bei Abflußspitzen im Winterhalbjahr kommt es aufgrund hoch mineralisierter Interflow-Anteile zu erhöhten K-, SO_4 - und NO_3 -Konzentrationen im Gesamtabfluß.

Die Stickstoff-Deposition ist 1985 im Vergleich zu den Vorjahren leicht angestiegen. Die SO_4 -Deposition lag dagegen je nach Gebiet niedriger bzw. höher. Die Belastung aus dem atmosphärischen Eintrag ist im Westteil des Schönbuchs größer und nimmt weiter zu.

Bilanzuntersuchungen haben ergeben, daß die Pflanzen in Sandgebieten zur K-Versorgung mit auf die Silikatverwitterung angewiesen sind. Der Stickstoff (N)- und Schwefelbedarf (S) kann dagegen aus dem atmosphärischen Eintrag gedeckt werden. Besonders in Nd-Gebieten kommt es zu N-Überschüssen, die in Naßjahren wie 1986 teilweise durch Interflow wieder ausgewaschen werden. Sulfat wird im Boden gespeichert. Der SO_4 -S-Überschuß betrug in Lb-Gebieten ca. 3 kg/ha·a und in Nd-Gebieten ca. 8 kg/ha·a.

¹ Dissertation an der Geowissenschaftlichen Fakultät der Universität Tübingen
Anschriß des Verfassers: Johannes Körner, Bei den Roßwiesen 2, 72074 Tübingen

Streamflow Generation, Interflow and Fluxes of Dissolved Constituents in the Forested Area of Schönbuch Nature Park

Johannes Körner¹

Abstract: In the forested nature park Schönbuch, situated south of Stuttgart, investigations had been conducted between 1984 to 1986 with the aim of characterizing catchment discharge and in order to quantify fluxes of water and dissolved solids.

The area of investigation is almost completely forested and geologically belongs to the Triassic Keuper hills. In this type of landscape, which is relatively frequent in Southern Germany, clayey and marly mudrocks and carbonate-cemented or silica-cemented sandstones determine the geological sequence. The valley system of the Goldersbach, the main river, displays a deep relief (150 m), and 70% of the slopes are steeper than 3 degrees.

The regolith can be subdivided into two periglacial units: an upper coarser grained and highly permeable debris layer with a thickness of up to 0,6 m and the lower fine grained layer of low permeability. The high contrast in the hydraulic conductivities favours the formation of interflow. Depending on the geology the regolith can either be more sandy or richer in clayey components.

Precipitation in the non forested area (NF) was determined at 725 mm/a in 1985 which more or less corresponds to the long-term average of 752 mm/a. Total discharge (Q_t) in the eight catchments correlates with the tree throughfall (NB) which on average is 55% in coniferous (Nd) and 76% of NF in deciduous stands (Lb). From regression analysis mean depth of groundwater discharge of 80 mm/a for coniferous and 170 mm/a for deciduous areas could be calculated.

Real evaporation was calculated for the representative catchment Großer Goldersbach (Nd/Lb = 60/40) at 596 mm/a (82% of NF), which is somewhat higher than the long-term mean of 550 mm/a. Groundwater recharge was determined at 102 mm/a for a total discharge of 161 mm/a.

Using special techniques for hydrograph separation ($\delta^{18}\text{O}$ and electrical conductivity) allow a discrimination into three components: interflow derived directly from recent event water (IF_e), interflow consisting mainly of displaced pre-event soil water (IF_{pe}) as well as older groundwater (GW).

The interflow depth amount in total to approximately 40 to 50 mm/a in sandstone and to ca. 90 mm/a in mudstone areas. Interflow is mainly observed in winter period when soil water contents exceed field capacity. During average recharge events approximately 40% of the tree throughfall are discharged from sandy and ca. 46% in clayey and marly areas. Total discharge for average events can be subdivided into 37% groundwater discharge, 52% pre-event interflow and 11% event interflow water in sandstone catchments, in mudrock areas these percentages can be quantified as 19% GW, 62% IF_{pe} and 19% IF_e . In summer only 3 to 4% of NB are discharged as total discharge Q_t . The interflow rapidly percolates through macropores and has only one component (IF_e). The proportion of interflow is on average 40% in sand and 60% of Q_t in clay dominated areas.

The concentration of dissolved solids in precipitation are higher below spruce than below beech. Concentration of K, Ca, SO_4 and NO_3 were considerably increased. pH-values in precipitation were on average 5,7, in tree throughfall below spruce 3,75 and below beech 5,0. The concentration of dissolved components in the interflow increase with higher mean residence time of the discharging soil water. In winter times frequently high concentrations of K, SO_4 and NO_3 are measured during peak-discharge.

Nitrogen deposition has increased in 1985 as compared to previous years. Depending on the catchment the SO_4 -deposition was either higher or lower. Deposition from atmospheric sources is higher in the west of the Schönbuch and is still on the increase.

Flux and balance investigations show that vegetation in sandy areas relies on potassium supply derived from silicate weathering processes. Nitrogen and sulfur demand is covered by the atmospheric input. Especially in coniferous areas a nitrogen surplus is measured which is washed out via interflow in wet years such as 1986. Sulfate is stored in the soil, the SO_4 -S surplus in the deciduous areas amounts to ca. 3 kg/ha·a and in coniferous areas to approximately 8 kg/ha·a.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des BMFT-Forschungsvorhabens "Saurer Regen/Waldsterben" und dem Teilprojekt "Schwefel-, Stickstoff- und Schwermetall-Umsatz zwischen Ökosystemkomponenten und -Verteilung auf Ökosystemkompartimente sowie deren (in-)direkte Auswirkung auf Organismen" (Forschungsprojekt Nr. 03 7346), das an den Universitäten Hohenheim und Tübingen unter der Leitung der Herren Professoren Dr. E. Schlichting, Dr. K. Stahr und Dr. G. Einsele durchgeführt wurde. An Standorten von Kleinlandschaften in Südwestdeutschland, die sich in ihrer atmosphärischen Belastung und/oder natürlichen bzw. anthropogenen Trophie unterscheiden, sollten der Stoffumsatz (besonders des Stickstoffs, Schwefels und der Schwermetalle) bilanziert und die Stoffverteilung kleinräumig kompartimentiert werden. Die Untersuchungen schlossen sich in wesentlichen Teilen an das unter der Leitung von Prof. Dr. Einsele durchgeführte Forschungsvorhaben "Das Landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbuch" an. Dabei wurden u.a. geologische und bodenkundliche Kartierungen sowie Untersuchungen zum Wasser- und Stoffhaushalt durchgeführt. Durch die Fortführung dieser grundlegenden Untersuchungen sollten längerfristige Tendenzen des Wasser- und Stoffhaushaltes aufgezeigt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden auf der Grundlage der gemeinsam mit meinen Kollegen Dipl.-Geol. M. Flegr und Dipl.-Agr.-Biol. Dr. L. Monn durchgeführten Untersuchungen (Forschungsbericht: FLEGR et al., 1989) spezielle weiterführende Teiluntersuchungen durchgeführt. Sie beziehen sich auf den Wasser- und Stoffhaushalt unter besonderer Berücksichtigung des Interflow. Die Notwendigkeit zu genaueren Untersuchungen der Abflußbildung mit Interflow ergab sich aus den im Rahmen des "Schönbuchprojektes" durchgeführten detaillierten Analysen von Abflußganglinien, aus denen die wichtige Rolle des Interflow bei der Abflußbildung hervorging.

Die Bearbeitung des Themas wurde mir von meinem akademischen Lehrer, Herrn Prof. Dr. G. Einsele, übertragen. Ihm danke ich ganz besonders herzlich für sein förderndes Interesse am Fortgang der Arbeit und seine Geduld bis zu ihrer Fertigstellung.

Zahlreiche Personen und Behörden stellten Unterlagen zur Verfügung oder unterstützten die Untersuchungen aktiv. Mein Dank gilt namentlich Herrn Dipl.-Phys. W. Stichler vom Institut für Hydrologie der GSF in München-Neuherberg für über 800 $\delta^{18}\text{O}$ -Analysen, Herrn Ltd. FDir. Dr. F. H. Evers und OReg. Biol. Rat Dr. W. Bücking von der Forstlichen Versuchsanstalt Baden-Württemberg, Herrn Ltd. FDir. Arnold von der Forstdirektion Südwürttemberg-Hohenzollern, dem Forstamt Bebenhausen, Herrn Weiß vom Wasserwirtschaftsamt Reutlingen, dem Deutschen Wetterdienst in Stuttgart, den Kollegen Dipl.-Geol. R. Poppe und Dipl.-Geol. R. Klaiber für Gelände- und Laborarbeiten, Frau A. Hartmann-Renz für ihre Hilfe bei ionenchromatographischen Analysen und Frau M. Fritz für die Ausführung von Zeichenarbeiten.

Besonderen Dank sage ich meinen Kollegen und Freunden

- Dipl.-Geol. M. Flegr und Dipl.-Agr.-Biol. Dr. L. Monn, mit denen das BMFT-Forschungsprojekt gemeinsam durchgeführt wurde,
- Dipl.-Geol. Dr. W. Fleck, mit dem die Interflow-Meßanlage konzipiert, gebaut und anfangs betrieben wurde,
- Dipl.-Geol. N. Zeidler, unter dessen Anleitung ich über 1000 $\delta^{18}\text{O}$ -Analysen am Mineralogischen Institut der Universität Tübingen durchführen konnte, der bei der Datenverarbeitung half und mit dem ich die Analysengeräte zur Ionenchromatographie am Geologischen Institut Tübingen installiert und anfangs betreut habe,
- Prof. Dr. G. Teutsch, der wertvolle konzeptionelle Hilfe und Unterstützung bei der Datenverarbeitung gab,
- Dipl.-Geol. Dr. H. Schmidt-Witte, Büro für Angewandte Geologie, meinem immer verständnisvollen und toleranten Arbeitgeber und ganz besonders herzlich
- Dipl.-Geol. M.Sc. Dr. M. Sauter für viele hilfreiche Diskussionen sowie seine Unterstützung bei der Datenverarbeitung und die Durchsicht des Konzeptes.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung und Zielsetzung	1
2. Einführung in die Themenbereiche Abflußbildung, Komponentenseparation und Stoffumsatz mit Interflow	4
2.1 Frühere Untersuchungen zur Interflow-Bildung und Diskussion der Ergebnisse	4
2.2 Frühere Ganglinienseparationen - Methodik sowie Problematik beim Auftreten von Interflow	7
2.3 Modellvorstellung zur Abflußbildung und Arbeitsansatz für eine erweiterte Komponentenseparation	10
2.4 Modellvorstellung zu Stoffkreislauf und Stoffumsatz unter Berücksichtigung des Interflow	15
3. Untersuchungsgebiete	18
3.1 Lage und Auswahlkriterien	18
3.2 Geologie und Hydrogeologie im Überblick	18
3.3 Deckschichten und Böden	20
3.4 Einzugsgebiete und Versuchsflächen	21
3.4.1 Einzugsgebiet Großer Goldersbach, Pegel Bebenhausen (P 1) und Teileinzugsgebiete	21
3.4.2 Einzugsgebiet Kirnbach und Teileinzugsgebiete im Bärloch	23
3.4.3 Versuchsflächen	24
4. Messungen zur Erfassung des Wasser- und Stoffhaushalts	27
4.1 Meßtechnische Erfassung der Wasserhaushaltsgrößen	27
4.2 Hydrochemische und physikalische Untersuchungen	31
4.3 Meßstellennetz	31
4.4 Meßumfang	33
5. Wasserhaushalt	34
5.1 Niederschlag	34
5.2 Verdunstung	35
5.2.1 Potentielle (ET_{pot}) und reelle Evapotranspiration (ET_{reell})	35
5.2.2 Die aktuelle Evapotranspiration (ETA) in Waldbeständen	37
5.2.3 Die aktuelle Verdunstung (V_a) aus den Gebietswasserbilanzen	40
5.2.4 Vergleich der Ergebnisse verschiedener Methoden	41
5.3 Abfluß	44
5.3.1 Das Abflußverhalten während des Untersuchungszeitraums im Überblick	44
5.3.2 Abflußregulierende Faktoren in den Teilgebieten	47
5.4 Abflutrennung und Grundwasserneubildung - Bestimmung nach herkömmlichen Verfahren	53
5.4.1 Q_g - und Q_{on} -Höhen nach graphischem Separationsverfahren	53
5.4.2 Q_g -Bestimmung nach statistischem Verfahren	55
5.4.3 Grundwasserneubildung	55
5.5 Die Quellen	59
5.5.1 Exemplarische Darstellung des Schüttungsverhaltens und der Quellwasserzusammensetzung aus verschiedenen Abflußkomponenten	64
5.5.2 Die Quellwassertemperaturen	67
6. Stoffhaushalt	68
6.1 Chemische Charakterisierung der Wasserhaushaltskomponenten - Konzentrationen und Konzentrationsänderungen	68
6.1.1 Freiland- und Bestandesniederschlag	69
6.1.2 Bodenwasser	73
6.1.2.1 Die chemische Zusammensetzung des Bodenwassers bei verschiedenen Ausgangsbedingungen - Überblick	73
6.1.2.2 Mittlere Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe im Bodenwasser	74

	Seite
6.1.3 Grundwasser (Quellen)	81
6.1.3.1 pH-Werte und Stoffkonzentrationen	81
6.1.3.2 Sulfat- und Nitratgehalte im langjährigen Vergleich	86
6.1.4 Vorfluter	86
6.1.5 Übersicht der mittleren Stoff-Konzentrationen in Wässern aus verschiedenen Kompartimenten	93
6.2 Stoffeintrag	100
6.2.1 Der Stoffeintrag mit dem Freiland- und Bestandesniederschlag	100
6.2.1.1 Der Stoffeintrag mit dem Stammablauf	102
6.2.1.2 Der Stoffeintrag mit dem Streufall	102
6.2.2 Der Stoffeintrag in Teileinzugsgebiete des Schönbuchs	102
6.3 Stoffaustrag aus Teileinzugsgebieten des Schönbuchs	103
6.4 Stoffumsatz und -bilanz für Teileinzugsgebiete des Schönbuchs	108
7. Charakterisierung der Wasserhaushaltskomponenten und spezielle Analyse der Abflußbildung durch Sauerstoff-18 ($\delta^{18}\text{O}$)	114
7.1 $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Niederschlag	114
7.2 $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Sickerwasser und Interflow	114
7.3 Sickergeschwindigkeit und Grundwasserneubildung aus Sauerstoffisotopen-Messungen	116
7.3.1 Abschätzung der mittleren Verweilzeit des Sickerwassers	117
7.3.1.1 Gebiet S 1 Schlagbaumlinde	117
7.3.1.2 Gebiet S 2 Bärloch	120
7.3.1.3 Gebiet S 3 Obere Lange Klinge	120
7.3.1.4 Gebiet S 4 Denzenberg	124
7.3.2 Abschätzung der Grundwasserneubildung	124
7.4 $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Abfluß	126
7.4.1 Änderungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Basisabfluß der Vorfluter und Quellen	126
7.4.2 Änderungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Gesamtabfluß der Vorfluter	130
8. Spezielle Untersuchungen zur Abflußbildung und zum Stoffaustrag mit dem Interflow	134
8.1 Die Niederschlag-Abfluß-Situation während des Untersuchungszeitraums im Einzugsgebiet Denzenberg	134
8.2 Quantitative Erfassung des Interflow und seine Bildungsbedingungen - Testfläche Denzenberg	136
8.2.1 Das Interflow-Verhalten im jahreszeitlichen Verlauf	137
8.2.1.1 Monatssummen von Interflow und Bestandesniederschlag	137
8.2.1.2 Monatssummen von Interflow und Gesamtabfluß	138
8.2.1.3 Bestandesniederschlag und Interflow einzelner Niederschlag-Abfluß-Ereignisse	138
8.2.1.4 Jahresgang der Saugspannung und des Wassergehalts im Deckschutt und deren Bedeutung für die Interflow-Bildung	140
8.2.1.5 Beziehung zwischen der Interflow-Menge von Niederschlag-Abfluß-Ereignissen und der Wasserspannung im Deckschutt	143
8.3 Hydraulisches Verhalten des Deckschutts in Bezug auf die Interflow-Bildung	144
8.4 Analyse der Abflußbildung mit Interflow durch $\delta^{18}\text{O}$	149
8.4.1 $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien der verschiedenen Abflußkomponenten im Überblick	149
8.4.2 Zusammensetzung des Interflow und Interflow-Anteil am Gesamtabfluß	151
8.4.2.1 Zusammensetzung des Interflow im jahreszeitlichen Verlauf - Ergebnisse der Versuchsfläche Denzenberg	151
8.4.2.2 Auswirkungen des Interflow auf den Gesamtabfluß am Pegel 14 im jahreszeitlichen Verlauf	153
8.4.2.3 Interflow-Anteil am Gesamtabfluß beim Pegel 14 im Frühjahr 1985 und 1986	154
8.4.3 Interflow aus Testflächenergebnissen und Separationsberechnungen (Einzugsgebiet Denzenberg)	155
8.4.3.1 Direkte Interflow-Messungen und Separationsberechnungen mit Sauerstoff-18	155

	Seite
8.4.3.2 Beziehung zwischen Interflow, Bestandesniederschlag und Gesamtabfluß	156
8.4.3.3 Konsequenzen der Interflow-Berechnungen für den Grundwasserabfluß und die Grundwasserneubildung	158
8.5 Separation des Gesamtabflusses in drei Abflußkomponenten für verschiedene Hochwasser-Ereignisse in unterschiedlichen Einzugsgebieten	159
8.5.1 Die Methode der 3-Komponenten-Separation	159
8.5.2 Hochwasser-Ereignisse im Einzugsgebiet Denzenberg ("Sandgebiet") bei unterschiedlichen Ausgangsbedingungen	161
8.5.2.1 Hochwasserereignis vom 30. Januar - 05. Februar 1985	161
8.5.2.2 Hochwasserereignis vom 07. - 09. Mai 1985	166
8.5.2.3 Hochwasserereignis vom 26. August 1985	169
8.5.2.4 Hochwasserereignis vom 08. November 1985	173
8.5.2.5 Hochwasserereignis vom 05. - 11. März 1986	176
8.5.2.6 Hochwasserereignis vom 03. - 07. April 1986	178
8.5.3 Vergleich "Sandgebiet - Tongebiet"	179
8.5.3.1 Hochwasserereignis vom 07. - 09. Mai 1985	180
8.5.3.2 Hochwasserereignis vom 04. - 11. März 1986	182
8.5.3.3 Hochwasserereignis vom 03. - 07. April 1986	183
8.5.4 3-Komponenten-Separationen im Großen Goldersbach ("Mischgebiet") und Vergleich mit Teileinzugsgebieten	184
8.5.4.1 Hochwasserereignis vom 07. - 09. Mai 1985	184
8.5.4.2 Hochwasserereignis vom 04. - 11. März 1986	187
8.5.4.3 Hochwasserereignis vom 03. - 07. April 1986	188
8.5.5 Abflußverhalten und 3-Komponenten-Separationen im Großen Goldersbach und Kirnbach bei extremen Hochwassersituationen	189
8.5.5.1 Hochwasserereignis vom 17. - 18. Mai 1985 im Einzugsgebiet Großer Goldersbach (P 1)	190
8.5.5.2 Hochwasserereignis vom 17. - 18. Mai 1985 im Einzugsgebiet Kirnbach (P 5/1)	192
8.6 Separation des Stoffaustrages in die Abflußkomponenten Interflow und Grundwasser	194
8.7 Schlußfolgerungen und Prognosen aus den Ergebnissen der Ganglinien-Separationen	197
8.7.1 Typkurven für Ganglinien-Separationen von Hochwasserereignissen	197
8.7.2 Interflowhöhen in Abhängigkeit von verschiedenen abflußbestimmenden Faktoren	199
9. Zusammenfassung	204

Literaturverzeichnis

Anhang

1. Einleitung und Zielsetzung

Das Niederschlag-Abflußgeschehen und die Entstehung von Spitzenabflüssen sowie die Grundwasserneubildung stehen im zentralen Bereich hydrologischer und hydrogeologischer Fragestellungen. Eine genaue Kenntnis dieser Größen und deren zeitliche Variabilität erlaubt wichtige wasserwirtschaftliche Vorhersagen über das Auftreten von Hochwässern und Grundwasserneubildungsraten bzw. Vorratsänderungen im Aquifer und bildet die Voraussetzung für Bilanzbetrachtungen.

Bilanzierungen des Wasser- und Stoffumsatzes sowie die Untersuchung der Stoffverteilung auf wurzelfernere und wurzelnähere Bereiche stellen die wesentliche Grundlage für das Verständnis und die Beurteilung der Auswirkungen atmosphärischer Stoffe auf Böden, Pflanzen und Gewässer dar.

Für beide Themenkomplexe ist eine Klärung des Abflußmechanismus und der stofflichen Zusammensetzung der Abflußkomponenten erforderlich, um Aufschluß darüber zu erhalten, zu welcher Zeit und auf welchen Fließpfaden sich chemisch unterschiedlich zusammengesetzte Wasser im Abflußsystem bewegen bzw. zum Vorfluter gelangen.

Die ungesättigte Zone übt im Wasser- und Stoffhaushalt eine Regelfunktion für den gesamten Abfluß und den Stoffumsatz aus. Sie stellt den Wasserspeicher für die Verdunstung dar. Über ihre Fähigkeit, Wasser aufzunehmen und abzugeben wirken die Deckschichten als Puffer für die Abflußbildung.

In der Pedosphäre findet ein wichtiger Teil des Stoffumsatzes statt. Über das Sickerwasser werden Stoffe eingetragen und sowohl an die Biosphäre als auch an das Grund- und Oberflächenwasser abgegeben.

Die Ausbildung der Deckschichten ist zusammen mit anderen Faktoren entscheidend dafür, wieviel Niederschlagswasser zur Grundwasserneubildung beiträgt oder oberflächennah als Zwischenabfluß oder Interflow abfließt. In mehrschichtigen Böden mit unterschiedlichen hydraulischen Leitfähigkeiten, die für das Keuperbergland typisch und dort weitverbreitet sind, kommt dem Interflow eine wichtige Rolle beim Abflußgeschehen zu.

Gemäß der 1994 neugefaßten DIN 4049-3 Nr. 2.2.25 wird der Zwischenabfluß oder Interflow wie folgt definiert: Teil des Abflusses, der dem Vorfluter als Reaktion auf ein auslösendes Ereignis (Niederschlag oder Schneeschmelze) aus den oberflächennahen Bodenschichten zugeflossen ist. Der Zwischenabfluß ist gegenüber dem Oberflächenabfluß zeitlich verzögert.

Bei Auftreten von Interflow gelangt versickerndes Niederschlagswasser nicht oder nicht vollständig zum Grundwasserleiter, sondern fließt (teilweise) hangparallel im Boden ab. Deshalb ist die Kenntnis der Bildungsbedingungen und Abflußmengen des Interflow, und damit der Zusammensetzung des Gesamtabflusses aus verschiedenen Teilkomponenten, nicht nur für die Beschreibung und Vorhersage von möglichen Hochwassersituationen von Bedeutung. Auch für eine der zentralen Fragen hydrogeologischer Untersuchungen, die Höhe der Grundwasserneubildung, ist sie von besonderem Interesse, da bei Bodenwasserbilanzberechnungen die effektive Grundwasserneubildung bei aktivem Interflow überschätzt wird.

Dies betrifft auch den Stoffhaushalt und -umsatz insofern, als mit dem Interflow eine bestimmte Stoffmenge der vornehmlich aus dem atmosphärischen Eintrag stammenden Elemente mehr oder weniger rasch aus dem Boden ausgeschwemmt oder direkt lateral zur Vorflut transportiert werden kann, ohne den Grundwasserleiter (langsame Fließkomponente) zu erreichen.

Untersuchungen zur Abflußbildung mit Separationen des Gesamtabflusses in verschiedene Teilkomponenten sowie Bilanzierungen des Wasser- und Stoffhaushaltes, die in jüngerer Zeit bei der Ökosystemforschung, insbesondere im Zusammenhang mit dem Waldsterben, durchgeführt wurden, sind aus zahlreichen Untersuchungen bekannt. Häufig wurden dabei hydrologische und hydrochemische Fragestellungen getrennt betrachtet.

Im Rahmen des landschaftsökologischen Forschungsprojektes "Naturpark Schönbuch" (EINSELE, 1986) wurde im Zeitraum von 1978 bis 1982 ein größeres zusammenhängendes Waldgebiet interdisziplinär untersucht. Das Gebiet, in dem auch die Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden, stellt einen Teil des Keuper-Berglandes mit benachbarten Lias-Hochflächen dar und repräsentiert damit in geologisch-morphologischer Sicht einen in Süddeutschland weit verbreiteten Landschaftstyp (Abb. 1-1). Auch Höhenlage und Klima sind für weite Teile unseres Landes typisch.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen des Schönbuchprojektes lag auf geowissenschaftlichen und hydrologischen Untersuchungen. Stoffflüsse zwischen verschiedenen Kompartimenten (Atmosphäre, Biosphäre, Pedosphäre etc.) in wässriger Lösung fanden dabei besondere Berücksichtigung. Aus dem sehr umfangreichen Untersuchungsprogramm konnten wesentliche Basisdaten zur Beschreibung des Zustands und der Vorgänge in ei-

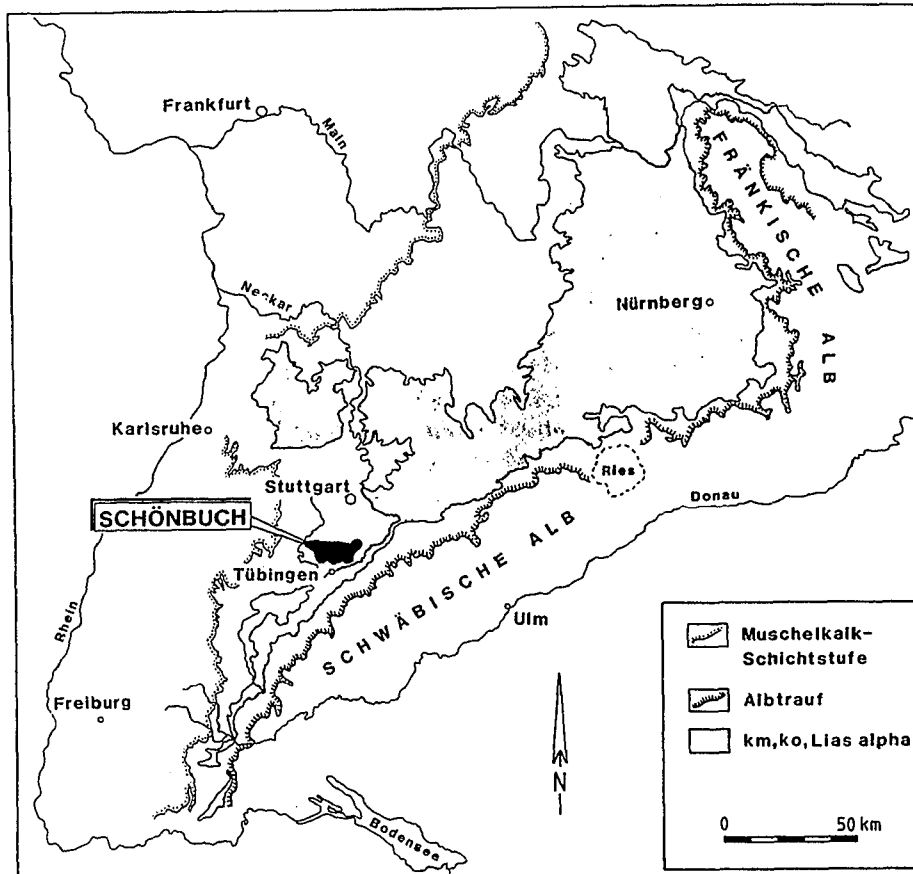


Abb. 1-1: Lage des Naturparks Schönbuch im süddeutschen Stufenland (aus EINSELE und AGSTER, 1986).

nem naturnahen Ökosystem gewonnen werden. Um gewisse Trends und Prognosen im Hinblick auf eine langsame Veränderung des Systems aufzuzeigen, hat sich jedoch die vierjährige Untersuchungszeit, abgesehen von wenigen Hinweisen, als nicht ausreichend erwiesen.

Die Sulfat- und Nitratausträge mit der Vorflut lagen im Mittel deutlich unter den jeweiligen Einträgen durch den Bestandesniederschlag. In jungen Quellwässern mit relativ kurzen mittleren Verweilzeiten wurden steigende mittlere Nitratgehalte und nur geringfügig ansteigende Sulfatkonzentrationen gemessen. In Bachwässern war bei Abflüßerhöhungen ein Ansteigen der Nitrat-, Sulfat und teilweise auch der Kaliumkonzentrationen nachzuweisen.

Teilvorhaben des Schönbuchprojektes, wie z.B. die Untersuchungen zum Wasserhaushalt und zum Ein- und Austrag sowie Umsatz gelöster Stoffe (AGSTER, 1986a und 1986b) umfaßten ganze Kompartimente und betrachteten die Pedosphäre z.T. als "Black Box". Zum internen Stoffkreislauf in der Pedosphäre wurden nur am Rande Daten erhoben.

Spezielle Teilvorhaben, wie Versuche mit künstlicher Beregnung (SCHWARZ, 1986), Abflüßgagliensseparationen mit Hilfe stabiler Isotopen und elektrischer Leitfähigkeit als Tracer (KÖRNER et al., 1986) sowie die von EINSELE et al. (1986b) durchgeführte Studie zu Niederschlag - Bodenwasser - Abflüßbeziehungen bei Hochwasserereignissen, erbrachten grundsätzliche Erkenntnisse über die hangparallele Wasserbewegung im Boden und ihre wichtige Rolle beim Abflüßgeschehen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollten längerfristige Tendenzen bzgl. des Ein- und Austrages und möglicher Speicherungs- und Auswaschungseffekte aufgezeigt werden. Dazu wurden weiterführende Untersuchungen zum Umsatz der atmosphärischen Schadstoffe, verbunden mit einer Fortsetzung der Bilanzierung der übrigen Hauptinhaltsstoffe des Wassers durchgeführt. Ferner wurde die Konzentrationsentwicklung der Hauptelemente vom Niederschlag bis zum Vorfluterabflüß bei der Passage durch Bestand, Böden, Deckschichten und Aquifer untersucht. Besonders in Bachwässern wurden auch die Konzentrationsänderungen bei Hochwasserereignissen betrachtet.

Diese Untersuchungen schließen eine Quantifizierung des Wasserhaushalts ein und knüpfen für ausgewählte Teilgebiete an die Arbeiten von AGSTER (1986), AGSTER und EINSELE (1986) sowie BÜCKING et al. (1986) an.

Um der wichtigen Rolle des Interflow Rechnung zu tragen, sollten in der vorliegenden Arbeit die Hydrogeologie und der Stoffumsatz des "Untersystems Interflow" räumlich, zeitlich, qualitativ und quantitativ erfaßt werden. Teilaspekte der unter Feldbedingungen durchgeführten Untersuchungen umfassen dabei Fragestellungen nach den klimatischen Voraussetzungen (d.h. Niederschlagshöhe und Bodenfeuchte), unter denen Interflow auftritt, nach dem Anteil der Interflow-Menge am Gesamtabfluß und der chemischen Zusammensetzung des Interflow.

Um die Interflow-Menge am Gesamtabfluß zu quantifizieren, reichen herkömmliche Zwei-Komponenten-Separationen nicht aus. Sie unterschei-

den nur zwischen Vor-Ereignis- und Ereigniswasser und beschreiben ein Abflußsystem mit Interflow nur unzureichend.

Wenn neben Grundwasser auch mobilisiertes Bodenwasser zum Abfluß kommt, sind mit dem aktuellen Niederschlagswasser vereinfachend 3 Komponenten zu trennen:

- 1.) Ereignis-(event)-Wasser aus aktuellem Niederschlagswasser oder Schmelzwasser,
- 2.) Älteres Vor-Ereignis-(pre-event)-Wasser aus Grundwasser
- 3.) Jüngerer Vor-Ereignis-(pre-event)-Bodenwasser.

Als Methoden zur Separation des Gesamtabflusses in diese drei modellhaft angenommenen Abflußkomponenten können direkte Mengenmessungen sowie hydrochemische und isotochemische Untersuchungen (Sauerstoff-18-Isotopengehalt als natürlicher Tracer) eingesetzt werden.

2. Einführung in die Themenbereiche Abflußbildung, Komponentenseparation und Stoffumsatz mit Interflow

Die anstehenden geologischen Schichten werden im Untersuchungsgebiet fast überall von periglazial entstandenen, tonig-sandig-steinreichen Deckschichten überlagert, die an den Hängen 1 - 2 m Mächtigkeit erreichen. Es herrschen zweischichtige Profile der Hangböden aus meist gut durchlässigem, grobkörnigem, 0,3 - 0,6 m mächtigem lößhaltigem Deckschutt über feinkörnigem und lößfreiem Basisschutt vor. Der starke Unterschied der hydraulischen Leitfähigkeiten in diesen Schuttdecken begünstigt einen oberflächennahen Hangwasserzug oder Interflow. Boden- und Deckschichtenuntersuchungen und -kartierungen liegen von MÜLLER und LANGBEIN (1986), BIBUS (1986) sowie ELGNER et al. (1986) vor. Eine genauere Beschreibung der Untersuchungsgebiete und Bodenprofile folgt in Kap. 3.

Die Bedeutung des Interflow für das Abflußgeschehen im Schönbuch geht i.w. aus folgenden Untersuchungen hervor:

- a) Versuche mit künstlicher Beregnung und Interflow-Beobachtung (SCHWARZ, 1983 und 1986),
- b) Trennung verschiedener Abflußkomponenten bei Hochwasserereignissen mit stabilen Isotopen und elektrischer Leitfähigkeit als Tracer (KÖRNER, 1983 und KÖRNER et al., 1986),
- c) Untersuchungen über Bodenwasserhaushalt und Abflußbildung (FLECK, 1986 und 1987),
- d) Studie zu Niederschlag-Bodenwasser-Abflußbeziehungen bei Hochwasserereignissen (EINSELE et al., 1986b), einer auf der Basis zahlreicher Daten verschiedener Teiluntersuchungen durchgeführten Arbeit.

Noch weitgehend offen blieben die Fragen nach der als Interflow abfließenden Wassermenge, ihrer Zusammensetzung aus frischem oder älterem Niederschlagswasser, den chemischen Inhaltsstoffen und den Interflow-Anteilen am Gesamtabfluß im jahreszeitlichen Verlauf.

Die über die Teilkomponente Interflow transportierte Wassermenge und Lösungsfracht wurde bei Bilanzierungen des Wasser- und Stoffhaushalts im Schönbuch (AGSTER, 1986b) bisher nicht getrennt untersucht. Da bei wirksamem Interflow das in den Boden eindringende Sickerwasser nach Abzug der Transpiration nicht vollständig als Grundwasserneubildung zur Verfügung steht und Speicherungs- und Ausschwemmungsvorgänge in der Pedosphäre auch über den Interflow reguliert werden, ist eine getrennte quantitative und chemische Betrachtung des Interflow von besonderer Bedeutung.

2.1 Frühere Untersuchungen zur Interflow-Bildung und Diskussion der Ergebnisse

Gemäß Untersuchungen zum Abflußverhalten von Waldböden bei künstlicher Beregnung (SCHWARZ, 1986) wird damit gerechnet, daß Hochwasserabflüsse in erster Linie durch Zwischenabfluß (Interflow) verursacht werden. Überlandabfluß ist nur in seltenen Ausnahmefällen (wie z.B. bei einem hundertjährigen Hochwasser im Mai 1978, EINSELE et al., 1986b) bei wassergesättigten Böden möglich, wenn die Niederschlagsrate die minimale Infiltrationsrate (Infiltrationsrate bei Wassersättigung, DIN 4047) eines Bodens übersteigt.

Ein Beregnungsversuch wurde im Herbst auf einem trockenen Boden (Braunerde-Pelosol über dicht gelagertem, unverwittertem Knollenmergel) durchgeführt. Dabei wurde Interflow in Trockenrissen beobachtet, ohne daß eine wesentliche Durchfeuchtung der Bodenmatrix zustande kam. Es hatte sich keine den Boden gleichmäßig durchfeuchtende Sickerwasserfront ausgebildet. Die mit einer Intensität von 100 mm/h als künstlicher Regen niedergegangene Wassermenge floß gemäß einer groben Abschätzung nahezu vollständig als Interflow ab.

Ein zweiter Versuch im darauffolgenden feuchteren Frühjahr zeigte bei fehlenden Trockenrissen einen Interflow in schmalere Gefügekluft. Dabei wurde eine geringere Durchflußmenge (höherer Fließwiderstand) und eine im Vergleich zum Versuch im trockenen Herbst um 20% höhere Bodenfeuchtezunahme in den obersten 30 cm des Profils registriert. SCHWARZ sieht die Ursache für die Erhöhung des Bodenwassergehaltes in der längeren Verweilzeit des Sickerwassers im Oberboden.

Zu den Versuchen, die im Herbst bei trockenem Boden durchgeführt wurden, ist folgendes kritisch anzumerken. Natürliche Regenfälle fallen mit wesentlich geringeren Intensitäten als 100 mm/h. Unter diesen (natürlichen) Bedingungen haben auch ausgetrocknete Böden mit Schrumpfrissen mehr oder weniger Zeit zur Wasseraufnahme, so daß nur ein gewisser, vermutlich kleiner Teil der eingetragenen Niederschlagsmenge als Interflow abfließen wird.

Im Rahmen dieser Arbeit sollten deshalb Untersuchungsmethoden entwickelt werden, mit denen unter natürlichen Bedingungen die tatsächliche Interflow-Menge bei verschiedenen klimatischen Ausgangssituationen im jahreszeitlichen Verlauf ermittelt werden kann.

Um einen möglichen Anteil von verdrängtem, älterem Niederschlagswasser im Interflow zu ermitteln, führte SCHWARZ einen Tracerversuch

mit NaCl im feuchten Frühjahr (April 1981) durch. Er ergab, daß der Interflow überwiegend aus Beregnungswasser, d.h. aktuellem Niederschlag bestand.

In früheren eigenen Untersuchungen (KÖRNER, 1983 und KÖRNER et al., 1986) wurde Interflow unter natürlichen klimatischen Bedingungen in Aufgrabungen beobachtet und beprobt. Die mit Hilfe von natürlichen Tracern durchgeführten Untersuchungen ergaben, daß Interflow auch schon bei Ereignissen mit geringen Niederschlagshöhen und Bodenwassergehalten von nur 25% der nutzbaren Feldkapazität (z.B. N-Q-Ereignis "C" im Oktober 1981, 12,8 mm Niederschlagshöhe im Waldbestand) auftritt und aus älterem Bodenwasser oder einer unterschiedlich zusammengesetzten Mischung der Komponenten "älteres Bodenwasser" und "aktuelles Niederschlagswasser" bestehen kann. Die Beteiligung von unterschiedlich zusammengesetztem Interflow am Gesamtabfluß konnte durch die parallele Anwendung zweier Separationsverfahren (Sauerstoff-18 und elektrische Leitfähigkeit) herausgearbeitet werden (vgl. Kap. 2.2).

Für Untersuchungen der Interflow-Zusammensetzung und für Separationsverfahren zur Ermittlung des Interflow-Anteils am Gesamtabfluß war eine Weiterführung der Tracermethoden mit Sauerstoff-18 und eine Analyse der natürlichen chemischen Inhaltsstoffe mehr erfolgsversprechend als eine Markierung mit Salz. Salze (insbesondere NaCl, das in höheren Konzentrationen Gefügeänderungen herbeiführt) werden von BLUME et al. (1966) für Markierungszwecke im Boden als wenig geeignet angesehen, da sie aus dem Absorptionswasserbereich verdrängt werden ("negative Sorption") und der Sickerwasserfront vorseilen. SCHWARZ hat mit seinem Markierungsversuch eine deutliche Abnahme der Na-Konzentration festgestellt, die er mit der Adsorption an den organischen und mineralischen Bodenbestandteilen erklärt.

FLÜGEL (1979) führte im Untersuchungsgebiet "Hollmuth" bei Heidelberg (Buntsandsteinrücken mit lehmigem Solifluktionmaterial, Lößlehm mit eingelagertem Buntsandsteinschutt) ein umfangreiches Untersuchungsprogramm zum Problem des Interflow mit direkten Messungen und Berechnungen durch. Diese Arbeit liefert wertvolle Beiträge für Untersuchungen des Wasserhaushalts und die ihn steuernden Parameter. Die Frage der Grundwasserneubildung durch Interflow stellt dabei das zentrale Thema dar. Interflow wird als die Wassermenge definiert, die sich im Substrat geneigter Flächen auf einer wasserstauenden Schicht überwiegend oberflächenparallel zum Grundwasserkörper oder direkt zum Vorfluter bewegt.

FLÜGEL fand u.a. Zusammenhänge zwischen Bodenfeuchte und dem Auftreten von Interflow.

Unter einem Grenzwert für die Bodenfeuchte des gesamten Substrates von 30 - 35 Vol-% kann der Boden hydromechanisch kein Niederschlagswasser an das Grundwasser weiterleiten. Während der Untersuchungsperiode stand im Mittel zwischen Mai und Oktober kein Bodenwasser für eine Grundwassererneuerung zur Verfügung. Die eigentliche Grundwasserneubildung fand zwischen November und Februar statt. In diesem Zeitraum trat Interflow auf, der direkt im Feld gemessen werden konnte. Neben der direkten Messung in Auffangwannen wurden als zweite Methode zur Bestimmung des Interflow kontinuierliche Messungen der Bodenfeuchte im Gelände und der Durchlässigkeitsbeiwerte im Labor durchgeführt. Daraus konnten Interflow-Mengen zunächst für das Versuchsfeld und anschließend auf das Einzugsgebiet hochgerechnet werden. Nach der für das untersuchte Einzugsgebiet aufgestellten Grundwasserbilanz stellte der Interflow 29,3% der gesamten Grundwasserneubildung. (In der Arbeit von FLÜGEL wird Interflow als zunächst hangparallele, später aber den Grundwasserleiter erreichende Wasserbewegung verstanden.) Der restliche Teil (ca. 70%) der Grundwasserneubildung gelangt nicht über den Interflow, sondern vermutlich über eine vertikale Sickerwasserbewegung zum Grundwasserleiter.

FLÜGEL definiert den Interflow zusammen mit dem Grundwasserabfluß als Teilkomponenten des Basisabflusses. Noch offen blieben bei FLÜGEL die Fragen nach der Höhe des als Direktabfluß (nicht über den Grundwasserleiter) zum Vorfluter strömenden Zwischenabflusses (Definition des Interflow gemäß INTERNATIONAL GLOSSARY OF HYDROGEOLOGY, 1969) sowie nach der Entwicklung der Interflow-Menge als Teil des Gesamtabflusses während Hochwasserereignissen.

EINSELE et al. (1986b) entwickelten auf der Basis von Ergebnissen der im Rahmen des Schönbuchprojektes durchgeführten Teiluntersuchungen über Deckschichten und Böden (MÜLLER und LANGBEIN, 1986; BIBUS, 1986 und LANGBEIN et al., 1986) und den erwähnten Arbeiten zur Abflußbildung von FLECK (1989), SCHWARZ (1986) und KÖRNER et al. (1986) ein Gedankenmodell über die vertikalen und lateralen Fließvorgänge in mehrschichtigen Bodenprofilen unter Berücksichtigung verschiedener Ausgangswassergehalte (vgl. Abb. A-2-1 im Anhang). In den im Schönbuch weit verbreiteten zweischichtigen Böden aus gut durchlässigem Deckschutt über tonreichem Basisschutt nehmen die hydraulischen Leitfähigkeiten sprunghaft von oben nach unten ab. Bei Infiltrationsraten (I_p) von mindestens 52 - 79 mm/h (SCHWARZ, 1986),

können selbst die intensivsten Niederschläge (bekannter Höchstwert aus dem Mai 1978: 38 mm/h) in den Waldboden eindringen, so daß Oberflächenabfluß (Q_o) allgemein nur dann zu erwarten ist, wenn der Deckschutt volle Wassersättigung erreicht hat.

Da die Durchsickerrate (I_d) von Deck- zu Basisschutt infolge der stark verminderten hydraulischen Leitfähigkeit wesentlich kleiner ist als I_b , besteht die Möglichkeit, daß es zu einer vollständigen Sättigung des Deckschutts kommt. Dies kann auf schwach geneigten Flächen zu einer häufig zu beobachtenden Staunässe führen. Wegen der noch geringeren Durchsickerrate am Übergang von Basisschutt zu anstehendem Gestein wird mit einem ähnlichen Vorgang auch an der Basis der Deckschichten gerechnet.

Nennenswerter lateraler Abfluß ist erst dann zu erwarten, wenn die wasserleitende Schicht wassergesättigt oder nur gering untersättigt ist. Aber auch schon vor einer Wassersättigung der gesamten Deckschichten bzw. des Deckschutts kann ein oberflächennaher Abfluß (Q_n) oder Interflow in Grobporen oder anderen wasserwegsam Bahnen wie z.B. in Klüften, Wurzelröhren oder Grabgängen beginnen, wenn sich ein Wasserstau an der Grenze zwischen Deckschutt und Basisschutt aufbaut (vgl. KIRKBY, 1978; BONELL et al., 1984). Die beiden Abflußanteile Q_o und Q_n wurden als Direktabfluß Q_d zusammengefaßt.

Als weitere Abflußanteile beschreibt EINSELE einen möglichen, wesentlich langsamer dem Vorfluter zuströmenden, tieferen Deckschichtenabfluß Q_i , der sich analog zu Q_n , jedoch an der Grenze zwischen Basisschutt und Festgestein bilden kann, sowie einen durch den Übergang von Sickerwasser in den Aquifer I_b hervorgerufenen verstärkten Grundwasserabfluß Q_g (EINSELE 1970; FLÜGEL 1981).

Die oben zitierten Bezeichnungen Q_i und Q_d entsprechen in ihrer Bedeutung nicht den bei Abflußseparationen (z.B. STICHLER und HERRMANN, 1984 oder KÖRNER, 1986) verwendeten gleichlautenden Abkürzungen. Dort stehen Q_i für den indirekten Abfluß aus Vor-Ereigniswasser (i.d.R. Basisabfluß) und Q_d für den direkten Abfluß aus Ereigniswasser (Niederschlags- oder Schmelzwasser). Demnach werden bei herkömmlichen Ganglinienseparationen diese beiden Komponenten des Gesamtabflusses durch ihr relatives Alter, nicht aber durch den unterschiedlichen Fließpfad zum Vorfluter unterschieden. So kann z.B. im Boden vorübergehend gespeichertes "pre-event" Wasser über den Interflow auch als (im oben genannten Sinne) Q_d zum Vorfluter gelangen (vgl. Kap. 2.3).

Bei der Auswertung aller im Zeitraum zwi-

schen 1975 und 1983 mittleren bis starken Niederschlag-Abfluß-Ereignisse konnte EINSELE (1986b) für das Untersuchungsgebiet Schönbuch Niederschlagsereignisse mit und ohne Abflußwirksamkeit für verschiedene Gebiete mit vorherrschend sandigen, tonigen oder sandig-tonigen Böden in Abhängigkeit von den Ausgangs-Bodenwassergehalten unterscheiden. In Gebieten mit "gemischten Böden" wurden, ausgehend von der Feldkapazität, im Durchschnitt 10 - 30 mm (Ereignis-)Niederschlag benötigt, um oberflächennahen Abfluß Q_n durch Teilsättigung des grobporenen Deckschutts auszulösen.

Bei diesen sehr umfangreichen Auswertungen wurden die beiden Abflußanteile Basisabfluß Q_g und Direktabfluß Q_d , einschließlich des kurzfristigen Interflow, mit Hilfe der Abflußganglinien durch ein graphisches Verfahren (vgl. HEWLETT und HIBBERT, 1967) getrennt. Daraus ergab sich der Bedarf für genauere, über den bisherigen Kenntnisstand hinausgehende Komponentenseparationen mit einer quantitativen Erfassung des oberflächennahen Abflusses (Interflow) mit denen die von EINSELE aufgezeigten Zusammenhänge zwischen Niederschlag, Abfluß und Bodenwasser weiter vertieft werden sollten.

FLECK (1989) konnte im sehr nassen Frühjahr 1983 mittels Messungen der Höhe des freien Stauwasserspiegels in Gruben Beobachtungen über das Leerlaufverhalten eines Interflow-Bodenwasserspeichers machen. Nach einer vollständigen Aufsättigung des Bodens wurde das Stauwasser wegen der geringen Geländeneigung (mit 3° geneigte Stubensandstein-Verebnung, Testfläche Schlagbaumlinde, S 1) nur langsam als Interflow abgeführt. Eine Tiefensickerung konnte aufgrund der lokalen Verhältnisse im Testgebiet ausgeschlossen werden.

Nach RICHARD (1978) läßt sich die Wassersickerung aus dem gesättigten Teil eines Hangbodens nach der Darcy-Gleichung berechnen. Die Entleerung des Interflow-Speichers (Abnahme der Höhe der gesättigten Bodenschicht) kann mit einer Gleichung beschrieben werden, die der von MAILLET (1905) für das Leerlaufen eines homogenen Aquifers entspricht. Aus der Mächtigkeit der gesättigten Schicht konnte FLECK einen Leerlaufkoeffizienten für den Hangwasserspeicher mit $\alpha = 0,084 \text{ d}^{-1}$ bestimmen. Aus der Steigung des diesem Speicher zuzuordnenden Abschnittes der Abflußganglinie am Vorfluter leitete sich ein entsprechender Wert ab ($\alpha = 0,073 \text{ d}^{-1}$). Die Auswertung weiterer Hochwasserwellen ergab mit $\alpha = 0,079 \text{ d}^{-1}$ einen ähnlichen Durchschnittswert.

Die Abflußganglinie dieses sich langsam entleerenden Hangwasserspeichers (Speicher B) wurde von dem Abfluß eines kurzfristig wirkenden,

sehr steile Abflußspitzen bildenden zweiten Interflow-Speichers (Speicher A) überlagert, der in dem untersuchten Gebiet den steileren Einzugsgebietsteilen (Knollenmergelhänge mit durchschnittlich 10 - 15° Neigung) zugeschrieben wurde.

FLECK stellt auch erste Ergebnisse einer gemeinsam konzipierten und im Einzugsgebiet Denzenberg gebauten Meßeinrichtung zur direkten Erfassung des Interflow vor. Auch dort konnten zwei Interflow-Speicher mit unterschiedlichen Speichereigenschaften unterschieden werden, die sich auch in der Ganglinie des Gesamtabflusses bei Hochwasserwellen abbildeten.

In den genannten Arbeiten wird die wichtige Rolle des Interflow für die Abflußbildung herausgestellt. Die in den mehrschichtigen Bodenprofilen des Schönbuchs möglichen Fließvorgänge werden insbesondere von EINSELE (1986b) erläutert. Sie bildeten eine Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen. Dabei sollten, über die bisherigen Gedankenmodelle und Mengenabschätzungen hinausgehende Untersuchungen zum Interflow-Verhalten und zur Interflow-Menge durchgeführt werden.

2.2 Frühere Ganglinienseparationen - Methodik sowie Problematik beim Auftreten von Interflow

Der am Vorfluter gemessene Gesamtabfluß Q wird für Bilanzrechnungen üblicherweise in zwei Abflußanteile, den grundwasserbürtigen Abflußanteil Q_g und den Oberflächen- bzw. oberflächennahen Abfluß Q_o unterteilt. Dafür wurden im Rahmen des Schönbuch-Projektes neben dem rein statistischen MoMNQ-Verfahren nach WUNDT (1958) auch ein graphisches Verfahren unter Berücksichtigung von abflußabhängigen Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit (Lf) im Vorfluter und Schüttungsschwankungen von Quellen (EINSELE und SCHULZ, 1973; RICHTER und LILICH, 1975) angewendet.

Spezielle Untersuchungen zur Trennung von Abflußkomponenten wurden im Schönbuch bisher bei mehreren mittelstarken N-Q-Ereignissen in ausgewählten Teilgebieten von KÖRNER et al. (1986) durchgeführt. Mit Hilfe von Lf-Messungen des im Vorfluter abfließenden Wassers konnte der Gesamtabfluß in die Komponenten niedrig mineralisierter Direktabfluß (Q_d) und höher mineralisierter indirekter Abfluß (Q_i , Basisabfluß bzw. Grundwasser) getrennt werden. In Kombination mit dieser Methode wurde ein zweites analytisches Verfahren zur Ganglinienseparation mit dem $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnis (untergeordnet auch D/H)

als natürlichem Tracer eingesetzt. Auch hier erfolgte eine Trennung zwischen den beiden Abflußkomponenten Q_d und Q_i , die bei dieser Methode jedoch anders als bei der Lf-Methode zu definieren sind. Unter bestimmten Voraussetzungen lassen sich damit die Anteile des "Ereigniswassers" aus aktuellem Niederschlagswasser und des "Vor-Ereigniswassers" aus älterem, schon im Untergrund vorhandenen Wasser (wofür üblicherweise der Isotopengehalt des Grundwassers bzw. des Basisabflusses herangezogen wird), im Gesamtabfluß trennen.

Folgende Prinzipskizze (Abb. 2-1) zeigt mögliche Ergebnisse verschiedener Verfahren zur Ganglinienseparation auf Ereignisbasis. Die mit $Q_i(\text{graph})$ markierten Ganglinien sind das Resultat der im ersten Absatz angeprochenen synthetischen $Q_o - Q_g$ -Unterteilung.

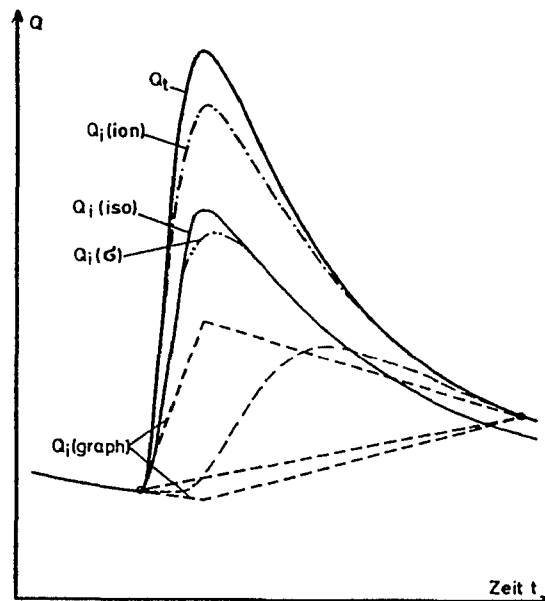


Abb. 2-1: Schematische Darstellung von indirekten Abflußkomponenten (Q_i) als Teile des Gesamtabflusses einer Hochwasserganglinie (Q_t), abgeleitet aus synthetischen (graph), isotopischen (iso) und chemischen (ion: Ionen, chemische Verbindungen; σ : elektrische Leitfähigkeit) Separationsansätzen. Aus HERRMANN & STICHLER (1983).

Ganglinienseparationen in zwei Komponenten mit Hilfe stabiler Umweltisotope werden seit über 20 Jahren angewendet. Stellvertretend für andere seien die Arbeiten von DINCER et al. (1970), MARTINEC et al. (1974), FRITZ et al. (1976), SKLASH et al. (1976), BLAVOUX (1978), STICHLER und HERRMANN (1978), SKLASH und FARVOLDEN (1979), HERRMANN und STICHLER (1980), EDEN et al. (1982), BOT-

TOMLEY et al. (1984 und 1986), HOOPER und SHOEMAKER (1986) und RODHE (1987) genannt.

Die verschiedenen Bearbeiter ermittelten gegenüber herkömmlichen Abflusstrennungen sehr hohe Grundwasser- bzw. Vor-Ereigniswasser-Anteile am Gesamtabfluß während Hochwasserereignissen von 60 und 70%. Ähnliche Anteile, zwischen 59 und 65%, wurden auch im Schönbuch mit Hilfe von $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ gefunden (KÖRNER et al., 1986). Eine größere Variationsbreite fand FRITZ et al. mit 40 - 90% in mehreren Einzugsgebieten in Kanada, eine wesentlich höhere Beteiligung des "pre-event"-Anteils bestimmte MOSLEY (1979) mit 75 - 97%. Weniger als 40% Grundwasseranteil bei Niederschlagsereignissen wurden nur von CROUZET et al. (1970) bei einem von 3 und von SKLASH und FARVOLDEN (1979) bei einem von mehreren untersuchten Ereignissen gefunden. Die Niederschlagsintensitäten waren im ersten Fall mäßig, im zweiten sehr hoch. Auch bei Ergebnissen von BEHRENS et al. (1971) spielte das Grundwasser in teilweise vergletscherten Untersuchungsgebieten eine geringere Rolle.

Schon früher (z.B. IVANOV, 1948) wurden andere hydrochemische Methoden angewendet, um die Mengenanteile verschiedener Komponenten am Gesamtabfluß abzuschätzen. Neben radioaktiven Tracern, einzelnen Ionen wie z.B. Chlorid (ZEKSTER, 1963) oder der Zusammensetzung mehrerer Hauptinhaltsstoffe (PINDER und JONES, 1969) fand vor allem die elektrische Leitfähigkeit (Lf) als Maß der Gesamtmineralisation häufig Anwendung bei der chemischen Ganglinienseparation. Grundwasseranteile um 25% (VISOCKY, 1970) oder zwischen 30 und 80% (TAGUTSCHI, 1982) wurden für verschiedene Einzugsgebiete bestimmt. PINDER und JONES ermittelten 32 - 42% Grundwasseranteil am Gesamtabfluß während Hochwasserwellen. Zwei-Komponenten-Separationen mit der Lf-Methode ergaben im Schönbuch in verschiedenen Einzugsgebieten Grundwasseranteile am Gesamtabfluß während Hochwasserereignissen zwischen 18 und 75%. (KÖRNER et al., 1986).

Methoden der Ganglinienseparation, die den unterschiedlichen Lösungsinhalt der zu trennenden Komponenten als Markierung verwenden, sind besonders bei der Erfassung der Direktabflußkomponente aus Ereigniswasser problematisch, da die Mineralisation des Niederschlagswassers nach dem Kontakt mit den Bodenpartikeln und im Verlauf der Fließstrecke zunehmen kann. Gegenüber den nichtkonservativen Eigenschaften gelöster Stoffe bietet das konservative Verhalten der Isotopen, die Bestandteile des Wassermoleküls selbst

sind, prinzipielle Vorteile.

Die Ermittlung der Tracerkonzentration der Vor-Ereignis-Komponente kann direkt über Grundwasserpegel, Quellen oder im Vorfluter bei Niedrigwasser (Basisabfluß) erfolgen. Eine Beprobung im Vorfluter bietet den Vorteil, Grundwasser aus möglicherweise verschiedenen Grundwasserleitern zu erfassen. Vor-Ereignis-Bodenwasser wird im Basisabfluß des Vorfluters nicht erfaßt, wenn kein länger anhaltender Deckschichtenabfluß auftritt. Die Markierung der Ereigniskomponente wird über eine Beprobung des aktuellen Niederschlags festgestellt.

Im Schönbuch durchgeführte 2-Komponenten-Separationen ergaben teils mit der Lf- und teils mit der $\delta^{18}\text{O}$ -Methode höhere Anteile des Vor-Ereigniswassers am Gesamtabfluß als mit der jeweils anderen Methode. Die Unterschiede sind auf eine bei der Einteilung in 2 Abflußanteile nicht erfaßte 3. Abflußkomponente zurückzuführen, deren Markierung entweder der Ereignis- oder der Vor-Ereignis-Komponente ähnlich war. Dies konnte bei auftretendem Interflow mit Hilfe von Isotopenmessungen nachgewiesen werden. Der Interflow stellte eine unterschiedlich markierte dritte Abflußkomponente aus älterem, schon im Boden gespeicherten Hangwasser dar. Dieses zusätzliche Vor-Ereigniswasser, das nicht oder nur minimal zum Basisabfluß beiträgt, wird erst durch stärkere Niederschläge mobilisiert und über den Vorfluter abgeführt. Dieser Mobilisierungsvorgang wurde schon von BLUME et al. (1966) für die Sickerwasserbewegung in einer buchenbestandenen Löß-Parabraunerde beschrieben. Auch SCHROEDER (1973) weist auf einen erheblichen Anteil älteren Bodenwassers im Hochwasserabfluß hin (Verdrängungstheorie). Ferner konnten SKLASH et al. (1986) mit Isotopenmessungen des "subsurface flow" zeigen, daß dieser Abflußteil hauptsächlich der "pre-event"-Komponente zugerechnet werden muß (und nicht aus aktuellem Niederschlagswasser, "event"-Komponente, besteht).

Je nach der Markierung dieser zusätzlichen Abflußkomponente aus Bodenwasser, die möglicherweise mehr dem Grundwasser oder mehr dem aktuellen Niederschlagswasser ähnlich ist, werden die Anteile des Grundwassers oder des aktuellen Niederschlagswassers als zu hoch oder zu niedrig bestimmt.

Beispiele von Untersuchungsergebnissen aus dem Schönbuch (Ergebnisse von zwei N-Q-Ereignissen (Kirnbachtal, P 5/1, KÖRNER et al., 1986) sollen verdeutlichen, daß die Verfahren der 2-Komponenten-Separation bei auftretendem Interflow für eine genauere Abflusstrennung nicht ausreichend genau sein können. Bei einem N-Q-Ereignis im

Oktober wurden mit der Lf-Methode höhere Anteile des "indirekten Abflusses" ermittelt als mit der $\delta^{18}\text{O}$ -Methode (Pegel 5/1: 75% bzw. 59%). Ein Ereignis im Dezember (vgl. Abb. A-2-2 Anhang) erbrachte die umgekehrten Ergebnisse (41% bzw. 62%). Bei beiden Fällen trat Interflow auf, der in Aufgrabungen beprobt werden konnte. Im Oktober waren die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte sowohl des vor dem Ereignis im Boden gespeicherten Wassers als auch des Interflow während des Ereignisses dem aktuellen Niederschlagswasser ähnlich. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Methode trennte in diesem Fall die Direktabflußkomponente, bestehend aus nicht quantifizierten Anteilen von Niederschlagswasser und älterem "Vor-Ereignis-Bodenwasser" von der Grundwasser- oder Basisabflußkomponente. Es wird deutlich, daß in diesem Fall der Anteil des Vor-Ereigniswassers am Gesamtabfluß unterschätzt, bzw. der Anteil des Ereigniswassers überschätzt wurde. Die Lf-Methode hat dagegen, wegen der hohen, in Richtung Grundwasser tendierenden Leitfähigkeit des Bodenwassers, den indirekten Abflußanteil, d. h. als Grundwasser- oder Basisabflußkomponente, überschätzt. Der mit der Lf-Methode abgetrennte indirekte Abflußanteil bestand in diesem Falle aus Grundwasser und höher mineralisiertem Interflow, wobei der Anteil aktuellen Niederschlagswassers nicht zu quantifizieren war, da ein Teil niedrig mineralisiert blieb (wegen einer kurzen Fließstrecke zum Vorfluter oder direkter Beregnung des Vorfluters), ein anderer jedoch, als Teil des Interflow, rasch an Leitfähigkeit zunehmen konnte.

Bei der wesentlich stärkeren Abflußerhöhung im Dezember lag eine andere Situation vor. Das Vor-Ereignis-Bodenwasser wies grundwasserähnliche $\delta^{18}\text{O}$ -Werte auf. Durch seine Beteiligung am Gesamtabfluß wurde der Vor-Ereignis-Anteil aus Grundwasser überschätzt. Die Separation mit $\delta^{18}\text{O}$ unterscheidet hier, im Gegensatz zum Oktober-Ereignis, näherungsweise zwischen dem gesamten Vor-Ereigniswasser, bestehend aus Grundwasser und älterem Bodenwasser, und dem Ereigniswasser. Die Lf-Methode hat wegen der relativ niedrigen Mineralisation des Vor-Ereignis-Bodenwassers einen zu hohen Anteil des aktuellen Niederschlagswassers vorgetäuscht.

Hier wird deutlich, daß der Interflow aus oberflächennahem Hangwasserabfluß (Oberflächenabfluß tritt nur in seltenen Ausnahmefällen auf) selbst ein 2-Komponenten-System aus älterem Bodenwasser und aktuellem Niederschlagswasser darstellen und sich mit dem älteren Grundwasser als 3. Komponente im Vorfluter mischen kann (vgl. Modellvorstellung der Abflußbildung in Kap. 2.3).

Frühere, in anderen Untersuchungsgebieten durchgeführte Ganglinienseparationen haben mit Isotopenverfahren allgemein höhere Grundwasseranteile ergeben als die Berechnungen mit Hilfe chemischer Inhaltsstoffe des Wassers (Situation des oben beschriebenen Dezember-Ereignisses). Es ist nicht auszuschließen, daß die oft ermittelten sehr hohen Anteile an Vor-Ereigniswasser (um 60 Prozent) in manchen Fällen auch auf eine Zumischung aus einem Bodenwasserspeicher mit grundwasserähnlichen $\delta^{18}\text{O}$ -Werten zurückzuführen sind. Der eigentliche Grundwasserabfluß aus der gesättigten Zone würde dann während Abflußerhöhungen nicht in dem Maße erhöht sein, wie die Vor-Ereignis-Komponente insgesamt. Durch eine vorübergehende Speicherung und Vermischung von Niederschlägen im Boden ist allgemein eher mit grundwasserähnlichen als mit niederschlagsähnlichen $\delta^{18}\text{O}$ -Werten zu rechnen. Die Lf-Werte des Bodenwassers dürften dagegen bei Situationen mit hoher Bodenfeuchte und deshalb wirksamem Interflow mit geringer Verweilzeit allgemein niedrig und niederschlagsähnlich sein.

Mit Ausnahme der im folgenden aufgeführten Arbeiten haben die meisten früheren Arbeiten nur eine der beiden Methoden zur quantitativen Abschätzung verwendet. FRITZ et al. (1976) konnten unterschiedliche Änderungen chemischer und isotopechemischer Parameter im Vorfluter während Abflußerhöhungen teilweise mit Gebietsvariationen der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers innerhalb eines Einzugsgebietes erklären. Eine Zumischung von niedriger mineralisiertem flachen Grundwasser (CALLES, 1985) konnte als 3. Abflußkomponente ebenso wie mobilisiertes Bodenwasser (s.o.) auch einen zu hohen Niederschlagsanteil vortäuschen.

BALEK et al. (1978) trennten 3 Abflußkomponenten, indem sie mit einem Tracer die beiden Komponenten Oberflächenabfluß und Interflow unterschieden und aus gemessenen Grundwasserständen den Basisabfluß berechneten. NEWBURY et al. (1969) ermittelten aus Lf-Änderungen einen Grundwasseranteil von 50% bei Abflußerhöhungen. Mit SO_4 -Messungen konnte der Anteil des tieferen, SO_4 -reichen Grundwassers mit 30% bestimmt werden.

Trennungen in mehr als 2-Komponenten unter Einbeziehung von Isotopen-Tracern wurden von BEHRENS et al. (1971 und 1979), die Tritium, Deuterium und Lf-Messungen anwendeten, durchgeführt. GRIEND, VAN DE und ARWERT (1983) erkannten aus ^{18}O -Messungen, daß gespeichertes Schmelzwasser vorherrschend an einer durch Regenniederschläge verursachten Abflußerhöhung beteiligt war. Ihre Untersuchungsgebiete waren teilweise vergletscherte Einzugsgebiete in

Österreich und Italien.

MALOSZEWSKI et al. (1983) unterschieden durch parallele Anwendung von ^2H und ^3H als voneinander unabhängige Tracer 3 Abflußkomponenten. Neben der direkten Komponente mit Verweilzeiten von Stunden bis maximal Tagen wurden zwei unterirdische Komponenten mit höheren Verweilzeiten von Wochen bis Monaten (bezeichnet als "sub1") und einer langen Verweilzeit von Jahren ("sub2") abgetrennt.

MOSER und STICHLER (1983) konnten den Abfluß eines Gletschergebietes in 4 Abflußanteile (subglazialer Abfluß, Abfluß aus dem Gletscher mit langer Verweilzeit, Eis- und Schneeschmelzwasser) untergliedern, wobei sie die Umweltisotopen ^2H , ^3H und ^{18}O als Tracer verwendeten, aber auch Lf-Messungen zu Hilfe nahmen.

EDEN und PRÖSL (1985) unterschieden, auch in einem alpinen Einzugsgebiet, 3 bis 5 Deckschichtenabflüsse mit verschiedenen Verzögerungszeiten. Sie verwendeten neben Isotopenmessungen (^{18}O) auch Farbmarkierungen.

EHMANN (1989) und SEEGER (1990) konnten in Buntsandsteingebieten des Nordschwarzwaldes Abflußseparationen mit Hilfe der Leerlaufkoeffizienten (α -Werte) auf graphischem Weg durchführen. SEEGER trennte 4 Abflußkomponenten aus unterschiedlichen Speicherräumen und ordnete diese Abflußanteile 3 unterschiedlichen Deckschichten- sowie einem Grundwasserabfluß zu. Der jährliche Anteil des gesamten Deckschichtenabflusses am Gesamtabfluß variierte zwischen 35 und 67%.

SAUTER (1992) wendete bei seinen Untersuchungen im Malm-Karst der Schwäbischen Alb neben natürlichen chemischen und isotopechemischen Methoden erstmals auch Temperaturunterschiede verschiedener Abflußkomponenten zur Ganglinienseparation an. Er konnte damit den Anteil des schnell abfließenden Wassers mit ca. 5-10% quantifizieren und damit eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen anderer Trennungsvorgängen erzielen.

KENNEDY et al. (1986) leitete aus chemischen und isotopechemischen Messungen einen nur geringen Einfluß frischen Niederschlagswassers während starken N-Q-Ereignissen ab. Aus 2-Komponenten-Trennungen wurden pre-event Anteile von 50 - 80% bestimmt, die aufgrund hydrogeologischer Gegebenheiten (niedrige hydraulische Leitfähigkeiten des Aquifers und tiefer Grundwasserspiegel) als nicht allein grundwasserbürtig angesehen wurden. Der hohe pre-event-Anteil im Gesamtabfluß wurde von den Autoren auf einen Abflußanteil eines Vor-Ereignis-Bodenwassers zurückgeführt, das durch infiltrierendes "event water" mobilisiert wird. Die Isotopenzu-

sammensetzung des Vor-Ereignis-Bodenwassers kann von der des Vor-Ereignis-Grundwassers differieren.

Dieses Abflußmodell beschreibt die bei der Abflußbildung im Schönbuch beteiligten Komponenten, wie sie nach den Ergebnissen der ersten Untersuchungen mit Hilfe von Isotopen und Lf-Messungen erkannt wurden.

RODHE (1987) weist auf das bisherige Fehlen von Arbeiten hin, die detaillierte Untersuchungen einzelner kleiner Hangabschnitte mit Studien zur Zusammensetzung des Gesamtabflusses von Einzugsgebieten mit Hilfe von Isotopenuntersuchungen verbinden. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu geben. Es sollte versucht werden, eine an die hydrogeologischen Gegebenheiten der Untersuchungsgebiete angepasste und verbesserte quantitative Komponentenseparation anzuwenden.

Für Fragen der Grundwasserneubildung ebenso wie für Aussagen, in welchen Bereichen (Deckschichten, Grundwasserleiter) mögliche Speicherrungs- oder Auswaschungsvorgänge ablaufen, ist eine qualitative und quantitative Trennung von Abflußkomponenten erforderlich. Wegen des Vorherrschens deutlich ausgebildeter zweischichtiger Deckschichten im Schönbuch kommt dem Interflow mit seiner chemischen Zusammensetzung und Verweilzeit eine wichtige Rolle zu. Deshalb sollte versucht werden, eine i. w. durch Starkniederschläge oder Schneeschmelzeereignisse mobilisierte dritte Abflußkomponente, Interflow aus älterem Bodenwasser, im Gesamtabfluß zu separieren.

2.3 Modellvorstellung zur Abflußbildung und Arbeitsansatz für eine erweiterte Komponentenseparation

Auf der Grundlage früherer Untersuchungen zum Abflußgeschehen und zur Komponentenseparation (vgl. Kap. 2.2) wurde eine an das Untersuchungsgebiet und seine hydrogeologischen Gegebenheiten angepasste Modellvorstellung zur Abflußbildung entwickelt. Es werden dabei Abflußkomponenten unterschieden, die aus Wässern mit jeweils verschieden langer Verweilzeit im Einzugsgebiet bestehen. Diese Definition unterscheidet sich damit von herkömmlichen Bezeichnungen der Abflußanteile, die verschiedene Fließpfade, wie z.B. Oberflächen- (Q_o), oberflächennaher (Q_n) und Grundwasserabfluß (Q_g), als Abflußkomponenten unterscheiden.

Ein stark vereinfachtes schematisches Profil durch ein Untersuchungsgebiet (Abb. 2-2) soll die Modellvorstellung der Abflußbildung aus 3 Kom-

ponenten veranschaulichen. Welche Abflußkomponenten über welche Fließpfade an welchen Meßstellen abfließen können wird in Abb. 2-2 unten erläutert.

Als erste Komponente, wird der Abflußanteil unterschieden, der aus aktuellem Niederschlagswasser (NB) besteht. Diese jüngste, nur während N-Q-Ereignissen, am Abfluß beteiligte Komponente erreicht den Vorfluter in der Regel über den Fließpfad Q_n als Interflow und nur in Ausnahmefällen als Oberflächenabfluß (Q_o). Sie wird an der Meßstelle Q_{on} erfaßt und als IF_e (Interflow aus Ereigniswasser, event water) bezeichnet.

Da selbst sehr intensive Niederschläge in den Waldboden eindringen oder von ihm aufgenommen werden können, ist Oberflächenabfluß (Q_o) nur dann zu erwarten, wenn der Deckschutt volle Wassersättigung erreicht hat, das heißt, wenn sich ein Wasserstau von der Grenze Deckschutt/Basisschutt bis zur Oberfläche aufgebaut hat. (Infiltrationsraten I_b von mindestens 52 - 79 mm/h (SCHWARZ, 1986) stehen maximale Niederschlagsintensitäten von 38 mm/h (Mai 1978) oder 27,1 mm/h (Mai 1985) gegenüber.

Nur weniger als 2% des Gesamtabflusses macht nach Untersuchungen von MIYAKE und TSUBOTA (1963) der Teil des aktuellen Niederschlagswassers aus, der direkt auf den Vorfluter fällt.

Bei der Kronenpassage verringert sich allgemein die Niederschlagsmenge (Kroneninterzeption I_k). Durch Fraktionierungseffekte kann sich dabei möglicherweise der ^{18}O -Isotopengehalt des Freilandniederschlags (NF) anreichern. SAXENA (1987) fand bei seinen in Uppsala durchgeführten Untersuchungen mittlere Erhöhungen der $\delta^{18}O$ -Werte von 0,3 ‰ (Variation von 0,1 und 1,2 ‰). Deshalb sollte der Tracer-Input in Waldgebieten im Bestandesniederschlag (NB) beprobt werden.

Der mit der Tracerkonzentration des aktuellen Niederschlags markierte Abflußanteil wird bei herkömmlichen 2-Komponenten-Separationen als Q_e (Q_d), vom Basisabfluß (Q_{pe} , Q_i) getrennt.

Die zweite Komponente wird als IF_{pe} (Interflow aus Vor-Ereigniswasser, pre-event water) bezeichnet. Sie besteht aus älterem, schon vor dem Ereignis im Boden vorhandenen Wasser, welches durch Schmelzwasser oder einsickernde Niederschläge verdrängt bzw. mobilisiert und über den Fließpfad Q_{on} zum Vorfluterabfluß (Gesamt-abfluß Q_i) beiträgt. Bei ausreichend starker Hangneigung und Ausbildung eines Stauwasserkörpers auf dem feinkörnigen Basisschutt ist auch mit einem Interflow zu rechnen, der über die Dauer eines eigentlichen N-Q-Ereignisses (Hochwasserwelle) hinausgeht und über eine bestimmte Zeit anhält.

Die Abflußkomponente IF_{pe} ist im Sinne einer Zweikomponenten-Separation der Vor-Ereignis-Komponen-

te (Q_{pe} , Q_i) zuzurechnen. Dieses ältere Bodenwasser wird aber, wie oben beschrieben, bei den üblichen Verfahren zur Bestimmung der Tracerkonzentration des Q_i (Grundwasser oder Basisabfluß im Vorfluter) in der Regel nicht erfaßt und kann deshalb je nach seiner Zusammensetzung die Separationsergebnisse beeinflussen.

Beprobt man den Oberflächen- (Q_o) und oberflächennahen Abfluß (Q_n) während eines N-Q-Ereignisses an einer Meßstelle Q_{on} , kann neben der Komponente IF_e auch IF_{pe} erwartet werden (vgl. Abb. 2-2, unten). In welchem Maße eine der Komponenten überwiegt, wird von verschiedenen Faktoren wie u.a. dem Bodenfeuchtezustand vor Beginn des Ereignisniederschlags und der Niederschlagsmenge bestimmt.

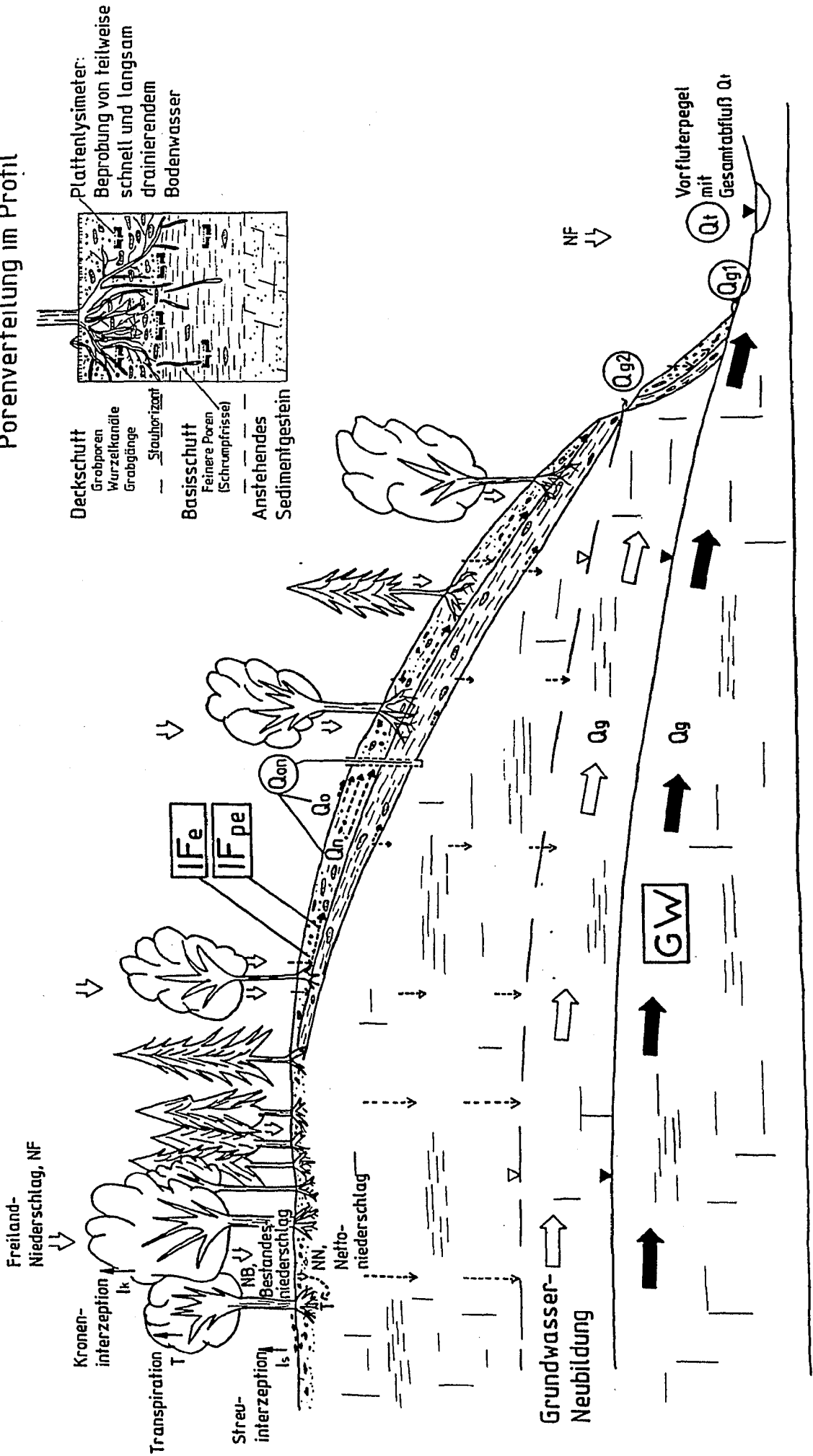
Das hier gewählte Abflußmodell unterscheidet sich von dem Ansatz einer 2-Komponenten-Separation, da sich auf den Fließpfaden Q_n und Q_o nicht ausschließlich Direktabfluß aus frischem Niederschlagswasser bewegt, sondern zeitweise auch älteres Bodenwasser. Da das Auftreten von Q_o als Extremsituation des Interflow mit einem vollständig gesättigten und durchströmten Deckschutt zu verstehen ist, kann Q_o wie auch Q_n aus einem "Deckschutt-Mischwasser" der Komponenten IF_e und IF_{pe} bestehen.

Da Q_o bei natürlichen Niederschlagsverhältnissen immer mit Q_n verbunden ist (s.o.), wurde keine Trennung des Deckschichtenabflusses in Oberflächen- und oberflächennahem Abfluß versucht. Sinnvoller schien dagegen eine gemeinsame und direkte quantitative Erfassung des als Q_{on} zusammengefaßten Abflusses und eine quantitative Trennung der diesen Abfluß bildenden Komponenten IF_e und IF_{pe} mit Tracermethoden.

Mit der Interflow-Meßstelle Q_{on} wird das gut drainierende lateral a) schneller über Wurzelkanäle und Grabgänge oder Klüfte (Makroporen) und b) langsamer über den Grobporenraum im Boden abfließende Hangzugwasser gewonnen. Die Meßeinrichtung wurde in einer Größe dimensioniert (10 m breiter Graben, vgl. Kap. 4), die eine repräsentative Beprobung des als Interflow abfließenden Wassers erlaubt. Kleinere Auffangeinrichtungen sind bei Inhomogenitäten der Durchlässigkeiten in den Deckschichten (z.B. fehlende oder angeschnittene Wurzelkanäle, Wurmgänge) zur Erfassung des Interflow weniger geeignet. Nicht zuletzt wirken sich auch durch den Einbau hervorgerufene Störungen des Bodens bei kleiner maßstäblichen Meßeinrichtungen stärker aus.

Neben dem gut drainierenden Bereich der Makro- oder Sekundärporen bis zu den weiten Grobporen (Wasserspannung pF: 0 - 1,77) findet ein Wasseraustausch oder eine Verdrängung von Bodenwasser auch im langsamer drainierenden Be-

Porenverteilung im Profil



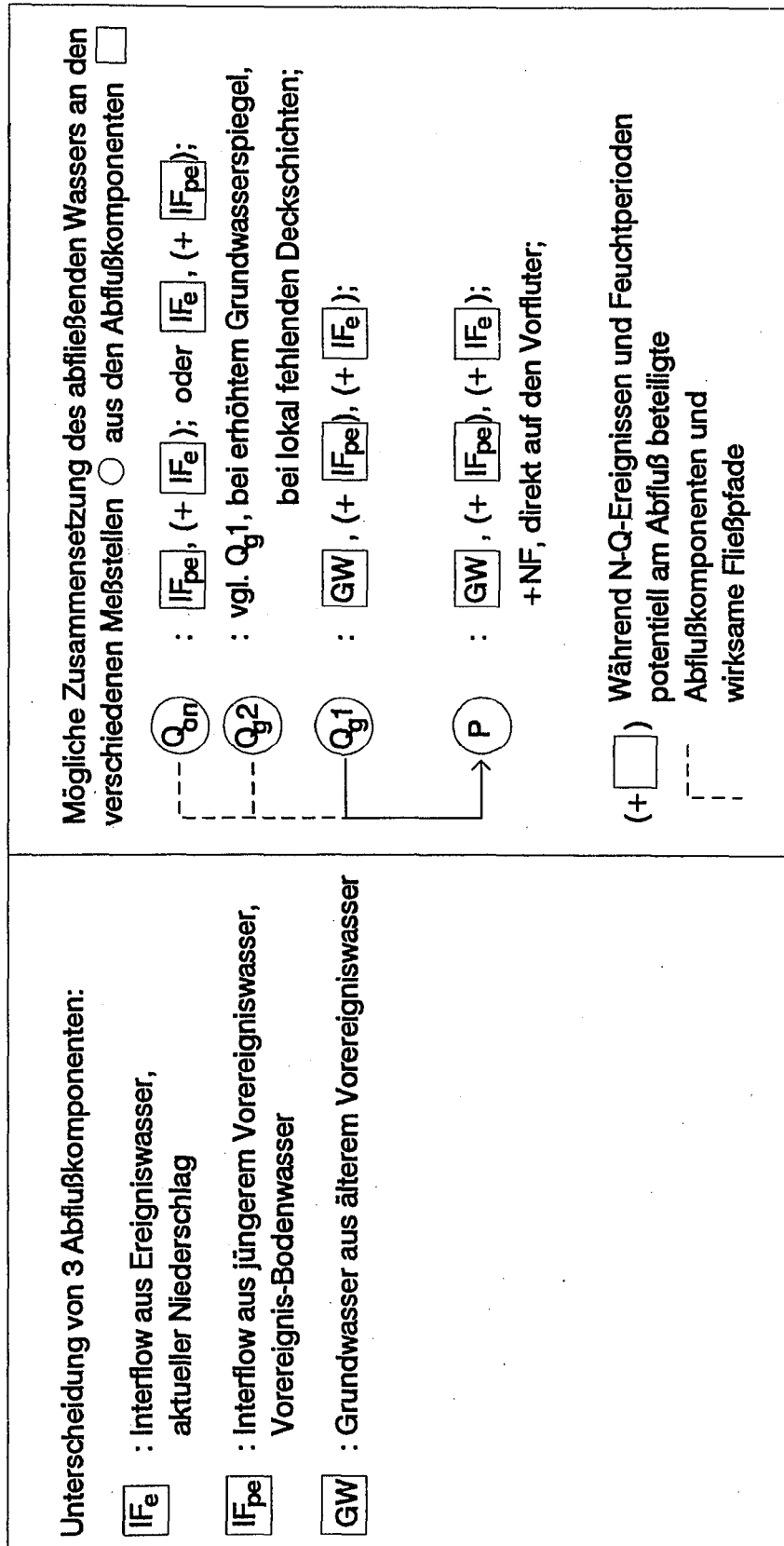


Abb. 2-2: Vereinfachtes Schema der Modellvorstellung für die Abflußbildung aus den 3 Komponenten (Markierung mit Rechtecken): IF_e (Interflow aus Ereigniswasser), IF_{pe} (Interflow aus Vor-Ereignis-Bodenwasser) und GW (älteres Vor-Ereignis-Grundwasser) mit ihren möglichen Mischungsanteilen an den Meßstellen (Markierung mit Kreisen): Q_{on} (Oberflächen- und oberflächennaher Abfluß), Q_{g1}, Q_{g2} (Quellen) und Q_t (Gesamtabfluß) am Vorfluterpegel (P).

reich statt. Dieses Wasser wurde mit Plattenlysimetern ($d = 30 \text{ cm}$) bis $pF = 2,78$ gewonnen, die in verschiedenen Tiefen eingebaut waren. In einer Detailskizze (Abb. 2-2, oben) ist verdeutlicht, daß z.B. durch den Anschnitt einer Wurzelbahn auch hier verschieden schnelles Wasser gewonnen werden kann.

Bei einem möglichen Wasserstau an der Grenze Basisschutt zu schlechter durchlässigem Festgestein (bei fehlender oder durch Toneinschlammung unwirksamer Klüftigkeit) ist auch ein tieferer Deckschichtenabfluß aus Vor-Ereignis-Bodenwasser, in der Schemaskizze (Abb. 2-2) durch kleine gestrichelte Pfeile angedeutet, denkbar (EINSELE et al. 1986b, dort als Q_i bezeichnet, vgl. auch Abb. A-2-1 im Anhang und Erläuterungen in Kap. 2.1).

Als Abfluß in der ungesättigten Zone aus "pre-event"-Wasser ist er nach oben gewählter Definition der IF_{pc} -Komponente zuzurechnen. Wegen der schlechten Durchlässigkeit des Basisschutts wird die isotopenchemische Zusammensetzung dieses Wassers jedoch eher dem des Grundwassers entsprechen als dem, im besser durchlässigen Deckschutt häufiger ausgetauschten, flacheren Bodenwasser.

Während der Baumaßnahmen zur Interflow-Meßanlage im April 1984 (vgl. Kap. 4) konnte bei hoher Bodenfeuchte nur an der Grenze Deckschutt/Basisschutt ein deutlicher Stauhormont in Form einer dünnen, wenige Zentimeter mächtigen, wassergesättigten Schicht erkannt werden. Der liegende Basisschutt und die Schichtgrenze Basisschutt/anstehendes Gestein waren vergleichsweise "trocken". Es wurden keine Hinweise auf einen zweiten Stauhormont gefunden.

Tieferer Deckschichtenabfluß in nennenswerter Menge wird sich auf Gebietsteile mit besser durchlässigem, z.B. mit Sandsteinbrocken durchsetztem Basisschutt (vgl. BIBUS, 1986), beschränken und, weil die hemmende Wirkung des Basisschutts fehlt, dann weitgehend ohne einen flacheren Interflow an der Grenze Deckschutt/Basisschutt stattfinden. Ein solcher tieferer Deckschichtenabfluß wird wegen der höheren Sickerschwindigkeit und einem rascheren Wasseraustausch isotopenchemisch dem oben beschriebenen Q_{on} ähnlich sein.

Die dritte Abflußkomponente besteht aus dem Grundwasserabfluß Q_g aus der permanent gesättigten Zone und wird als GW (Grundwasser) bezeichnet. Das Wasser dieser Komponente besteht aus im Vergleich zur IF_{pc} -Komponente älterem Vor-Ereigniswasser.

Die GW-Komponente entspricht dem bei Zwei-Komponenten-Separationen vom aktuellen Niederschlagswasser abgetrennten Vor-Ereigniswasser (Q_{pe} oder Q_i) nur dann, wenn für die Berechnung die tatsächliche Tracerkonzentration des Grundwassers erfaßt wurde und keine Zumischung eines zusätzlichen Abflußanteils wie Interflow erfolgt ist.

Die GW-Komponente kann in Grundwasserpe-

geln, Quellen oder bei Trockenwetterbedingungen im Vorfluter erfaßt werden. Infolge starker Niederschläge kann der Übertritt von Sickerwasser in die Poren und Klüfte der Festgesteine (besonders bei gut durchlässigen oder fehlenden Deckschichten) auch einen verstärkten Abfluß aus der permanent gesättigten Zone hervorrufen (vgl. EINSELE, 1970; FLÜGEL, 1981). Eine solche, während N-Q-Ereignissen mögliche Zunahme des Grundwasserabflusses kann neben Schüttungserhöhungen in tieferen Quellen (Q_g1) auch, bei fehlenden Deckschichten, durch das Ansprechen von flachen Quellen (im Abflußschema durch die Meßstelle Q_g2 veranschaulicht) erkennbar werden. Dieses wird durch den kurzfristigen (lokalen) Anstieg des Grundwasserspiegels bei Niederschlagsereignissen erklärt.

In beiden modellhaft angenommenen Quellaustritten Q_g1 und Q_g2 können während oder nach Niederschlagsereignissen neben der GW-Komponente auch die IF_{pc} - und die IF_c -Komponenten beteiligt sein, wenn kurz vor dem Zutagetreten des Grundwassers oder an der Quelle selbst eine Vermischung mit dem oberflächennahen Abfluß erfolgt.

An Abflußpegeln im Vorfluter (P) wird der Gesamtabfluß Q_t erfaßt. Je nach klimatischer Situation werden neben der ständig abfließenden GW-Komponente, Zumischungen der IF_c - und IF_{pc} -Komponenten zu erwarten sein, die eine quantitative 3-Komponenten-Separation erforderlich machen.

Bei durchgehend wasserstauenden Deckschichten, wie sie in der modellhaft angenommenen Hangsituation beschrieben und in Abb. 2-2 dargestellt sind, kommt es gerade an Hängen zu keiner nennenswerten Grundwasserneubildung. Die eigentliche Grundwasserneubildung findet bevorzugt in Gebietsteilen mit sandigeren, besser durchlässigen oder fehlenden Deckschichten statt, die eine rasche Tiefensickerung zum Aquifer erlauben. Dies ist z.B. im Bereich flachgründiger Bodenentwicklungen auf Verebnungsflächen des Stubensandsteins (km4), im Bereich des Angulatusandsteins (Lias $\alpha 2$) aber auch an "Sandhängen" mit lokal steinreichem Basisschutt und klüftigem verwittertem Festgestein der Fall.

Weil die IF_{pc} -Komponente aus jüngerem Vor-Ereigniswasser nur phasenweise aktiv ist, kann ihre Konzentration über Grundwasserproben aus dem Quellafluß oder Basisabflußproben aus dem Vorfluter nur ungenügend erfaßt werden. Deshalb ist eine direkte Beprobungsmöglichkeit des als Q_{on} zusammengefaßten Deckschichtenabflusses notwendig.

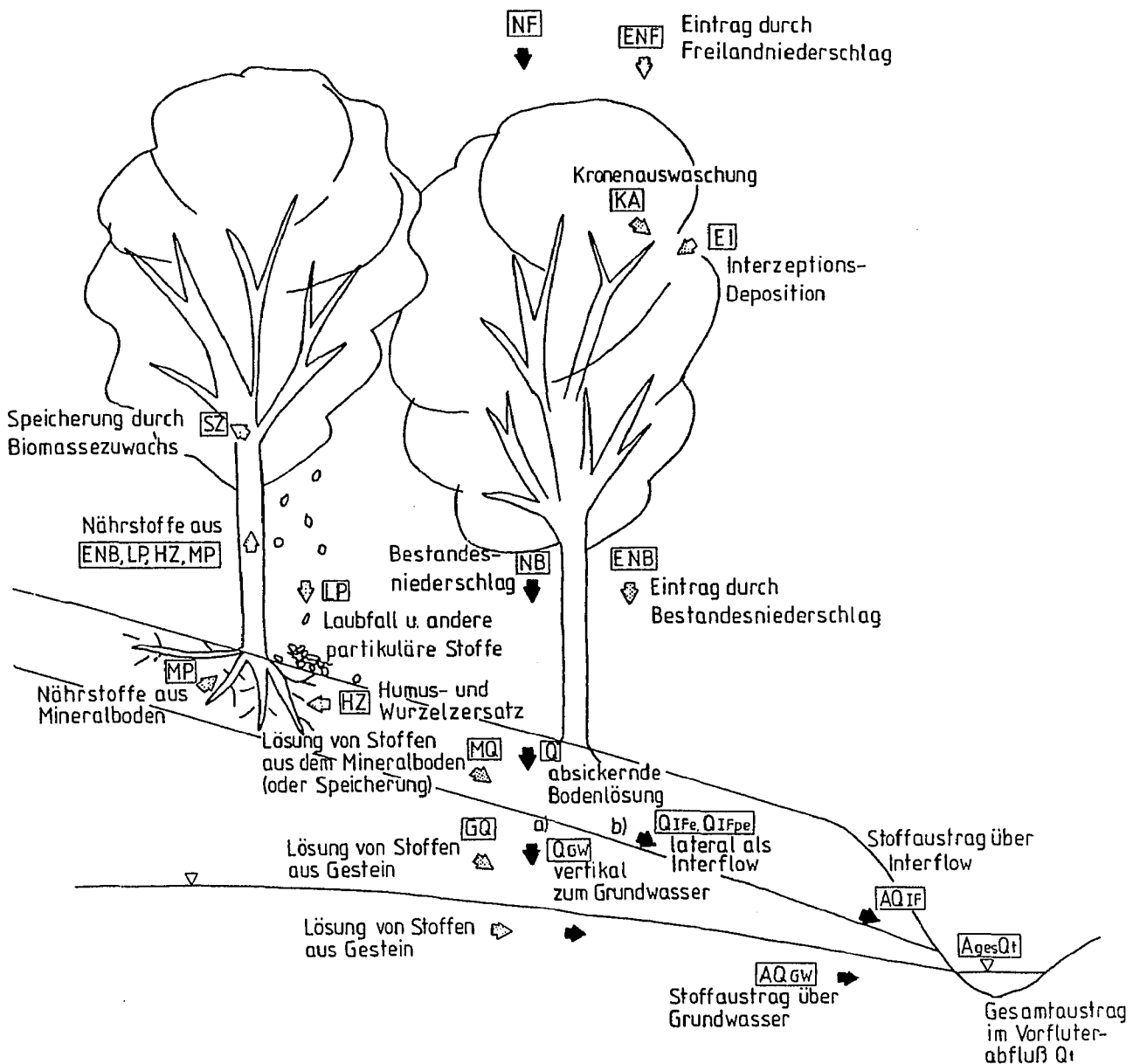


Abb. 2-3: Vereinfachtes Schema zur Erläuterung der Stoffflüsse des externen und internen Stoffkreislaufs sowie der Stoffumsätze in der Pedosphäre und im tieferen Untergrund (verändert nach einer Vorlage von EINSELE et al., 1986c).

2.4 Modellvorstellung und Problematik von Stoffkreislauf und Stoffumsatz unter Berücksichtigung des Interflow

In einem vereinfachten Schema (Abb. 2-3) werden die Stoffflüsse und der Stoffumsatz im Untergrund in Anlehnung an EINSELE et al. (1986c) veranschaulicht. Das Schema wurde durch den über den Interflow ablaufenden Stofftransport ergänzt.

Der als "externer" Stoffkreislauf bezeichnete

Stoffeintrag über den Freilandniederschlag (ENF) und Stoffaustrag über das Quell- und Bachwasser im Gesamtabfluß ($A_{ges}Q_t$) ist relativ einfach und genau zu messen und deshalb gut zu quantifizieren. Im Gegensatz dazu sind quantitative Angaben zum "internen" Stoffkreislauf schwierig, weil oft mehrere Stoffflüsse miteinander verknüpft und einzeln oft meßtechnisch nicht direkt erfaßt werden können.

So ergeben sich manche Systemgrößen als

Restglied einer Bilanz, die z.B. bei der Interzeptionsdeposition (EI) teils auf selbst gemessenen Daten wie den Stoffeinträgen über den Bestandesniederschlag (Kronendurchlaß mit Stammablauf, ENB) und den Freilandniederschlag (ENF) beruhen und teils auf Literaturdaten, wie für die Kronenauswaschung (KA) aus Untersuchungen im Solling (ULRICH et al. 1979), zurückgreifen. Die Bestimmung von EI kann dann aus der sog. Kronendachdifferenz (vgl. ULRICH, 1983; EINSELE, 1985):

$$EI = ENB - ENF - KA + D$$

erfolgen, wenn D (Stoffe, welche die Pflanzen über das Kronendach direkt aufnehmen) vernachlässigt wird.

Für die Stoffe, die relativ wenig aus dem Kronenraum ausgewaschen werden (Stickstoff, Chlorid, Sulfat, Natrium und Magnesium) konnten mit dieser Methode plausible EI-Werte ermittelt werden. Im Beispielgebiet der Pegelmeßstelle P 1 (westlicher Schönbuch, Nadelwald/Laubwald = 60/40) lagen die EI-Werte für Magnesium und Sulfat etwa doppelt so hoch, für Chlorid und Nitrat etwa halb so hoch wie die ENF-Werte. Natrium wurde nur mit ca. 1/6 des EF-Wertes als EI eingetragen. Bei Calcium und Kalium dominiert dagegen die Kronenauswaschung die Konzentration des Bestandesniederschlags, was eine Bestimmung von EI recht unsicher macht. EI und ENF wurden in etwa gleicher Höhe ermittelt.

EINSELE et al. (1986c) geben für die 4-jährige Meßreihe des Schönbuchprojektes und das Beispielgebiet (P 1) folgende mittlere Flußraten (kg/ha·a) für die verschiedenen Ökosystemkompartimente an (Tab. 2-1).

Tab. 2-1: Mittlere Flußraten der wichtigsten Elemente in wässriger Lösung in den verschiedenen Kompartimenten im Schönbuch-Waldökosystem (Beispielgebiet P 1, 60% Nadel-, 40% Laubwald). Nach Daten aus Einsele et al. (1986c).

	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	N	SO ₄ ²⁻
EF	3,3	3	5	1	6	7	19
KA	0,7	13	7	0,3	2	0	9
EI	0,5	3	5	2	3	3	34
EB	4,5	19	17	3	11	10	62
SZ	0,2	7	8	1,5	0,1	12	4
Q	3,5	-1	2	1	9	-2	49
(SK 20?)		1	34	25	32	0,3	63)
MQ	-9	-4	-127	-40	-1	-3	14
AQ	13	3	129	41	10	1	35
(A _{ges} ^{Q_t})							

(Angaben in kg/ha·a)

SK = Saugkerzen; Erläuterungen der Abkürzungen vgl. Text und Abb. 2-3.

Der bestandesinterne Stoffumsatz erfolgt hauptsächlich im Kronenraum der Waldbestände, in der wasserungesättigten Zone, dem Wurzelraum und in der Pflanze selbst. Der interne Stoffkreislauf der Biosphäre umfaßt zunächst nur die Elemente, welche die Pflanzen von abgestorbenen Organismen (u.a. Laubfall und andere partikuläre Stoffe LP, Humus und Wurzelersatz HZ) aufnehmen. Die Biosphäre nutzt jedoch auch Stoffe aus dem Eintrag (ENF und EI) und schließt Stoffe aus dem Mineralboden (MP = Fluß vom Mineralboden zur Pflanze) auf. Das bedeutet ein Ineinandergreifen des externen und internen Stoffkreislaufs.

Die Pedosphäre nimmt als "offenes Stoffreservoir" von oben Stoffe auf und gibt diese nach einer möglichen vorübergehenden Speicherung sowohl an die Biosphäre (Aufnahme durch Pflanzen) als auch an das Grund- und Oberflächenwasser ab. Da das Sickerwasser bzw. die Bodenlösung (Q) Stoffe aus dem Mineralboden auflösen (MQ = Fluß aus dem Mineralboden) und zum Grundwasser (Q_{GW}) oder seitlich als Interflow über Ereigniswasser (Q_{IFe}) oder Vor-Ereignis-Bodenwasser (Q_{IFpe}) abtransportieren kann sowie durch Pflanzenbedarf abgereichert wird, ist allgemein längerfristig mit einem Defizit in diesem Kompartiment zu rechnen.

Der Stofffluß Q der a) vertikal oder b) lateral sichernden Bodenlösung kann ohne Berücksichtigung weiterer Stoffumsätze in der durchwurzeltten Pedosphäre wie folgt angesetzt werden (EINSELE et al., 1986c):

$$Q = ENB - KA - SZ$$

Der Stoffaustrag (AQ) kann sowohl über den Fließpfad a) tief absickernde Bodenlösung - Grundwasser (AQ_{GW}) erfolgen, wobei noch Lösungsvorgänge im tieferen Gestein und Aquifer (GQ) die Austragsraten erhöhen, als auch über den Fließpfad b) flach absickernde Bodenlösung - Interflow (AQ_{IF}) stattfinden. Beide Fließpfade treffen im Vorfluterabfluß (Gesamtabfluß Q_t) zusammen und bilden den Gesamtaustrag (A_{ges}^{Q_t}).

Aus der Differenz zwischen den gemessenen Gesamtaustragsraten im Vorfluter (A_{ges}^{Q_t}) und den berechneten Stofffrachten im Sickerwasser (Q) ergeben sich für die wichtigsten Elemente die in Tab. 2.1 mit der Abkürzung MQ bezeichneten Lösungs- oder Aufspeicherungsmengen aus oder im Mineralboden. Bei Calcium und Magnesium ist auch die Lösung aus dem tieferen Gestein (GQ, vgl. Abb. 2-3) eingeschlossen.

Die rechnerisch und durch Gewinnung der Bodenlösung aus Saugkerzen (SK) ermittelten Werte für die Stoffflüsse stimmten in den Untersuchungen des Schönbuchprojektes meist nicht voll über-

ein (s.u.).

Außer für Sulfat, für das nach Abzug der hohen geogenen Sulfatanteile im Gesamtaustrag eine Speicherung, vermutlich in tieferen Bodenbereichen, errechnet wurde, konnten für die anderen untersuchten Elemente Stoffabgaben aus dem Mineralboden oder dem tieferen Gestein, also eine Lösungsverwitterung abgeleitet werden.

Die ausgesprochenen Bioelemente Kalium und Stickstoff ändern ihre Konzentration in der Bodenlösung durch komplexe Vorgänge des Pflanzenbedarfs, durch Lösungsverwitterung (Freisetzung von Kalium durch Silikatverwitterung) und bei Stickstoff durch Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse in der Pedosphäre oder durch längerfristige Stickstoff-Festlegungen und -entbindungen durch Humusakkumulation oder -abbau. Die Untersuchungen im Rahmen des Schönbuchprojektes ergaben, daß der über die Atmosphäre eingetragene Stickstoff im Durchschnitt vollständig aufgebraucht wird.

Die von Pflanzen nur untergeordnet aufgenommenen Elemente Natrium und Chlorid werden ohne wesentliche Änderung der eingetragenen Stoffmenge (ENB) an das Sickerwasser unter der Wurzelzone weitergegeben.

Die Bodenwässer aus Saugkerzen lieferten für diese Elemente jedoch zu hohe Konzentrationen. Die Ursachen für stark schwankende Stoffkonzentrationen aus Saugkerzenproben wird darin vermutet, daß z.T. schlecht drainierbare Bodenwässer erfaßt werden, in denen sich Stoffe anreichern, die nicht oder wenig von den Pflanzen als Nährstoffe aufgenommen werden.

Durch diesen Effekt waren Stoffflußberechnungen auf der Grundlage von Bodenwasseranalysen, die mit einheitlichen Abflußraten durchgeführt wurden (angenommen wurden 180 mm/a: Versickerung einschließlich des oberflächennahen Wasserabstroms, AGSTER, 1986a) beeinträchtigt (vgl. Tab. 2-1, SK) .

Arbeitsansatz für weitere Untersuchungen zum Stoffumsatz im Rahmen der vorliegenden Arbeit

Zur Vermeidung der o.g. Probleme bei Stoffflußberechnungen mittels Saugkerzen-Analysen wurde im Rahmen der vorliegende Arbeit versucht, das tatsächlich in den tieferen Untergrund zum Grundwasser sickernde oder hangparallel als Interflow im Boden abfließende Wasser getrennt zu erfassen. Die Ergebnisse dieser Stofffrachtseparation sollten in die Berechnungen zum externen Stoffkreislauf, als Fortführung der früheren Stoffumsatzberechnungen zum möglichen Erkennen

längerfristiger Tendenzen, einbezogen werden.

Dazu dienten Plattenlysimeter, die in verschiedenen Tiefen über und unter der Wurzelzone eingebaut waren (vgl. Kap. 4.2.1). Wegen ihrer im Vergleich zu Saugkerzen größeren Aufnahmefläche von ca. 710 cm² erfassen sie eher einen Durchschnitt des im Boden vorhandenen Porenraums. Der Interflow wurde durch eine separate Meßeinrichtung direkt gemessen.

In Verbindung mit der Bestimmung der mittleren Verweilzeit des in jedem Plattenlysimeter gewonnenen Sickerwassers und des Interflow sollten die durch Transpirations-Konzentration in schlecht drainierbaren Bodenporen verursachten Stoffanreicherungen besser erkannt werden (vgl. Kap. 6.1.2 und 7.3.1).

Durch vergleichende Untersuchungen der Lösungsinhalte des in verschiedenen Tiefen aufgefangenen Sickerwassers und des Interflow können die modellhaft in zwei Fließpfade unterteilten Stoffaustragsvorgänge unterschieden werden. Es sind dies die langsamer verlaufende, tiefere Sickerung zum Grundwasser Q_{GW} mit dem Stoffaustrag über das Grundwasser (AQ_{GW}) und die raschere, laterale Wasserbewegung als Interflow (Q_{IF}) mit dem zugehörigen Stoffaustrag AQ_{IF} .

Daneben konnte auch der zeitliche Verlauf von Anreicherungs-, Ausschwemmungs- und möglichen Mobilisierungsvorgängen älteren Bodenwassers durch eindringende Niederschläge durch eine genauere Erfassung des sich im Boden bewegenden Wassers untersucht werden.

Weil der Interflow, besonders bei Hochwasserereignissen im Frühjahr einen nicht unerheblichen Anteil am Gesamtabfluß ausmacht, und Auswaschungsvorgänge aus dem Boden eher über den rasch abfließenden Interflow reguliert werden als über die langsamere Sickerung zum Grundwasser, wird der Stoffumsatz in der Pedosphäre besser

durch eine Differenzierung der beiden Austragspfade beschrieben.

Während die Beschaffenheit des Grundwassers sehr stark durch die Petrographie des Aquifers bestimmt wird und allgemein hohe Calcium-, Magnesium und Hydrogencarbonatgehalte aufweist, wird die des Sickerwassers und Interflow eher durch die mit dem Niederschlag eingetragenen Elemente und die in der ungesättigten Bodenzone ablaufenden biologisch/chemischen Prozesse dominiert. Bei NO_3 , z.T. auch bei SO_4 und K, wurden positive Konzentration-Abfluß-Korrelationen festgestellt (Kap. 6.1.4). Die geogenen Wasserinhaltsstoffe (Ca, Mg, HCO_3 , z.T. auch SO_4) werden bei zunehmendem Interflow-Anteil am Gesamtabfluß abgereichert. Damit wird die wichtige Rolle des Stoffaustrags über den Interflow während Hochwasserereignissen unterstrichen.

3. Untersuchungsgebiete

3.1 Lage und Auswahlkriterien

Der Naturpark Schönbuch liegt zwischen Tübingen und Stuttgart und ist rund 155 km² groß (vgl. Kap. 1, Abb. 1-1). Das Einzugsgebiet des Goldersbaches, in dem in ausgewählten Teilgebieten die Untersuchungen durchgeführt wurden, nimmt davon 72 km² ein (Abb. 3-1). Es ist nahezu vollständig bewaldet, wobei der Fichtenwald gegenüber dem Buchenwald im Verhältnis 60 zu 40 überwiegt. Trotz der dichten Besiedlung um das Waldgebiet ist der Schönbuch weitgehend in naturnahem Zustand und bis heute von anthropogenen Einflüssen wenig betroffen.

Im Rahmen des "Landschaftsökologischen Forschungsprojekts Naturpark Schönbuch" (EINSELE, 1986) wurden in den Jahren 1978 bis 1983 u.a. Bestandsaufnahmen wie geologische und bodenkundliche Kartierungen sowie speziellere Untersuchungen zum Wasser- und Stoffhaushalt im Gesamtgebiet und einzelnen Teilgebieten (insgesamt 14 Einzugsgebiete) durchgeführt. Das dabei erhobene (Basis-)Datenmaterial und ein Ausschnitt der offen gebliebenen Detailfragen schufen die Voraussetzungen und den Bedarf für eine Fortsetzung bestimmter Untersuchungen.

Für die vorliegende Arbeit wurden 8 Einzugsgebiete und 4 Versuchsflächen ausgewählt, um längerfristige Trends erkennen und speziellere Untersuchungen durchführen zu können. Ihre Lage ist der Übersichtskarte in Abb. 3-1, den Kartenausschnitten in Abb. A-3-1 im Anhang sowie dem Meßstellennetz in Abb. 4-2 zu entnehmen. Die ausgewählten Gebiete unterscheiden sich im geologischen Aufbau, in den Böden und der Baumartenzusammensetzung. Sie haben ähnliche Immissionen. Vier in sich homogene Versuchsflächen, zwei Fichten- und zwei Buchenbestände auf unterschiedlichen Untergrund (Stubensandstein und Lias-Knollenmergel), erlaubten die Untersuchung der wichtigsten Standortverhältnisse. Die dort gewonnenen Ergebnisse ermöglichten die Übertragung auf zunächst 4 kleine, relativ homogene Einzugsgebiete (mit 2 Teileinzugsgebieten) und dann 2 größere, mit insgesamt uneinheitlichen natürlichen Gegebenheiten ausgestattete Gebiete (topologisch-synthetischer Ansatz). Die zwei großen Einzugsgebiete (Großer Goldersbach am Pegel 1 im westlichen Schönbuch und Kirnbach am Pegel 5/1 im östlichen Schönbuch) waren ihrerseits durch Unterschiede in Untergrund, Relief und Böden voneinander abzugrenzen. Ein zweiter Ansatz, z.B. betreffend den Gesamtstoffaustrag der Einzugsgebiete, bestand in großflächigeren Untersuchungen, die eine Integration von lokal

wechselnden Verhältnissen, wie sie in vielen Nachbargebieten ebenso angetroffen werden, liefern.

Wie auch in anderen Mittelgebirgslandschaften Deutschlands sind im Schönbuch-Waldgebiet mehrgliedrige Schuttdecken vorhanden (vgl. BIBUS, 1986). Die periglazialen Deckschichten bildeten das Ausgangssubstrat für die holozäne Bodenbildung. Trotz unterschiedlicher Bodentypen herrscht oft eine enge Beziehung zwischen Bodenhorizonten und den vertikal gegliederten Schuttdecken, die in häufig zweischichtigen Böden (forstwirtschaftlich als Sand- und Lehmkerfe bezeichnet) das Auftreten von Interflow in durchlässigerem Deckschutt über schlechter durchlässigem Mittel- oder Basisschutt begünstigen. Das Schönbuchgebiet stellt damit für Untersuchungen zur Rolle des Interflow im Abflußgeschehen ein gut geeignetes Untersuchungsgebiet dar.

In den bisher nur in östlichen Teilgebieten des Schönbuchs durchgeführten Untersuchungen zur Abflußbildung und Komponentenseparation (KÖRNER et al., 1986) wurde qualitativ ein deutlicher Einfluß des Interflow auf das Abflußgeschehen erkannt. Spezielle quantitative Untersuchungen sollten den bisherigen Kenntnisstand erweitern und auch den westlichen Teil des Schönbuchs mit repräsentativen Detailuntersuchungen erfassen.

Neben den bisher genannten Kriterien spielte auch die Nähe und gute Erreichbarkeit bei der Auswahl der Untersuchungsgebiete eine wichtige Rolle. Die Notwendigkeit, ereignisorientierte Beprobungen durchzuführen, ließ keine Ausdehnung auf andere, im Rahmen des BMFT-Projektes bearbeitete Gebiete zu.

3.2 Geologie und Hydrogeologie im Überblick

Der Schönbuch liegt im Bereich der Keuper-Lias-Stufe der südwestdeutschen Schichtstufenlandschaft und zeigt das typische Schichtstufenrelief des Keuperberglands. Das Gebiet wird von den Schichten des mittleren (km1 - km5) und oberen Keupers (ko) sowie des untersten Lias (Lias α) aufgebaut. Der Wechsel von harten und weichen Gesteinen bedingt eine engräumig gegliederte Landschaft. Karbonatisch und kieselig gebundene Sandsteine sowie Kalksteine bilden heute weite Plateaus, Ton- und Mergelgesteine dagegen z.T. steil abfallende Hänge. Drei Schichtstufenbildner sind dabei von besonderer Bedeutung: Stubensandstein (km4), Rätssandstein (ko) und die harten Sand- und Kalksteinfolgen des Lias α (Abb. 3-1).

Das Gebiet wird von den Störungssystemen der herzynisch verlaufenden Hildrizhäuser Verwer-

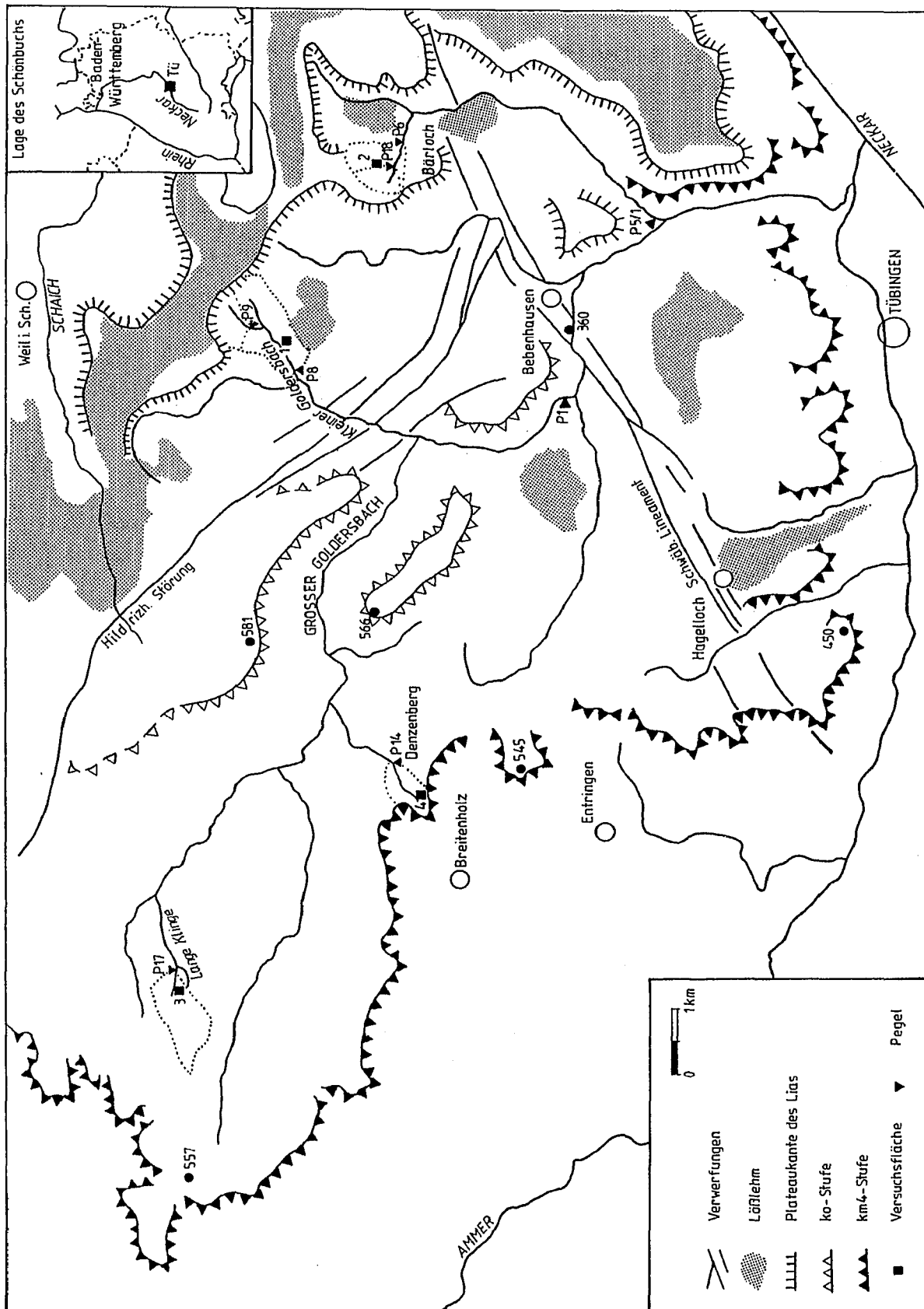


Abb. 3-1: Geologisch-geomorphologische Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes mit der Lage der Versuchsflächen und den kleineren Teileinzugsgebieten an den Pegelmeßstellen P 17 und P 14 in der westlichen Stubensandstein- sowie P 8 (mit P 9) und P 6 (mit P 18) in der östlichen Knollenmergel-Lias-Landschaft. Verändert nach einer Vorlage von BIBUS (1986).

fung und des variszisch verlaufenden Schwäbischen Lineaments (Bebenhäuser Graben) durchzogen. Die Stubensandstein-Verebnung im Südwestteil des Schönbuchs entwässert allgemein in Richtung des größten Schichteinfallens nach SE.

Eine ausführliche Beschreibung des geologischen Aufbaues des Untersuchungsgebietes sowie Hinweise auf die zahlreichen, bisher durchgeführten geologischen Untersuchungen geben AGSTER (1983), EINSELE und AGSTER (1986) sowie FLECK (1987).

Hydrogeologisch von Bedeutung ist das Auftreten der ersten Sandsteinbank im Stubensandstein, an deren Basis häufig Quellen austreten. Der Stubensandstein erreicht im Untersuchungsgebiet eine Mächtigkeit von 35 - 50 m. Er besteht aus einer Wechselfolge von mehrere Meter mächtigen, meist grobkörnigen Sandsteinbänken und sandigen Mergelbänken. Die klüftigen Sandsteine dieses Schichtgliedes stellen den wichtigsten Grundwasserleiter und -speicher im Untersuchungsgebiet dar.

Über den hangenden, teilweise steilen Knollenmergel (km5)-Hängen mit oft mächtigen, tonig-lehmigen Verwitterungs- und Solifluktiondecken, folgt die zweite markante Schichtstufe und Verebnungsfläche aus Rät (ko), das nur zum Teil im Untersuchungsgebiet vertreten ist, oder unterem Lias.

Die Basis des kalkfreien, harten, quarzitischen, feinkörnigen und stark geklüfteten Rätssandsteins, der maximal 10 m Mächtigkeit erreicht, stellt über den dichten Knollenmergeln (km5) ebenfalls einen wichtigen Quellhorizont dar. Auch die klüftigen Kalk- und Kalksandsteinbänke des 25 m mächtigen unteren Lias bilden einen wichtigen Quellhorizont im Untersuchungsgebiet.

Plateauflächen mit 0 - 3° Neigung nehmen ca. 31% der Gesamtfläche ein. Das übrige Gebiet besteht aus Hängen verschiedener Neigung. Fläche (3 - 7°) und mittelsteile Hänge (7 - 15°) nehmen mit 55% einen großen Flächenanteil, besonders auf den Tongesteinen des Keupers und Lias ein. Sehr steile Hänge mit Neigungen über 15° sind mehr im West- und Südwestteil verbreitet und nehmen ca. 14% der Gesamtfläche ein.

3.3 Deckschichten und Böden

Im Keuper-Lias-Bergland sind Bildungen der ausgehenden letzten Eiszeit in Form von periglazialen Umlagerungen und äolischen Sedimenten verbreitet erhalten. Auf den Hochflächen, insbesondere im Bereich des Lias α , wird fast überall eine unterschiedlich mächtige, weitgehend verlehmtete Lößauflage angetroffen. Nur bei größerer Mäch-

tigkeit von bis zu 3 m ist in tieferen Teilen des Bodenprofils noch karbonathaltiger Löß zu finden. Auf den Hängen lagern solifluidale Schuttdecken mit mehrgliedrigem Aufbau. In den Talauen überwiegen Auelehme.

Neben BIBUS (1986), der sich eingehend mit dem Aufbau der Deckschichten im Schönbuch beschäftigte, finden sich weitere Detailinformationen zu diesem Themenkomplex in den Arbeiten von SCHMIDT-WITTE (1985), ELGNER et al. (1986), MÜLLER und LANGBEIN (1986) sowie FLECK (1987).

Nahezu im gesamten Untersuchungsgebiet lassen sich die Deckschichten in lößhaltigen und skelettreichen Deckschutt und lößfreien Basisschutt gliedern. Nur auf Verebnungsflächen kann stellenweise ein steinarmes und lößlehmhaltiges Mittelschutt eingeschaltet sein. Der Basisschutt setzt sich aus dem verwitterten anstehenden Festgestein zusammen. Das Ausgangsgestein bestimmt die Korngrößenzusammensetzung bzw. den Skelettanteil, wobei jedoch ein Gehalt von meist mehr als 50% Ton am Feinerdeanteil den Basisschutt vom Deckschutt mit geringerem Tongehalt unterscheiden läßt.

Die Deckschichten auf den verwitterungsresistenteren Sand- und Kalksteinen des Lias α und des Rät besitzen oft einen hohen Steingehalt in der tonigen Grundmasse. Dagegen weisen die Solifluktionsschichten mit Stubensandsteinmaterial einen höheren Sandanteil auf, da die groben, kaolinig gebundenen Sandsteine unter periglazialen Bedingungen zu raschem Zerfall durch Frostsprengung neigten. Der Basisschutt kann eine Mächtigkeit von bis zu mehreren Metern erreichen. Der Deckschutt ist flächenhaft in einer Mächtigkeit von 30 - 60 cm in der jüngeren Tundrenzeit entstanden. Holozäne Abtragungen sind mit Ausnahme der in historischer Zeit stark anthropogen genutzten Gebiete als unbedeutend anzusehen (ELGNER et al., 1986).

Die vertikal gegliederten Schuttdecken bildeten das Ausgangssubstrat für die holozäne Bodenbildung. In Abhängigkeit von der unterschiedlichen Zusammensetzung der Schuttdecken entstanden verschiedene Bodenprofile (und -typen), deren Horizonte eng mit den Schuttdeckengrenzen verbunden sind. Es herrschen zweischichtige Böden (forstwirtschaftliche Bezeichnung: Sand- und Lehmkerfe) vor. Ergänzend zu den Daten aus dem Schönbuchprojekt wurden im Rahmen des gemeinsam durchgeführten BMFT-Forschungsvorhabens (FLEGR et al., 1989) von Herrn MONN, Universität Hohenheim, detaillierte Aufnahmen der in den Versuchsflächen angetroffenen Bodenprofile sowie eine Ermittlung der wichtigsten bodenphysikalischen Kenngrößen vorge-

nommen (vgl. dazu Kap. 3.4.3).

Der meist zweischichtige Aufbau der Deckschichten beeinflusst die Abflußbildung mit Interflow (vgl. Kap. 2.3). Der allgemein steinreiche, 30 - 60 cm mächtige Deckschutt weist einen hohen Grobporenanteil auf und stellt den Hauptwurzelraum dar. An dem Übergang zum liegenden, feinkörnigen Basisschutt nimmt die hydraulische Leitfähigkeit mehr oder weniger sprunghaft ab (vgl. Beschreibung der Teileinzugsgebiete und Versuchsflächen, Kap. 3.4f. und Abb. 3-2 in Kap. 3.4.3). Ein oberflächennaher, hangparalleler Interflow kann in Grobporen, Klüften oder Grabgängen und Wurzelröhren schon dann wirksam werden, wenn sich Wasser an dieser "Grenzschicht" staut, also noch ehe diese gut durchlässige Schicht vollständig wassergesättigt ist (KIRKBY, 1978).

3.4 Teileinzugsgebiete und Versuchsflächen

Die Hauptuntersuchungen konzentrierten sich auf 4 Teileinzugsgebiete, die sich bezüglich der Merkmale geologischer Aufbau, Böden bzw. Bodeneigenschaften und Baumartenzusammensetzung in der Weise unterscheiden, daß der Einfluß einzelner Gebietsunterschiede auf den Wasser- und Stoffhaushalt bzw. die Abflußbildung erkennbar werden kann (z.B. ähnlicher geologischer Aufbau, unterschiedlicher Baumbestand und umgekehrt). Die dazugehörigen Versuchsflächen repräsentieren je einen Bestand der Hauptbaumart. Zur Lage der Untersuchungsgebiete, die i.f. teilweise auch nach ihren Pegelmeßstellen benannt werden (vgl. Abb. 3-1 und Kap. 4, Abb. 4-1, Meßstellennetz).

Es wurden untersucht:

2 Stubensandstein-Gebiete im westlichen Schönbuch:

- Obere Lange Klinge, Pegel P 17, mit Versuchsfläche S 3 (Fichte)
- Denzenberg, Pegel P 14, mit Versuchsfläche S 4 (Buche/Eiche)

2 Gebiete in der Knollenmergel-Lias-Landschaft im östlichen Schönbuch:

- Kleiner Goldersbach, Pegel P 8, mit Versuchsfläche S 1 "Schlagbaumlinde" (Fichte)
- Bärloch, Pegel P 6, mit Versuchsfläche S 2 (Buche)

Ferner wurden die Teileinzugsgebiete

- Josefsruh, Pegel P 9 (Teilgebiet von P 8) und
- Oberes Bärloch, Pegel P 18 (Teilgebiet von P 6) besonders im Hinblick auf die Abflußbildung mit Interflow untersucht.

Als größere, heterogen aufgebaute Einzugsgebiete, die eine höhere Integrationsebene darstellen, wurden das den Nordwestteil des Schönbuchs umfassende Gebiet

- Großer Goldersbach, Pegel P 1, mit den Teilgebieten P 8, P 9, P 14, P 17 (vgl. Kap. 3.4.1), und das im Ostteil gelegene Gebiet
- Kirnbach, Pegel P 5/1, mit den Teilgebieten P 6 und P 18 (vgl. Kap. 3.4.2) erfaßt.

Einen Überblick über die Geologie der Einzugsgebiete und weitere wichtige Gebietsparameter gibt Tab. 3-1. Die im folgenden gewählte Reihenfolge der Einzugsgebiete unterscheidet die großen Gebiete im West- und Ostteil (P 1 und P 5/1) und richtet sich bei der Reihenfolge der Teilgebiete nach ansteigenden Pegelnummern.

3.4.1 Einzugsgebiet Großer Goldersbach (P 1) und Teileinzugsgebiete

Einzugsgebiet Großer Goldersbach bis zum Pegel Bebenhausen (P 1)

Der Große Goldersbach und seine Zuflüsse entwässern bis zum Pegel Bebenhausen fast den gesamten westlichen Schönbuch mit einem Einzugsgebiet von 37,6 km². Es überwiegen die Sandsteinflächen des mittleren und oberen Keupers gegenüber den Keuper- und Liasmergeln mit Lößlehmauflage. Weit verbreitet sind deshalb Böden mit sandigem Deckschutt (Sandkerfe). Die Verteilung von Nadelwald zu Laubwald im Verhältnis 60/40 entspricht der mittleren Bestandesverteilung des gesamten Goldersbachgebietes (72 km²).

Teileinzugsgebiet Kleiner Goldersbach (P 8)

Dieses zu 2/3 mit Nadelwald bestockte Einzugsgebiet liegt am Nordrand des Schönbuchs im Übergangsbereich zwischen der Stubensandstein-Landschaft im Westen und der Lias-Knollenmergel-Landschaft im Osten.

Auf der Stubensandstein-Verebnung ist allgemein tonreicher Basisschutt unter schluffreichem, sandarmem Deckschutt anzutreffen. Bei geringeren Deckschuttmächtigkeiten und zunehmendem Staunässeinfluß herrschen Pseudogleye und Pseudogley-Parabraunerden vor. An Hangkanten bei freiliegenden km⁴-Sandsteinbänken, die häufig flache Quellaustritte bilden, werden Podsole bzw. podsolige Braunerden angetroffen. Deckschichten mit höheren Sandgehalten (Sandkerfe) weisen nutzbare Feldkapazitäten (nFk) zwischen 90 und 120 mm auf, wohingegen für Lehmkerfe (durch

Tab. 3-1: Größe der Einzugsgebiete, Verbreitung der geologischen Einheiten, mittlere nutzbare Feldkapazität der Böden (nFk), Anteile des Laub- und Nadelwaldes (Lb bzw. Nb) am Gesamtbestand und Reliefenergie (verändert nach Vorlage aus AGSTER, 1986a).

Meß- stelle	F _N (km ²)	km1	km2	km3	km4	km5	ko	(Flächenanteile in %)			nFk (mm)	Lb/Nd (%)	Relief- energie m/km ²
								Lias	Löß (-lehm)	Aue- sed.			
P 1	37,580	3	4	14	47	15	7	4	3	3	120	40/60	6
P 8	1,109	-	-	-	25	46	-	14	15	-	120	33/67	78
P 9	0,368	-	-	-	-	59	-	22	19	-	120	78/22	190
P 14	0,185	-	-	16	84	-	-	-	-	-	90	81/19	368
P 17	0,344	-	-	-	100	-	-	-	-	-	110	20/80	76
P 5/1	9,060	-	-	1	8	30	1	38	19	3	120*	50/50	19
P 6	0,380	-	-	-	-	5	-	76	19	-	95	89/11	145
P 18	0,113	-	-	-	-	-	-	73	27	-	85	100/0	178

* gemäß frdl. mündl. Mitteil. von Herrn Dr. FLECK, Geologisches Landesamt, Freiburg

Aufarbeitung von km4-Tonen) standortbezogen günstigere nFk-Werte zwischen 120 und 160 mm ermittelt wurden (FLECK, 1987). Die Verteilung der nutzbaren Feldkapazitäten in den Einzugsgebieten (dargestellt in Abb. A-3-1 im Anhang) gibt Hinweise auf die Ausbildung der Deckschichten.

Über die km5-Hänge ziehen sich stark mit lehmig-steinigem Material aus dem hangenden Lias durchsetzte Deckschichten. Das liegende tonige Substrat verhindert weitgehend eine Tiefensickerung. Es liegen Braunerde-Pelosole bzw. Pelosole in Abhängigkeit von der Mächtigkeit des Deckschuttes vor.

Die Deckschichten des Lias α zeigen sich als gelbliche Verwitterungslehme mit oft hohem, aus Angulatensandstein (Lias α 2) bestehendem Skelettanteil. Bei sehr gering geneigten bis ebenen Lagen ist Staunässe zu beobachten. Als Bodentypen sind Pseudogley-Parabraunerden die Regel.

Die zweischichtigen, tongründigen Böden begünstigen das Auftreten von Interflow und verhindern eine starke Tiefensickerung bzw. Grundwasserneubildung (vgl. dazu Porenverteilung in den untersuchten Bodenprofilen, Abb. 3-2, Kap. 3.4.3). In Trockenzeiten kann es in den plastischen, verwitterten km5-Tonen zur Bildung von Schrumpfrissen und damit zu einer erhöhten Wasserwegsamkeit kommen.

Wegen des hohen Anteils der schlecht durchlässigen Böden (Flächenanteil von km5 + Lias + Löß = 75%) ist mit erhöhten Q_{on} zu rechnen. Als Grundwasserleiter dominiert der Stubensandstein, der teils mit tiefer gelegenen und teils mit flachgründigen Quellen erfaßt wird. Grundwasser aus dem Lias α strömt wegen der nach Norden einfallenden Schichtlagerung nur bei hohem Füllungsgrad des Aquifers in das Einzugsgebiet von P 8. Der Abstrom des Lias-Grundwassers führt zu einer kleineren Größe (0,85 km²) des unterirdischen Einzugsgebietes (AGSTER, 1983).

Teileinzugsgebiet Josefsruh (P 9)

Das 0,37 km² große, insgesamt homogene Einzugsgebiet ist zu fast 80% mit Laubwald bestanden. Mit 60% herrscht Knollenmergel gegenüber etwa gleichen Anteilen von Lias und Löß vor. Der Vorfluter verläuft in den Deckschichten und führt neben Q_{on} zeitweise auch Grundwasser aus dem Liasaquifer, das nur bei hohem Füllungsgrad in das Gebiet strömt (vgl. Gebiet P 8). Eine meist nur im Winterhalbjahr schüttende Überlaufquelle (Jockelesbrunnen, Q 31) bestätigt einen mit dem Schichteinfallen nach Norden gerichteten Abstrom des Lias-Grundwassers, der zu einem unterirdischen Einzugsgebiet von 0,20 km² führt.

Teileinzugsgebiet Denzenberg (P 14)

Das nur 0,185 km² große Einzugsgebiet liegt am Rand der Stubensandsteinstufe (Abb. 3-1). Infolge einer Schichtaufwölbung in diesem Bereich fällt der Stubensandstein nach NE ein. Der Vorfluter verlauf folgt dem Schichteinfallen. Das steile Einzugsgebiet läßt sich wegen der gebietstypischen Morphologie (keine km4-Verebnung sondern nur eine am Rand auftretende Verflachung des oberen km4) gut abgrenzen. Fast das gesamte, mit Flächenanteilen von 84% km4 und 81% Laubwald recht homogene Einzugsgebiet, wird von Hangflächen eingenommen.

Deck- und Basisschutt sind im gesamten Gebiet fast durchgehend ausgebildet (FLECK, 1987). Braunerde-Pelosole und Braunerden-Parabraunerden mit relativ hoher nFk (90 - 120 mm) sind auf den Talhängen verbreitet. Nur über morphologisch als Kanten auszumachenden Sandsteinbänken fehlt der Basisschutt und der Deckschutt ist nur gering (bis 20 cm Mächtigkeit) ausgebildet. Dort treten podsolige Sandböden mit nur geringer nFk (60 - 90 mm) auf. Wegen hoher hydraulischer

scher Leitfähigkeiten im Deckschutt bleiben Pseudogley-Merkmale auf die Böden der flacheren Oberhänge beschränkt. Als durchschnittliche nutzbare Feldkapazität sind 90 mm anzusetzen (vgl. Abb. A-3-1 im Anhang und Abb. 3-2, Kap. 3.4.3).

Der Vorfluterpegel befindet sich unter der Basis des km4-Aquifers, sodaß der gesamte Grundwasserabfluß erfaßt werden kann. Quellwasser tritt an der km4-Basis ganzjährig und aus oberen, flacheren Bereichen nur vorübergehend aus.

Teileinzugsgebiet Obere Lange Klinge (P 17)

Das 0,344 km² große, homogene und im Vergleich zu P 14 flachere Teileinzugsgebiet liegt am Westrand des Untersuchungsgebietes auf einem ausgedehnten, schwach nach Osten einfallenden Stubensandsteinplateau (vgl. Abb. 3-1).

Der Vorfluter hat sich in dem zu 80% mit Nadelwald bestandenen Gebiet bis zu 7 m in die oberen Stubensandsteinhorizonte eingetieft. Deshalb wird hier nur der Grundwasserabfluß aus den oberen km4-Horizonten erfaßt. An der Basis einer Sandsteinbank treten auf Vorfluterniveau flache Quellen mit ganzjähriger Schüttung aus.

Auch in diesem Einzugsgebiet treten die Deckschichten in Form von lößhaltigem, grobkörnigem Deckschutt und lößfreiem, feinkörnigem Basischutt über Stubensandstein auf. So sind Sandkerfe, zweischichtige Böden mit lehmigem Sand über sandig-lehmigem Ton und nFk-Werten von 100 - 140 mm, dominierend. Auswirkungen von Stau-nässe sind in verschiedenen Graden zu beobachten. An Stellen, wo der Basisschutt fehlt, treten auch podsolige Braunerden bis Podsole auf. Dies sind insbesondere die Gebiete, wo Sandsteinbänke inselartig an die Oberfläche treten und als Ausgangssubstrat für die Bodenbildung dienen. Diese ungünstigen Standorte besitzen nFk-Werte von 60 - 90 mm (vgl. Abb. A-3-1 im Anhang).

Auf den tongründigen Böden findet, wegen der mit zunehmendem Tongehalt geringeren hydraulischen Leitfähigkeit, wie auch in den anderen Gebieten, eine flache Entwässerung über Interflow statt (vgl. Abb. 3-2, Kap. 3.4.3). Dagegen begünstigen reine Sandstandorte (ohne tonigen Basischutt) die Neubildung von Grundwasser.

3.4.2 Einzugsgebiet Kirnbach und Teileinzugsgebiete im Bärloch

Einzugsgebiet Kirnbach (P 5/1)

Die Meßstelle P 5/1 erfaßt das im östlichen Teil

des Schönbuchs gelegene, 9,06 km² große Einzugsgebiet des Kirnbachs kurz vor seiner Mündung in den Goldersbach. Dieses, neben dem Gebiet großer Goldersbach (P 1), zweite übergeordnete Mischgebiet weist ein ausgeglichenes Verhältnis von Laub- zu Nadelwald auf. Die Flächenanteile der für die östliche Schönbuch-Landschaft bestimmenden geologischen Einheiten Knollenmergel und Lias liegen bei ca. 30 bzw. 38%. Die Kalksand- und Kalksteinbänke des Lias α stellen vor allem im oberen Teil des Untersuchungsgebietes (vgl. Gebiet P 6, Kap. 3.4.2) einen wichtigen Aquiferhorizont dar. Im unteren Teil tritt Grundwasser aus dem vollständig aufgeschlossenen Stubensandstein hinzu. Quer durch das Kirnbachgebiet verläuft die Bebenhäuser Verwerfung (Abb. 3-1). Frühere Untersuchungen ergaben keine dadurch bedingten Auswirkungen auf die Wasserführung. Aufgrund vorangegangener (AGSTER, 1983) und eigener Wasserhaushaltsberechnungen konnte, gemäß der (wenn auch nicht ganz eindeutigen) Schichtlagerung und dem Fehlen von Quellen an der Nordseite des Liasplateaus im nördlichen Gebietsteil, ein unterirdisches Einzugsgebiet (F_u) auf ca. 11 km² abgeschätzt werden.

Das weit verbreitete tonige Substrat der Böden auf Lias- und km5-Fließerden ermöglicht einen starken Interflow. Meist tritt Deckschutt über Basisschutt auf, wobei der Deckschutt in der Regel sehr schluffreich und in seiner maximalem Mächtigkeit von 40 - 60 cm weite Teile des Gesamtgebietes einnimmt. Die durchschnittliche nFk kann mit 120 mm (mündl. Mitt. von Herrn Dr. FLECK) angesetzt werden.

Teileinzugsgebiet Bärloch (P 6)

An der Pegelmeßstelle P 6 wird ein 0,38 km² großes ($F_u = 0,46$ km², AGSTER, 1983), zu 89% mit Buchen bestandenes Einzugsgebiet eines Seitenzuflusses im oberen Kirnbachgebiet erfaßt. Der Vorfluter entwässert einen Teil des in diesem Bereich flach nach SE zum Kirnbachtal einfallenden Liasplateaus, das fast ausschließlich von Schiefertönen sowie Kalk- und Kalksandsteinbänken des Lias α aufgebaut wird. Einen ausgeprägten Quellhorizont bildet der Lias $\alpha 1$ (Psilonotenkalk).

Die Deckschichten im höher gelegenen Westteil sind geringmächtig und sehr steinreich. Angulatsandsteine treten oft bis an die Oberfläche. Diese flachgründigen Böden haben nutzbare Feldkapazitäten von nur 60 - 90 mm (vgl. Abb. A-3-1 im Anhang). Weiter nach Osten nimmt die Mächtigkeit des mit den verwitterungsresistenten Angu-

Tab. 3-2: Zusammenfassung wichtiger Charakteristika der Versuchsflächen (unter Einbeziehung der Daten von BÜCKING und KREBS, 1986 und FLECK, 1987).

	Schlagbaumlinde	Bärloch	Ob. Lange Klinge	Denzenberg
Versuchsfläche	S 1	S 2	S 3	S 4
Kurzbezeichnung	Fichte	Buche	Fichte	Buche (Eiche)
Baumart	450	480	520	520
Höhe (m ü. NN)	2900	5100	5200	3500
Größe (m ²) ca.	3°	5°	3 - 5°	5 - 15°
Hangneigung	km ⁵ /(km ⁴)	Lias α ₂	oberer km ⁴	km ⁴
Geologischer Untergrund	Pseudogley-Parabraunerde	Pseudogley-Parabraunerde	Braunerde bis Parabraunerde	schwach pseudo-vergl. Braunerde
Bodentyp	140	110	100	90
nutzbare Feldkapazität (mm)	Lehmkerf	Lehmkerf	Sandkerf	Sandkerf
Standortseinheit				

latensandsteinen durchsetzten Deckschutt zu. Darunter hat sich ein schwer durchlässiger toniger Basisschutt ausgebildet. Durch den hohen Skelettanteil aus kantigen Sandsteinen werden die nFk-Werte der relativ tiefgründigen Böden herabgesetzt und betragen nur 90 - 120 mm. Als Bodentyp sind Pseudogley-Parabraunerden vertreten.

Teileinzugsgebiet Oberes Bärloch (P 18)

Die Meßstelle P 18 erfaßt mit einer Fläche von 0,113 km² ungefähr das obere Drittel des Einzugsgebietes von P 6. Bis zu dieser Meßstelle wird der Vorfluter nur mit Grundwasser aus dem Angulatusandstein (Lias α₂) gespeist. Dazu kommt hier ein abflußrelevanter Interflow im Deckschutt über Basisschutt aus tonigen Verwitterungsdecken des Lias. Die mittlere nFk des oberen Bärlochgebietes beträgt nur 85 mm (Abb. A-3-1 im Anhang), weil gegenüber dem Einzugsgebiet von P 6 höhere Anteile von geringer mächtigen und steinreicheren Deckschichten mit nFk-Werten von 60 - 90 mm vorliegen. Das Gebiet ist vollständig, vor allem mit Buchenaltbeständen, bewaldet.

3.4.3 Versuchsflächen

Fichten-Versuchsfläche Schlagbaumlinde (S 1)

Diese Versuchsfläche wurde in einem ca. 60-jährigen Fichtenbestand mit einem für das Gesamtgebiet durchschnittlichen Bestockungsgrad eingerichtet. Sie liegt auf der schwach nach Norden geneigten Südseite der teilweise mit km⁵ und Löß überdeckten km⁴-Verebnung in 450 m Meereshöhe (Tab. 3-2). Als Bodentyp liegt eine Pseudogley-Parabraunerde mit einer in ca. 150 cm Tiefe liegenden, abdichtend wirkenden km⁵-Fließerde (Stau Masse) vor. Die durch die Lagerung von lehmig-schluffigem Deckschutt über tonigem Basisschutt bedingte Zweigliederung zeigt sich auch

in der Porenverteilung und im Leitfähigkeitsprofil (Abb. 3-2, Profil S1-1).

Nordwestlich, in Richtung Taleinschnitt, angrenzend an die Versuchsfläche, wurden an 2 weiteren unterschiedlichen Standorten Profilgruben angelegt und Sickerplatten in verschiedenen Tiefen eingebaut. Mit abnehmender km⁵-Überdeckung und zunehmendem Sandgehalt wurde dabei eine Braunerde (Profil S1-2) und direkt an der Hangkante ein Podsol (nicht dargestellt) angetroffen. Am Profil S1-2 wird eine bessere Möglichkeit zur Tiefensickerung wegen einer geringeren Abnahme des Grobporenanteils deutlich.

Buchen-Versuchsfläche Bärloch (S 2)

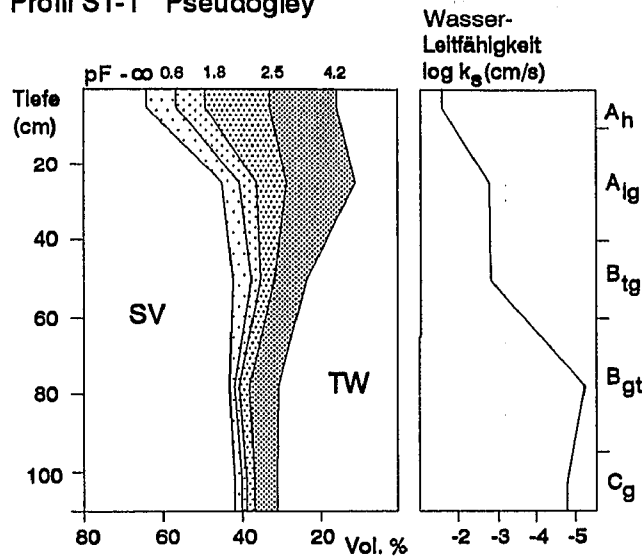
Die Versuchsfläche liegt in dem für das Gesamtgebiet typischen 80-jährigen Buchenbestand in 480 m ü. NN. Als Bodentyp liegt einheitlich eine Pseudogley-Parabraunerde mit einer nFk von 110 mm vor. An zwei Standorten wurden Profilgruben angelegt und Sickerplatten in 3 verschiedenen Tiefen eingebaut. Die gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten nehmen in den Deckschichten nach unten kontinuierlich ab. Eine deutlicher Knick in der Kurve zeigt sich beim Übergang des Deck- in den Basisschutt von 10⁻² auf 10⁻⁴ cm/s in ca. 50 cm Tiefe (Abb. 3-2). Der Anteil der Grobporen beträgt in 60 cm nur 4%.

Fichten-Versuchsfläche Ob. Lange Klinge (S 3)

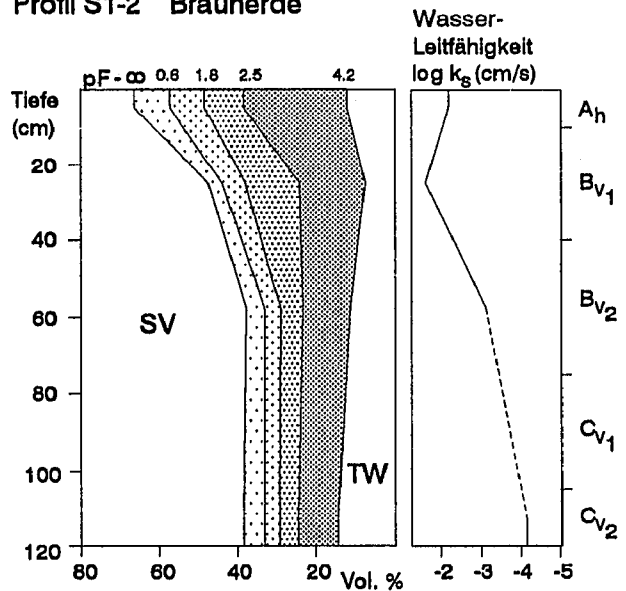
Die Versuchsfläche (in früheren Untersuchungen auch als Fläche Birnbaum bezeichnet) liegt 520 m ü. NN. Sie ist mit 90-jährigen Fichten bestanden. Der flachgründige, ab 0,65 m in das anstehende Gestein übergehende Boden hat den für das Einzugsgebiet typischen zweischichtigen Aufbau eines Sandkerfes mit lehmigem Sand als Deckschutt und sandig-lehmigem Ton als Basisschutt. In 3 Profilgruben wurde als Bodentyp eine schwach pseudovergleyte Braunerde-Parabraunerde ange-

Versuchsfläche S1 : Schlagbaumlinde

Profil S1-1 Pseudogley



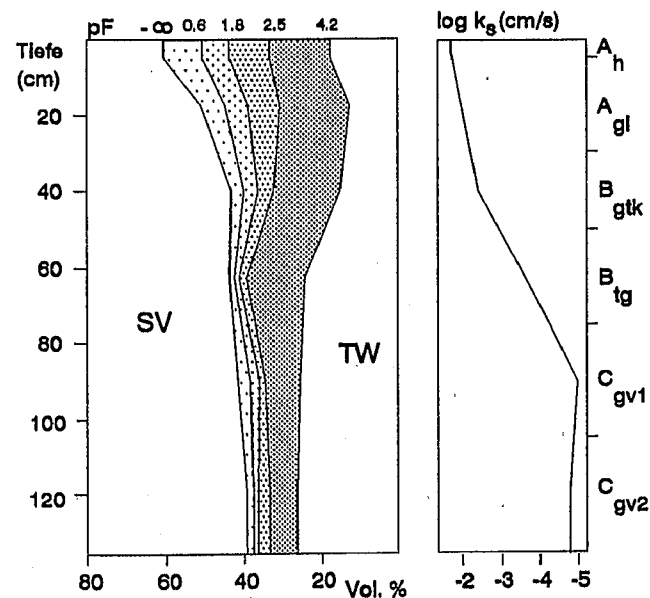
Profil S1-2 Braunerde



Versuchsfläche S2 : Bärloch

Profil S2-1,2

Parabraunerde, pseudovergleyt



Versuchsfläche S3: Obere

Lange Klinge

Profil S3-1,3

Pseudovergleyte Parabraunerde-Braunerde

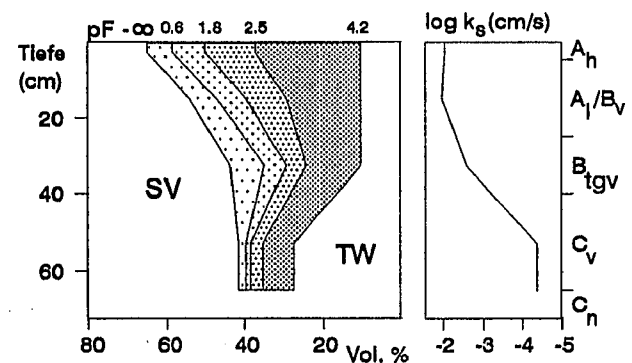
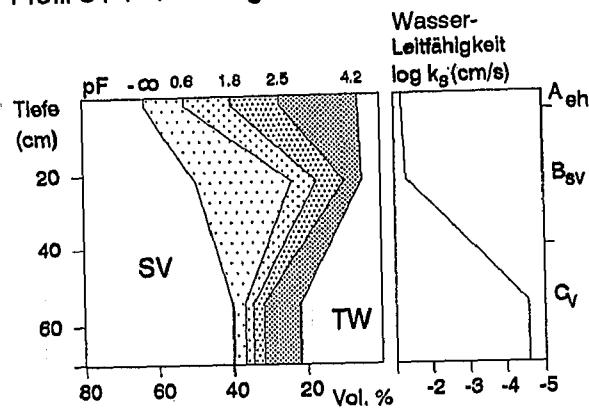


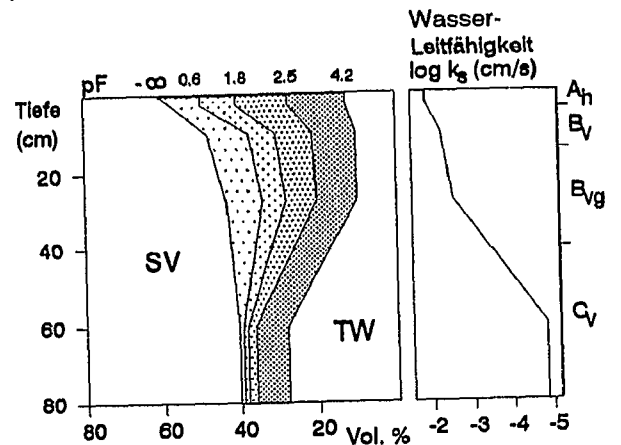
Abb. 3-2: Bodenprofile der Versuchsflächen mit Porenverteilung und gesättigter Wasserleitfähigkeit. Bestimmung der Parameter durch Herrn Dr. MONN (Zeitraum Sept./Okt. 1984) im Rahmen des gemeinsam durchgeführten BMFT-Forschungsprojektes (FLEGR et al., 1989).

Versuchsfläche S4 : Denzenberg

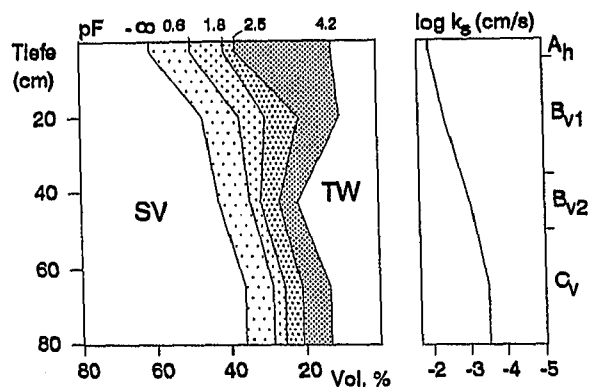
Profil S4-1 Podsolige Braunerde



Profil S4-2 Pseudovergleyte Parabraunerde



Profil S4-3 Parabraunerde



Legende:

- SV** Substanzvolumen
- pF < 0,6 Gröbstoporen
- pF 0,6 - 1,8 Weite Grobporen
- pF 1,8 - 2,5 Enge Grobporen
- pF 2,5 - 4,2 Mittelporen
- TW** pF > 4,2 Feinporen (Totwasser)

Fortsetzung Abb. 3-2

treffen. Das Gesamtporenvolumen nimmt mit der Tiefe sehr stark ab. Der Grobporenanteil verringert sich von 24% im Deckschutt auf 6% im Basisschutt (Abb. 3-2).

Buchen-Versuchsfläche Denzenberg (S 4)

Die Versuchsfläche S 4 liegt wie S 3 in 520 m ü. NN und ist mit im Durchschnitt 115-jährigen Buchen und einzelnen Eichen bestanden. Die Fläche liegt am flacheren Oberhang und ist mit 5 - 15° geneigt. Es liegen schwach pseudovergleyte Braunerden bis Parabraunerden, im oberen Testflächenbereich aber auch podsolige Braunerden vor

(Abb. 3-2, Profil S4-1).

Auf S 4 wurden an 3 verschiedenen Standorten bodenphysikalische Parameter ermittelt. Die Folge von Deckschutt über Basisschutt geht mit einem sprunghaften Rückgang der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten von ca. 10^{-2} cm/s auf ca. 10^{-5} cm/s einher. Das in unmittelbarer Nähe eines Buchenstamms angelegte Profil S4-3 bildet hier mit nach unten durchgehend ca. 8 Vol.-% Gröbstoporen eine Ausnahme (vermutlich Wurzelkanäle). Der Grobporenanteil in den Profilen S4-1 und S4-2 verringert sich von 26-38% im Deckschutt auf 4-8% im Basisschutt. Diese Zwischichtböden bieten gute Voraussetzungen für Interflow.

4. Messungen zur Erfassung des Wasser- und Stoffhaushalts

Die Erfassung des Wasser- und Stoffhaushalts erfordert, insbesondere im Hinblick auf eine Trennung von Abflußkomponenten und Stofffrachten, eine Reihe von Detailuntersuchungen. Dabei sind die Teilkomponenten des Wasserkreislaufs zeitlich und räumlich in kleinen, an die jeweilige Fragestellung und Lösungsmethode angepaßten Abschnitten zu erfassen. Dies erfordert Messungen der Menge und der chemischen Zusammensetzung sowie eine Bestimmung der Fließpfade des Wassers, das sich im Ökosystem zwischen dem Freilandniederschlag (NF) und dem Abfluß im Vorfluter (Gesamtabfluß, Q_t) bewegt. Dabei gilt es sowohl saisonale Schwankungen wie auch Änderungen bei einzelnen Hochwasser-Ereignissen zu ermitteln (vgl. dazu Abb. 2-2).

Die Konzentrationen der Hauptelemente in wäßrigen Lösungen, die die verschiedenen Ebenen eines Ökosystems passieren, geben erste Hinweise auf den Grad der Belastung eines Ökosystems durch atmosphärische Schadstoffe. Mit den zugehörigen Wassermengen sind die transportierten Stoffmengen dieses "externen" Stoffkreislaufs (vgl. EINSELE et al., 1986c) zu bilanzieren (vgl. Kap. 2.4).

Zum Untersuchungs- und Meßprogramm gehörte deshalb eine Beprobung und quantitative Erfassung des zirkulierenden Wassers, nach Möglichkeit jeweils vor und nach seiner Passage der einzelnen Teilkompartimente.

Es wurden in großem Umfang Proben von Niederschlagswässern (vor und nach der Kronenpassage), Bodenwässern (unterschiedlicher Mobilität und aus verschiedenen Tiefen), Grundwässern (aus verschiedenen Grundwasserleitern und Quellhorizonten) sowie Bachwässern entnommen und auf ihre Inhaltsstoffe (Bioelementkonzentration) untersucht.

Neben der nach Möglichkeit direkten Mengenerfassung dienten Tracerverfahren mit Sauerstoff-18, elektrischer Leitfähigkeit (oder einzelnen Ionen) zur Separation verschiedener Abflußkomponenten im Gesamtabfluß und zur Ermittlung von Verweilzeiten und Sickergeschwindigkeiten des Wassers in den verschiedenen Ebenen des Ökosystems. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Bildungsbedingungen und die Rolle des Interflow im Abflußgeschehen gerichtet. Ferner sollte der im Boden lateral stattfindende Stoffaustausch mit dem Interflow quantifiziert und Speicherungs- bzw. Auswaschungsvorgänge beschrieben werden. Dazu mußten auch Porenverteilungen in Bodenprofilen und bodenphysikalische Parameter (gesättigte Wasserleitfähigkeit, Beziehungen zwi-

sehen Wasserspannung- und Wassergehalt) bestimmt werden. Für die Wasserhaushaltsberechnungen wurden ferner Klimadaten zur Lufttemperatur und -feuchte erhoben.

4.1 Meßtechnische Erfassung der Wasserhaushaltsgrößen

Der Wasser- und Stoffeintrag eines Einzugsgebietes und Ökosystems oberhalb des Baumbestandes oder im Freiland wird durch den Freilandniederschlag (NF) erfaßt (Abb. 2-3). Der Freilandniederschlag gibt in Waldgebieten die Grundbelastung bzw. die von diversen Wirkungen lokalspezifischer Faktoren wie Bestandesart- und -dichte unbeeinflusste "Input-Größe" wieder.

Die zeitliche Verteilung und Intensität des Niederschlags im Freiland wurde von im Winter beheizbaren "Hellmann"-Niederschlagsschreibern aufgezeichnet. Zur Kontrolle von Niederschlags-teilsommen und zur Entnahme von Wasserproben dienten sowohl Totalisatoren des Typs "Hannoversch-Müнден" als auch selbst angefertigte, größere Auffangeinrichtungen mit lichtgeschützten Sammelbehältern. Durch die größeren Sammeltrichter ($F = 815 \text{ cm}^3$) konnten auch sehr geringe Niederschläge und Schneefälle separat beprobt werden. Die Beprobungseinrichtungen ermöglichten die gemeinsame Erfassung von trockener und nasser Deposition ("bulk-sampling", vgl. DVWK-Regel 122, 1984).

Der Bestandesniederschlag (NB) setzt sich aus Kronendurchlaß (Kronentraufe) und Stammabfluß zusammen. Der Kronenraum der Bäume wirkt als Filter partikulär und gasförmig transportierter Stoffe, wobei die Pflanzenoberflächen als Akzeptoren wirken. Wegen der größeren Blattoberfläche und der ganzjährigen Benadelung in Nadelwaldbeständen ist die trockene Deposition dort höher als in Laubwäldern, weshalb eine bestandsspezifische Erfassung dieses als Interzeptionsdeposition (EI) bezeichneten Stoffeintrags erfolgen muß.

Zur Konzentrationserhöhung bei der Kronenpassage tragen auch aus der Pflanze selbst ausgewaschene Stoffe bei. Die Kronenauswaschung (KA), ein Teil des internen Stoffkreislaufs, wird zusammen mit dem Bestandesniederschlag erfaßt. Durch eine Berechnungsmethode, die auf der elementspezifischen Auswaschung basiert, kann die Interzeptionsdeposition getrennt erfaßt werden. Untersuchungen während der hier vorgestellten Meßperiode wurden von FLEGR et al. (BMFT-Forschungsbericht, 1989) mit Hilfe von Schwefelisotopen ($\delta^{34}\text{S}$) durchgeführt.

Die Verdunstung von Benetzungswasser an den Baumkronen (Kroneninterzeption, I_k) bewirkt ei-

ne Reduzierung der Niederschlagsmenge bei der Kronenpassage. Durch die Messung des Bestandesniederschlags wird diese Teilgröße der Evapotranspiration bzw. die den Waldboden erreichende Niederschlagsmenge erfaßt.

Der Bestandesniederschlag wird vor dem Versickern in den Waldboden durch Streuinterzeption (I_s) und der verbleibende Nettoniederschlag (N_N) im Wurzelraum durch die Wasseraufnahme der Pflanzen (Transpiration, T) weiter reduziert und chemisch verändert (vgl. Schemaskizze in Abb. 2-2). I_s und T wurden nicht direkt gemessen, sondern auf der Grundlage früherer Meßergebnisse (FLECK, 1987) und eigener Messungen bestimmt bzw. qualitativ über die Plattenlysimeter erfaßt.

Durch Verdunstung treten prinzipiell Fraktionierungseffekte des $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnisses auf. Auch die elektrische Leitfähigkeit nimmt bei der Kronenraumpassage in der Regel deutlich zu. Die für Ganglinienseparationen notwendige Bestimmung der Tracerkonzentration der Abflußkomponente aus aktuellem Niederschlagswasser (IF_c -Komponente) muß deshalb im Bestandesniederschlag erfolgen.

Der durch das Kronendach fallende Niederschlag wurde in Testflächen mit einheitlichem Bestand mit verteilten Sammeltrichtern ($F = 815 \text{ cm}^3$) aufgefangen. Die Aufstellung erfolgte an verschiedenen, für die Kronendichte repräsentativen Positionen.

Menge und Inhaltsstoffe wurden stichprobenartig parallel auf zwei gleichen Versuchsflächen mit Untersuchungen der Forstlichen Versuchsanstalt, Stuttgart-Weilimdorf (jetzt Freiburg) verglichen. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

Der sich an Ästen sammelnde und am Stamm ablaufende Anteil des NB (Stammabfluß) ist häufig höher konzentriert als der Kronendurchlaß. Er ist bei der Erfassung des Stoffumsatzes mit zu berücksichtigen. Der Stammablauf wurde mit spiralförmig um die Stämme geklebten Ablaufrinnen und großen Auffangbehältern (ca. 150 l) zur Beprobung gewonnen. Auf Fichtenstandorten ist der Stammablauf mit 1% des NF vernachlässigbar klein (BÜCKING und KREBS, 1986). Da er aber auf Buchenstandorten mit 15% des NF (frdl. mündl. Mitt. von Dr. Bücking, FVA Freiburg, vgl. auch ELLENBERG et al., 1986) eine wichtige Rolle spielt, wurde er für diese Baumart erfaßt.

Messungen des Stoffinhalts und des ^{18}O -Gehalts der Bodenlösungen dienten zur Bearbeitung verschiedener Teilaspekte des Untersuchungsprogramms. Über Änderungen des Lösungsinhalts während der Sickerung und elementspezifische Bi-

lanzen sollten längerfristige Festlegungen oder vorübergehende Anreicherungs- und Speichereffekte beschrieben werden. Durch die mit Hilfe von $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen im Jahresgang mögliche Bestimmung der mittleren Verweilzeiten und Sickergeschwindigkeiten können Transportraten bei der Sickerung und lokale Grundwasserneubildungsraten berechnet werden. Ferner werden Bodenhorizonte erkennbar, in denen eine hangparallele Wasserbewegung stattfindet oder ein Wasserstau auftritt.

Zur Gewinnung von Boden- und Sickerwasser wurden auf Versuchsflächen an 2 - 3 Stellen in verschiedenen Tiefen von Bodenprofilen (zwischen 30 und 120 cm) Unterdrucklysimeter mit P80-Platten (keramische Platte, Luftdurchtritt bei 800 cm WS) eingebaut. An die Saugplatten wurde nach jeder Beprobung mittels einer Vakuumpumpe ein Unterdruck von ca. 600 cm Wassersäule (entsprechend einer Wasserspannung von $\text{pF} = 2,78$) angelegt. Damit konnte das Bodenwasser bis zu einem Wassergehalt der Feldkapazität ($\text{pF} 1,8 - 2,5$) gewonnen werden. Dies entspricht dem Porenwasser aus dem schnell drainierenden Bereich der weiten Grobporen (Porendurchmesser $> 50 \mu\text{m}$, $\text{pF} 0 - 1,77$) bis einschließlich der langsamer drainierenden engen Grobporen (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1982) oder Mittelporen (SCHLICHTING und BLUME, 1966) mit einem Porendurchmesser zwischen $50 - 10 \mu\text{m}$ und einer Wasserspannung von $\text{pF} 1,77 - 2,54$. Nur ein geringer Teil des mit den Plattenlysimetern gewonnenen Wassers stammt aus dem pflanzenverfügbaren Wasser über der Feldkapazität ($\text{pF} 2,5 - 4,2$).

Die Tensiometer ließen sich dank einer frostsicheren "Befüllung" mit Ausnahme der oberen 20 cm auch in den Wintermonaten betreiben. Bodenwasserspannungen waren wegen der Verwendung von P80-Material (800 cm Wassersäule) bis maximal $\text{pF} = 2,9$ zu erfassen.

Menge und Zusammensetzung des Interflow werden von der Durchlässigkeit des Deckschutts und der Bodenfeuchte mitbestimmt. Böden oder Bodenhorizonte mit unterschiedlicher Porengrößenzusammensetzung und Porenvolumen weisen unterschiedliche Beziehungen zwischen Wassergehalt (Wg) und Wasserspannung (pF) auf. Dieser Zusammenhang charakterisiert einen Boden und erlaubt Rückschlüsse auf seinen Wasserhaushalt (z.B. Speichereigenschaften, Geschwindigkeit der Entwässerung, Verfügbarkeit für Pflanzen).

In ausgewählten Profilen der Versuchsflächen wurden neben der gesättigten Wasserleitfähigkeit die pF -Wg-Kurven und die Porenverteilung der zu unterscheidenden Bodenhorizonte anhand von

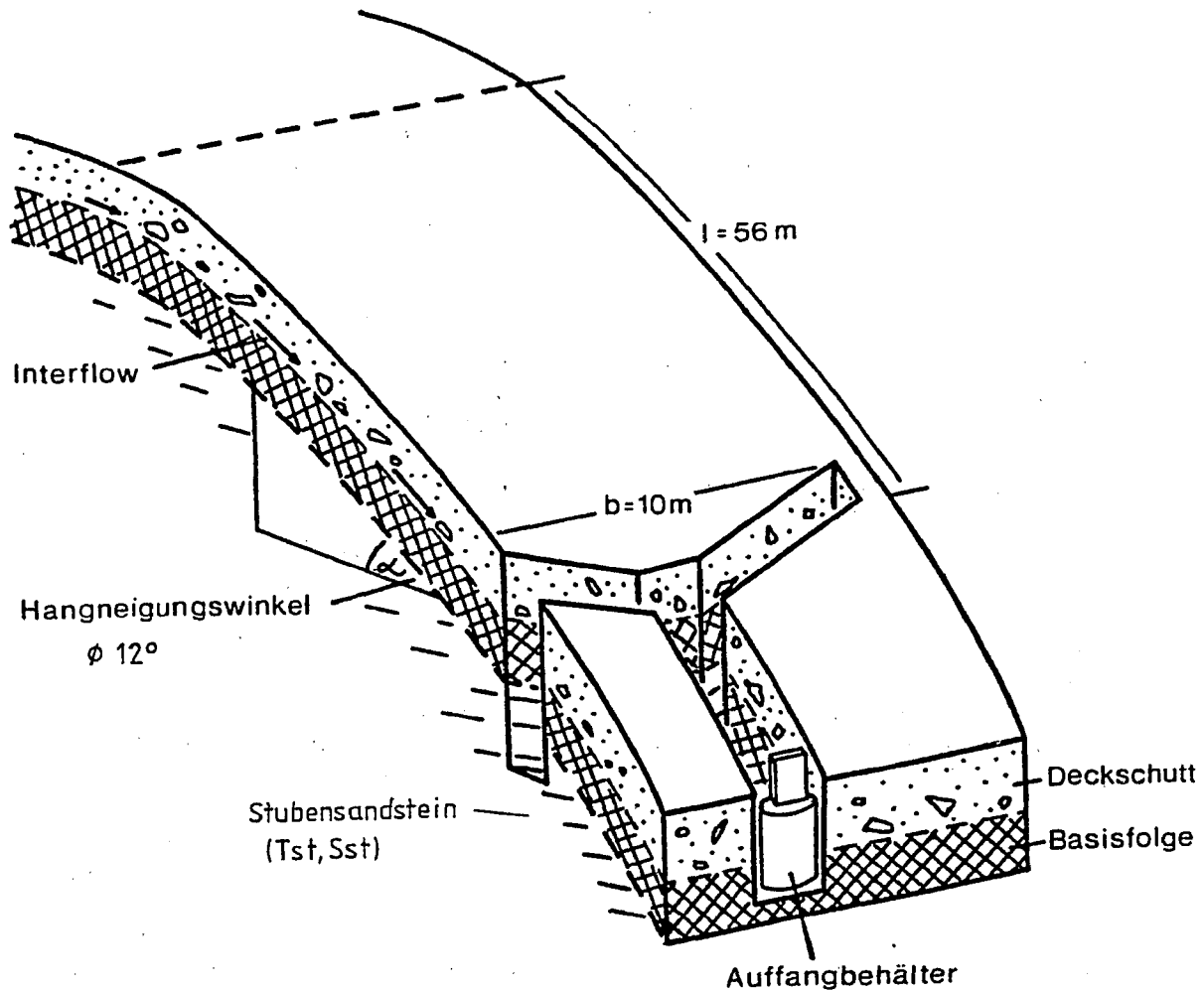


Abb. 4.1: IF-Meßstelle: Meßeinrichtung zur Erfassung des Oberflächen- und oberflächennahen Abflusses Q_{on} einer Hangfläche.

Stechzylinderproben im Labor (Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim) ermittelt (vgl. Kap. 3.4, Abb. 3.2). Im Gelände wurden die Wasserspannungen kontinuierlich in verschiedenen Bodenhorizonten mittels Einstichtensiometer gemessen. Aus Messungen der pF-Werte in verschiedenen Tiefen (bei bekannter pF-Wg-Beziehung auch über Wassergehaltsbestimmungen) wird erkennbar, ob und in welchem Bodenhorizont leicht drainierendes Wasser ($pF < 1,8$) oder stärker gebundenes ($pF 1,8 - 2,5$) Wasser einem oberflächennahen Abfluß zur Verfügung stehen kann.

Neben den indirekten Möglichkeiten zur Erfassung des Interflow über Unterdrucklysimeter und die Messungen der Wasserspannungen wurde eine IF-Meßanlage konzipiert (Abb. 4-1, vgl. auch Abb. 2-2), die eine permanente, direkte Möglichkeit zur Beprobung und Mengennmessung des sich

oberflächennah bewegendes Wassers (Q_{on}) erlaubt. Die Ergebnisse der direkten und indirekten Erfassung des Q_{on} (s.o) sollten bzgl. der chemischen Zusammensetzung und des Fließpfades (Wasserstaubildung über dem Basisschutt) verglichen und auf eine Übertragbarkeit für andere Gebiete, in denen keine permanente IF-Meßstelle zur Verfügung stand, überprüft werden.

Mit der Möglichkeit zur direkten Interflow-Beprobung konnte sowohl die modellhaft unterschiedene 2. Abflußkomponente aus Vor-Ereignis-Bodenwasser (IF_{pe} -Komponente) gemessen und beprobt werden, als auch die Zusammensetzung des als Q_{on} abfließenden Bodenwassers aus den Komponenten IF_e und IF_{pe} zeitlich und quantitativ untersucht werden.

Ein wesentlicher Vorteil einer IF-Meßeinrichtung gegenüber Plattenlysimetern (indirekte Methode, s.o.) besteht darin, daß quantitative und

qualitative (chemische und isopenchemische) Änderungen des Interflow, insbesondere auch während N-Q-Ereignissen, direkt erfaßt werden konnten. Die Ergebnisse der IF-Meßstelle konnten auf das Gesamteinzugsgebiet übertragen und mit den Ergebnissen spezieller Ganglinienseparationen mit der Abtrennung des Interflow im Gesamtabfluß verglichen werden (vgl. Kap. 8.4.3.f.).

Die IF-Meßstelle wurde am Rand der Testfläche S 4 im Einzugsgebiet Denzenberg an einer geeigneten, für das Gesamtgebiet repräsentativen Stelle gebaut. Dieses Gebiet (vgl. Kap. 3.4.1 und Abb. A-3-1 im Anhang) besteht größtenteils aus Hangflächen mit recht einheitlichem Boden- und Bestandescharakter, sodaß mit der getroffenen Gebietsauswahl das Interflow-Verhalten einer abgegrenzten kleinen Hangfläche mit dem des gesamten Gebietes (IF-Abflußteil im Vorfluterabfluß Q) verglichen werden konnte.

Die Meßeinrichtung bestand aus einem 10 m breiten und einem hangabwärts verlaufenden, etwa Ypsilon-förmigen Graben, der die Deckschichten aus Deckschutt und Basisschutt vollständig durchschnitt und bis in die dort an Hängen vorherrschenden bröckeligen Mergel des Stubensandsteins reichte (Abb. 4-1). Die Länge des entwässerten, durchschnittlich ca. 12° geneigten Hangstreifens war durch einen 56 m entfernten, quer zum Hang verlaufenden Wegeinschnitt klar abzugrenzen.

Der bis zu einem Auffangbehälter stets in den unverwitterten Mergeln des Stubensandsteins verlaufende Graben wurde im Sohlbereich mit einer Plastikfolie ausgekleidet, die in der hangseitigen Grabenwand im Übergangsbereich zwischen Basisschutt und Anstehendem befestigt wurde. Zum Schutz gegen direkt in den Graben fallenden Niederschlag wurde die gesamte Grabenkonstruktion mit Folien abgedeckt. Da in den unverwitterten Stubensandstein-Mergeln keine nennenswerte Wasserbewegung stattfindet, wird der gesamte Interflow aus den Deckschichten in den Gräben aufgefangen. Mit Hilfe eines Schwimmer-Schreibers auf dem 140 Liter fassenden Auffanggefäß konnte die Interflow-Menge aus der Testfläche mit seiner Zu- und Abnahme im zeitlichen Verlauf aufgezeichnet werden.

Neben der ständig betriebenen IF-Meßstelle auf der Versuchsfläche Denzenberg konnten direkte Beprobungen des Interflow an weiteren, neu angelegten oder bereits bestehenden Aufgrabungen oder natürliche Gräben (Hanganschnitten) in den Gebieten Denzenberg (P 14), Kleiner Goldersbach (P 8) und Bärloch (P 6), durchgeführt werden. Dort konnte, während und nach N-Q-Ereignissen, aus dem angeschnittenen Bodenprofil sickern Wasser beobachtet und mit provisorisch installier-

ten Probenflaschen aufgefangen werden.

Weitere Möglichkeiten zur Beobachtung und Beprobung des Interflow boten die Pegelmeßstelle P 9, Josefsruh (Bachverlauf weitgehend in den Deckschichten, vgl. Kap. 3.4.1) und nur sporadisch schüttende Quellen, die zu einem gewissen Teil aus den Deckschichten gespeist werden (vgl. Kap. 2.3 und Abb. 2-2.).

Bei (lokal) durchlässigen oder fehlenden Deckschichten erreicht ein bestimmter Teil des Sickerwassers den Grundwasserleiter um nach einer gewissen Verweilzeit über Quellen oder direkt in den Vorfluter zu münden. Das Grundwasser stellt die älteste von modellhaft, nach ihrer Verweilzeit, insgesamt drei unterschiedenen Abflußkomponenten dar (GW-Komponente, vgl. Kap. 2.3 und Abb. 2-2). Durch Lösungsvorgänge aus dem Gestein wird der Chemismus des neugebildeten Grundwassers allgemein stark verändert, trotzdem bilden sich, z.B. durch Bestandesunterschiede bedingte, verschieden hohe Stoffeinträge auch im Grundwasserchemismus ab.

Für die grundlegenden Verfahren zu der wasserwirtschaftlich besonders wichtigen Bestimmung der Grundwasserneubildung ist der Grundwasserabfluß zu ermitteln. Er macht nach bisherigen Erfahrungen etwa zwei Drittel des Gesamtabflusses aus und stellt damit eine wesentliche Größe bei Stoffaustragsberechnungen dar. In Abhängigkeit von der mittleren Verweilzeit des Grundwassers kann der Stoffaustrag über den Grundwasserleiter verzögert werden. In Grundwässern mit relativ kurzer mittlerer Verweilzeit von ca. 5 Jahren wurden ansteigende Nitratgehalte gemessen, die auf eine steigende atmosphärische NO_x-Zufuhr hinweisen (AGSTER und EINSELE, 1986). Um diese Tendenz weiter verfolgen zu können, sollten Messungen in verschieden alten Grundwässern weiter durchgeführt werden.

Die chemische und isopenchemische Beprobung des Grundwassers konnte über Quelfassungen erfolgen, mit denen die maßgeblichen Grundwasserleiter in den verschiedenen Teilgebieten getrennt erfaßt wurden. Über Quellschüttungsganglinien waren Charakteristika der Grundwasserleiter zu ermitteln. Wegen der oft nur sehr geringen Schüttungen, und um außerdem zu viele, auch störanfällige Installationen im Waldgebiet zu vermeiden, wurden die Mengmessungen jeweils mit Eimer und Stoppuhr durchgeführt.

Neben den Proben aus Quelfassungen, waren nach lang anhaltendem Trockenwetter bei fehlendem Interflow auch Proben aus dem Vorfluter zur indirekten Bestimmung der GW-Komponente heranzuziehen. Gleiche Bedingungen gelten erfahrungsgemäß auch für die Beprobung von Quellen,

da auch dort Zumischungen von Interflow, besonders im Bereich der Fassungen, möglich sind.

Im Vorfluter sind, abgesehen von einem möglichen Grundwasserabstrom, der Gesamtabfluß Q_t und der gesamte Lösungsaustrag meßbar. Dies setzt eine kontinuierliche Mengenerfassung (automatisch registrierende Pegelschreiber) mit regelmäßigen und ereignisorientierten Probenahmen voraus. Hierfür konnten an den Pegelmeßstellen P 14 und P 8, teilweise auch an P 18, halbautomatische Probennehmer eingesetzt werden.

Der Vorfluterabfluß (Gesamtabfluß) setzt sich, je nach Abflußbedingungen, aus verschiedenen Abflußkomponenten zusammen. Über chemische und isopenchemische Veränderungen im jahreszeitlichen Verlauf und während N-Q-Ereignissen lassen sich, bei Anwendung spezieller Separationsmethoden, die Abflußkomponenten und ihre Lösungsfracht quantifizieren.

4.2 Hydrochemische und physikalische Untersuchungen

Zur Bestimmung der physikalisch-hydrochemischen Parameter wurden an den verschiedenen Meßstellen regelmäßig Untersuchungen durchgeführt und zahlreiche Wasserproben entnommen. Die Messungen und Analysen wurden teilweise schon im Gelände, überwiegend aber im Labor durchgeführt.

Im Gelände wurden unmittelbar nach der Probenahme folgende Bestimmungen vorgenommen:

Temperatur, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Hydrogenkarbonat und z.T. freie Kohlensäure (Säure- und Basenkapazität).

Es wurden die Meßgeräte pH 91 und Lf 91 der Firma WTW verwendet bzw. titrimetrische Analysen (gem. DIN 38409-H6) vorgenommen.

Ferner wurden regelmäßig in verschiedenen Bodenprofilen und Bodentiefen Messungen der Wasserspannungen in cm Wassersäule (Umrechnung in pF-Werte) über Keramikzellen mittels Einstichtensiometer (Fa. Dr. Fritz von Ballmoos AG Elektronik) sowie Messungen der Bodentemperatur durchgeführt.

Die folgenden Anionen und Kationen wurden im Labor des Geologischen Instituts der Universität Tübingen bestimmt:

Fluorid, Chlorid, Nitrat Sulfat, Phosphat mittels Ionenchromatographie an den Geräten DIONEX 2000i und teilweise WATERS.

Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium mittels Atom-Absorptions-Spektrometer 303, teilweise

ionenchromatographisch (WATERS).

Im Labor der Universität Hohenheim (Bodenkunde) fanden folgende Untersuchungen statt:

Ammonium mittels Photometer (DIN 38 406-E5-1) sowie weitere Kationenanalysen mittels AAS.

Die Bestimmungen der $\delta^{18}O$ -Werte erfolgten massenspektrometrisch sowohl am Institut für Radiohydrometrie (jetzt Institut für Hydrologie) der GSF in München-Neuherberg durch Herrn Dipl.-Phys. W. STICHLER als auch im geochemischen Labor des Mineralogischen Instituts der Universität Tübingen durch eigene Messungen unter fachtechnischer Anleitung von Herrn Dipl.-Geol. N. ZEIDLER).

4.3 Meßstellennetz

Die für die Ermittlung des Wasser- und Stoffhaushaltes notwendigen Detailuntersuchungen (vgl. Kap. 4.2) wurden in den verschiedenen Teileinzugsgebieten (vgl. Kap. 3.4) an zahlreichen Meßstellen vorgenommen. Abb. 4-2 zeigt das über das Schönbuchgebiet und die untersuchten Teileinzugsgebiete verteilte Meßstellennetz.

Insgesamt 6 Freiland-Niederschlagsschreiber (N1 - N6) (betreut von H. Flegr, Geologisches Institut Tübingen und vom Wasserwirtschaftsamt Reutlingen) wurden ausgewertet und zu Tagesniederschlagssummen zusammengefaßt. Für N-Q-Ereignisse fand eine Detailauswertung des zeitlichen Niederschlagsverlaufs statt. Zur Ermittlung der quantitativen Niederschlagsverteilung im Schönbuchgebiet wurden zusätzlich 12 Totalisatoren (T) eingesetzt. Klimadaten (Lufttemperatur und -feuchte) zur Bestimmung der E_{pot} nach HAUDE stammen von 2 Stationen des Deutschen Wetterdienstes, Ehningen und Herrenberg. Der Vorfluterabfluß (Q_t) der Teileinzugsgebiete, wurde an insgesamt 8 Schreibpegeln (P) erfaßt. Grundwasser konnte an 14 Quellfassungen (Q) (regelmäßig an 10) gemessen werden.

Auf den 4 Versuchsflächen (S 1 - S 4) wurden weitere 8 Niederschlagsmeßeinrichtungen, je 4 im Freiland (NF, an nächstgelegener geeigneter Freifläche) und im Bestand (NB) sowie zur Erfassung des Sickerwassers 28 Plattenlysimeter eingerichtet. Desweiteren wurden neu geschaffene oder natürliche Interflow-Meßstellen Q_{on} (1 fest installierte Meßstelle und Aufgrabungen in insgesamt 3 Teileinzugsgebieten) sowie 34 Tensiometer betrieben.

In Tab. 4-1 ist die Meßstellen-Ausstattung der verschiedenen Einzugsgebiete mit ihren Bezeichnungen zusammengestellt.

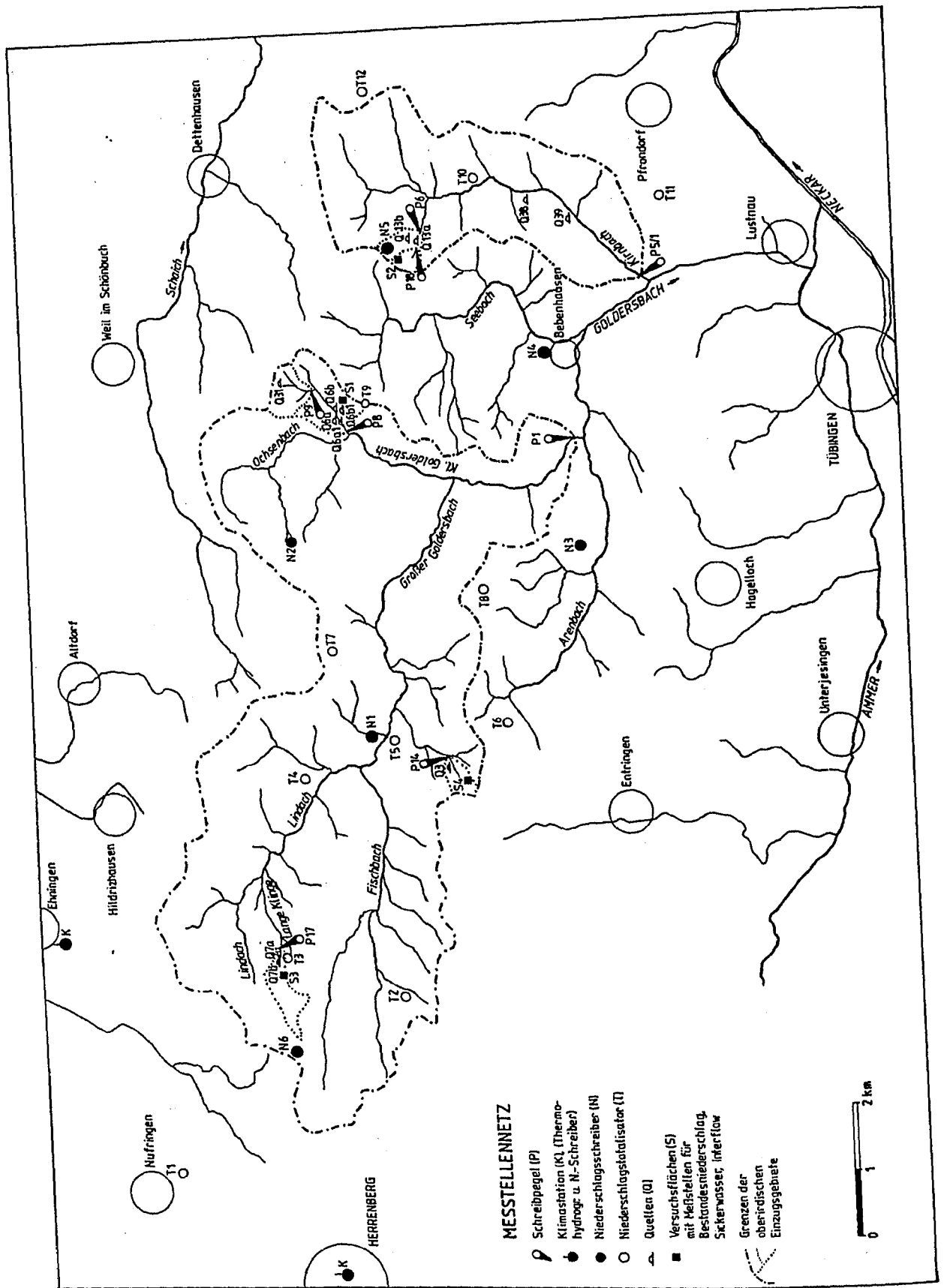


Abb. 4-2: Untersuchte Einzugs- und Teileinzugsgebiete mit Meßstellennetz und Versuchsfächen.

Tab. 4-1: Meßstellen und ihre Bezeichnungen in den Einzugsgebieten und Versuchsflächen.

Einzugsgebiet:	Goldersbach			Kirnbach
Pegelmeßstelle:	P 1			P 5/1
Quellen:	in Teileinzugsgebieten			Q 38, Q 39 (km4)
Teil-Einzugsgebiet:	Kleiner Goldersbach	Denzenberg	Obere Lange Klinge	Bärloch
Pegelmeßstelle:	P 8	P 14	P 17	P 6
Teilgebiet:	Josefsruh			Ob. Bärloch
	P 9			P 18
Quellen:				
Lias α km4 (flach) (tief)	Q 31 Q 6b, Q 6b1 Q 6a, Q 6a1	Q 3a, Q 3b Q 3	Q 7a, Q 7b	Q 13a, Q 13b
Versuchsfläche:	Schlagbaumlinde	Denzenberg	Ob. L. Klinge	Bärloch
X:	S 1	S 4	S 3	S 2
mit Meßstellen:				
Freiland-Nied.:	NFS1	NFS4	NFS3	NFS2
Bestandes-Nied.:	NBS1	NBS4	NBS3	NBS2
Interflow:	IF-S1	IF1-S4 IF2-S4		IF-S2
Plattenlysimeter				
Profil S X - 1:	30, 60, 90 cm	40, 60 cm	25, 40 cm	30, 60, 90 cm
2:	30, 60, 105 cm	25, 40, 60 cm	25, 40 cm	30, 60, 90 cm
3:	75 cm	40, 60, 90 cm	25, 40, 60 cm	
Tensiometer				
Anzahl (Tiefe):	8 (22,5-105 cm)	9 (12,5-100 cm)	9 (12,5-53 cm)	8 (17,5-90 cm)

4.4 Meßumfang

Die Niederschlagshöhe im Freiland und die Abflußmengen an den Vorfluterpegeln wurden kontinuierlich aufgezeichnet. Auch die Interflow-Meßstelle im Gebiet Denzenberg verfügte über eine automatische Mengenummessung (Kap. 4.1). Quellschüttungen wurden regelmäßig wöchentlich gemessen. Leitfähigkeit, Temperatur und pH-Wert konnten in den Vorflutern, den Quellen und soweit möglich auch im Interflow wöchentlich erfaßt werden. Die Messungen der Niederschlagshöhe im Bestand, der Sickerwassermengen in den Plattenlysimetern und der Wasserspannungen erfolgten allgemein 14-tägig. Proben zur chemischen oder isotopechemischen Analyse wurden im Regelfall von Niederschlägen und Sickerwässern 14-tägig, von Quellen, Interflow und Vorflutern in variierenden, an die Abflußsituation angepaßten, Abständen entnommen.

Während Hochwassersituationen konnten die Meß- und Beprobungsintervalle deutlich, bis zu teilweise mehreren Messungen pro Tag, verkürzt werden. Aus Vorflutern konnten mit halbautomatischen Probenehmern bis zu halbstündlich Wasserproben entnommen werden. Wegen der Notwendigkeit, die meisten, nicht automatisch betriebenen Meßstellen anzufahren bzw. zu Fuß zu erreichen, war während Niederschlag-Abfluß-Ereignissen abzuwägen, ob Beprobungen in allen Einzugsgebieten, aber mit niedriger Frequenz, oder nur in Teilgebieten, dafür aber mit höherer Frequenz, durchgeführt werden sollten. Ein Schwerpunkt wurde auf das Einzugsgebiet Denzenberg mit der dort installierten IF-Meßstelle gesetzt. Dennoch liegen auch von den anderen Gebieten, besonders von "trägeren" Schneeschmelzeereignissen, verschiedene Hochwasserbeprobungen vor.

5. Wasserhaushalt

Die Bearbeitung spezieller Teilaspekte im hydrologischen Kreislauf setzt eine Bilanzierung des Wasserhaushaltes mit der Ermittlung seiner Teilkomponenten voraus. Zusammen mit direkten Messungen des Niederschlags (im Freiland und Bestand), der Bodenfeuchte, des Abflusses und der Klimadaten (Lufttemperatur und -feuchte) können unter Einsatz verschiedener Methoden die Verdunstung und die Grundwasserneubildung (mit Speicheränderungen im Boden und Grundwasserleiter) bestimmt werden.

Die Trennung von Abflußkomponenten kann Aufschluß darüber geben, welche Wassermengen unterschiedlicher Zusammensetzung oder verschiedenen Alters über welchen Fließpfad zum Vorfluter gelangen. Über ein spezielles Tracerverfahren soll das als Interflow abfließende ältere Bodenwasser als eigene, dritte Abflußkomponente von aktuellem Niederschlagswasser und Grundwasser unterschieden werden. Aus der Höhe des grundwasserbürtigen Abflusses können außerdem Grundwasserneubildungsraten ermittelt werden. Zu diesem Zweck wurden auch herkömmliche Ganglinienseparationen mit der Abtrennung der Grundwasserganglinie durchgeführt.

Über eine Quantifizierung der Wasserhaushaltsgrößen und ihrer Stofffrachten können Stoffbilanzen für die verschiedenen Einzugsgebiete erstellt werden (Kap. 6). Diese bildeten den Rahmen für die Beantwortung von Detailfragen des Stoffhaushalts, wie dem Austrag gelöster Stoffe über den Zwischenabfluß.

Mengenmessungen und Beprobungen direkt zu erfassender Wasserhaushaltsgrößen wurden auf ausgewählten Testflächen durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse dieser detailliert untersuchten Standorte wurden auf die größeren Einzugsgebiete übertragen. Der Gesamtabfluß und der Stoffaustrag konnten für das jeweilige Gesamtgebiet an Vorfluter-Pegelmeßstellen bestimmt werden (topologisch-synthetischer und chorologisch-analytischer Ansatz, ENGELHARDT und SCHLICHTING, 1980).

5.1 Niederschlag

Da die Niederschlagsverteilung stark variieren kann, wurde der Freilandniederschlag (NF) durch, über das Gesamtgebiet verteilte, Meßstellen und speziell für die einzelnen Teilgebiete und Versuchsflächen, getrennt erfaßt (vgl. Kap 4.3 Meßstellennetz). Für größere Gebiete wurden die Mittelwerte der zugehörigen Meßstellen verwendet.

Mit den Daten der hier vorgestellten Meßperiode und den Werten aus früheren Untersuchungen wurde der Trend, daß die Niederschlagshöhe von West nach Ost zunimmt, weiter präzisiert. Ferner sollte eine vermutete räumliche Variation des Schadstoffeintrags (im Hinblick auf Emittenten oder die Herkunft von Immissionen) im Gesamtgebiet erfaßt werden.

In den beiden Untersuchungsjahren 1985 und 1986 schwankten die durchschnittlichen Jahresniederschlagssummen erheblich und lagen 1985 mit 725 mm nur leicht unter und 1986 mit 1021 mm sehr stark über dem langjährigen Mittelwert von ca. 752 mm (Tab. 5-1). Somit konnten Abflußbildung und Stoffumsatz eines durchschnittlich nassen Jahres sowohl mit den Daten aus früheren Untersuchungsperioden, als auch mit den Ergebnissen eines extrem nassen Jahres verglichen werden.

Tab. 5-1: Durchschnittliche Niederschlagshöhen im Freiland (mm/a). Vergleich mit früheren Meßperioden im Schönbuchgebiet.

Meßzeitraum	Jahresniederschlag.	Halbjahreswerte Winter / Sommer
*1931 - 1960:	752 mm	292 mm / 460 mm
*1979 - 1982:	753 mm	335 mm / 418 mm
1985:	725 mm	280 mm / 445 mm
1986:	1021 mm	441 mm / 580 mm

* Daten aus AGSTER (1986)

Die Angaben der durchschnittlichen Niederschlagshöhen von 1985 und 1986 basieren auf den Daten der Meßstationen auf den Versuchsflächen (Tab. A-5-4 im Anhang). Im östlichen Schönbuch wurden, entsprechend der langjährigen Niederschlagsverteilung, insgesamt höhere Niederschläge registriert als im westlichen Teil. Genauere Angaben zur Niederschlagsverteilung aus den Daten von über das Gesamtgebiet verteilten 12 Totalisatoren und 6 Niederschlags-Schreibern (vgl. Meßstellennetz, Abb. 4-2), die im Rahmen dieser Arbeit nur teilweise für Tageswerte zur Verdunstungsberechnung und für einzelne N-Q-Ereignisse ausgewertet wurden, sind in Vorbereitung (FLEGR).

Die Sommer- und Winterniederschläge verteilen sich in den Untersuchungsjahren 1985 und 1986 etwa entsprechend dem im HYDROLOGISCHEN ATLAS der BRD (1979) angegebenen mittleren Verhältnis von 60:40. Der Schönbuch gehört dem Sommerregentyp mit kontinentaler Klimatönung an. Die langjährige monatliche Niederschlagsverteilung weist Maxima im Juni und Juli und Minima im Februar auf. Im Meßzeitraum wichen einzelne Monatswerte z.T. erheblich da-

von ab (vgl. Abb. 5-2, Abb. 7-1).

Wegen der stark unterschiedlichen Jahresniederschlagssummen von 1985 und 1986 war der gesamte Untersuchungszeitraum für die langjährige Niederschlags-Abflußsituation nicht repräsentativ. Deshalb wurde bei der Angabe von Wasserhaushaltsgrößen weitgehend auf eine Mittelwertbildung für beide Untersuchungsjahre verzichtet.

5.2 Verdunstung

Die Bestimmung der Verdunstungshöhe ist für Wasserhaushaltsbetrachtungen von entscheidender Bedeutung. Die potentielle Verdunstung bildet eine notwendige Eingangsgröße für die Bestimmung der tatsächlichen Gebietsverdunstung (reelle oder aktuelle Verdunstung) und der Grundwasserneubildung. Besonders in Waldbeständen ist die Ermittlung der Verdunstungshöhe nur über aufwendige Verfahren möglich. Insbesondere im Hinblick auf das niederschlagsreiche Jahr 1986 wurden verschiedene Methoden zur Ermittlung der Verdunstungshöhe angewendet. Die Ergebnisse sollen mit denen der früheren Meßperiode (1979 - 1982: AGSTER, 1983 und FLECK, 1987) verglichen werden.

Die Bestimmung der potentiellen Verdunstung (ET_{pot}) erfolgte nach den Methoden von HAUDE (in RICHTER & LILLICH, 1975) und SOKOLLEK (1983), der das Haude-Verfahren für Waldbestände modifiziert hat.

Die tatsächliche Gebietsverdunstung wurde nach drei verschiedenen Methoden berechnet. Sie wird bezeichnet als

- a) reelle Evapotranspiration ET_{reell}
- b) aktuelle Evapotranspiration ETA
- c) aktuelle Verdunstung V_a .

a) ET_{reell} wurde nach der Methode von UHLIG (1954) auf der Basis der nach SOKOLLEK für Waldbestände korrigierten HAUDE-Verdunstung (ET_{pot}) bestimmt. Dieses Verfahren basiert auf einer Bodenwasserbilanz und berücksichtigt die nutzbare Feldkapazität (nFK) der Böden. Die Verdunstungshöhe und der als Überschuß tiefer sickernde Niederschlagsanteil (Grundwasserneubildung inkl. Interflow) wird für Dekaden in Abhängigkeit vom Niederschlagsangebot berechnet. Ähnliche Verfahren, die die Änderungen des Bodenwassergehaltes berücksichtigen, wurden von EINSELE et al. (1969) und RENGGER et al. (1974) beschrieben.

Die Bilanzrechnung erfolgte in Anlehnung an das UHLIG-Verfahren mit einem von SAUTER

(1992), für die Situation von Frosttagen und Schneefällen (Niederschlags-Speicherung) erweiterten Rechenprogramms (TEUTSCH, 1989) in Tagesschritten.

b) ETA wurde nach der Bodenwasserbilanz-Methode in Anlehnung an die Untersuchungsergebnisse von FLECK (1987) ermittelt, der die Verdunstungsgrößen im Waldbestand (Kroneninterzeption I_k , Streuinterzeption I_s und Transpiration T) für die Versuchsflächen im Schönbuch getrennt erfaßte. Über die dabei gefundenen Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten zwischen Niederschlagshöhe, Bodenfeuchte und Verdunstungshöhe konnte die Höhe der einzelnen Verdunstungskomponenten und der gesamten aktuellen Evapotranspiration (ETA) in den Teileinzugsgebieten für die Untersuchungsperiode 1985/86 ermittelt werden.

c) V_a wurde durch eine Gebietswasserbilanz aus der Differenz von Niederschlag und Abfluß unter Berücksichtigung der Speicheränderungen im Boden und im Aquifer bestimmt. Vergleichsdaten der V_a liegen für den Meßzeitraum 1979 -82 von AGSTER (1983) vor.

FLECK (1987) konnte aus den Ergebnissen der Verdunstungsberechnungen von 1979-82 (V_a , ETA) eine einfache Gleichung für die Untersuchungsgebiete des Schönbuchs aufstellen, mit der die durchschnittliche Verdunstungshöhe nur in Abhängigkeit des Nadelwaldanteils in den Einzugsgebieten zu bestimmen ist. Auch mit dieser Gleichung (als vierte Berechnungsmethode) wurde die Verdunstungshöhe in den untersuchten Teilgebieten bestimmt. Diese ETA*-Werte werden mit den Daten des durchschnittlich nassen Jahres 1985 verglichen.

Die für die verschiedenen Berechnungswege notwendigen Daten stammen von Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes und den auf den Testflächen ermittelten Werten der Kroneninterzeption und der Bodenfeuchteänderung sowie den an den betreffenden Pegelmeßstellen der Einzugsgebiete bestimmten Abflüssen.

Genauere Angaben zu den Berechnungsmethoden finden sich in genannten Arbeiten bzw. im Überblick bei RICHTER & LILLICH (1975) oder HÖLTING (1980).

5.2.1 Potentielle (ET_{pot}) und reelle Evapotranspiration (ET_{reell})

Zur Bestimmung der ET_{pot} nach HAUDE werden die relative Luftfeuchte und die Lufttemperatur um 14 Uhr als Meßdaten benötigt. Es wurden folgende ET_{pot} -Werte berechnet (Tab. 5-2):

Tab. 5-2: ET_{pot} -Werte nach HAUDE.

	ET_{pot}		Freilandniederschlag (Mittelwerte)
	Jahreswerte	Halbjahreswerte Winter / Sommer	
1985:	659 mm	171 mm / 487 mm	725 mm
1986:	578 mm	107 mm / 364 mm	1021 mm

Die ET_{pot} für 1985 liegt im Bereich der Mittelwerte vorausgegangener Meßperioden (1968-1978: 607 mm und 1979-1980: 637 mm, Daten aus AGSTER, 1986). Der für das Naßjahr 1986 ermittelte geringere ET_{pot} -Wert ist auf die durchschnittlich höhere Luftfeuchte und ein geringeres Sättigungsdefizit der Luft infolge der häufigeren Niederschläge zurückzuführen.

Zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung (ET_{pot}) für Waldbestände (SOKOLLEK, 1983), sind die für verschiedene Waldbestände geltenden Monatsfaktoren und die Kroneninterzeptionsverluste (I_k) einzubeziehen. Die auf den 4 Testflächen ermittelten I_k -Werte wurden auf die Teilgebiete, entsprechend ihrer Bestandesverteilung, umgerechnet.

Im Hinblick auf die Bestimmung der ET_{reell} nach UHLIG auf Tagesbasis mußten Tageswerte der Eingangsgröße ET_{pot} und hierfür Tageswerte der Kroneninterzeption bestimmt werden. Dazu wurden, auf der Grundlage von über Niederschlags-Schreiber erfaßten Tagesniederschlagshöhen und den zahlreich (für einzelne Ereignisse oder mehrtägige Meßzeiträume) vorliegenden NF/NB-Verhältnissen, Tageswerte der Kroneninterzeption berechnet. Der Stammablauf bei Laubwaldgebieten wurde dabei mitberücksichtigt.

Für jedes der 8 untersuchten Einzugsgebiete konnten entsprechend der Bestandesverteilung separate ET_{pot} -Werte berechnet werden (vgl. Tab. A-5-1, Anhang). Sie liegen allgemein höher als die bestandesunabhängig nach HAUDE ermittelten Daten. Dies ist auf die zusätzliche Berücksichtigung der im Gelände gemessenen (reellen) Interzeptionsverluste zurückzuführen. Die im Naßjahr 1986 stärkeren Interzeptionsverluste wirkten sich gegenüber 1985 nur in wenig erhöhten ET_{pot} -Werten aus (vgl. auch Tab. 5-2).

Die höchsten ET_{pot} -Werte sind in beiden Jahren in dem Gebiet mit dem höchsten Nadelwaldanteil (Einzugsgebiet P 17 (Nadelwaldanteil $N_d = 80\%$), die niedrigsten in einem reinen Laubwaldgebiet (Einzugsgebiet P 18) errechnet worden (Tab. 5-3 und Tab. A-5-1). Die ET_{pot} -Höhen des Einzugsgebiets von P 1, das mit seinem N_d -Anteil von 60% den gesamten Schönbuch repräsentiert, bewegen sich innerhalb dieser Bandbreite.

Tab. 5-3: Höhen der potentiellen Verdunstung ET_{pot} und des Freilandniederschlags in ausgewählten Untersuchungsgebieten. Berechnung nach dem von SOKOLLEK (1983) für Waldbestände modifizierten HAUDE-Verfahren.

Einzugsgebiete: Nadelwaldanteil (%):	P 17	P 1	P 18
1985			
ET_{pot}	956	897	761
NF	687	729	713
1986			
ET_{pot}	985	908	776
NF	1021	1007	1063

Angaben in [mm/a]

In die für die verschiedenen Einzugsgebiete getrennt durchgeführten Bestimmung der realen Evapotranspiration (ET_{reell}) gingen neben den Tageswerten der ET_{pot} (s.o.) und des Freilandniederschlags die mittleren nutzbaren Feldkapazitäten ein. Die Änderung der Bodenfeuchte (ΔR_b) zwischen Beginn und Ende des Meßzeitraumes konnte aus Tensiometerdaten der 4 Versuchsflächen und den zugehörigen pF-WG-Kurven berechnet und auf die Einzugsgebiete übertragen werden. Im, bezogen auf die langjährigen Durchschnittswerte, etwas zu trockenen Bilanzjahr 1985 ergaben sich allgemein negative, im sehr nassen Jahr 1986 deutlich positive Änderungen des Bodenwasserspeichers. Die ET_{reell} -Werte aller Einzugsgebiete sind zusammen mit den Bodenfeuchteänderungen in Tab. A-5-2 (Anhang) zusammengestellt.

Die Berechnungsmethode zur Bestimmung der ET_{reell} hängt entscheidend vom Wasserrückhaltevermögen der Böden ab. Es wird vorausgesetzt, daß der Niederschlag, der in den Boden versickert, immer zuerst zur Auffüllung eines möglichen Bodenfeuchtedefizits und einer möglichen Verdunstung zur Verfügung steht und erst nach Überschreiten der Feldkapazität zur Grundwasserneubildung und zum Abfluß beitragen kann.

Die Genauigkeit der Ergebnisse dieser Berechnungsmethode wird dadurch beeinträchtigt, daß im Sommer ein Teil des versickernden Niederschlagswassers auch bei Bodenwassergehalten unter der Feldkapazität über Makroporen (z.B. Grabgänge, Trockenrisse) den Bodenwasserspeicher verlassen kann, ohne einer Verdunstung in ausreichender Zeit zur Verfügung gestanden zu haben.

Bei den durchgeführten Berechnungen beeinflusst die unterschiedliche Bestandesverteilung die ET_{reell} entscheidend. Die Extremwerte der ET_{reell} wurden in den nadel- (Nd) oder laubwaldreichsten Teilgebieten P 17 und P 18 beobachtet (Tab. 5-4).

Die nach EINSELE et al. (1969) korrigierte HAUDE-Verdunstung ergab für den Meßzeitraum

1979-80 im Mittel 588 mm (AGSTER, 1983), was etwa dem ET_{reell} -Wert des für den Schönbuch repräsentativen Einzugsgebiets von P 1 im normalen Jahr 1985 entspricht.

Tab. 5-4: Höhen der realen Verdunstung ET_{reell} und des Freilandniederschlags in ausgewählten Untersuchungsgebieten. Berechnung auf Tagesbasis nach dem von TEUTSCH und SAUTER modifizierten UHLIG-Verfahren.

Einzugsgebiete:	P 17	P 1	P 18
Nadelwaldanteil (%):	80	60	0
1985			
ET_{reell}	626	590	456
NF	687	729	713
1986			
ET_{reell}	745	681	776
NF	1021	1007	1063

Angaben in [mm/a]

Für einen Vergleich mit früher ermittelten Verdunstungshöhen (tatsächliche Gebietsverdunstung) kann ferner das Verhältnis von Verdunstung zu Freilandniederschlag herangezogen werden. Das nach der hydrologischen Grundgleichung ($V = N - Q$) bestimmte langjährige Mittel (Meßzeitraum 1968 - 1978 und 1979 - 1982, Daten aus AGSTER, 1986) beträgt für das Einzugsgebiet Großer Goldersbach (P 1) $V/N = 75\%$. Für dieses Gebiet liegt das ET_{reell}/NF -Verhältnis im Jahr 1985 mit 81% etwas höher, im Naßjahr 1986 dagegen mit 68% deutlich niedriger.

Trotz des im Vergleich zu 1985 um ca. 300 mm höheren Niederschlagsdargebots ergab die ET_{reell} -Berechnung von 1986 nur eine um ca. 100 mm höhere Verdunstung (Beispielgebiet P 1). Der "Niederschlagsüberschuß" von ca. 200 mm bewirkte eine Zunahme des Bodenwassergehalts um ca. 100 mm. Ca. 100 mm standen einem erhöhten Abfluß bzw. einer Speicheränderung im Grundwasser zur Verfügung. Da diese Werte nicht erreicht wurden (vgl. Kap. 5.3), werden Mängel bzw. Ungenauigkeiten der Berechnungsmethode bei vom Durchschnitt stark abweichenden Niederschlagsmengen deutlich.

Wenn ein Teil des Niederschlags nicht für die Verdunstung oder Auffüllung der Feldkapazität zur Verfügung steht, sondern vorher über Interflow abgeführt wird (s.o.) sind auch die ET_{reell} -Werte theoretisch als zu hoch einzustufen. Dagegen würde eine Berücksichtigung der Windwirkung (was bei der ET_{reell} -Berechnung nicht geschieht, vgl. Eingangsgröße ET_{pot}) zu höheren Verdunstungsraten führen. Wenn feuchte Luft ständig abtransportiert wird, kann trotz geringem Sättigungsdefizit der Luft eine hohe Verdunstung stattfinden.

Hinreichend genaue Quantifizierungen der Verdunstung in Waldbeständen sind von direkten Messungen der einzelnen Verdunstungskomponenten zu erwarten, wie sie FLECK (1987) im Schönbuch durchgeführt hat.

5.2.2 Die aktuelle Evapotranspiration (ETA) in Waldbeständen

Die Verdunstung in Waldbeständen setzt sich aus

- Kroneninterzeption (I_k)
 - Streuinterzeption (I_s) und
 - Transpiration (T)
- zusammen (Abb. 2-2).

a) Die Kroneninterzeption I_k wurde auf 2 Buchen- und 2 Fichtentestflächen (vgl. Kap. 4) aus der Differenz von Kronendurchlaß und Freilandniederschlag mit Berücksichtigung des Stammabflusses in Buchenbeständen in einer Höhe von 15% des Freilandniederschlags (frdl. mdl. Mitt. von Herrn Dr. Bücking, FVA Freiburg, vgl. auch ELLENBERG et al., 1986) bestimmt. Auf Fichtenstandorten ist der Stammabfluß mit 1% des Freilandniederschlags dagegen vernachlässigbar klein (BÜCKING und KREBS, 1986).

Tab. A-5-3 (im Anhang) gibt eine ausführliche Übersicht der auf den Versuchsflächen ermittelten Halbjahreswerte der Niederschlagshöhen im Freiland und Bestand sowie der Kroneninterzeptionsverluste.

In Tab. 5-5 sind die relativen Anteile der Kroneninterzeption am Freilandniederschlag (I_k/NF -Mittelwerte) der beiden Fichten- und Buchentestflächen dargestellt.

Tab. 5-5: Durchschnittliche Verhältnisse von Kroneninterzeption zu Freilandniederschlag (I_k/NF in %). Mittelwerte von jeweils 2 Fichten- und Buchen-Versuchsflächen.

I_k/NF -Verhältnisse (Angaben in %)					
	Fichte		Buche		
1985	45	24	1986	42	20
WjHj.	52	20	WjHj.	44	14
SoHj.	40	26	SoHj.	40	24

Die I_k -Verluste sind unter Fichte deutlich höher als unter Buche. Dieser Mehrverlust machte im Durchschnittsjahr 1985 ca. 150 mm und im Naßjahr 1986 ca. 234 mm aus. Die I_k -Mittelwerte der Fichtenflächen (45 und 42%) stimmen mit dem durchschnittlichen I_k/NF -Verhältnis des Zeitraums 1979 - 83 (44%) sehr gut überein (BÜCKING und KREBS, 1986).

Auch auf den Buchentestflächen wurden in der früheren Untersuchungsperiode von 1979 - 1982

mit 24% ein dem Normaljahr 1985 entsprechender I_k/NF -Wert ermittelt.

Im Naßjahr 1986 tendieren die I_k/NF -Verhältnisse zu niedrigeren Werten. Dies ist mit auf einen bei länger andauernden und stärkeren Niederschlägen geringeren Einfluß von Benetzungskapazitäten zurückzuführen (s.u.).

Durch die Benetzungskapazität der Blätter weisen geringere Einzelniederschläge prozentual geringere Bestandesniederschläge (höhere Interzeption) auf als Starkniederschläge. BENECKE (1978) fand für Buchen- und Fichtenbestände im Solling Benetzungskapazitäten von 2,6 mm und 4,7 mm. Bei der Analyse von Einzelereignissen ist es deshalb ratsam, die Bestandesniederschlagshöhen in kürzeren Abständen direkt (und nicht aus längerfristig ermittelten Prozentanteilen am Freilandniederschlag) zu bestimmen.

Die insgesamt im Vergleich zu 1985 geringeren I_k/NF -Verhältnisse von 1986 (Tab. 5-5) sind vor allem auf geringere I_k/NF -Werte im westlichen Schönbuch (S 3: Fichte und S 4: Buche) zurückzuführen. Dies hängt mit den dort höheren Niederschlagsintensitäten zusammen. Im östlichen Schönbuch (S 1: Fichte und S 2: Buche) blieben die I_k/NF -Verhältnisse etwa gleich (Tab. 5-6).

Tab. 5-6: Durchschnittliche Verhältnisse von Kroneninterzeption zu Freilandniederschlag (I_k/NF in %). Getrennt nach Versuchsflächen im westlichen und östlichen Schönbuch. Westteil: S 3: Fichte; S 4: Buche. Ostteil: S 1: Fichte; S 2: Buche.

I_k/NF -Verhältnisse (Angaben in %)				
	Fichte		Buche	
	1985	1986	1985	1986
Schönbuch				
-Westteil	52	45	27	19
-Ostteil	38	39	21	20

Die jahreszeitlichen Schwankungen der Kroneninterzeption werden i.w. durch die unterschiedlichen I_k -Verluste zwischen immergrünem Nadelwald und winterkahlem Laubwald bestimmt.

b) Auf der Fichten- und Buchentestfläche S 1 und S 2 wurden im Meßzeitraum 1979-83 Beträge für die Streuinterzeption I_s nach einer von HELVEY (1964) beschriebenen Methode gewonnen (FLECK, 1987). Im Jahresmittel der 4-jährigen Meßperiode lag die Interzeption der Buchenstreu bei 72 mm und die der Fichtenstreu bei 54 mm. Die als Halbjahreswerte vorliegenden Daten konnten für die Untersuchungsperiode 1985-86 auf die 4 Testflächen unter Berücksichtigung der klimatischen Verhältnisse (in Absprache mit H. FLECK) übertragen werden (Tab. A-5-4 im Anhang).

Für das etwa durchschnittliche Jahr 1985 wur-

den die mittleren I_s -Halbjahreswerte, für das nasse Jahr 1986 die I_s -Verluste aus Halbjahren mit sehr ähnlichen NB-Höhen übernommen. Die I_s -Höhen bewegten sich in den Halbjahren zwischen 15 und 59 mm und in den Gesamtjahren zwischen 54 und 86 mm. In Tab. 5-7 sind die so bestimmten mittleren I_s/NF -Verhältnisse der Fichten- und Buchentestflächen zusammengestellt.

Tab. 5-7: Durchschnittliche Verhältnisse von Streuinterzeption zu Freilandniederschlag (I_s/NF in %). Mittelwerte von jeweils 2 Fichten- und Buchen-Versuchsflächen.

I_s/NF -Verhältnisse (Angaben in %)					
	Fichte		Buche		
	1985	1986	1985	1986	
WiHj.	5	7	5	6	
SoHj.	9	12	8	12	

Bei einzelnen Niederschlags-Ereignissen hängt die Streuinterzeption, wie auch die Kroneninterzeption, von der Niederschlagshöhe und der Benetzungskapazität, die hier auch als Feldkapazität bezeichnet werden kann, ab. Nach FLECK entspricht die Feldkapazität der Buchen- und der Fichtenstreu einem Wassergehalt von 1,6 mm und 1,9 mm.

c) Für die Transpiration (T) der Bäume steht das pflanzenverfügbare Bodenwasser und der in den Mineralboden versickernde Nettoniederschlag (N_N : Freilandniederschlag minus Gesamtinterzeption, vgl. Abb. 2-2) zur Verfügung. Bei sommerlicher Trockenheit sind die Bäume überwiegend auf den im Winter angelegten Bodenwasservorrat angewiesen. Die typischen Zweischichtböden des Schönbuchs speichern im lößreichen Deckschutt im Vergleich zum tonigen Basisschutt den größeren Teil des pflanzenverfügbaren Wassers.

FLECK (1987) bestimmte auf zwei Fichten- (S 1 und S 3) und einer Buchentestfläche (S 2) im Schönbuch Transpirationsraten für die Untersuchungsperiode 1979-82. Die Ergebnisse dieser früheren Meßperiode, die i.f. zusammengefaßt werden, verdeutlichen das Transpirationsverhalten der verschiedenen Baumbestände in Abhängigkeit von Niederschlagsangebot, Bodenfeuchte und Vegetationszeit.

Die T-Maxima wurden in normal nassen Jahren in Fichtenbeständen im Juni (ϕ 74 mm, maximal 35 - 40 mm/10 Tage) und in Buchenbeständen im Juni (ϕ 64 mm) gemessen. Im Winter sind nur die T-Raten der Fichten (40 - 50 mm, Abschätzungen nach Arbeiten von LADEFOGED, 1963 und PISEK & TRANQUILINI, 1951) relevant.

Sinkt der Wassergehalt in trockenen Sommermonaten unter 30% der nutzbaren Feldkapazität, kommt es zu einer Reduzierung der Transpiration. Sie entspricht dann annähernd der Nettoniederschlagsmenge (vorausgesetzt, der gesamte versickernde Niederschlag wird

von den Wurzeln rasch aufgenommen und fließt nicht vorzeitig ab) und nicht dem Verdunstungsanspruch der Umgebungsluft, ausgedrückt als ET_{pot} nach HAUDE (1954). In feuchten bis nassen Sommern mit ausreichendem Wasserdargebot (Bodenfeuchte stets über 30% der nFk) muß der Bestand seinen Wasserverbrauch nicht einschränken. Die Transpiration bleibt bis September auf einem hohen Niveau und verläuft etwa proportional zur potentiellen Verdunstung.

Die mittleren jährlichen Transpirationsraten (Jahresdurchschnittswerte 1979-82) lagen in den untersuchten Fichtengebieten bei $T = 253$ mm und 339 mm (Gebiet mit höherer nFk und höherem NB) und in dem Buchengebiet bei $T = 264$ mm mit jährlichen Schwankungen bis zu 30%.

Bezogen auf die nutzbare Feldkapazität liegen die Transpirationsraten der Fichtenbestände etwas unter denen der Buchenbestände (vgl. dazu auch Literaturstudie von BRECHTEL & LEHNHARDT, 1982). Die höhere Transpiration der Buchen ist auf höhere sommerliche T-Raten zurückzuführen, die durch höhere Nettoniederschläge (i.w. geringere Interzeptionsverluste) und wahrscheinlich auch durch das tiefer reichende Wurzelsystem bedingt sind.

Auf der Grundlage der Ergebnisse von FLECK konnten die halbjährlichen Transpirationsraten für die Versuchsflächen im Untersuchungszeitraum 1985-86 bestimmt werden. Über verschiedene Zwischenschritte wurden dabei die Basisdaten aus klimatologisch vergleichbaren Halbjahren mit Abweichungen der gemessenen Niederschlagshöhen und Bodenwassergehalte korrigiert. Eine Übertragung auf die Einzugsgebiete erfolgte entsprechend ihrer Bestandesverteilung und durchschnittlichen nutzbaren Feldkapazitäten. FLECK (1987) konnte zeigen, daß sich die Transpiration in den verschiedenen untersuchten Standorten bei unterschiedlicher nFk etwa um den Differenzbetrag der nFk (mm) ändert.

Dieses vereinfachende, in Abstimmung mit H. Dr. Fleck durchgeführte Verfahren (Übertragung und Korrektur der früher direkt ermittelten T-Raten) war, da es dieselben Testgebiete betraf, möglich. Eine weitere Voraussetzung für die Anwendbarkeit bestand darin, daß die Bodenfeuchte im Meßzeitraum stets über 30% der nutzbaren Feldkapazität lag und keine Einschränkungen des Wasserverbrauchs zu erwarten waren, mithin ein höherer oder niedriger Nettoniederschlag direkt höhere oder niedrigere Transpirationsraten bewirkte (s.o.).

Die für 1985 und 1986 bestimmten mittleren Transpirationsraten der Fichten waren, bezogen auf die nutzbaren Feldkapazitäten der Testflächen, etwas höher als die der Buchen (Tab. 5-8).

Dies entspricht den einer Literaturstudie von BRECHTEL & LEHNHARDT (1982) entnommenen Daten, nach denen sich die jährlichen Transpirationsraten für Fichten um einen Mittel-

wert von 286 mm (Auswertung von 15 Arbeiten) und für Buchen um 313 mm (Auswertung von 24 Arbeiten) mit allerdings erheblichen Schwankungsbreiten bewegen. Auch die Ergebnisse der einzelnen Versuchsflächen im Schönbuch wichen teilweise stark voneinander ab (Tab. A-5-4, Anhang).

Tab. 5-8: Mittlere jährlichen Transpirationsraten von je 2 Fichten- und Buchentestflächen.

	φ Transpiration		φ Niederschlag im Freiland
	Fichte	Buche	
1985:	293 mm	288 mm	725 mm
1986:	357 mm	352 mm	1021 mm
φ nFk	120 mm	108 mm	

Die Gesamtverdunstung, hier bestimmt als aktuelle Evapotranspiration (ETA) in Waldbeständen, zusammengesetzt aus den unter a) - c) besprochenen Teilkomponenten I_s , I_k und T war in beiden Untersuchungsjahren in den Fichtengebieten deutlich höher als in den Buchengebieten. Dies ist auf die generell höhere Kroneninterzeption I_k der immergrünen Fichtenbestände zurückzuführen, wie aus der Zusammenstellung der einzelnen Verdunstungskomponenten (jeweils Mittelwerte der beiden Fichten- und Buchentestflächen) hervorgeht (Tab. 5-9).

Tab. 5-9: Aktuelle Evapotranspiration aus den Teilkomponenten Kronen- (I_k) und Streuinterzeption (I_s) sowie Transpiration (T). Mittelwerte von je 2 Fichten- und Buchentestflächen für die Untersuchungsjahre 1985 und 1986.

	I_k	I_s	T	ETA	NF	ETA/NF %
	[mm]					
1985						
Fichte	325	54	293	672	728	92
Buche	175	72	288	535	723	83
1986						
Fichte	432	70	357	859	1031	74
Buche	199	86	352	637	1012	63

NF: φ der zugehörigen Testflächen

Gemäß den ETA-Bestimmungen für die Versuchsflächen standen, nach der Überschlagsrechnung NF - ETA (Nettoniederschlag N_N), im normal nassen Jahr 1985 in einem rein mit Fichten bestandenen Einzugsgebiet nur 58 mm und in einem reinen Buchenbestand dagegen 188 mm für den Gebietsabfluß sowie für Speicheränderungen zur Verfügung. Im Naßjahr 1986 dagegen blieben 172 mm bei Fichten und 375 mm bei Buchen für Abfluß und Speicheränderungen übrig.

Entsprechend ihren Anteilen von Laub- und Nadelwald und unter Berücksichtigung ihrer mittleren nutzbaren Feldkapazitäten sind die Verdun-

stungshöhen der Testflächen (ETA und Teilkomponenten) auf alle untersuchten Einzugsgebiete umgerechnet worden. Die einzelnen Werte sind der Tab. A-5-5 (Anhang) zu entnehmen.

Für das Gebiet von P 1, dem größten und für den Schönbuch repräsentativen Einzugsgebiet (Nd/Lb = 60/40; nFk = 120 mm), ergaben sich nach den Ergebnissen der ETA-Bestimmung (Tab. 5-10) Nettoniederschlagshöhen N_N (NF - ETA) von 107 mm (1985) und 232 mm (1986). Berücksichtigt man die Möglichkeit von positiven und negativen Speicheränderungen, bewegen sich diese N_N -Höhen in einem plausiblen Rahmen.

Tab. 5-10: Aktuelle Evapotranspiration ETA (aus den Teilkomponenten I_k , I_s und T) im Einzugsgebiet P 1 für die Untersuchungsjahre 1985 und 1986. N_N = Nettoniederschlag (ETA - NF).

Einzugsgebiet P 1				
	$I_k + I_s + T =$	ETA	NF	N_N
1985:	265 + 61 + 296 =	622	729	107
1986:	339 + 76 + 360 =	775	1007	232

Alle Angaben in [mm/a]

Zum Vergleich der Verdunstungshöhen von 1985 und 1986 mit den mittleren Verdunstungshöhen der Meßperiode 1979-82 kann eine von FLECK (1987) für die Daten von 1979-82 aufgestellte Regressionsgerade herangezogen werden, die die Beziehung von mittlerer Verdunstungshöhe zum Nadelwaldanteil von 14 Einzugsgebieten wiedergibt. Von diesen 14 Verdunstungshöhen wurden 4 als ETA und 10 als V_a (vgl. Kap. 5.2.3) berechnet. Bei bekannter Bestandesverteilung (Nd: Nadelwaldanteil im Gesamtgebiet) kann die mittlere Gesamtverdunstung des betreffenden Einzugsgebietes, hier zur Unterscheidung mit den o.g. ETA-Werten als ETA^* -Werte bezeichnet, näherungsweise wie folgt bestimmt werden:

$$ETA^* = 513 + 1,13 Nd$$

mit ETA^* in [mm] und Nd in [%].

Für das Beispielgebiet P 1 (Nd = 60%) ergibt sich eine durchschnittliche Verdunstungshöhe von $ETA^* = 581$ mm. Bezogen auf das Vergleichsjahr 1985 und die Ergebnisse anderer Verdunstungsrechnungen für das Gebiet P 1 bedeutet das eine Abweichung von maximal nur ca. 7% (vgl. Kap. 5.2.4).

5.2.3 Die aktuelle Verdunstung V_a aus den Gebietswasserbilanzen

Die tatsächliche Gebietsverdunstung läßt sich als aktuelle Verdunstung V_a auch aus der Gebietswasserbilanz berechnen. Für kurze Beobachtungszeiträume sind die Speicheränderungen im gesättigten (ΔR_g) und ungesättigten Bereich (ΔR_b) in die allgemeine Wasserhaushaltsgleichung ($N = Q + V$) mit einzubeziehen (ARBEITSKREIS GRUNDWASSERNEUBILDUNG 1977). Sie hat dann die Form:

$$V_a = N - Q_t \pm \Delta R_g \pm \Delta R_b$$

Der Vorteil dieser Methode besteht darin, daß eine direkt meßbare Wasserhaushaltsgröße, der Gesamtabfluß Q_t im Vorfluter, in die Berechnung eingeht und nicht, wie bei anderen Verfahren, ausschließlich Hochrechnungen kleinräumig ermittelter Daten erfolgen müssen.

Q_t (total runoff, Gesamtabfluß) beinhaltet den Grundwasserabfluß (Q_g) und den als Q_{on} zusammengefaßten Oberflächen- und oberflächennahen Abfluß (vgl. Kap. 2.3 und Abb. 2-2). Da in mehreren Gebieten die Fläche des oberirdischen (F_N) vom unterirdischen (F_u) Einzugsgebiet abweicht, ist ein Grundwasserzu- oder -abstrom ($\pm Q_{gw}$) zu berücksichtigen. Dazu wurden die aus der Abflußganglinie über ein graphisches Verfahren (vgl. Kap. 5.3) ermittelten Q_g -Werte an die Größe von F_u angepaßt.

Die Festlegung der Einzugsgebietsgröße F_u basiert weitgehend auf den Ergebnissen von AGSTER (1983). Teilweise wurden sie auf hier untersuchte kleinere Teilgebiete übertragen. Für das Kirnbachgebiet (P 5/1), konnte ein schon von AGSTER vermutetes, größeres unterirdisches Einzugsgebiet abgeschätzt werden (Kap. 3.4.2). Angaben zu Abflußhöhen von Q_g oder Q_t beinhalten im folgenden immer Q_{gw} .

Vorratsänderungen im Bodenwasserspeicher (ΔR_b) wurden über Messungen der Wasserspannung und Ermittlung des Bodenwassergehalts (pF-WG-Kurven) auf den Versuchsflächen und Übertragung auf die Einzugsgebiete, entsprechend ihren mittleren nFk-Werten, bestimmt. Die Änderungen des Grundwasservorrats (ΔR_g) konnten jeweils mit Hilfe des Trockenwetterabflusses im Vorfluter am Ende des hydrologischen Jahres, bei niedrigstem Füllungsgrad des Grundwasserspeichers, ermittelt werden (z.B. WUNDT, 1953).

Wegen des stark unterschiedlichen Niederschlagsdargebots der beiden Untersuchungsjahre 1985 (normal naß bis leicht trocken) und 1986 (extrem naß) waren Speicheränderungen im Boden und Grundwasserleiter für die Bestimmung

des Wasserhaushalts (V_a und Grundwasserneubildung aus der Gebietswasserbilanz, Kap. 5.4) von besonderer Wichtigkeit.

Im Bilanzjahr 1985 war allgemein eine geringe Abnahme, im Bilanzjahr 1986 dagegen eine, je nach Gebiet z.T. sehr starke Zunahme sowohl der Bodenfeuchte (R_b) als auch des Grundwasservorrats (R_g) festzustellen. In Tab. A-5-5 (Anhang) sind die Wasserhaushaltsdaten zur Berechnung der V_a für die einzelnen Einzugsgebiete den Ergebnissen der Bodenwasserbilanzmethode (ETA) gegenübergestellt. Die verglichen mit R_b erwartungsgemäß geringeren Speicheränderungen im Grundwasser fielen, besonders im nassen Jahr 1986, deutlicher aus als in den früheren Untersuchungsperioden (AGSTER, 1983). Die höheren Niederschläge im Naßjahr 1986 schlugen sich i.w. in positiven Speicheränderungen und einer gesteigerten Verdunstungsrate nieder. Die Erhöhung des Gesamtabflusses blieb dagegen vergleichsweise gering (vgl. auch Kap. 5.3).

Dies wird am Beispiel der Wasserhaushaltsgrößen und den sich daraus ergebenden V_a -Höhen des repräsentativen Einzugsgebietes P 1 (Großer Goldersbach) verdeutlicht (Tab. 5-11).

Tab. 5-11: V_a -Höhen aus der Gebietswasserbilanz im Einzugsgebiet P 1, Untersuchungsjahre 1985, 1986.

Einzugsgebiet P 1					
	N	-	$Q_t \pm$	$R_b \pm$	$R_g = V_a$
1985	729	-	161	+ 21	+ 1 = 596
1986	1007	-	171	- 107	- 13 = 716

Alle Angaben in [mm/a]

Vergleichsdaten der Verdunstungshöhe aus der Gebietswasserbilanz mehrjähriger früherer Meßzeiträume lagen etwas niedriger als im Abflußjahr 1985 (Tab. 5-12).

Tab. 5-12: V_a -Höhen im Einzugsgebiet P 1. Vergleich mit den Ergebnissen früherer Untersuchungsperioden.

Einzugsgebiet P 1			
	N [mm/a]	V_a [mm/a]	V_a/N [%]
1937-47:	765	540	71
1968-78:	748	565	76
1979-82:	724	543	75
1985:	729	596	82
1986:	1007	716	71

Die Bandbreite der für die verschiedenen Gebiete ermittelten V_a -Werte (Tab. A-5-5, im Anhang) schwankte 1985 zwischen 541 und 628 mm. Die für den vorangegangenen Meßzeitraum gebildeten

V_a -Mittelwerte von denselben Einzugsgebieten schwankten in einem ähnlichen Bereich zwischen 504 und 606 mm (AGSTER, 1986a). Gebiete mit höherem Nadelwaldanteil weisen allgemein auch höhere V_a -Werte auf. Dies gilt sowohl für die Untersuchungsperiode 1979-82 als auch für 1985 und 1986 (Kap. 5.2.4).

5.2.4 Vergleich der angewendeten Methoden zur Berechnung der tatsächlichen Gebietsverdunstung

In Tab. 5-13 sind die Ergebnisse der verschiedenen Verdunstungsberechnungen (vgl. Kap. 5.2.1 - 5.2.3) exemplarisch für das Einzugsgebiet von P 1, das mit seinem Nd/Lb-Verhältnis von 60/40 den gesamten und seiner mittleren nFk von 120 mm weite Teile des Schönbuchs repräsentiert, zusammengefaßt.

Tab. 5-13: Ergebnisse verschiedener Verdunstungsberechnungen. Einzugsgebiet P 1 (1985 und 1986).

	1985		1986	
	NF = 729 mm Verd. [mm]	Verd./NF [%]	NF = 1007 mm Verd. [mm]	Verd./NF [%]
ET _{reell}	590	81	681	68
ETA	622	85	775	77
V_a	596	82	716	71
(ETA*)	581	80)		

ETA*: mittlere ETA nach Meßergebnissen von 1979-82, vgl. Kap. 5.2.2)

Die für 1985 nach verschiedenen Methoden berechneten Verdunstungshöhen stimmen sehr gut überein. Einschließlich des aus Mittelwerten der Meßperiode 1979-82 abgeleiteten (nur für durchschnittliche Jahresniederschlagssummen geltenden) und nicht auf aktuellen Meßdaten beruhenden ETA*-Wertes bewegten sich die Anteile der Verdunstung am Freilandniederschlag (Verd./NF) in einem sehr engen Bereich zwischen 80 und 85%. Es hat sich damit gezeigt, daß die unterschiedlichen Berechnungsmethoden in einem Jahr mit durchschnittlichem Niederschlagsdargebot und für ein Gebiet mit etwa ausgeglichenem Bestandesverhältnis zu ähnlichen Resultaten führen.

Für das Naßjahr 1986 ergaben alle angewendeten Berechnungsmethoden niedrigere Verd./NF-Verhältnisse als für 1985. Im Gebiet von P 1 schwankten die Werte zwischen 68% und 77%, was einer absoluten Differenz von 94 mm entspricht.

Der Unterschied ist auf die in den verschiedenen Berechnungsmethoden unterschiedliche Be-

rücksichtigung der extremen klimatischen Situation zurückzuführen (im Vgl. zum langjährigen Mittelwert um nahezu 300 mm höherer Jahresniederschlag).

Bei der ET_{recll} -Bestimmung (vgl. Kap. 5.2.1) findet die Niederschlagshöhe indirekt und direkt Eingang in die Berechnung. Die ET_{pot} wird u.a. über die relative Luftfeuchte ermittelt und mit den NB-Höhen korrigiert. Damit gehen Unterschiede der Baumartverteilung in die Berechnung ein. Die Kronentraufe reguliert den Gang der Bodenfeuchte und damit die Wassermenge, die einer Verdunstung (Transpiration und Streuinterzeption) zur Verfügung steht.

Bei der ETA-Berechnung (vgl. Kap. 5.2.2) werden den Freiland- und Bestandesniederschlagshöhen besonders Rechnung getragen, da sie bei der Berechnung der Verdunstungs-Teilkomponenten direkt berücksichtigt werden. Vom Durchschnitt abweichende Niederschlagshöhen beeinflussen z.B. direkt die Höhe der Transpiration. Die höheren Niederschläge von 1986 führten zu deutlich höheren I_K -Werten und damit zu ETA-Höhen, die nicht nur für P 1, sondern für alle Gebiete die höchsten Verdunstungsraten darstellten.

Die nach der Gebietswasserbilanz durchgeführte Verdunstungsbestimmung V_a (vgl. Kap. 5.2.3) bezieht die Niederschlagshöhe im Freiland direkt in die Berechnung ein. Weitere Klimafaktoren sowie Bestandes- und andere Gebietsunterschiede werden indirekt über die Abflußhöhe und die Speicheränderungen im Boden und Aquifer erfaßt. Die Verdunstungshöhen aus dieser Methode lagen für das Gebiet von P 1 etwa im Durchschnitt der Ergebnisse der drei Berechnungsmethoden. Infolge der positiven Speicheränderungen führten die extrem hohen Niederschläge nicht zu höheren Verdunstungsraten.

In Abb. 5-1 werden die Ergebnisse der verschiedenen Verdunstungsberechnungen (Verd.: ET_{recll} , ETA, V_a) für die 8 untersuchten Teileinzugsgebiete zusammengefaßt. In 3 Graphiken sind von oben nach unten die ET_{recll} -, ETA- und V_a -Höhen, bezogen auf den Freilandniederschlag (NF), gegen den Nadelwaldanteil an der Gesamtfläche (Nd/F), dem die Verdunstungshöhe am stärksten beeinflussenden Faktor, dargestellt.

Für 1985 und 1986 sind die Werte der einzelnen Gebiete mit den Regressionsgeraden (dicke durchgezogene und strichpunktierte Linien) eingetragen. Die genauen Verdunstungsdaten sind den Tabellen A-5-2 (ET_{recll}) und A-5-5 (ETA und V_a) im Anhang zu entnehmen. Zum Vergleich sind in jede Graphik die Regressionsgeraden der ETA*-Berechnung (einfache Gleichung zur Bestimmung der mittleren Verdunstung, Kap. 5.2.2), bezogen auf den Freilandniederschlag von 1985 (gestri-

chelte dicke Linie) und die der für den Meßzeitraum 1979-82 berechneten durchschnittlichen Verdunstungshöhen von insgesamt 14 Teilgebieten (Grundlage der ETA*-Gleichung) als gestrichelte dünne Linien eingetragen. Die Einzeldaten der letztgenannten Geraden sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

Die Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsverfahren zeigen eine positive Korrelation zwischen Verdunstungshöhe und dem Nadelwaldanteil in den Einzugsgebieten. Die Korrelationen sind bei den Ergebnissen der ET_{recll} - und ETA-Verfahren deutlich besser als bei den Daten aus der V_a -Berechnung, weil sie die von der Bestandesverteilung abhängigen NB-Höhen direkt in die Berechnungen einbeziehen.

Alle Verfahren ergaben für das Naßjahr 1986 deutlich niedrigere Verd./NF-Verhältnisse als für 1985. Die höheren Niederschläge von 1986 tragen demnach nicht nur zu höheren Verdunstungsraten sondern auch zu höheren Abflüssen und einer Auffüllung der Speichervorräte im Boden und Grundwasserleiter bei. Für einen Vergleich mit früheren Durchschnittswerten sind die Daten des ungewöhnlich nassen Jahres 1986 nicht geeignet.

Für 1985 sind die Steigungen der ETA- und ET_{recll} -Geraden größer als die der V_a -Geraden. (Höhere Verdunstung für ein reines Nadel- und niedrigere für ein reines Laubwaldgebiet.) Einen flacheren Kurvenverlauf beschreiben auch die nach verschiedenen Verfahren (10 V_a -Höhen und 4 ETA-Höhen) berechneten Durchschnittswerte von 1979-82 (ϕ Verd. 1979 - 82) sowie die ETA*-Gerade, die mit der für 1979-82 gefundenen Beziehung, jedoch auf die NF-Höhen von 1985 bezogen, berechnet wurde (vgl. Kap. 5.2.2).

Abgesehen von den stärkeren Abweichungen der Ergebnisse der verschiedenen Verdunstungsberechnungen für reine Nadel- oder reine Laubwaldgebiete, stimmen die aus den Regressionsgeraden abzulesenden Verdunstungshöhen bei eher ausgeglichenen Nd/Lb-Verhältnissen gut überein. Dies konnte am Beispiel des Einzugsgebietes P 1 für 1985 (Tab. 5-13) verdeutlicht werden.

Der für ein Gebiet mit 100% Nadelwald und das Abflußjahr 1985 extrapolierte ETA/NF-Anteil (95%) liegt vergleichsweise zu hoch. Die für die drei nadelwaldreichsten Einzugsgebiete P 17, P 8 und P 1 (Nd: 80%, 67% und 60%) ermittelten ETA-Höhen werden jedoch gut durch die Ergebnisse der Gebietswasserbilanz (V_a -Werte) wiedergegeben. Die für die einzelnen Einzugsgebiete unabhängig voneinander bestimmten Verdunstungsraten ETA und V_a des Jahres 1985 unterscheiden sich allgemein nur sehr wenig (Abweichungen unter 5% oder absoluten Unterschieden zwischen 2 mm und 35 mm, Tab. A-5-5 im Anhang). Nur das Kirnbachgebiet (P5/1) zeigt mit 60 mm eine deutlichere Differenz.

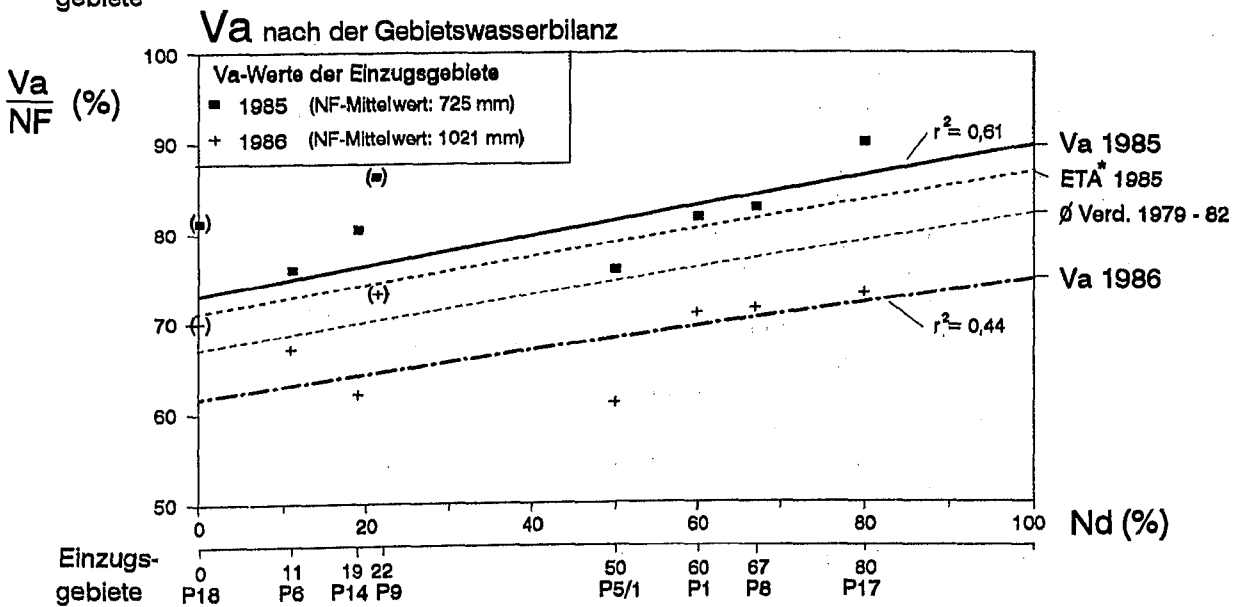
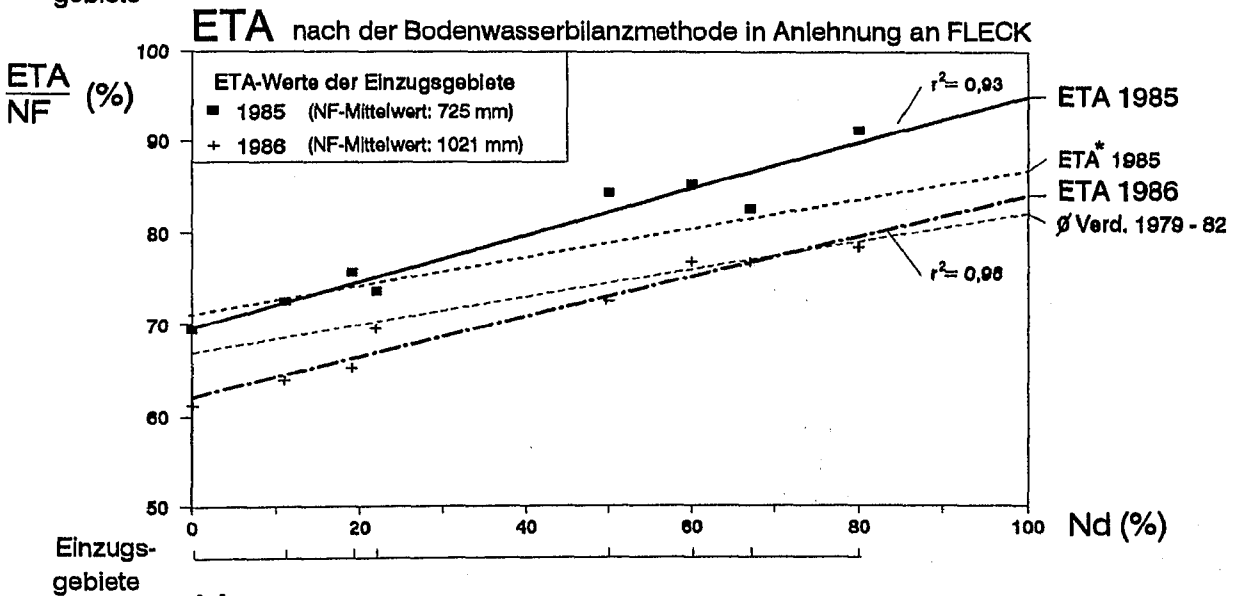
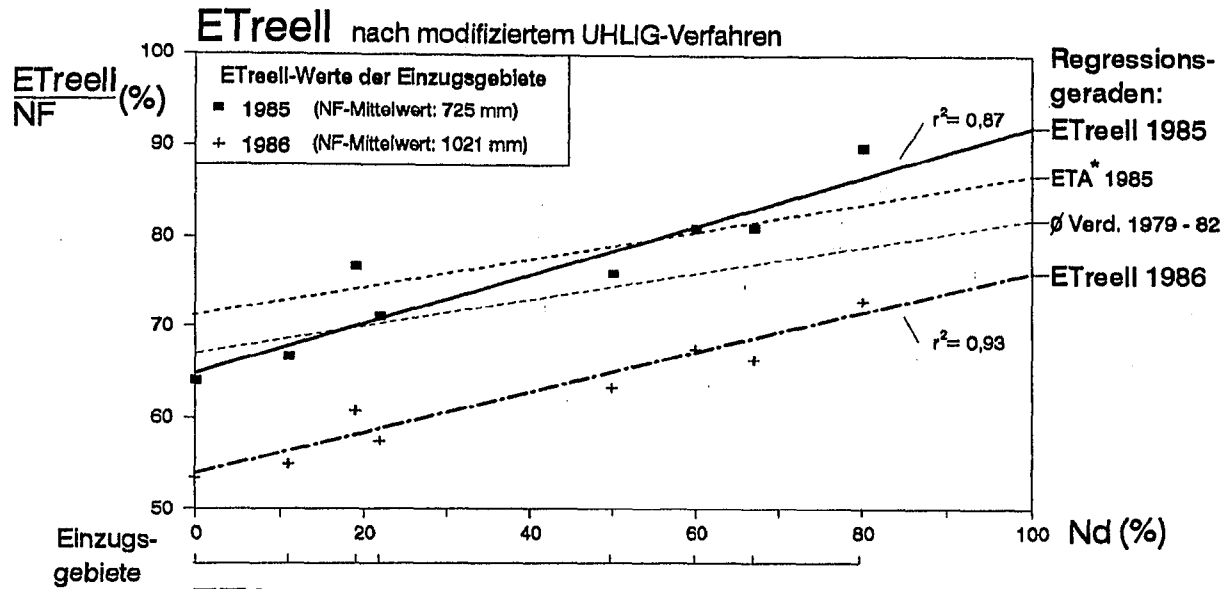


Abb. 5-1: Verdunstungshöhen (bezogen auf die NF-Höhen) nach verschiedenen Berechnungsverfahren in Abhängigkeit zum Nadelwaldanteil (Nd) in 8 untersuchten Teileinzugsgebieten. Vergleich der Daten aus dem Messzeitraum 1985-86 mit der durchschnittlichen Verdunstung von 14 Teilgebieten in den Jahren 1979-82.

Im nasserem Jahr 1986 waren die Abweichungen der Ergebnisse beider Verfahren etwas höher (bis 8%), wobei mit Ausnahme von P 6 (und P 18, P 9) die nach der Bodenwasserbilanz ermittelten Verdunstungsraten (ETA) höher liegen.

Durch die insgesamt gute Übereinstimmung beider Verfahren werden die angegebenen Verdunstungsraten bestätigt. Auch 1986 nahm das Kirnbachgebiet (P 5/1) insofern eine Sonderstellung ein, als dort die Differenz zwischen V_a (650 mm) und ETA (722 mm) mit 122 mm wesentlich größer war.

(Die V_a/NF -Werte von zwei Einzugsgebieten (P 9 und P 18) sind bei der Regressionsberechnung nicht berücksichtigt und in Klammern dargestellt. Da dort im wesentlichen nur Deckschichtenabfluß und kein Grundwasser erfaßt wurde, konnte keine, mit den anderen Gebieten zu vergleichende, Gebietswasserbilanz durchgeführt werden.)

5.3 Abfluß

Der Abfluß stellt neben Niederschlag und Verdunstung die dritte Hauptkomponente der einfachen Wasserhaushaltsgleichung ($Q = N - V$) dar. Die Gesamtabflußmengen (Q_t) der Einzugsgebiete wurden an Pegelmeßstellen der Vorfluter direkt gemessen (Abb. 4-2). Die Abflußhöhen wurden mit Berücksichtigung der unterirdischen Einzugsgebietsgrößen (F_u , vgl. Kap. 3 und Kap. 5.2.3) berechnet.

Die Q_t -Messungen wurden an insgesamt 8 Pegelmeßstellen in verschiedenen großen Einzugsgebieten durchgeführt (Kap. 3). 6 kleinere Teileinzugsgebiete waren durch gebietsspezifische Verhältnisse wie z.B. Bestandesart, Deckschichtenbildung und geologischen Untergrund unterschiedlich gekennzeichnet, so daß Auswirkungen dieser Faktoren auf die Gebietsabflüsse und den Stoffaustrag (Kap. 6.3) erfaßt werden konnten. 2 größere Gebiete, P 1 in der flacheren Stubensandsteinlandschaft im Westteil und P 5/1 in der steileren Knollenmergel-Lias-Landschaft im Ostteil des Schönbuchs, schließen die Teilgebiete ein und erlaubten, Zusammenhänge zwischen Abflußhöhe und abflußregulierenden Faktoren auch in größerem Maßstab herzuleiten.

Eine getrennte und quantitative und qualitative Erfassung verschiedener Abflußanteile (hier verstanden als Abfluß über verschiedene Fließpfade, Kap. 2.3) war direkt nur in kleineren Kompartimenten möglich. Kleinere Untersuchungseinheiten bildeten dabei die Versuchsflächen mit ihren Meßeinrichtungen wie z.B. die Interflow-Meßstelle. Die Untersuchungsergebnisse von Standortverhältnissen konnten dann auf größere Landschaftseinheiten übertragen werden.

Für ein gesamtes Einzugsgebiet ist der Oberflächen- und oberflächennahe Abfluß (Q_{on})

nicht direkt zu messen. Es wurden deshalb verschiedene Methoden eingesetzt, mit denen Q_{on} als Teil von Q_t bestimmt werden konnte (vgl. Kap. 5.4). Für spezielle Verfahren zur Analyse der Abflußbildung war eine genaue Beschreibung des Interflow-Verhaltens mit einer Registrierung der abfließenden Menge und einer direkten Beprobung erforderlich. Dazu wurde der Interflow an 3 Standorten in den Deckschichten über Stubensandstein, Knollenmergel und Lias direkt beprobt und an einer Stelle kontinuierlich gemessen. Durch die Erfassung der chemischen und isotochemischen Zusammensetzung konnte der Interflow in weitere Teilkomponenten (IF_c und IF_p) gegliedert werden (Kap. 2-3 und 8f.). Mit ergänzenden Messungen des Sickerwassers in verschiedenen Tiefen durch Plattenlysimeter konnten die Ergebnisse auf die Einzugsgebiete übertragen werden.

Mit der IF-Meßeinrichtung war es möglich, über die bisher nur während künstlicher Beregnung oder sporadisch bei N-Q-Ereignissen erfolgten qualitativen IF-Messung hinaus für ein repräsentatives Teilgebiet die Interflow-Menge über einen längeren Zeitraum aufzuzeichnen. Mit der Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des Interflow konnten über Separationsverfahren seine wechselnde Zusammensetzung und sein Anteil am Gesamtabfluß bestimmt werden.

Der Grundwasserabfluß (Q_g) eines Einzugsgebietes kann ebenfalls nicht direkt quantifiziert werden. Über Quellschüttungsmessungen konnten Speichereigenschaften der Grundwasserleiter bestimmt werden. Mit der Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Quellwässer (auch kurzfristig während N-Q-Ereignissen) konnten mit speziellen Separationsverfahren (graphisch, statistisch und isotochemisch) Q_g -Anteile am Gesamtabfluß (Kap. 5.4 und 8f.) sowie die Grundwasserneubildung (Kap. 5.4.3, Kap. 7.3.2) erfaßt werden.

Aus den Quellschüttungsdaten (12 Quellen) der beiden Hauptgrundwasserleiter in den Untersuchungsgebieten (km4 und Lias) konnten ebenfalls die Auswirkungen geologischer und bestandestypischer Unterschiede der Quelleinzugsgebiete auf das Schüttungsverhalten abgeleitet werden.

5.3.1 Das Abflußverhalten während des Untersuchungszeitraums im Überblick

Das Abflußverhalten während der Untersuchungsperiode 1985/86 wird am Beispiel des Gesamtabflusses Q_t aus dem größten untersuchten Einzugsgebiet (Großer Goldersbach, P 1) sowie den Änderungen des Grundwasserabflusses Q_g (Schüt-

tungsganglinie der km4-Quelle Q 3, Graphik oben) und des Oberflächen- bzw. oberflächennahen Abflusses Q_{on} (mit der IF-Meßstelle gewonnene Interflow-Mengen, IF-Höhe in mm/Mon.), in Abb. 5-2 dargestellt. Ferner sind der Verlauf der mittleren Wasserspannung (pF-Werte, km4-Testfläche S 4, Denzenberg) und die Tageswerte des Freilandniederschlags (Station N 1) dargestellt (vgl. Lage der Meßstellen vgl. Kap. 4 und Abb. 4-2).

Die Abtrennung des Grundwasserabflusses Q_g von Q_t basiert hier auf einem graphischen Verfahren mit einer semilogarithmischen Auswertung des Gesamtabflusses, bei der "langsames", aus dem Grundwasserleiter abfließendes Wasser von "schnellerem" Oberflächen- und oberflächennahem Abfluß (Q_{on}) abgetrennt werden konnte (vgl. Kap. 5.4). Zusätzlich wurden dabei Leitfähigkeitsänderungen im Vorfluter und Schüttungsschwankungen von Quellen (exemplarisch dargestellt: km4-Quelle Q 3) berücksichtigt.

Die Niederschlagsverteilung weist besonders in den Frühjahrsmonaten deutlich ausgeprägte Maxima auf. Die Sommer- und Herbstmonate waren 1985 durch einzelne Ereignisse, 1986 dagegen durch besonders häufige, länger anhaltende Niederschläge gekennzeichnet. Die Niederschlagssumme lag 1986 mit +278 mm (Durchschnittswert für gesamten Schönbuch +296 mm, vgl. Kap. 5.1) ganz erheblich über der des Vorjahres.

Die Wasserspannungskurve wird durch die Niederschlagsverteilung und den unterschiedlichen Wasserverbrauch der Vegetation (Wachstumsperioden) beeinflusst. Nach Ende der Frühjahrsniederschläge stieg die Wasserspannung in den Sommermonaten 1985 deutlich über $pF = 1,8$ an. Die starken Niederschläge im Sommer 1986 führten dagegen zu einem wiederholten Absinken der pF-Werte und zu einer Zunahme der Bodenfeuchte über die Feldkapazität. Die mittlere Wasserspannung bis 1 m u. Gel. blieb während der gesamten Untersuchungsperiode bei $pF < 3$. Wegen des sehr geringen Wasserbedarfs der Pflanzen in der vegetationslosen Zeit kam es in den Wintermonaten trotz geringerer Niederschläge häufig zu einer Wassersättigung des Bodenprofils.

Relevante Interflow-Mengen (dargestellt als Monatssummen, mm/Mon.) flossen nur bei sehr hoher Bodenfeuchte in den Winter- und Frühjahrsmonaten ab. Maximale Q_{on} -Abflußhöhen wurden im Testgebiet im Mai 1985 (Meßbeginn April/Mai 1985) mit 45,2 mm/Mon. und im April 1986 mit 53,6 mm/Mon. registriert. Im hydrologischen Jahr 1986 (mit vollständig erfaßten Winterhalbjahr) betrug die auf der Versuchsfläche (560 m²) gemessene Interflow-Höhe 106 mm.

Der gemäß der Quellschüttung von Q 3 größte Grundwasservorrat im km4-Aquifer wurde 1985 erst nach den hohen Mai-Niederschlägen im Juni erreicht. Nach dem im Vergleich zum Vorjahr relativ höheren Niederschlagsdargebot im Januar und März/April 1986 wurde der höchste Füllungsgrad des Stubensandstein-Aquifers 1986 schon Anfang Mai auf etwa gleichem Niveau wie 1985 erreicht. Neben diesem Jahresgang des Grundwasserabflusses zeigen vorübergehende Erhöhungen der Quellschüttung, besonders bei ansteigendem Füllungsgrad des Aquifers in den Frühjahrsmonaten, Phasen mit deutlicher Grundwasserneubildung an.

Mit einer kontinuierlichen Entleerung des Grundwasserleiters ab Juni 1985 und geringeren Niederschlägen im Sommerhalbjahr ließ der Grundwasserabfluß Q_g bis Ende Dezember deutlich nach. Verbunden mit einem sehr viel höheren Niederschlagsdargebot verzögerte sich 1986 die Entleerung des Grundwasserleiters. Die Extremwerte der Quellschüttungen wurden mit maximal 0,182 l/s und minimal 0,032 l/s registriert.

Höhe und Verteilung der Niederschläge wirken sich im allgemeinen direkt auf den Gesamtabfluß Q_t (P 1) aus. Verzögerte und häufig starke Abflußerhöhungen kommen bei Schneeschmelzeereignissen wie beispielsweise im Februar 1985 oder März/April 1986 zustande. Mit zunehmendem Füllungsgrad des Stubensandstein-Aquifers und bei Bodenwassergehalten noch weit über der Feldkapazität bewirkten die 1985 extrem hohen Mai-Niederschläge (189 mm) die stärksten Abflußerhöhungen der gesamten Untersuchungsperiode. Bei P 1 wurden Spitzenabflüsse von bis zu 9910 l/s bei einem Tagesmittelwert von 3658 l/s (8,4 mm/d) registriert. Dieser Wert überschritt die Abflußspitze der vorausgegangenen Untersuchungsperiode 1979-82, in der max. 5,7 mm/d gemessen wurden. Höhere Abflußwerte sind vom Mai 1978 (Tagesmittel 38 mm) und April 1983 (13,56 mm/d, maximal 10400 l/s) bekannt.

Die jährlichen Gesamtabflußmaxima wurden 1985 im Mai und 1986 wie gewöhnlich nach der winterlichen Schneeschmelze erreicht. Die Abflußminima stellten sich 1985 zum Ende des hydrologischen Jahres ein. 1986 sorgten stärkere Herbst-Niederschläge (Sept./Okt.) für ein gleichbleibend überdurchschnittlich hohes Abflußniveau.

Abflußerhöhungen sind stets mit einer Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit im Gesamtabfluß verbunden. Dies weist auf eine Zumischung von gegenüber dem Grundwasser niedriger mineralisiertem Wasser des Oberflächen- und oberflächennahen Abflusses hin.

Der 1986 im Vergleich zum Vorjahr wesentlich

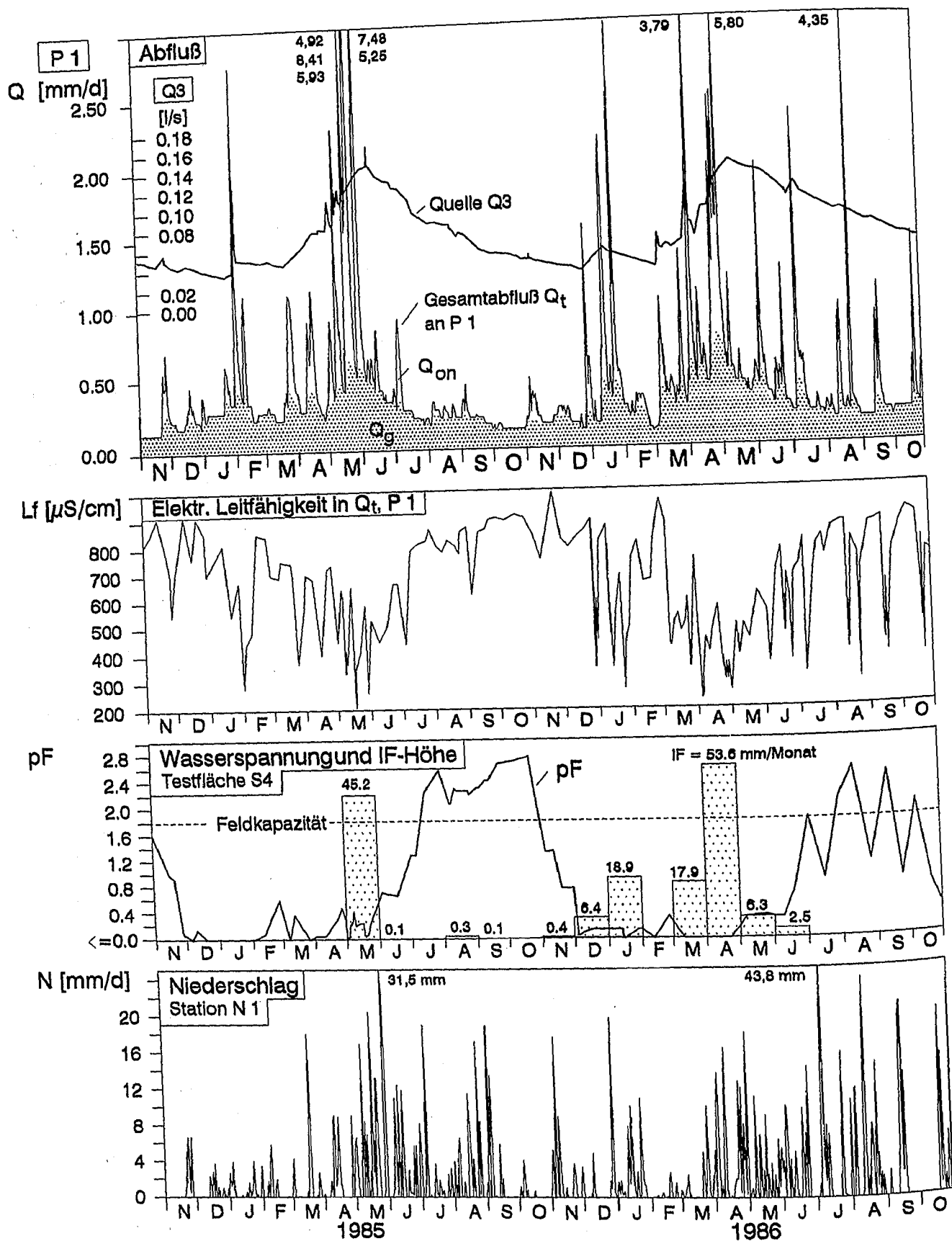


Abb. 5-2: Gesamtabfluß (Q), Grundwasserabfluß (Q_g) und Änderung der elektrischen Leitfähigkeit (L_f) in Q_t (Messstelle P 1, Großer Goldersbach), Schüttungsganglinie der km4-Quelle Q 3 (148 Einzelmessungen), monatliche Interflowhöhen an der IF-Meßanlage und Variation der Wasserspannung im Boden auf der km4-Testfläche S 4 (102 pF-Mittelwerte von je 9 Tensiometern aus Tiefen von 0,12 m bis max. 1 m u.Gel.) sowie Verteilung der Niederschläge (Messstelle N 1) im Untersuchungszeitraum 1985-1986.

höhere Jahresniederschlag hat zu einer vergleichsweise nur geringen Gesamtabflußsteigerung und zu einem geringfügig erhöhten Q_{on}/Q_t -Anteil geführt (Tab. 5-14). Der verbleibende Rest dieses Niederschlag-Mehrangebots (+277 mm) trug einerseits zu einer stark gesteigerten Evapotranspiration und andererseits zu einer deutlichen Zunahme des Boden- (+107 mm) und Grundwasservorrats (+13 mm) bei (vgl. Kap. 5.2.3, Tab. 5-11 und Tab. A-5-5 im Anhang).

Tab. 5-14: Abflußhöhen des Gesamtabflusses Q_t im Gebiet Großer Goldersbach (P 1) mit Prozentanteilen von Q_{on} und Q_g an Q_t in den Bilanzjahren 1985 und 1986.

Einzugsgebiet P 1				
	Q_t	Q_g/Q_t	Q_{on}/Q_t	NF
	[mm]	----- [%]	----- [%]	[mm]
1985	161	64	36	729
1986	172	58	42	1007

Die positiven Vorratsänderungen im Bodenwasserspeicher sind am Verlauf der pF-Kurve (Ende 1986 geringere Wasserspannungen) erkennbar. Ein höherer Füllungsgrad des km4-Grundwasserleiters ist am höheren Q_g -Abfluß (vgl. Schüttungskurve von Q 3 mit einem verlangsamten Leerlaufen des km4-Aquifers und Q_g -Ganglinie von P 1) abzulesen. Im Bilanzjahr 1985 ergaben sich gegenüber dem Vorjahr dagegen geringe Abnahmen der Speichervorräte.

5.3.2 Abflußregulierenden Faktoren in den Teilgebieten

Ein Vergleich zwischen den beiden großen Einzugsgebieten P 1 (Großer Goldersbach) im westlichen und P 5/1 (Kirnbach) im östlichen Schönbuch ergab im Gebiet P 5/1 durchweg höhere Spitzenabflüsse (Tab. 5-15). Umgekehrt sanken die Niedrigwasserabflüsse bei P 5/1 unter die von P 1. Die Extremwerte der 2-jährigen Meßreihe (Mai 1985: Maxima und Okt./Nov. 1985: Minima) verdeutlichen diesen markanten Unterschied.

Tab. 5-15: Extremwerte des Gesamtabflusses in den Gebieten P 1 und P 5/1.

Mittler Tagesabfluß				Spitzenabfluß	
Maximum		Minimum			
P 1	P 5/1	P 1	P 5/1	P 1	P 5/1
97	217	1,6	1,1	264	897

Alle Angaben in [l/s·km²]

Wegen der ausgeglicheneren Niederschlagsverteilung im Jahr 1986 blieben die Abflußspitzen unter denen des Vorjahres. Bei P 5/1 lagen sie mit 68

l/s·km² wiederum deutlich höher als bei P 1 (45 l/s·km²). Auch frühere Messungen ergaben in den östlichen Teilgebieten mit Werten zwischen 80 und 110 l/s·km² höhere maximale Q_t -Tagesmittelwerte als in den westlichen Einzugsgebieten, wo die Werte um 60 l/s·km² streuten.

Die unterschiedlichen Abflußhöhen in den beiden großen Einzugsgebieten können generell durch den Einfluß der verschiedenen geologischen Landschaften auf das Abflußgeschehen erklärt werden. Die in den östlichen Teilgebieten (P 5/1) weitverbreiteten Keupermergel und Liastone begünstigen Spitzenabflüsse, wohingegen aufgrund des besseren Retentionsvermögens des km4-Speichergesteins die Niedrigwasserabflüsse bei P 1 höher liegen.

Im Einzelnen wurde die Wirksamkeit der abflußregulierenden Faktoren

- Niederschlagshöhe im Freiland
- Verbreitung von Laub- und Nadelwald
- geologische und geomorphologische Gegebenheiten

mit Aquifereigenschaften, Ausbildung der Deckschichten und Topographie in den untersuchten Teilgebieten geprüft.

Im folgenden werden Korrelationen zwischen Abflußhöhen und abflußregulierenden Faktoren von ausgewählten Teilgebieten dargestellt. Die dafür verwendeten Kenngrößen der einzelnen Einzugsgebiete sind in Tab. A-5-6 (im Anhang) zusammengestellt.

Gesamtabfluß und Freilandniederschlag

Nach WUNDT (1953) stellt der Abflußfaktor Q/N eine gebietsspezifische Größe dar. Setzt man gleiche Gebietseigenschaften voraus, wären in verschiedenen Gebieten bei höheren NF-Werten auch höhere Gesamtabflüsse (Q_t) zu erwarten. Dies trifft nicht oder nur teilweise zu. Die Auswirkungen der NF- auf die Q_t -Höhen werden offenbar durch andere abflußregulierende Gebietseigenschaften überprägt.

Ein Vergleich der großen Einzugsgebiete P 1 und P 5/1 (Tab. 5-16) zeigt bei einer guten Übereinstimmung der Abflußfaktoren des Normaljahres 1985 mit den mittleren Q_t/NF -Werten von 1979-82, immer niedrigere Q_t/NF -Verhältnisse im westlichen km4-Gebiet P 1.

Größere Abweichungen der Abflußfaktoren von 1985 und 1979-82 ergaben sich z.T. in den Teil-Einzugsgebieten (Tab. A-5-6, Anhang). (Das hohe Q_t/NF -Verhältnis von 0,32 im Gebiet P 6 hat sich 1985 mit 0,26 nicht wieder ergeben.) Der höchste Abflußfaktor des Untersuchungszeitraums

wurde 1985 im Gebiet P 5/1 mit 0,30, der niedrigste in dem kleinen km4-Nadelwaldgebiet P 17 im gleichen Jahr mit 0,13 ermittelt (Tab. A-5-6, Anhang).

Tab. 5-16: Abflußfaktoren Q_t/NF der Einzugsgebiete P 1 und P 5/1.

		Q_t	NF	Q_t/NF
		- [mm/a] -		
1985	P 1	161	729	0,22
	P 5/1	212	713	0,30
φ1979-82	P 1	172	724	0,24
	P 5/1	207	754	0,27
1986	P 1	171	1007	0,17
	P 5/1	240	1063	0,23

Im sehr nassen Jahr 1986 (NF = 1021 mm) lagen die Abflußfaktoren *unter* denen des Vorjahres. Vergleichsdaten aus dem Naßjahr 1982 (NF-Höhen: ca. 900 - 1000 mm) ergaben dagegen *über* dem Durchschnitt liegende Q_t/NF -Verhältnisse von 0,25 bis 0,37. Die erhöhten (teilweise auch intensiveren) Niederschläge von 1982 trugen offenbar mehr zu einem gesteigerten Abfluß bei als die gleichmäßigeren Niederschläge von 1986. 1986 führten die hohen Niederschläge am Ende des hydrologischen Jahres besonders zu einer Erhöhung der Boden- und Grundwasserreserven.

Die für beide Naßjahre mit den Änderungen der Speichervorräte "korrigierten" Abflußfaktoren ($Q_t \pm \Delta R/NF$) nähern sich lediglich einander an. Auch für 1985 verringert sich nur die Schwankungsbreite der so modifizierten Abflußfaktoren der verschiedenen Einzugsgebiete (Tab. A-5-6, Anhang).

Zusammenfassend ist festzustellen:

- 1.) Bei etwa gleichen Niederschlagsmengen im Freiland (ein Abflußjahr) wurden in verschiedenen Teilgebieten des Schönbuchs unterschiedlich hohe, mit den Speicheränderungen korrigierte, Abflußfaktoren bestimmt.
- 2.) Bei unterschiedlichen Niederschlagsmengen im Freiland (verschiedene Abflußjahre) wurden in denselben Teilgebieten unterschiedlich hohe, mit den Speicheränderungen korrigierte, Abflußfaktoren bestimmt.

Beides weist auf die Wirksamkeit weiterer abflußregulierender Faktoren in den Einzugsgebieten hin. Die o.g. Abflußfaktoren sind somit als gebietsspezifische Größe nicht ausreichend.

Der Einfluß des Waldbestandes auf den Gesamtabfluß

In bewaldeten Gebieten kann nur der Bestandesniederschlag (NB) abflußwirksam werden. Da in Buchenbeständen deutlich höhere Niederschläge gemessen werden als in Fichtenbeständen (ϕ NB 1985-86 für Buchen 681 mm/a und für Fichten 501 mm/a) geht von der Laub-/ Nadelwald-Verteilung ein wichtiger Einfluß auf das Abflußgeschehen aus. Dies wird von allgemein höheren Abflüssen in laubwaldreicheren Gebieten, auch durch die Messungen von 1985 und 1986, bestätigt. Die Abflußfaktoren von geologisch ähnlichen, überwiegend mit Fichten- oder Buchen bestandenen Gebieten verdeutlichen diesen Zusammenhang (Tab. 5-17).

Tab. 5-17: Abflußfaktoren (Q_t/NF) von ausgewählten Nadel(Nd)- und Laub(Lb)waldgebieten mit überwiegend km5/Lias- oder km4-Anteilen.

	km5/Lias-		km4-Gebiete	
	P 6	P 8	P 14	P 17
	0	67	19	80
1985 Q_t/NF	0,26	0,21	0,28	0,13
1986 Q_t/NF	0,19	0,17	0,25	0,17

Das im Vergleich zu P 17 ausgeprägtere Relief im km4-Gebiet P 14 wirkt vermutlich zusätzlich abflußbegünstigend, was zu einem höheren Abflußfaktor führt (vgl. Tab. A-5-6 im Anhang).

In Abb. 5-3 sind die mit den Speicheränderungen korrigierten Abflußfaktoren gegen den Nadelwaldanteil in den untersuchten Teilgebieten dargestellt. Graphik a) berücksichtigt den tatsächlich gemessenen Gesamtabfluß Q_t ($Q_{on} + Q_g$), Graphik b) nur die abgetrennten Q_g -Höhen (vgl. Kap. 5-4-1, Tab. A-5-7, Anhang).

Die beiden Darstellungen können bei eventuellen Diskrepanzen die Auswirkungen verschiedenen Q_{on} -Abflusses auf den Gesamtabfluß Q_t in den Einzugsgebieten (bedingt durch verschiedene Deckschichtenausbildung und Topographie) verdeutlichen.

Die mit dem Gesamtabfluß Q_t gebildeten Abflußfaktoren von 6 Einzugsgebieten ergaben für das etwa durchschnittliche Abflußjahr 1985 einen deutlichen Zusammenhang mit der jeweiligen Bestandesverteilung in den Einzugsgebieten (Abb. 5-3, a). Zum Vergleich dienten Durchschnittswerte von 1979-82 (berechnet nach Daten von AG-STER, 1986) die, wegen der Verwendung von Mittelwerten erwartungsgemäß eine bessere Korrelation ergaben. Die kleineren Abflußfaktoren von 1985 sind i.w. durch negative Speicheränderungen bedingt.

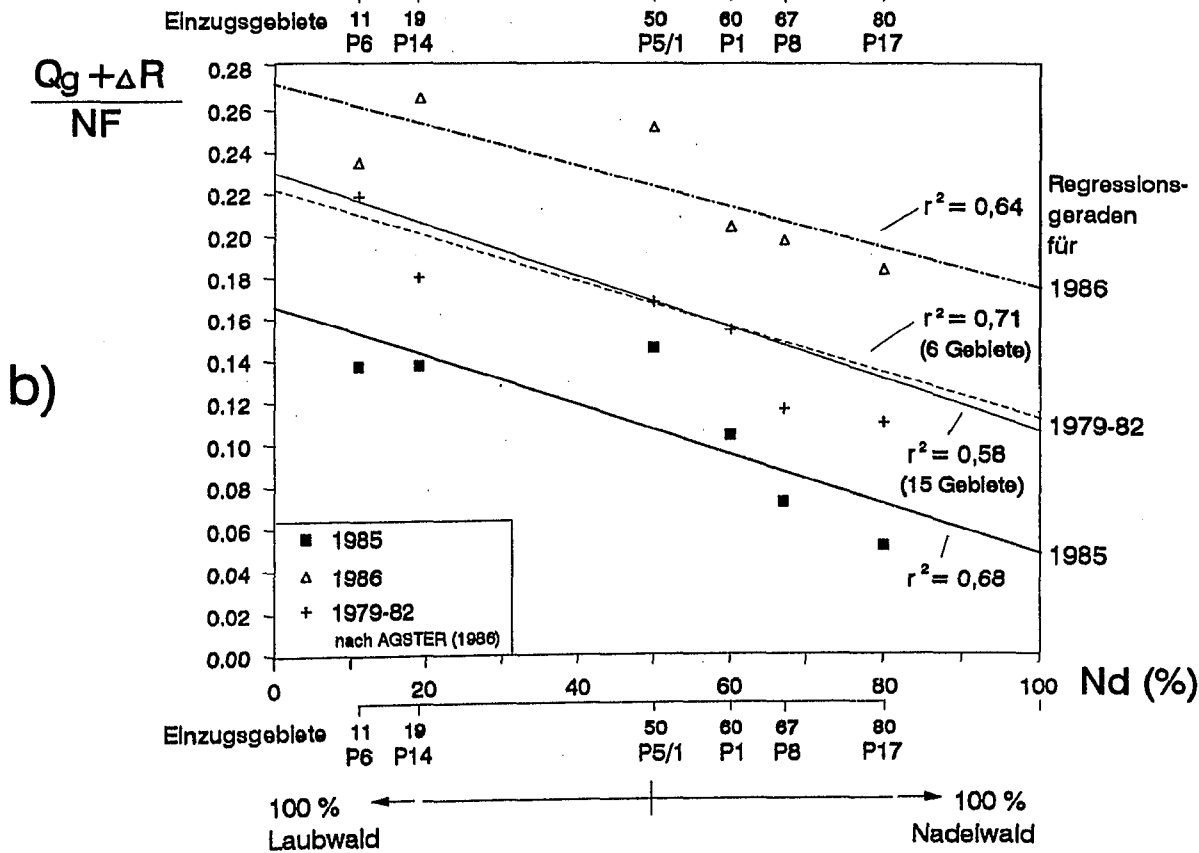
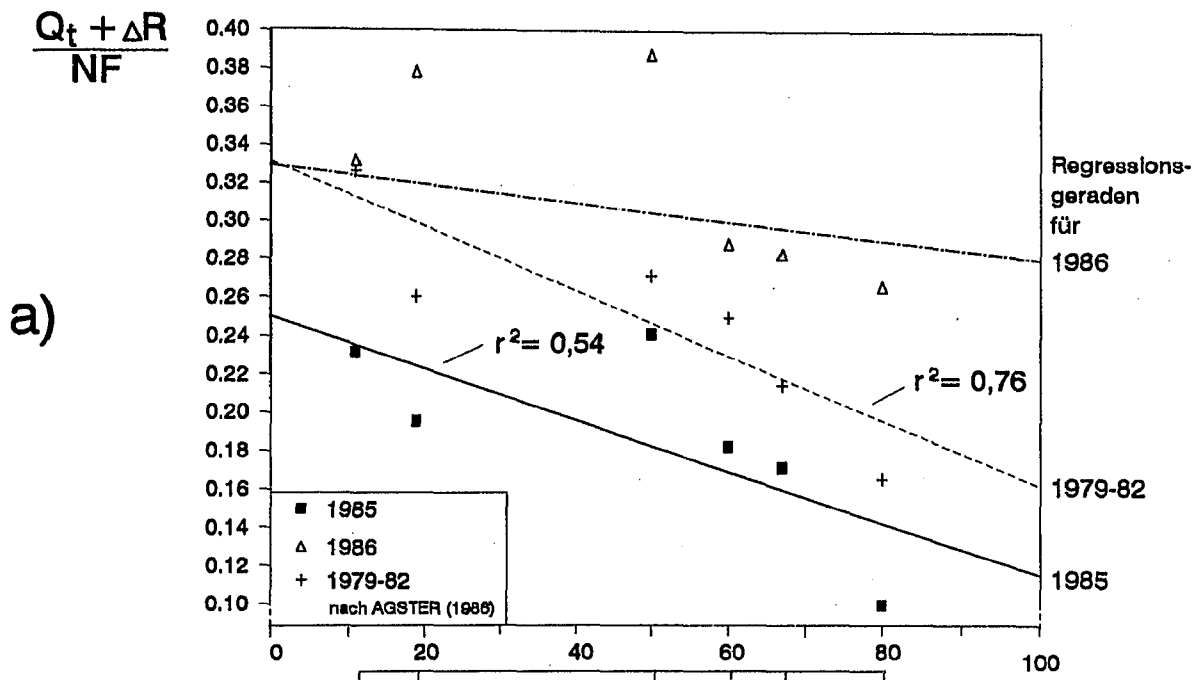


Abb. 5-3: Abflußanteile (einschl. der Vorratsänderungen $\Delta R = \Delta R_g + \Delta R_b$) von a) Q_t Gesamtabfluß; b) Q_g Grundwasserabfluß am Freilandniederschlag NF in Abhängigkeit zur Verbreitung des Nadelwalds an der Gesamtfläche Nd/F der untersuchten Einzugsgebiete.

Es fällt auf, daß Gebiete mit sehr hohen km⁴-Anteilen (P 17 und P 14) deutlich unter der Ausgleichsgerade liegen, während die Knollenmergel-/Lias-Gebiete eher höhere Abflußfaktoren aufweisen. Hier zeichnet sich der Einfluß der Interflow begünstigenden, schlechter durchlässigen Deckschichten ab.

Ausgehend von vergleichsweise kleineren Q/NF-Verhältnissen (Tab. 5-17 und A-5-6 im Anhang) kommt es im extrem nassen Jahr 1986 wegen der sehr hohen positiven Speicheränderungen zu überdurchschnittlich großen Abflußfaktoren. (Ähnlich hohe Werte, jedoch ohne die Gebiete P 17 und P 5/1, von denen für 1982 keine eigenen Daten vorlagen, wurden für das Vergleichsjahr 1982 berechnet.) Die besonders hohen Gesamtabflüsse in den Gebieten P 14 und P 5/1 führten zu stark abweichenden Abflußfaktoren. Mit ihnen konnte für die 6 untersuchten Teilgebiete insgesamt kein direkter Zusammenhang zu der Bestandesverteilung (Regressionsgerade in Abb. 5-3 gestrichelt) abgeleitet werden.

Mit dem Grundwasserabfluß Q_g gebildete Abflußfaktoren werden weniger stark von wechselnden Q_{on} -Abflüssen (als Bestandteil von Q_t , Abb. 5-3 a) und den Q_{on} bestimmenden Faktoren beeinflusst. Die zwischen diesen Abflußfaktoren und der Bestandesverteilung signifikanten negativen Korrelationen kommen für 1985, für die Mittelwerte der Jahre 1979-82 und auch für das Naßjahr 1986 sehr gut zum Ausdruck (Abb. 5-3, b).

Neben der Darstellung der einzelnen Daten und ihrer Regressionsgeraden für die 6 Vergleichsgebiete wurde auch die auf den Ergebnissen von 15 Teilgebieten basierende, von AGSTER (1986) berechnete Ausgleichsgerade, jedoch ohne Einzeldaten, eingetragen. Der nahezu deckungsgleiche Verlauf der Regressionsgeraden von 6 und 15 Teilgebieten aus dem Meßzeitraum 1979-82 zeigt die für die Abflußsituation des Schönbuchs repräsentative Auswahl der 6 Untersuchungsgebiete.

Die Q_g -Abflußfaktoren ergeben, im Gegensatz zu den Q_t -Abflußfaktoren (Abb. 5-3, a) auch im Naßjahr 1986 einen deutlichen Zusammenhang zu der Bestandesverteilung (Abb. 5-3, b). Dies zeigt, daß sich die Q_{on} -Höhen im Naßjahr 1986 in den verschiedenen Gebieten stärker voneinander unterscheiden als die Q_g -Höhen.

Aus den nahezu gleichen Steigungen der Regressionsgeraden können für alle Beobachtungszeiträume für ein reines Laubwald- und ein reines Nadelwaldgebiet Q_g -Differenzen von ca. 90 mm/a berechnet werden. Im Mittel ergeben sich Q_g -Abflüsse in Höhe von ca. 170 mm/a für reine Laubwald- und 80 mm/a für reine Nadelwaldbestände. Die Differenz der Summen der Verdunstungsteil-

komponenten (Bodenwasserbilanzmethode, Kap. 5.2.2) zwischen reinen Laub- und Nadelwaldgebieten liegt im mehrjährigen Mittel (1979-82) bei 113 mm und 1985 bei 137 mm (Auswertung von 4 Testflächenergebnissen, Tab. 5-9).

Daraus kann gefolgert werden, daß der höhere Nettoniederschlag in Buchenbeständen überwiegend zu einer höheren Grundwasserneubildung beiträgt. Nur eine Teilmenge steht einem höheren Q_{on} zur Verfügung.

Einfluß der Deckschichten und der Topographie auf den Gesamtabfluß

Bei größeren Reliefunterschieden kann Niederschlagswasser (nach der Kronenpassage) rascher zum Vorfluter gelangen (sich damit eher einer Evapotranspiration entziehen) und den Gesamtabfluß (über Q_{on}) erhöhen, als in flacheren Gebieten. Die Ausbildung der Deckschichten kann sowohl den Gesamtabfluß als auch die Höhen der einzelnen Abflußkomponenten beeinflussen. Bei größerer Mächtigkeit der Deckschichten ist durch eine gesteigerte Transpiration (Kap. 5.2.2) eine höhere Gesamtverdunstung zu erwarten, bei schlechter vertikaler Durchlässigkeit (Ausbildung eines Stauhizontes) kann ein rascher Abfluß bzw. Interflow begünstigt und die Grundwasserneubildung erschwert werden.

Zur qualitativen Beschreibung des Sickerhaltens der in den Einzugsgebieten verbreiteten Deckschichten kann vereinfachend die Verbreitung des Sandsteinkeupers (km 2, km 4 und ko) in den Teilgebieten herangezogen werden. In den westlichen Teilgebieten herrschen eher lehmig-sandig ausgeprägte, besser durchlässige Deckschichten über Sandsteinkeuper vor. Im östlichen Schönbuch sind dagegen mehr tonig ausgebildete Deckschichten über Keupermergel und Liastonen verbreitet.

Dieses Vorgehen stellt deshalb eine Vereinfachung dar, weil auch in Sandsteinkeupergebieten zuweilen stärker tonig ausgebildete Böden angetroffen werden (z. B. MÜLLER und LANGBEIN, 1986). Vgl. auch Darstellungen der Porengrößenverteilung und gesättigten hydraulische Leitfähigkeit in Bodenprofilen der km⁴-Testflächen (Abb. 3-2) mit stellenweise schlecht durchlässigen, Q_{on} begünstigenden Böden. Ferner konnte in z.T. eigenen Untersuchungen der periglazialen Deckschichten (ELGNER et al., 1986) nachgewiesen werden, daß Schichtgrenzen stellenweise zwischen 50 und 100 m von durch Solifluktion hangabwärts verlagertem Bodenmaterial überwandert wurden.

Um den Einfluß der unterschiedlichen Deckschichtenausbildung auf Q_t und Q_{on} deutlich zu

machen, sind in Abb. 5-4 a) die Höhe des Gesamtabflusses (korrigiert mit ΔR und bezogen auf NB) und in Abb. 5-4 b) die Höhe von Q_{on} (korrigiert mit ΔR_t und bezogen auf NB) gegen die Verbreitung des Sandsteinkeupers in den untersuchten Einzugsgebiete dargestellt. Durch den Bezug auf die jeweiligen NB-Höhen wird die dominierende Auswirkung der Bestandesverteilung auf die Abflußhöhen (dargestellt in Abb. 5-3) weitgehend kompensiert.

Da lokal unterschiedliche Deckschichtenausbildungen in kleineren Gebieten eher zu Unschärfen führen können, ist ein Trend der übergreifenden Einzugsgebiete, die sich durch ihre Sandsteinkeuperanteile von 9% (Gebiet P 5/1) und 58% (Gebiet P 1) deutlich unterscheiden, jeweils durch eine Verbindungslinie der Einzelwerte hervorgehoben.

Für die 3 dargestellten Untersuchungszeiträume (ϕ 1979-82, 1985 und 1986) wurden im "Sandsteingebiet" P 1 geringere Abflußhöhen (Q_t und Q_{on} , bezogen auf NB) gemessen als im "Tongebiet" P 5/1. Diesen Zusammenhang geben auch die mit ähnlicher Steigung verlaufenden Regressionsgeraden aller 6 Untersuchungsgebiete, jedoch nur für die durchschnittlich nassen Beobachtungszeiträume 1979-82 und 1985, wieder.

Die Korrelationen zwischen Q_{on} und Sandstein-Anteilen (Abb. 5-4 b) zur Beschreibung der Deckschichtenausbildung in den Einzugsgebieten sind erwartungsgemäß deutlich besser als der mit Q_t bestehende Zusammenhang, der durch Q_g -bestimmende Faktoren "gestört" wird (Abb. 5-4 a). Erwartungsgemäß wird Q_g als Teil von Q_t von anderen, bereits diskutierten Abflußfaktoren stärker beeinflusst.

Im sehr nassen Jahr 1986 ist v.a. wegen überdurchschnittlicher Abflußzunahmen in den beiden sandsteinreichsten Gebieten (P 14 und P 17) kein Zusammenhang zwischen Abflußhöhe und Sandstein-Anteil der untersuchten Gebiete erkennbar. Die großen Gebiete zeigen den sonst vorliegenden Trend nur schwach bei Q_{on} , bei Q_t dagegen besonders stark. Hier wirken sich vermutlich höhere positive Speicheränderungen und eine überdurchschnittliche Zunahme des Q_g im Gebiet P 5/1 aus.

Auch die im Vergleich zu P 1 größeren topographischen Unterschiede können sich im Gebiet P 5/1 abflußbegünstigend auf Q_{on} auswirken. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen Reliefenergie (Quotient aus Höhendifferenz im Einzugsgebiet und Einzugsgebietsgröße, vgl. Tab. 3-2, Kap. 3 und Tab. A-5-6, Anhang) und den Q_{on} -Abflußfaktoren ist allerdings nicht erkennbar. So weichen z.B. die Q_{on} -Abflußfaktoren eines sehr steilen Einzugsgebietes (P 14) in normal nassen Jahren

kaum von der Regressionsgeraden ab (Abb. 5-4 b). Vermutlich findet in dem Sandgebiet P 14 auf Teilflächen (randliche Verebnung mit besser durchlässigen Deckschichten) eine höhere Infiltration in den Aquifer und damit ein höherer Q_g -Abfluß statt, der einen Einfluß der Topographie, der auf Q_{on} wirken könnte, zurückdrängt. Im Naßjahr 1986 war dagegen eine relativ stärkere Q_{on} -Zunahme, auch im km4-Gebiet P 17, das im Vergleich zu P 14 auch 1985 relativ höhere Q_{on} -Anteile aufweist (vgl. Abb. 5-4 a und b und Kap. 5.4.1), zu verzeichnen.

AGSTER (1986), der einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Quotienten Q_o/NB und den Sandsteinkeuper-Anteilen in den Einzugsgebieten fand, ermittelte aus der Berechnung der linearen Regression einen Rückgang des Q_o von 80 - 95 mm/a in reinen "Tongebieten" auf Werte um 40 mm/a in reinen "Sandgebieten". Die eigenen Daten von 1985 bestätigen die theoretischen Q_o -Abflußunterschiede von ca. 40 - 50 mm/a (vgl. paralleler Verlauf der Ausgleichsgeraden von 1985 und 1979-82).

Zusammenfassende Betrachtung zu den Auswirkungen abflußregulierender Faktoren

Mit zunehmendem Nadelwaldanteil (Nd) nehmen die Verdunstungshöhen zu. Wegen des reduzierten Wasserdargebots sind in Nd-reichen Gebieten deshalb geringere Gesamtabflußhöhen zu erwarten. Dieser Zusammenhang zwischen Bestandesverteilung und Abflußhöhe konnte bei der Untersuchung von 6 Einzugsgebieten für den Gesamtabfluß und durchschnittlich feuchte Jahre sowie für den Grundwasserabfluß in durchschnittlichen und einem sehr nassen Jahr nachgewiesen werden (Abb. 5-3). (Im nassen Jahr 1986 verhinderte eine sehr starke R_t -Zunahme höhere Q_{on} -Abflüsse.)

Neben der Bestandesverteilung wurde die Auswirkungen des abflußwirksamen Faktors Deckschichten, vereinfachend durch den Gebietsanteil des Sandsteinkeupers, dargestellt. Ein Zusammenhang zwischen der Ausbildung von eher lehmig-tonigen Deckschichten und höheren Abflüssen im östlichen Schönbuch (P 5/1) und eher lehmig-sandigen Deckschichten und geringeren Abflüssen im westlichen Gebiet (höherer Sandsteinkeuper-Anteil, P 1) ist gut erkennbar. Im nassen Jahr 1986 verwischen vermutlich die Auswirkungen der anderen genannten Abflußfaktoren einen Zusammenhang zwischen Deckschichtenausbildung und Gesamtabfluß bzw. oberflächennahem Abfluß.

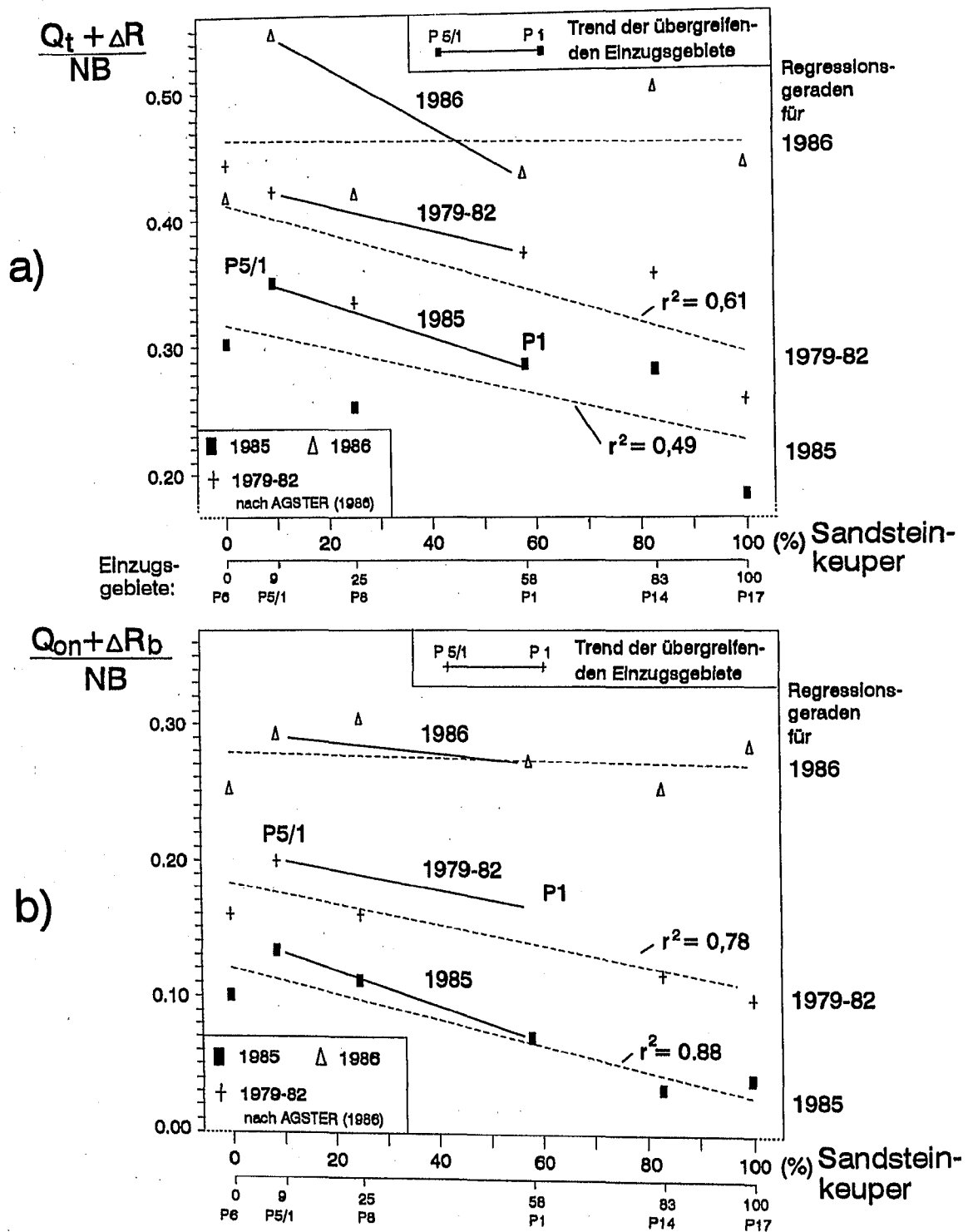


Abb. 5-4: Abflußanteile von a) Q_t Gesamtabfluß, (einschließlich der Vorratsänderungen $\Delta R = \Delta R_p + \Delta R_b$) und b) Q_{on} (einschließlich ΔR_b) am Bestandes-Niederschlag NB in Abhängigkeit zur zunehmenden Verbreitung des Sandsteinkeupers in 6 bewaldeten Einzugsgebieten. Angaben für 1979-82: neu berechnet nach Daten von AGSTER (1986).

Die großen, übergreifenden Einzugsgebiete P 5/1 und P 1 bestätigen die festgestellten Korrelations-ergebnisse. Hier machen sich Inhomogenitäten der Deckschichtenausbildung und Topographie weniger bemerkbar als in den kleineren Teileinzugsgebieten.

Mögliche Auswirkungen der Topographie auf die Abflußhöhen bestehen darin, daß mit zunehmenden Reliefunterschieden das Niederschlagswasser rascher in den Vorfluter abgeführt und einer Evapotranspiration entzogen werden kann. Eine eindeutige Beziehung zwischen den Abflußfaktoren Q/NB und der Reliefenergie, einem möglichen Maß zur Beschreibung topographischer Unterschiede (Tab. A-5-6, Anhang), ließ sich nicht ermitteln. Vermutlich überlagern die Einflüsse der anderen genannten Faktoren die Auswirkungen der Topographie.

Im Kirnbachgebiet (P 5/1) tragen steile Hänge und tonige, weniger gut durchlässige Deckschichten zu den höchsten, nur mit P 14 vergleichbaren, Abflußmengen bei (Verbindung der Faktoren Topographie und Deckschichtenausbildung).

In anderen, kleineren Einzugsgebieten mit hoher Reliefenergie blieben die Abflüsse niedriger. So wirken z. B. im Bärlochgebiet (RE-Stufe = 5) am Pegel 6 (Teilgebiet von P 5/1), das mit überwiegendem Lias-Anteil zunächst den "Tongebieten" zuzurechnen ist, die sandigen Deckschichten über Angulatensandstein (Lias $\alpha 2$) vermutlich weniger abflußbegünstigend.

5.4 Abflußtrennung und Grundwasserneubildung - herkömmliche Bestimmungsverfahren

Das Abflußverhalten wurde bisher über den direkt gemessenen Gesamtabfluß (Q_t im Vorfluter) und die nach einem graphischen Verfahren abgetrennten Abflußkomponenten Grundwasserabfluß (Q_g) und Oberflächen- und oberflächennaher Abfluß (Q_o bzw. Q_{on}) beschrieben.

Mit Messungen von Quellschüttungen und der Erfassung des Interflow ist eine Bestimmung von Abflußkomponenten nur qualitativ oder in kleinerem Maßstab quantitativ möglich. Um die Ergebnisse von kleinräumig durchgeführten Untersuchungen auf größere Gebiete übertragen zu können, oder die Resultate von speziellen Separationsverfahren des Gesamtabflusses einordnen bzw. mit früheren Daten vergleichen zu können, sind zunächst herkömmliche Verfahren zur Abflußtrennung angewendet worden.

Diese Trennverfahren unterteilen den Gesamtabfluß in die langsamer abfließende Grundwasser-

komponente Q_g und die rascher abfließende Q_o - bzw. Q_{on} -Komponente (vgl. dazu auch Einführung in die Modellvorstellung zur Abflußbildung, Kap. 2.3).

Die Grundwasserneubildung kann bei langjährigen Beobachtungszeiträumen dem Grundwasserabfluß gleichgesetzt werden. Deshalb stellt die Ermittlung der Q_g -Höhe eine der grundlegenden Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildung dar. Andere Methoden werden vorgestellt und am Beispiel der Ergebnisse ausgewählter Gebiete verglichen.

5.4.1 Q_g - und Q_{on} -Höhen nach graphischem Separationsverfahren

Die bisher im wesentlichen nicht als Abflußhöhe sondern nur indirekt über Abflußfaktoren vorgestellten Q_g - und Q_{on} -Abflußteile in den Einzugsgebieten (Kap. 5.3, Tab. A-5-6, im Anhang) waren Ergebnisse eines graphischen Verfahrens zur 2-Komponenten-Separation. Abflußabhängige Änderungen der Leitfähigkeit im Vorfluterabfluß (und in Quellschüttungen) und Quellschüttungsschwankungen werden mit berücksichtigt (vgl. dazu EINSELE und SCHULZ, 1973, RICHTER und LILLICH, 1975). Zur Auswertung dienen semilogarithmisch dargestellte Abfluß-Tagesmittelwerte, aus deren Kurvenverlauf prinzipiell rascher abfließendes Wasser von weniger rasch aus dem Grundwasserleiter abfließendem (TWL) getrennt wird. Die als Q_g abgeflossene Wassermenge wurde nach der graphischen Abtrennung planimetriert und in Abflußhöhen umgerechnet.

Am Abflußgeschehen können neben einem direkt auf den Vorfluter fallenden Niederschlag und tatsächlichem Oberflächenabfluß verschiedene Speichersysteme mit unterschiedlichem Retentionsvermögen und dem Leerlaufverhalten eines homogenen Aquifers (Gleichung nach MAILLET, 1905) beteiligt sein.

Durch eine mögliche Überlagerung unterschiedlicher Leerlaufkurven (gekennzeichnet durch verschiedene α -Werte) von z.B. flacheren und tieferen Grundwasserspeichern mit der eines für Interflow sorgenden Bodenwasserspeichers wird eine Q_g - und Q_{on} -Bestimmung erschwert. Ferner kann in einem graphisch abgetrennten rascheren Abflußteil neben direkt abfließendem Niederschlagswasser auch älteres Bodenwasser enthalten sein, die beide als Q_{on} (i.d.R. als Interflow und kaum als Überlandabfluß) zum Gesamtabfluß beitragen.

Es wird deutlich, daß eine Trennung des Gesamtabflusses in Q_g und Q_o (Q_{on}) den Abflußvorgang mit nur eingeschränkter Genauigkeit (auch

verfahrensbedingt) beschreiben kann.

Genaueren Einblick in die Zusammensetzung des Gesamtabflusses und das quantitative Verhalten der Abfluß-Teilkomponenten aus verschiedenen Speichersystemen haben isopenhydrologische Separationsverfahren (mit Untersuchungen von Leerlaufkurven) im Zusammenhang mit der Betrachtung von einzelnen N-Q-Ereignissen (vgl. Kap. 8.5) geben können.

Mit dem graphischen Verfahren konnte, trotz der angesprochenen Schwierigkeiten, eine plausible Abtrennung des Grundwasserabflusses Q_g von einem rascher abfließenden, hier nicht weiter differenzierten Abflußteil aus Oberflächen- und oberflächennahem Abfluß Q_{on} durchgeführt werden. Ausgewertet wurden Leerlaufkurven und Quellschüttungen sowie Leitfähigkeitsänderungen in Vorflutern und Quellen, welche die wechselnde Zusammensetzung des Gesamtabflusses aus höher mineralisiertem Grundwasser und geringer mineralisiertem Deckschichten- und Niederschlagswasser wiedergeben. Ferner lieferten die Erfahrungen im Zusammenhang mit den Messungen und Auswertungen des Interflow-Verhaltens (vgl. Kap. 8.2f.) wertvolle Hinweise.

Die graphische Trennung des Gesamtabflusses in Q_g und Q_{on} wurde für alle Untersuchungsgebiete (mit Ausnahme der beiden kleinen Gebiete P 9 und P 18, die einen nur unvollständigen Grundwasseranschluß besitzen) durchgeführt. Damit wurden Basisdaten der Abflußanteile für einen Vergleich mit den Ergebnissen der aufwendigeren, spezielleren Trennverfahren gewonnen. Eine Zusammenstellung der Daten (Halbjahreswerte) ist der Tabelle A-5-7 (im Anhang) zu entnehmen.

In Tab. 5-18 sind die Ergebnisse der großen Einzugsgebiete P 1 und P 5/1 sowie der Teilgebiete P 14 und P 8, die die höchsten und niedrigsten Q_g/Q_t -Verhältnisse in den Untersuchungsjahren 1985 und 1986 aufwiesen, zusammengefaßt. Zusätzlich dargestellt sind die mittleren Abflußteile der früheren Meßperiode 1979-82.

Die Q_g/Q_t -Verhältnisse variieren in beiden großen Einzugsgebieten nur wenig um 60%. Die in kleineren Gebieten unterschiedlichen Auswirkungen der abflußregulierenden Faktoren (Kap. 5.3.2) werden in den großen Gebieten eher ausgeglichen. Bei insgesamt geringeren Abflußhöhen waren im Gebiet P 1 im Normaljahr 1985 etwas höhere und im Naßjahr 1986 etwas niedrigere Q_g/Q_t -Anteile im Vergleich zum Einzugsgebiet von P 5/1 ermittelt worden.

Die Q_g/Q_t -Anteile stimmen im normal nassen Jahr 1985 insgesamt gut mit den Mittelwerten der Jahre 1979-82 überein. Im "Sandsteingebiet" P 14 (km 4-Anteil 83%) konnte im Vergleich zu

dem "Tongebiet" P 8 (km 4-Anteil nur 25%.) bei stets höheren Abflüssen ein auch prozentual deutlich höherer Q_g -Abfluß abgetrennt werden. Die damit verbundene höhere Grundwasserneubildung ist darauf zurückzuführen, daß in Teilen des Gebietes lehmig-sandige Deckschichten mit günstigeren Sickerseigenschaften (gegenüber lehmig-tonigen und Q_{on} begünstigenden) vorherrschen (vgl. auch Abb. 5-4).

Tab. 5-18: Höhen des Gesamtabflusses, des Oberflächen- und oberflächennahen Abflusses Q_{on} und des Grundwasserabflusses Q_g sowie Anteile von Q_{on} und Q_g an Q_t in den Einzugsgebieten P 1, P 5/1, P 14 und P 8.

	Q_t	Q_{on}	Q_g		Q_g/Q_t	Q_{on}/Q_t
	mm/a	mm/a	mm/a	(%)	%	%
P 1						
1979-82	172	68	104	(84)	60	40
1985	161	58	103		64	36
1986	172	73	99		58	42
P 5/1						
1979-82*	207	91	116	(107)	56	44
1985	212	85	127		60	40
1986	240	97	143		60	40
P 14						
1979-82	175	55	120	(95)	69	31
1985	205	59	146		71	29
1986	240	82	158		66	34
P 8						
1979-82	156	74	82	(47)	53	47
1985	161	80	81		50	50
1986	172	89	83		48	52

1979-82: Vergleichsdaten nach AGSTER (1986);

*: umgerechnet auf veränderte Fu-Größe

(): Q_g nach MoMNQ-Verfahren (WUNDT, 1958)

Der Grundwasserabfluß bewegte sich 1985 zwischen 62% und 71% (Q_g/Q_t) in "Sandgebieten" und zwischen 50 und 62% in Tongebieten. Neben den durchlässigeren Deckschichten wirken im Gebiet P 14 auch geringere Nadelwaldanteile mit höheren Nettoniederschlägen als Q_g -erhöhender Faktor im Gebiet P 14 im Vergleich zu P 8 (vgl. Kap. 5.3.2).

Trotz des extrem hohen Niederschlagsdargebots von 1986 stellten sich gegenüber 1985 nur geringe Verschiebungen der Q_g/Q_t -Verhältnisse zu niedrigeren Werten ein. Dies liegt mit an den wegen der großen Zunahme der Speichervorräte, v.a. des Bodenwasserspeichers, nur wenig gesteigerten Gesamtabflußhöhen.

Die höheren Gesamtabflüsse des östlichen Gebietes (P 5/1) sind nach diesem Auswerteverfahren nicht auf höhere Q_{on} -Abflüsse allein, sondern auf eine im gleichen Verhältnis gesteigerte Zunahme beider Abflußkomponenten zurückzuführen (vgl. abflußregulierende Faktoren, Kap. 5.3.2).

Bei der Diskussion über den Einfluß verschiedener abflußwirksamer Faktoren (Kap. 5.3.2) konnten z.T. erhebliche Abweichungen kleinerer Teileinzugsgebiete von dem Trend der übergreifenden großen Gebiet P 1 und P 5/1 aufgezeigt werden. Es folgen ergänzende Anmerkungen unter Einbeziehung der absoluten Abflußhöhen in [mm].

Im reinen Stubensandstein-Gebiet von P 17 entsprach die Q_{on}/Q_g -Verteilung von 1985 (Tab. A-5-7) etwa den früheren Durchschnittswert (1979-82). Flache km4-Hänge mit sandreichen Deckschichten und vergleichsweise geringe Gebietsniederschläge sorgen für etwas unterdurchschnittliche Q_{on} -Anteile zwischen 35% und 38% bei geringsten Gesamtabflüssen aller untersuchten Gebiete. Da nur der obere Bereich des Stubensandsteins bei P 17 erfaßt wird und mit einer Bachbettversickerung gerechnet werden muß (AGSTER, 1983) kommt es in normal nassen Jahren zu nur sehr geringen Abflußhöhen. Im Naßjahr 1986 stieg Q_t (von 92 mm auf durchschnittliche 175 mm) und Q_{on} relativ am stärksten an ($Q_{on}/Q_t = 46\%$).

Die Q_{on}/Q_g -Anteile im zweiten kleinen Stubensandsteingebiet P 14 (km4-Flächenanteil 83%) entsprachen 1985 mit 31/69, trotz höheren Gesamtabflusses, etwa dem Mittelwert der vorangegangenen Meßperiode (ca. 30/70). Auch in diesem Gebiet bewirkten die gegenüber 1985 wesentlich höheren Niederschläge von 1986 eine Zunahme des Q_{on}/Q_t -Anteils von 29% auf 34%.

Bei einem Vergleich der km4-Gebiete P 14 und P 17 zeigen sich im Gebiet P 14, trotz wesentlich höherer Reliefenergie, deutlich geringere Q_{on}/Q_t -Anteile (die geringsten von allen untersuchten Einzugsgebieten). Neben anderen möglichen Effekten (wie unterschiedliche Speicheränderungen) wirken sich im Gebiet P 14 offenbar größere Teilbereiche mit besser durchlässigen Deckschichten (vgl. geringere k_f -Gradient in Profil S 4-3, Abb. 3-2, Kap. 3) oder fehlendem Basisschutt (z.B. am Einzugsgebietsrand), der sonst als Stauhohizont den oberflächennahen Abfluß begünstigt, Q_{on} vermindern aus. Für einen hohen Grundwasserabfluß ist sicherlich mitentscheidend, daß P 14 den gesamten Stubensandstein-Aquifer und damit den gesamten Grundwasserabfluß erfaßt, wohingegen an P 17 nur der Grundwasserabfluß aus den oberen km4-Horizonten gemessen wird.

Im Lias-Gebiet P 6 wurden in der früheren Meßperiode sehr hohe durchschnittliche Q_g -Anteile (66% Q_g/Q_t) bei einem sehr hohen mittleren Gesamtabfluß von 275 mm/a festgestellt. In den Jahren 1985 und 1986 lagen die entsprechenden Daten dagegen eher auf durchschnittlichem Niveau (Tab. 5-19).

Dieses Gebiet besitzt trotz hohem Lias- und Knollenmergel-Anteil (95%) Deckschichten, die sich vermutlich nicht Q_{on} begünstigend auswirken. Dies kann dadurch erklärt werden, daß die Lias-Vorkommen in den Untersuchungsgebieten hauptsächlich Plateauflächen einnehmen und dort häufig von weniger tonigen, sondern eher sandigen Verwitterungsböden des Angulatusandsteins (Lias α_2) überdeckt sind. Somit läßt sich die vereinfachend zur Charakterisierung der Deckschichten (Kap. 5.3.2) verwendete Abgrenzung von sandig ausgeprägten, weniger Q_{on} begünstigenden Deckschichten über km4 von den eher Interflow begünstigenden Deckschichten in "Tongebieten" (km5 und Lias) nur begrenzt anwenden.

Die Q_g/Q_{on} -Werte für das Gebiet P 8 sind sehr unter-

schiedlich im Vergleich zu den anderen Gebieten. Hier wurden die geringsten Grundwasserabflüsse und höchsten Q_{on} -Anteile (um 50%) bei exakt gleichen Gesamtabflußhöhen wie im Gebiet P 1 ermittelt. Dies stimmt mit dem Durchschnittswert der früheren Meßperiode, 47% Q_{on}/Q_t , gut überein (AGSTER, 1983). Das Gebiet ist durch die vergleichsweise hohe Verbreitung des Knollenmergels (46%), dessen tonig ausgebildete Deckschichten allgemein zu hohen Q_{on} -Abflüssen führen, charakterisiert.

Unter Berücksichtigung der Speicheränderungen im Aquifer können aus den Q_g -Höhen die jährlichen Grundwasserneubildungsraten ermittelt werden. Die nach dieser Methode für die verschiedenen Einzugsgebiete berechnete Grundwasserneubildung (bezeichnet als I_g) wird in Kap. 5.4.3 dargestellt.

5.4.2 Q_g -Bestimmung nach statistischem Verfahren

Neben graphischen Verfahren lassen sich auch statistische Methoden zur Ermittlung des Grundwasserabflusses heranziehen. Das häufig angewendete MoMNQ-Verfahren nach WUNDT (1958) bildet aus dem arithmetischen Mittel der monatlichen Niedrigwasserabflüsse einer langjährigen Meßreihe die monatliche mittlere Niedrigwasserabflußspende. Sie entspricht nach WUNDT der mittleren unterirdischen (Grundwasser-) Abflußspende. Die auf diese Weise ermittelten Q_g -Werte liegen erfahrungsgemäß zu niedrig, da kurzfristige Q_g -Erhöhungen nicht berücksichtigt werden. Für die hier bearbeitete Meßreihe zweier sehr unterschiedlich nasser Jahre war dieses Verfahren nicht geeignet.

Die Ergebnisse der früheren 4-jährigen Meßperiode (AGSTER, 1986) werden hier zum Vergleich mit den Q_g -Ergebnissen des graphischen Verfahrens für das Normaljahr 1985 herangezogen (vgl. Tab. 5-19). Die Q_g -Höhen liegen zwischen ca. 10 und 30 mm unter den graphisch (TWL) ermittelten Grundwasserabflüssen und geben ein Minimum der Grundwasserneubildung wieder.

5.4.3 Grundwasserneubildung

Der Grundwasserabfluß wurde für den Meßzeitraum 1985 und 1986 mit Hilfe eines graphischen Verfahrens bestimmt (Kap. 5.4.1) und mit dem statistisch nach WUNDT (1958) ermittelten Grundwasserabfluß der mehrjährigen Meßreihe 1979-82 verglichen. Die Grundwasserneubildung (I_g) kann bei langjährigen Beobachtungszeiträu-

Tab. 5-19: Grundwasserneubildung in den untersuchten Einzugsgebieten. Ergebnisse verschiedener Berechnungsverfahren.

Meßstation Einzugsgebiet	Meß- zeitraum	Q _t	Q _{on}	Q _g	I _{g1}	I _{g2}	I _{g3}	I _{g4}	
		alle Angaben in mm/a							a
P 1 Goldersbach/ Bebenhausen	1985	161	58	103	102	157	165	68	130
	1986	172	73	99	112	219	353	80	156
	1979-82	172	68	104	113		174		
P 5/1 Kirnbach	1985	212	85	127	110	195	147	(28	44)
	1986	240	97	143	191	264	379	(35	55)
	1979-82	207	91	116	144		177		
P 6 Bärloch	1985	182	70	112	109	252	164	64	92
	1986	203	81	122	141	350	400	82	118
	1979-82	241	83	158	159		194	84*	
P 8 Kleiner Goldersbach	1985	161	80	81	76	170	173	84	149
	1986	172	89	83	83	227	369	95	162
	1979-82	156	74	82	84		192	77*	
P 14 Denzenberg	1985	205	59	146	129	216	181	81	142
	1986	240	82	158	182	276	345	97	171
	1979-82	175	55	120	121		181	76*	
P 17 Obere Lange Klinge	1985	92	35	57	55	92	159	72	151
	1986	175	80	95	99	183	370	83	199
	1979-82	110	39	71	72		180	66*	

Abkürzungen:

Q_t, Q_{on}, Q_g: Gesamtabfluß, gemessen; Abflußkomponenten, graphische Separation;

I_{g1}: graphisch mit Hilfe der TWL

I_{g2}: Modellrechnung in Anlehnung an das UHLIG-Verfahren (SAUTER, 1992)

I_{g3}: Methode nach RENGER und STREBEL (1980)

I_{g4a}: graphisch-chemisch nach der Chloridmethode (SCHULZ, 1972)

I_{g4b}: Chloridmethode (SCHULZ, 1972), abgewandelt mit Bezug auf den Bestandesniederschlag (Höhe und Chloridkonzentration)

*: Daten aus dem Meßzeitraum 1979-80

(weitere Erläuterungen im Text)

men mit dem Grundwasserabfluß gleichgesetzt werden. Für die Bilanzierung kürzerer, einjähriger Meßzeiten sind Grundwasservorratsänderungen (ΔR_g) mitzubersichtigen. Unter Einbeziehung des Grundwasserab- bzw. -zustroms (Q_{gw}) gilt dann:

$$I_g = Q_g + Q_{gw} + \Delta R_g$$

(vgl. Einzeldaten in Tab. A-5-5 und A-5-7 im Anhang).

Die für die 6 Teilgebiete ermittelten Ergebnisse dieser, auf einem graphischen Verfahren basierenden Berechnung der Grundwasser-(GW-)Neubildung sind in Tab. 5-19 den Ergebnissen anderer hier angewendeten Verfahren gegenübergestellt. Sie werden i.f. als I_{g1}-Werte bezeichnet.

Grundwasserneubildung nach graphischem Verfahren (I_{g1})

Die GW-Neubildungsraten (I_{g1}, graphisches Ver-

fahren, Tab. 5-19) bewegten sich 1985 (NF-Mittel = 725 mm) zwischen 55 mm (P 17) und 129 mm (P 14). Die entsprechenden Werte der vorangegangenen Meßperiode 1979-82 (25 mm höherer NF, dem langjährigen Mittelwert entsprechend) lagen mit unterschiedlichen Abweichungen allgemein über den Werten von 1985. Sie reichten von 72 mm (P 17) bis 159 mm (P 6).

Im Abflußjahr 1985 kam es in allen Gebieten zu einer Verringerung des Bodenwasservorrats (16 - 45 mm) und in Teilgebieten auch zu negativen Grundwasservorratsänderungen (0 - 17 mm, vgl. Tab. A-5-5, Anhang).

Die I_{g1}-Daten des sehr nassen Jahres 1986 (NF-Mittelwert = 1021 mm) liegen für alle Einzugsgebiete zwar deutlich über den Werten von 1985, übersteigen aber nur in 3 Gebieten (P 5/1, P 14, P 8) die Mittelwerte der früheren Meßperiode von 1979-82 (NF-Mittelwert = 750 mm, AGSTER, 1986a). Der extrem hohe Jahresniederschlag von 1986 führte nur zu einer vergleichsweise geringen positiven Grundwasservorratsänderung (3 - 48 mm, vgl. Tab. A-5-5, Anhang).

Dies liegt daran, daß die hohen Sommer- und Herbstniederschläge 1986 zu einer erhöhten Bodenwasserspeicherung ΔR_b bis maximal 128 mm (A-5-5, Anhang, Abb. 5-2, Kap. 5.3) beitrugen. Dieses am Ende des Bilanzjahres 1986 noch gespeicherte Niederschlagswasser konnte erst im folgenden Abflußjahr zu einer gesteigerten GW-Neubildung (bzw. auch zu einer Interflow- und Transpirationszunahme) beitragen. Die GW-Neubildungsraten von 1986 erreichten deshalb nicht die Werte aus dem ähnlich niederschlagsreichen (NF ca. 960 - 1000 mm), aber wegen der geringeren positiven Bodenwasservorratsänderungen sehr viel abflußreicheren Jahr 1982. Die GW-Neubildungsraten (I_g) variierten 1986 zwischen den Extremwerten 83 mm (Gebiet P 8) und 191 mm (P 5/1); 1982 lag das Minimum bei 135 mm (P 8) und das Maximum bei 233 mm (P 6).

Die I_g -Raten weichen in den Teilgebieten stark voneinander ab. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Verteilung von Laub- und Nadelwald und den Q_g -Abflußhöhen wurde in Kap. 5.3.2 aufgezeigt (vgl. Abb. 5-3). Zwischen Grundwasserabfluß und Nadelwaldanteil besteht eine negative Korrelation.

Die Regressionsgeraden besitzen die Form:

$$1985: y = -0,00116x + 0,164 \quad (r^2 = 0,68)$$

$$1986: y = -0,00096x + 0,270 \quad (r^2 = 0,64)$$

Bezogen auf ein langjähriges Niederschlagsmittel von 750 mm und unter der Voraussetzung ausgeglichener Speicheränderungen ergeben sich Schwankungsbreiten der GW-Neubildung zwischen reinen Laubwaldbeständen (Lb) und reinen Nadelwaldbeständen (Nd) von

$$1985: 123 \text{ mm (Lb) und } 36 \text{ mm (Nd) und}$$

$$1986: 203 \text{ mm (Lb) und } 131 \text{ mm (Nd).}$$

Die Höhen der Grundwasserabflüsse schwankten 1985 und 1986 um die Mittelwerte von 1979-82 (Abb. 5-3). Die Mittelwerte der beiden Meßperioden (1985-86 und 1979-82) stimmen sehr gut überein:

$$1985/86: 163 \text{ mm (Lb) und } 84 \text{ mm (Nd)}$$

$$1979-82: 166 \text{ mm (Lb) und } 84 \text{ mm (Nd)}$$

(6 untersuchte Teilgebiete)

$$1979-82: 172 \text{ mm (Lb) und } 78 \text{ mm (Nd)}$$

(15 untersuchte Teilgebiete).

Der Zusammenhang zwischen abnehmenden Q_g -Höhen (damit geringeren Grundwasserneubildungsraten) und geringeren Bestandesniederschlägen bei zunehmendem Nadelwaldanteil wur-

de eindeutig nachgewiesen. Die Auswirkungen weiterer abflußregulierender Faktoren wurden in Kap. 5.3.2 diskutiert. Langjährig höhere GW-Neubildungsraten in Laubwaldbeständen werden auch von BENECKE (1978) aus dem Untersuchungsgebiet Solling beschrieben.

Grundwasserneubildung nach einer Modellrechnung in Anlehnung an das UHLIG-Verfahren (I_g)

Zur Ermittlung der reellen Evapotranspiration (ET_{reell}) wurde eine an das UHLIG-Verfahren angelehnte Modellrechnung (TEUTSCH, 1988 und SAUTER, 1992) angewendet (vgl. Abschnitt 5.2.1). (In Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge und der nutzbaren Feldkapazität der Böden wird die potentielle Verdunstung auf die ET_{reell} reduziert.) Aus dieser Berechnung ergibt sich die Wassermenge, die nach Abzug der ET_{reell} zur GW-Neubildung zur Verfügung steht.

Bei Auftreten von Interflow wird von der Gesamtmenge des in den Boden eindringenden Sickerwassers (Nettoniederschlag) ein bestimmter Teil über den Fließpfad Q_{on} und nicht über das Grundwasser und den Fließpfad Q_g (vgl. Abb. 2.2) das Einzugsgebiet mit dem Gesamtabfluß verlassen.

Die nach der Modellrechnung bestimmte "GW-Neubildung" gibt somit eher die zu erwartende Gesamtabflußhöhe aus Q_g und Q_{on} wieder. Sie beinhaltet auch einen nach Ende des Bilanzjahres 1986 möglichen Abfluß aus Speichervorräten, die während des Abflußjahres aufgefüllt worden sind.

Die für die großen Einzugsgebiete P 1 und P 5/1 berechneten Abflußhöhen (Tab. 5-19, Spalte I_{g2}) liegen im Jahr 1985 nur wenig (P 1: 4 mm; P 5/1: 17 mm) unter den gemessenen Gesamtabflußhöhen (Q_t). Die Differenzen resultieren aus einer Verringerung der Grundwasserreserven, die graphisch ermittelt, bei P 1: -1 mm und bei P 5/1: -17 mm ergaben.

1986 lagen die I_{g2} -Werte für P 1 um 47 mm und für P 5/1 um 24 mm über den gemessenen Q_t -Höhen. Die Grundwasserreserven hatten sich schon Ende des Bilanzjahres 1986 um 13 mm (P 1) und um 48 mm (P 5/1) erhöht. Ausgehend von den stark erhöhten Bodenwasserreserven (Tab. A-5-5) war noch mit einer weiteren Abflußzunahme nach Ende des Bilanzjahres zu rechnen. Somit kann nur für P 1 eine gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Daten festgestellt werden.

Mit Ausnahme der für P 6 berechneten Daten wurden auch in den anderen Gebieten für 1985

allgemein gute Übereinstimmungen zwischen den gemessenen und berechneten Gesamtabflüssen erzielt. Unter Berücksichtigung der Grundwasservorratsänderungen betragen die Abweichungen zwischen 2% (P 17) und 13% (P 14).

Für 1986 lagen die berechneten Gesamtabflüsse aller Gebiete über den gemessenen Q_t -Höhen des Abflußjahres. Mit Auswirkungen erhöhter Grund- und Bodenwasservorräte auf den Gesamtabfluß war erst nach dem Bilanzzeitraumende zu rechnen.

Grundwasserneubildung (I_g) nach RENGER und STREBEL (1980b)

Bei längeren Untersuchungen an verschiedenen ebenen Standorten unterschiedlicher land- und forstwirtschaftlicher Nutzung wurde ein enger Zusammenhang zwischen der aus der Bodenwasserbilanz ermittelten GW-Neubildung und den meteorologischen Größen Niederschlag (NF), Evapotranspiration nach HAUDE und pflanzenverfügbare Bodenwassermenge ($W_{pfl} = nF_k + \text{kapillarer Aufstieg}$) festgestellt. Es wurden verschiedenen Regressionsgleichungen ermittelt, mit denen die GW-Neubildung auch speziell für Laub- und Nadelwaldgebiete mit einer Genauigkeit von 30 - 40 mm/a berechnet werden kann.

Die Differenzierung von GW-Neubildungsraten von Flächen unterschiedlicher Baumartenzusammensetzung stützt sich stark auf die Ergebnisse einer 6-jährigen Beobachtungszeit (1969 - 1975) im Solling-Gebiet (Fichten- und Buchenbestand auf Braunerden).

Voraussetzung für die Gültigkeit der Gleichungen sind ebene Standortverhältnisse ohne stauwasserbeeinflusste Böden. Das Lias-Keuper-Bergland des Schönbuchs mit einer häufig ausgebildeten wasserstauenden Basisschuttdecke und Interflow erfüllt diese Voraussetzung nicht. Stark vereinfachend ergeben sich mit dieser Methode GW-Neubildungsraten, die die tatsächliche GW-Neubildung um den Betrag des Oberflächen- und oberflächennahen Abflusses übersteigen (vgl. auch Berechnungsansatz der Modellrechnung nach UHLIG).

Die für die Berechnungen notwendigen Eingangsgrößen (s.o.) lagen für die verschiedenen Untersuchungsgebiete vor. Für reinen Nadelwald kam die Regressionsgleichung für Fichten- und Kieferaltbestände zum Einsatz. Für reinen Laubwald wurde, entsprechend den Erfahrungswerten von RENGER und STREBEL, vereinfachend der Mittelwert der GW-Neubildungsraten von Nadelwald und Grünland angewendet. Die genaue Form der Regressionsgeraden für die verschiedenen

Bodennutzungen und Bodeneigenschaften sind der oben zitierten Arbeit zu entnehmen.

Die Ergebnisse der GW-Neubildungsberechnung nach RENGER und STREBEL sind in Tab. 5-19 als I_g -Daten zusammengestellt. Die Eingangsgrößen der zum Vergleich berechneten Daten für den früheren Meßzeitraum 1979-82 wurden den Arbeiten von AGSTER (1983 und 1986) entnommen.

Die für den 4-jährigen Meßzeitraum 1979-82 berechneten mittleren I_g -Werte schwankten allgemein in dem angegebenen Genauigkeitsbereich von maximal ± 30 bis 40 mm/a um die mit den Speichervorraterhöhungen korrigierten Gesamtabflußhöhen Q_t . Eine sehr gute Übereinstimmung konnte im größten, gemischt bestandenen Einzugsgebiet P 1 sowie im Gebiet P 14 erzielt werden. Für die nahezu reinen Nadel- und Laubwaldgebiete P 6 und P 17 lieferte die Methode dagegen zu hohe Abweichungen.

Auch 1985 bewegten sich die I_g -Werte mit max. ca. ± 40 mm um die mit den Speichervorratsänderungen korrigierten Q_t -Höhen. Nur für das Gebiet P 17 wurden zu hohe Grundwasserneubildungsraten ermittelt. Die Regressionsgleichung für reine Nadelwaldbestände ist für die Abflußsituation im Schönbuch nur mit unbefriedigenden Ergebnissen anwendbar.

Für das Naßjahr 1986 wurden mit dieser Methode die höchsten GW-Neubildungsraten (zwischen 345 und 400 mm/a) bestimmt. Die I_g -Werte (korrigiert mit den positiven Speicheränderungen im Boden und Grundwasser) schwankten deutlich stärker um die gemessenen Abflußhöhen als 1985. Nur für 2 Gebiete P 5/1 und P 14 wurde der tolerierte Genauigkeitsbereich nicht überschritten.

Die Methode zur Bestimmung der GW-Neubildung nach RENGER und STREBEL liefert auch für das Lias-Keuper-Bergland des Schönbuchs im Mittel plausible Werte, wobei die als Q_{on} abfließende Wassermenge von den berechneten Werten abzuziehen ist. Dies gilt jedoch nur für Durchschnittsjahre oder Mittelwerte mehrjähriger Meßreihen.

Grundwasserneubildung nach SCHULZ (1972) aus der Chlorid-Bilanz (I_g 4a und I_g 4b)

Bei diesem Verfahren wird über die verdunstungsbedingte Chlorid-Anreicherung in dem zum Grundwasser sickenden Niederschlagsanteil indirekt die Höhe der Gebietsverdunstung bestimmt und daraus die GW-Neubildung abgeleitet. Voraussetzung der Anwendbarkeit ist, daß kein anthropogener Cl-Eintrag (Düngung, Salzstreuung)

erfolgt.

Zur Berechnung (Gl. 1, unten) sind die mittleren Cl-Konzentrationen im Niederschlag (Cl_{NF}) und Grundwasser (Cl_{GW}) sowie die Freiland-Niederschlags(NF)- und Q_{on} -Höhen, die direkt gemessen bzw. graphisch (Q_{on}) bestimmt wurden, notwendig.

$$I_g = \frac{(NF - Q_{on}) \cdot Cl_{NF}}{Cl_{GW}} \quad (Gl. 1)$$

Da der Bestandesniederschlag in den bewaldeten Einzugsgebieten quantitativ und qualitativ relativ genau erfaßt worden war, konnte das Chlorid-Verfahren in veränderter Form (Gl. 2, unten) mit der tatsächlich den Waldboden erreichenden Niederschlagsmenge (NB) und seiner Chloridkonzentration (Cl_{NB}) angewendet werden. Neben der Q_{on} -Höhe gehen damit direkt gemessene gebiets-spezifische Größen in die Berechnung ein.

$$I_g = \frac{(NB - Q_{on}) \cdot Cl_{NB}}{Cl_{GW}} \quad (Gl. 2)$$

Die GW-Neubildungsraten nach diesen graphisch-chemischen Verfahren sind in Spalte I_g4a (Gl. 1) und I_g4b (Gl. 2) in Tabelle 5-19 zusammengestellt.

Künstliche Cl-Einträge (z.B. durch Streusalz) und damit höhere Cl-Gehalte im Grundwasser täuschen bei diesem Verfahren eine zu hohe Verdunstung und eine zu niedrige Grundwasserneubildung vor. Die Ergebnisse für das Gebiet von P 5/1, in dem ein längerer Straßenabschnitt verläuft, zeigen diesen Effekt bei I_g4a und I_g4b deutlich (Tab. 5-19). Im Gebiet von P 1, das nur von einem kleinen Straßenabschnitt gequert wird, ist der Störeffekt weniger deutlich. Hier liegen die I_g4a-Werte unter und die I_g4b-Werte über den Ergebnissen der graphischen Methode (I_g1).

Für die Gebiete P 6 und P 14 wurden mit der herkömmlichen Chloridmethode (I_g4a), verglichen mit den Ergebnissen von I_g1, zu geringe GW-Neubildungsraten für 1985 und 1986 bestimmt. Dies bestätigen auch Vergleichswerte von mittleren GW-Neubildungsraten eines früheren Meßzeitraumes (Mittelwerte der Jahre 1979-80, AGSTER (1983). Das Verfahren, das den Bestandesniederschlag als Eingangsgröße verwendet (I_g4b), ergab, mit einer guten Übereinstimmung bei P 14, ähnliche Ergebnisse wie die I_g1-Bestimmung.

In den Einzugsgebieten P 8 und P 17 stimmen dagegen die Ergebnisse des herkömmlichen Chloridverfahrens besser mit den I_g1-Werten überein. Auch frühere Anwendungen des Chlorid-Verfah-

rens auf Einzugsgebiete im Schönbuch ergaben sehr unterschiedliche Ergebnisse (AGSTER, 1983).

Zusammenfassend zeigt sich, daß die beschriebenen Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildung im Regelfall mit steigendem Berechnungs- oder Auswerteaufwand befriedigendere Ergebnisse zeigen. Das graphische Auswerteverfahren orientiert sich an den direkt im Gelände gemessenen Daten und liefert deshalb die an lokal unterschiedliche Situationen am besten angepaßten Ergebnisse für die Grundwasserneubildung. Unsicherheiten bei diesem Verfahren bestehen darin, daß eine Aufteilung des Gesamtabflusses in nur 2 Abflußkomponenten den komplexen Abflußvorgang nicht hinreichend genau beschreibt. Grundwasser und Interflow werden möglicherweise mit den als Q_g und Q_{on} abgetrennten Abflußteilen nicht scharf genug unterschieden (vgl. Kap. 2.3). Mit Isotopenverfahren lassen sich weitere Trennungen von Abflußkomponenten, insbesondere während einzelner N-Q-Ereignisse durchführen und damit kurzfristige Grundwasserneubildungsraten bestimmen. Ferner kann der als Interflow zum Gesamtabfluß beitragende Abflußanteil und die darin enthaltene Frischwasserkomponente quantifiziert werden (Kap. 8.5f.).

Über Isotopenmessungen in Niederschlägen und Bodenwässern aus verschiedenen Tiefen können mit Hilfe des Exponentialmodells die Sickergeschwindigkeiten des in den Boden eindringenden Wassers bestimmt werden. Damit sind lokal für einzelne Bodenprofile geltende Grundwasserneubildungsraten zu berechnen, die auf Einzugsgebiete hochgerechnet werden konnten (Kap. 7.3.2).

5.5 Die Quellen

Von den insgesamt 14 untersuchten Quellen konnten 7 Stubensandstein- und 3 Lias-Quellen regelmäßig im Jahresverlauf gemessen und beprobt werden. Die Lage der Quellen in den Einzugsgebieten ist der Tab. 4-1 sowie der Abb. 4-2 zu entnehmen. In Tab. 5-20 werden verschiedene Kenndaten zur Charakterisierung des Schüttungsverhaltens und der Quellwasserzusammensetzung zusammengefaßt.

Die Ganglinien der Schüttung (Q in l/s), der elektrischen Leitfähigkeit (Lf in $\mu S/cm$) und des Sauerstoff-18-Gehalts ($\delta^{18}O$ in ‰) sind in Abb. 5-5 bis 5-7 sowie in Abb. A-5-1 und A-5-2 im Anhang, die Quelltemperaturen in Abb. 5-8 dargestellt. Eine Diskussion der Kurvenverläufe ausgewählter Quellen folgt in Kap. 5.5.1.

Tab. 5-20: Ausgewählte Kennwerte zur Charakterisierung des Schüttungsverhaltens der regelmäßig unter suchten Lias- und Stubensandstein-Quellen im Untersuchungszeitraum 1985 und 1986.

	Höhe m ü.NN	Q _m	Q _{min} l/s	Q _{max}	NQ/HQ	α - Werte d ⁻¹	Abb.-Nr.
Lias							
Q 13a	460	0,61	0,046	2,51	1:55	0,009 - 0,06	5-7
Q 13b	458	0,33	0,1	10,0 (0,7)	1:100 (1:7)	0,007 - 0,04	5-7
Q 31	490	0,09	0	0,36	-	-	A-5-2 (Anhang)
km4							
Q 3	478	0,083	0,032	0,18 (0,14)	1:5,2 (1:4)	0,0057 - 0,02	5-5
Q 6a	432	0,069	0,018	5,0 (0,09)	1:278 (1:5)	0,0034 - 0,035	5-5
Q 6a1	432	0,12	0,045	0,8 (0,25)	1:18 (1:6)	0,0051	A-5-1 (Anhang)
Q 6b	438	0,034	0	0,39	-	0,02 - 0,05	5-6
Q 7a	522	0,011	0,005	0,018	1:3,8	0,0025	5-6
Q 38*	400	0,24	0,27	0,67	1:2,5	0,003	A-5-1 (Anhang)
Q 39	390	0,79	0,053	15,0 (0,65)	1:283 (1:12)	0,006 - 0,01	A-5-2 (Anhang)

Q_m, Q_{min}, Q_{max}: Mittlere, minimale und maximale Schüttung
 NQ/HQ: Schüttungsquotient aus niedrigster und höchster Schüttung
 (): Maximalschüttung und damit berechnete NQ/HQ-Verhältnisse der "Basisschüttung" (ohne kurzfristige Q_{0n}-Zumischung)
 - : Kennwert nicht bestimmbar
 * : Angaben zur Quellschüttung nach neuer, größer dimensionierter Fassung im Oktober 1985

	T _m °C	T _{min}	T _{max}	L _f ---	L _f _{min} [µS/cm]	L _f _{max} ----	L _f	18O _m	18O _{min}	18O _{max}	18O
Lias							max/min				min/max
Q 13a	8,3	3,1	12,0	554	205	661	3,2	-9,87	-10,55	-9,35	1,13
Q 13b	9,1	6,0	11,1	396	148	584	3,9	-9,51	-10,35	-9,24	1,12
Q 31	8,2	3,7	15,6	470	231	655	2,8	-10,13	-11,95	-9,40	1,27
km4											
Q 3	8,3	5,0	12,4	690	359	763	2,1	-9,67	-10,30	-9,14	1,13
Q 6a	7,4	2,5	12,4	246	158	720	4,6	-9,49	-10,02	-9,17	1,09
Q 6a1	7,7	5,3	12,1	507	285	590	2,1	-9,45	-9,69	-9,18	1,06
Q 6b	6,8	0,0	16,2	110	50	248	5,0	-9,96	-10,35	-8,70	1,19
Q 7a	8,1	2,0	12,9	550	519	560	1,1	-9,57	-9,86	-9,45	1,04
Q 38*	8,4	7,3	11,4	634	344	671	2,0	-9,26	-9,80	-8,99	1,09
Q 39	7,7	6,0	10,7	615	142	829	5,8	-9,45	-10,26	-8,59	1,19

Der Kurvenverlauf der Quellschüttungsganglinie gibt Änderungen des Grundwasserdargebots wieder. Die sehr unterschiedlich ausgeprägten Schüttungsmaxima der untersuchten Quellen werden allgemein im nassen Frühjahr, im April bis Mai, erreicht. Aus dem Schüttungsverhalten sind wesentliche Aquifereigenschaften abzuleiten. Ein steiler Kurvenverlauf mit kleinen Schüttungsquotienten aus minimaler und maximaler Schüttung (NQ/HQ) weist auf geringes Retentionsvermögen und hohe Wasserwegsamkeit des Grundwasserleiters hin (vgl. auch Leerlaufverhalten, α-Werte). Dies kennzeichnet verkarstete, bzw. klüftige Festgesteine. Im Untersuchungsgebiet bilden die durch Verwitterung stark aufgelockerten Partien des Stubensandsteins und klüftige Bereiche des Lias α solche Grundwasserleiter mit ausgeprägten Wasserwegsamkeiten. Die Schüttungen der Quellen Q 6a und Q 13a (Abb. 5-5 und 5-7) zeigen dies exemplarisch.

Aus einem ausgeglichenen und flacheren Kurvenverlauf sowie einem hohen NQ/HQ-Verhältnis ist dagegen ein hohes Retentionsvermögen eines

Aquifers mit einer Wasserspeicherung, vorwiegend in Feinklüften und Poren, abzuleiten. Dies trifft hier vorwiegend auf untere Bereiche des Stubensandsteins und z.B. auf die Quellen Q 3 (Abb. 5-5 b) und Q 38 (Abb. A-5-1, im Anhang) zu.

Neben der jahreszeitlichen Schwankung sind bei einer geringmächtigen Überdeckung des Aquifers und ausreichender Durchlässigkeit der Deckschichten auch deutliche, kurzfristige Schüttungsschwankungen möglich, die einzelnen Niederschlags-Ereignissen zugeordnet werden können (vgl. auch Besprechung einzelner N-Q-Ereignisse in Kap. 8).

Wenn Schüttungserhöhungen infolge von Hebungen des Grundwasserspiegels und einem "piston flow-Effekt" auftreten, fließt "älteres Grundwasser" mit längerer Verweilzeit ab. Solche Schüttungserhöhungen sind "gedämpft" und mit keinen wesentlichen L_f- und δ¹⁸O-Änderungen verbunden, da an der Quelle kein Mischwasser austritt (vgl. km4-Quelle Q 7a, Abb. 5-6, b). Der Jahresgang dieser Parameter wie auch der Schüt-

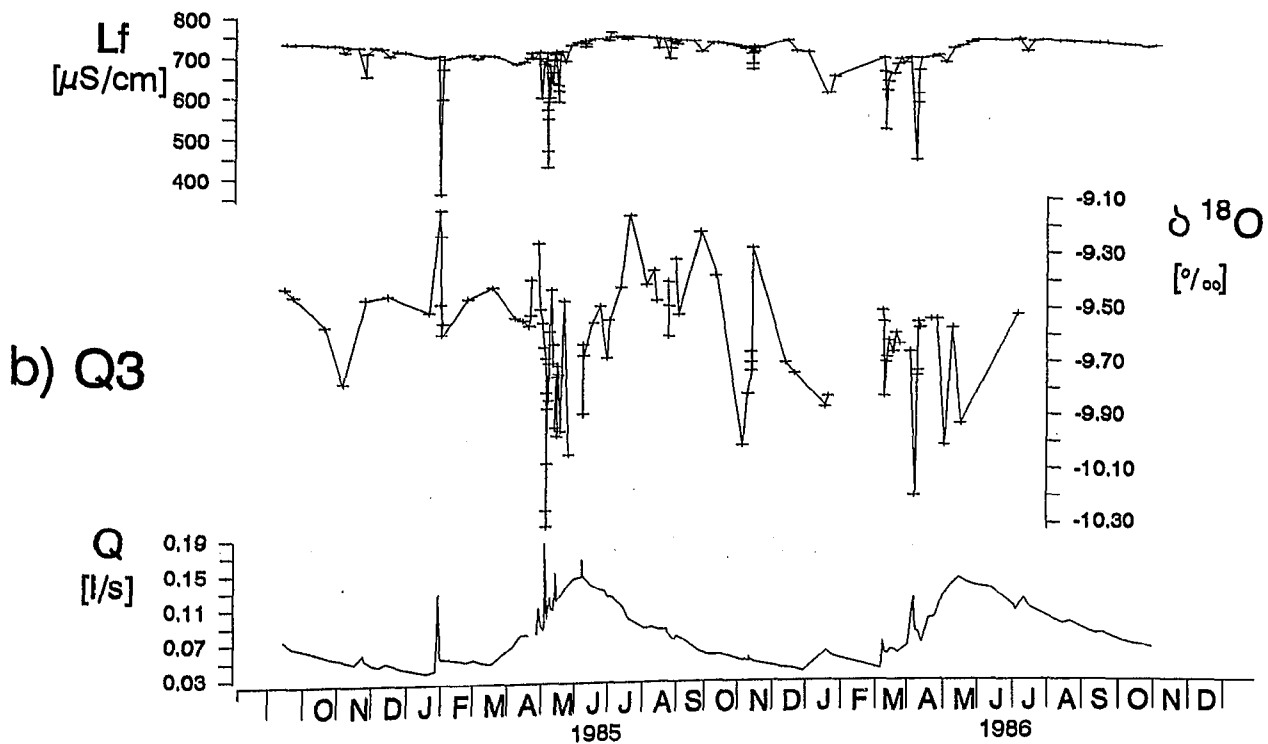
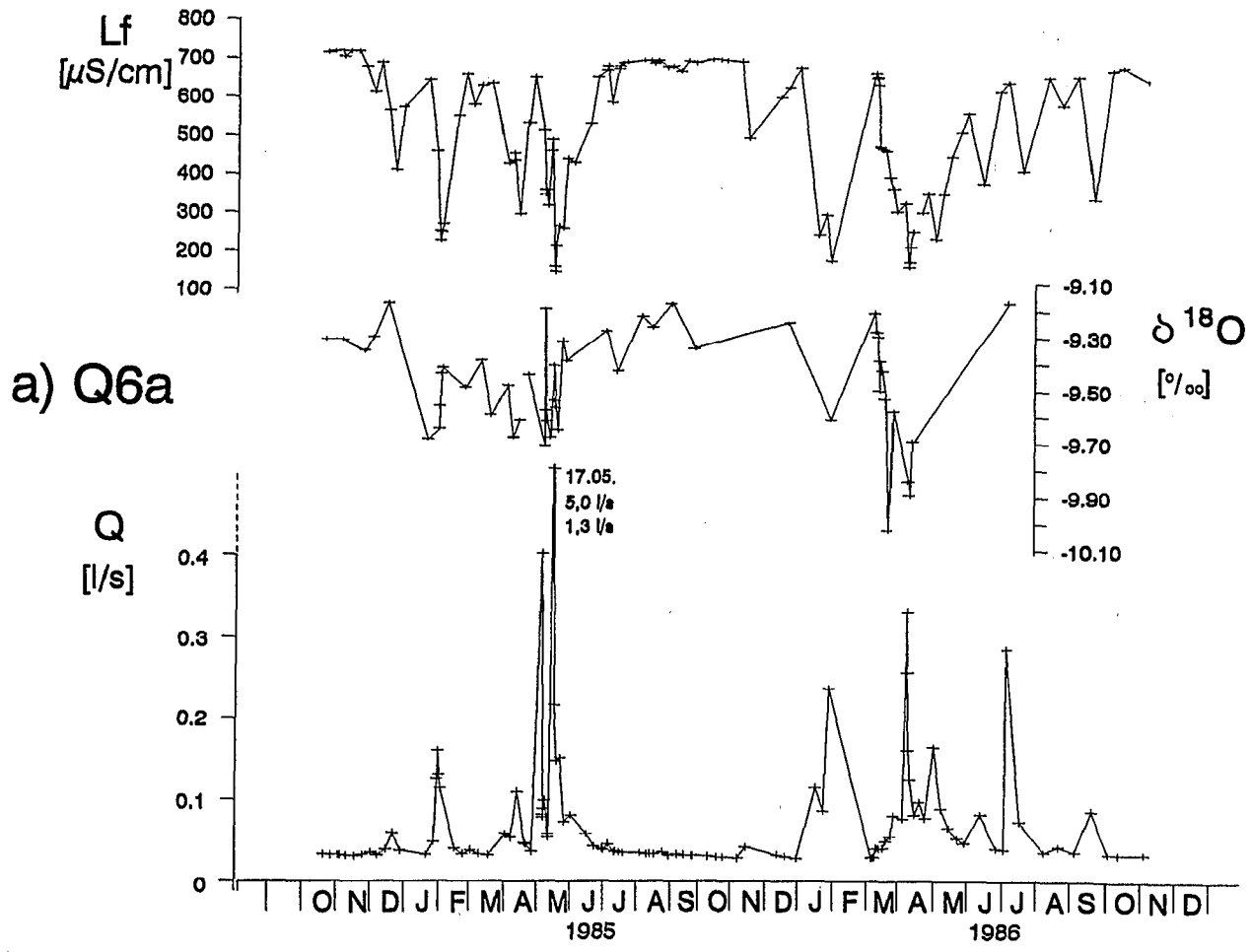


Abb. 5-5: Ganglinien der Schüttung (Q), der elektrischen Leitfähigkeit (L_f) und des ^{18}O -Gehalts ($\delta^{18}\text{O}$) der km4-Quellen a) Q 6a und b) Q 3.

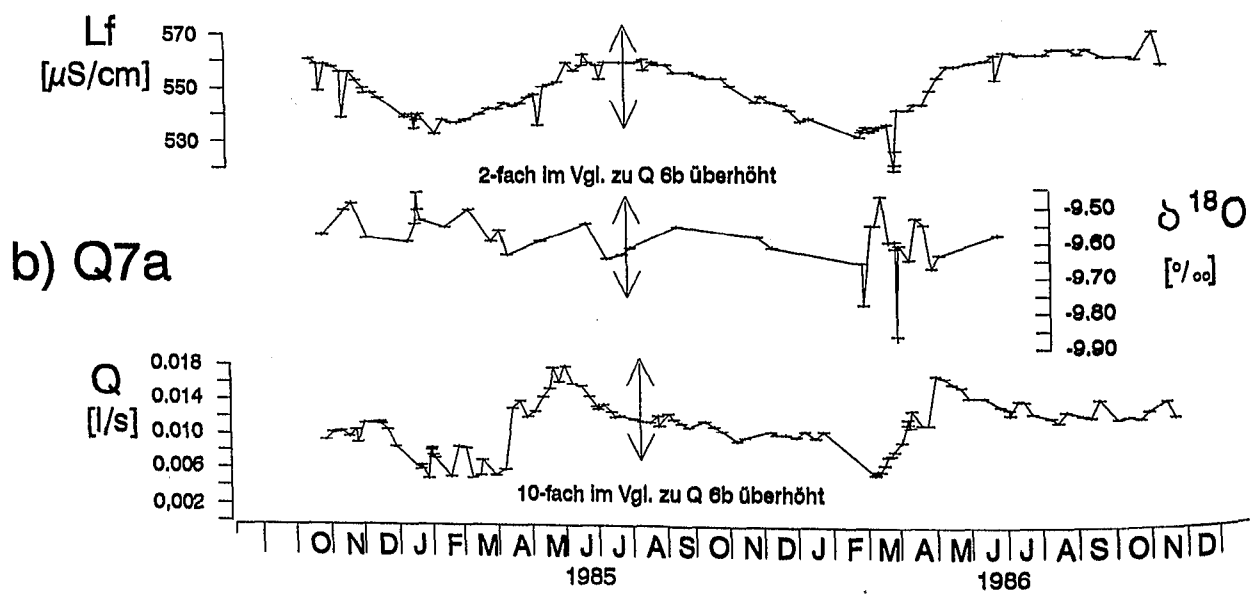
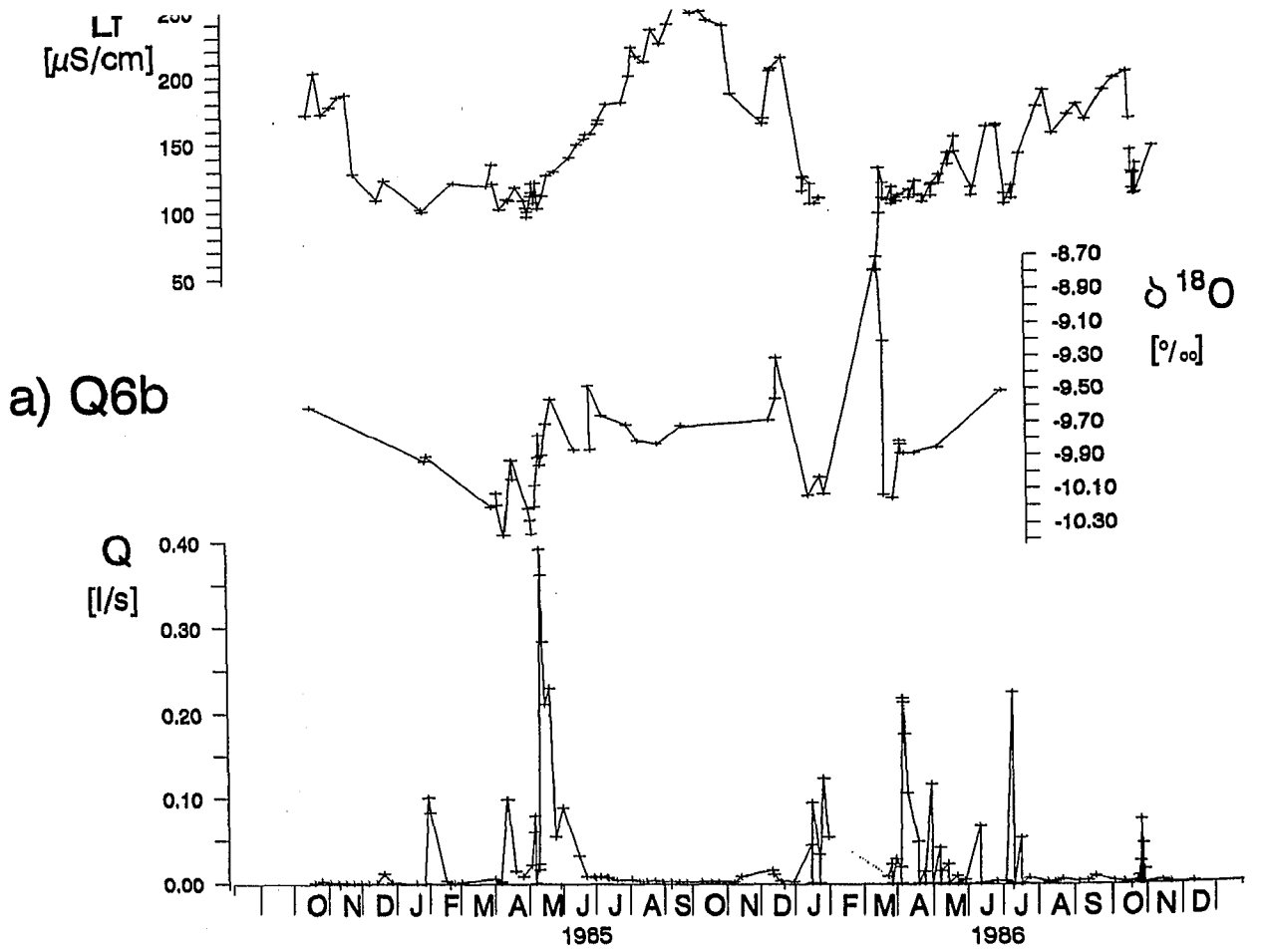


Abb. 5-6: Ganglinien der Schüttung (Q), der elektrischen Leitfähigkeit (Lf) und des ^{18}O -Gehalts ($\delta^{18}\text{O}$) der km⁴-Quellen a) Q 6b und b) Q 7a.

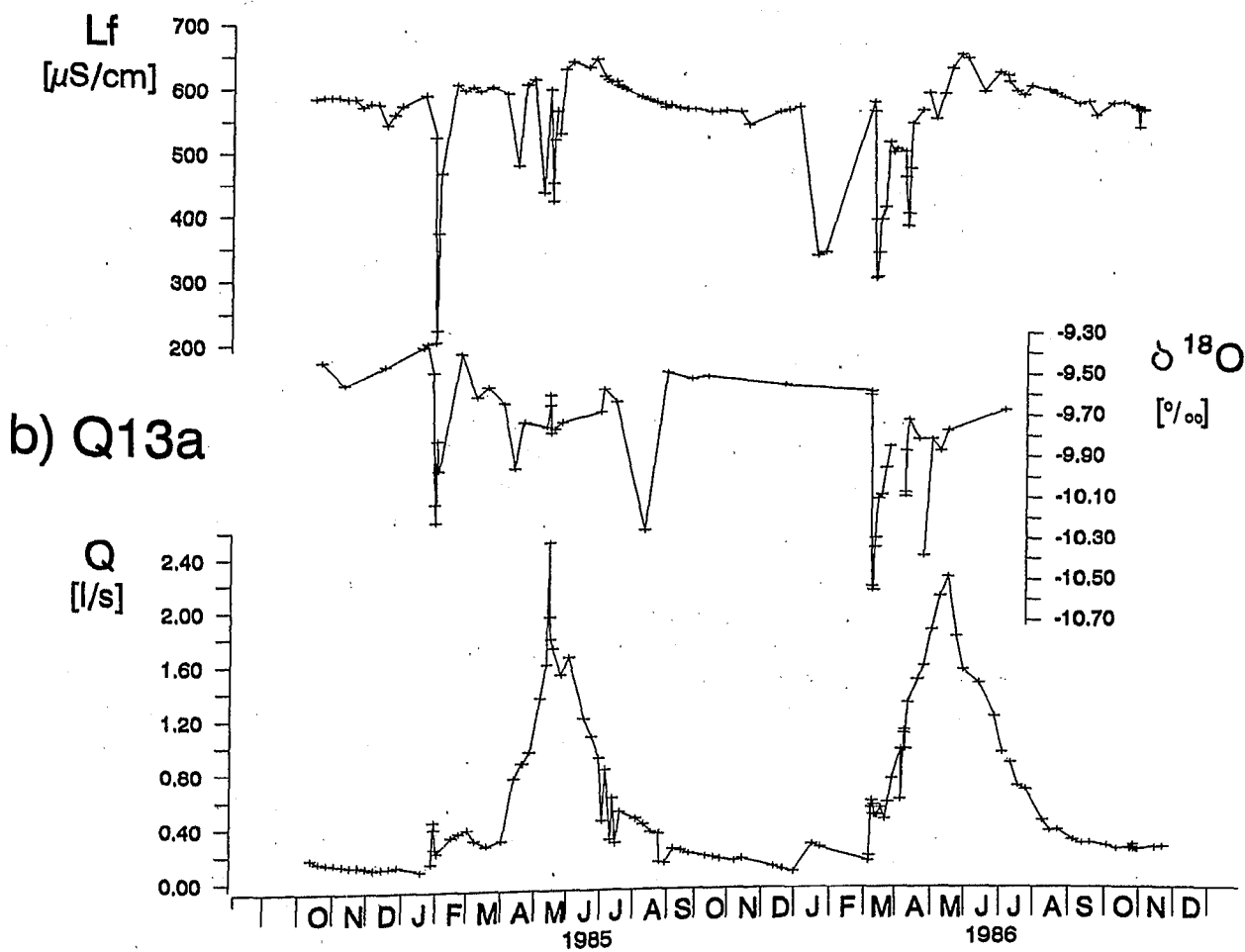
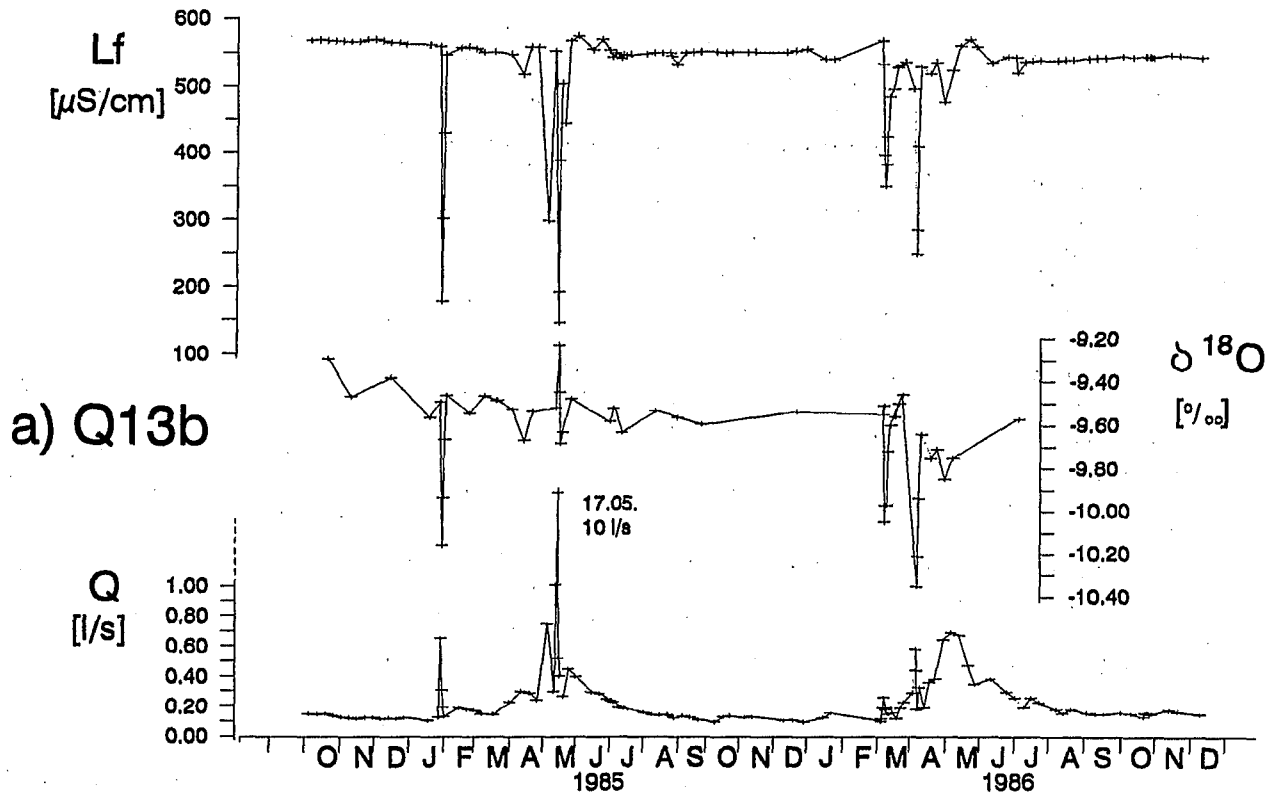


Abb. 5-7: Ganglinien der Schüttung (Q), der elektrischen Leitfähigkeit (Lf) und des ^{18}O -Gehalts ($\delta^{18}\text{O}$) der Lias-Quellen a) Q 13b und b) Q 13a.

tung wird bestimmt durch eine je nach Verweilzeit mehr oder weniger gedämpfte und phasenverschobene Abbildung des Niederschlag-Inputs. Ferner weisen niedrige Quellschüttungen meist höhere Lösungsinhalte auf.

Häufiger zu beobachten sind kurzfristige steile Schüttungsspitzen, die mit starken Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen einher gehen. Hier werden die Schüttungserhöhungen (auch) durch die Zumischung von niedriger mineralisiertem Interflow bewirkt, der im Vergleich zum Grundwasser isotopisch anders zusammengesetzt ist. Die Zumischung von Interflow erfolgt dann kurz vor der Quelle (vgl. auch Schemaskizze, Abb. 2-2).

Durch niederschlagsreiche Perioden, aber auch durch Einzelereignisse hervorgerufene, kurzfristige Änderungen von Schüttung, Lösungsinhalt und Isotopengehalten sind auch bei flachgründigen Quellen und einer Wasserbewegung in Großklüften, etwa im oberen Bereich des Stubensandsteins, möglich.

Bei hohen Grundwasserständen kann Wasser aus einem gut durchlässigen Grundwasserleiter (durch Verwitterung aufgelockerte km4-Partien und klüftige Lias α -Bereiche) zum Abfluß beitragen. Im Vergleich zum längerfristigen Porengrundwasser wird dieses Wasser rascher abfließen und anders zusammengesetzt sein. Dies wird durch 2 Speichertypen erklärt, die an ihrem unterschiedlichem Leerlaufverhalten (Auswertung der TWL, Bestimmung von 2 α -Werten) unterschieden werden konnten (vgl. Tab. 5-20, z.B. Q 6a).

Im Vergleich zu den früheren Untersuchungen von AGSTER (1983) wurden häufiger Messungen und Probenahmen an den Quellen durchgeführt, sodaß mehr Hochwasser-Ereignisse erfaßt werden konnten. Die hier vorgestellten Ergebnisse von 1985-1986 weichen deshalb teilweise deutlich von denen des Meßzeitraums 1979-80 ab.

Oberflächennahe Quelleinzugsgebiete und gut durchlässige oder fehlende Deckschichten führen zu einer erkennbaren Anpassung der Wasser- an die Lufttemperatur. Ein rascher Wasserumsatz und eine kurzfristige Zumischung von Interflow wirken sich auch in Form stärkerer Temperaturschwankungen aus (Abb. 5-8, Abb. A-5-3, Anhang).

5.5.1 Exemplarische Darstellung des Schüttungsverhaltens und der Quellwasserzusammensetzung

Die Schüttungsganglinie der Stubensandstein-Quelle Q 3 (Abb. 5-5, b) zeigt einen ausgeprägten Jahresgang mit Maxima im Mai - Juni und Mini-

ma von Dezember - Februar. Der insgesamt ausgeglichene Kurvenverlauf wird von einzelnen sehr kurzfristigen, dem Basisabfluß quasi aufgesetzten, Abflußspitzen unterbrochen, die im wesentlichen nicht durch erhöhten Grundwasseraustritt, sondern durch eine Zumischung von niedriger mineralisiertem und isotopisch anders zusammengesetztem Interflow zustande kommen. Dies belegen die sehr kurzfristigen, starken Abweichungen der Lf- und die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte. Erhöhungen der Grundwasserschüttung durch einen "piston-flow-Effekt" hätten keine oder nur geringe Änderungen dieser Parameter zur Folge. Selbst unter Einbeziehung der nicht dem Aquifer allein zuzuordnenden Maximalschüttung wird ein hoher Schüttungsquotient von 1:5,2 erreicht (mit dem Basisabfluß allein 1:4,4). Das spricht für ein hohes Retentionsvermögen des Aquifers. Aus der Trockenwetterfalllinie (TWL) ohne Q_{on} -Abfluß ist das Zusammenwirken von zwei Speichersystemen abzuleiten. Dominant ist eine Wasserspeicherung in Kleinklüften und Poren des km4-Aquifers (α -Wert = 0,0057 d^{-1}). Nur bei hohen Grundwasserständen werden Bereiche mit zunehmender Kluftdichte und -weite und einer höheren Wasserwegsamkeit wirksam (α -Werte um 0,02 d^{-1}). Über die quantitative Zusammensetzung des Quellwassers während einzelner Abflußerhöhungen wird in Kap. 8.5f. berichtet.

Die Stubensandstein-Quelle Q 6a (Abb. 5-5, a) unterscheidet sich von Q 3 im Schüttungsverhalten und der Quellwasserzusammensetzung während Schüttungserhöhungen deutlich. Die Basis-schüttung, wie bei Q 3 gekennzeichnet durch Lf-Werte um 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, beschreibt hier keinen ausgeglichenen Jahresgang. Sie schwankt in einem engen Bereich zwischen 0,018 und ca. 0,09 $1/\text{s}$. Das Schüttungsverhalten insgesamt ist wesentlich unruhiger. Besonders in den Winter- und Frühjahrsmonaten, 1986 aber auch im nassen Sommer, sind neben längerfristigen (während niederschlagsreicher Perioden) auch ganz kurzfristige, bis auf 5 $1/\text{s}$ ansteigende Schüttungserhöhungen registriert worden. Das NQ/HQ-Verhältnis der Basisschüttung variiert mit 1 : 5 etwas stärker als bei Q 3. Der α -Wert des km4-Aquifers aus Poren- und Kleinklüften konnte mit 0,0034 d^{-1} , ähnlich wie bei Q 3, bestimmt werden. Das sehr niedrige NQ/HQ-Verhältnis von 1 : 278 (nur Q 39 weist einen ähnlich kleinen Schüttungsquotienten auf) wird durch teilweise länger anhaltende Zumischungen von niedriger mineralisiertem und meist ^{18}O -ärmerem Wasser hervorgerufen.

Die sehr kurzfristigen Schüttungserhöhungen sind im wesentlichen einem Interflow (teilweise aus einem Bodenwasserspeicher durch versickernde Niederschläge mobilisiert) zuzuschreiben, der

sich kurz vor dem Quellaustritt mit dem Grundwasser vermischt (vgl. sehr starke Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen). Die längerfristigen Schüttungserhöhungen (besonders 1986) können, wegen des im Vergleich zu Q 3 geringeren Grundwasserflurabstandes, auch einem rascheren Grundwasserabfluß über Großklüfte (im oberen km4-Bereich) zugeschrieben werden. Dabei erfolgt keine vollständige Durchmischung dieses geringer mineralisierten Grundwassers mit dem Porengrundwasser. Längerfristig niedrige, einen Jahresgang beschreibende Lf-Werte (und auch $\delta^{18}\text{O}$ -Werte) zeigen diesen Zusammenhang. Für dieses Speichersystem konnte ein α -Wert von $0,035 \text{ d}^{-1}$ bestimmt werden.

Ein im Vergleich zu Q 3 und Q 6a noch gegensätzlicheres Schüttungsverhalten zeigen die Stubensandstein-Quellen Q 7a und Q 6b (Abb. 5-6). Die sehr geringe Schüttung von Q 7a bewegt sich nur in einem engen Bereich mit einem hohen NQ/HQ-Verhältnis von 1:3,8. Maximale Grundwasserstände werden nach der Schneeschmelze im Frühjahr erreicht. Direkte Auswirkungen einzelner Niederschläge auf die Schüttung sind kaum zu erkennen. Das nach dem gleichmäßigen Leerlaufverhalten sprunghafte Abfallen der Schüttung unter $0,01 \text{ l/s}$ (ab Dezember 1984 und ab Januar 1986) ist vermutlich mit einem Absinken des Grundwasserspiegels im Bereich des erfaßten Quellhorizontes zu erklären. Anhand der TWL konnte nur ein sehr geringer α -Wert von $0,0025 \text{ d}^{-1}$ ermittelt werden. Der ausgeglichene Kurvenverlauf weist auf die Wirksamkeit nur eines km4-Speichers aus Kleinklüften und Poren hin.

Obwohl nur der obere (in anderen Gebietsteilen aufgelockerte) Bereich der hier flachen km4-Platte die Quelle Q 7a speist, findet keine Wasserzirkulation in Großklüften statt.

Auch die Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen bewegen sich in einem sehr engen Bereich. An dieser Quelle wurden die geringsten Variationen dieser Parameter registriert (Tab. 5-20). Kurzfristige, relativ geringe Auslenkungen wie z.B. während der Schneeschmelze im März und April 1986, deuten eine nur minimale Interflow-Zumischung an. Der km4-Quellhorizont wird bei Q 7a an einer nahezu senkrechten Flanke der Vorfluterrinne angeschnitten. Eine mögliche Vermischung mit Interflow ist deshalb erschwert.

Die sehr flachründige km4-Quelle Q 6b reagiert anders als Q 7a. Die "Basisschüttung" des km4-Aquifers aus längerfristigem Wasser macht nur einen sehr geringen Teil der Gesamtschüttung aus. In den Wintermonaten fällt die Quelle zeitweise trocken. Starke Niederschlags-Ereignisse und Schneeschmelzperioden wirken sich direkt in den relativ stärksten, kurzfristigen Schüttungser-

höhungen der untersuchten Quellen aus (vgl. dazu Q 39, Tab. 5-20). Ein geringes Retentionsvermögen des verwitterten, stark aufgelockerten Stubensandsteins in diesem Einzugsgebiet wird durch die hohen α -Werte von $0,02 - 0,05 \text{ d}^{-1}$ aufgezeigt. Da in dem Einzugsgebiet eine teilweise Überdeckung des Grundwasserleiters durch eine abdichtende, vor der km4-Hangkante jedoch auskeilende Knollenmergel-Fließerde vorliegt, ist dem Interflow eine wesentliche Rolle im Schüttungsverhalten zuzuschreiben.

Die Lf- und die $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen weisen die nach Q 39 relativ größte Variationsbreite auf (Tab. 5-20). Die Wirksamkeit eines Interflow aus kurzfristig gespeichertem Bodenwasser verdeutlichen die sehr niedrigen, bis unter $100 \mu\text{S/cm}$ absinkenden und damit niederschlagsähnlichen Lf-Werte.

Die am Beispiel von 4 Quellen dargestellten Variationen und Mechanismen des Schüttungsverhaltens sind auch bei den übrigen km4-Quellen erkennbar. Q 6a1 und Q 38 weisen ein ähnliches Verhalten wie Q 3 auf, Q 39 wird dagegen sehr viel stärker von Interflow und möglicherweise schnellerem Grundwasserabfluß über Großklüfte bestimmt.

Die Lias-Quelle Q 13a (Abb. 5-7, b) weist mit einer steilen Schüttungsganglinie und einem kleinen NQ/HQ-Quotienten ein typisches Verhalten für einen Kluffgrundwasserleiter mit geringem Retentionsvermögen auf. Aus der TWL konnte neben diesem dominierenden Speichertyp aus Großklüften (α -Wert = $0,06 \text{ d}^{-1}$) ein zweiter, vermutlich aus Kleinklüften an der Basis des Lias $\alpha 2$ -Aquifers (α -Wert = $0,007 \text{ d}^{-1}$) abgeleitet werden, der bei niedrigen Grundwasserständen die Schüttung bestimmt.

Ähnlich wie an der Schüttung ist auch an den Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten, verglichen mit der Lias-Quelle Q 13b (Abb. 5-7, a), eine relativ trägere und längerfristige Reaktion auf die Einwirkung von Niederschlägen abzulesen. Die Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen sind demnach neben einer Interflow-Zumischung auch auf rasch ausgetauschtes Grundwasser in Großklüften zurückzuführen.

Die kleinere Quelle Q 13b wird dagegen von spontan auf Niederschläge reagierendem Interflow stark beeinflusst. Die sehr kurzfristigen Schüttungsspitzen (maximal 10 l/s), deuten dies an. Auch hier liegen 2 Speichertypen vor, die dem aufgelockerten, klüftigen Bereich und dem Teil aus Kleinklüften und Poren im Angulatsandstein (Lias $\alpha 2$) zuzuordnen sind.

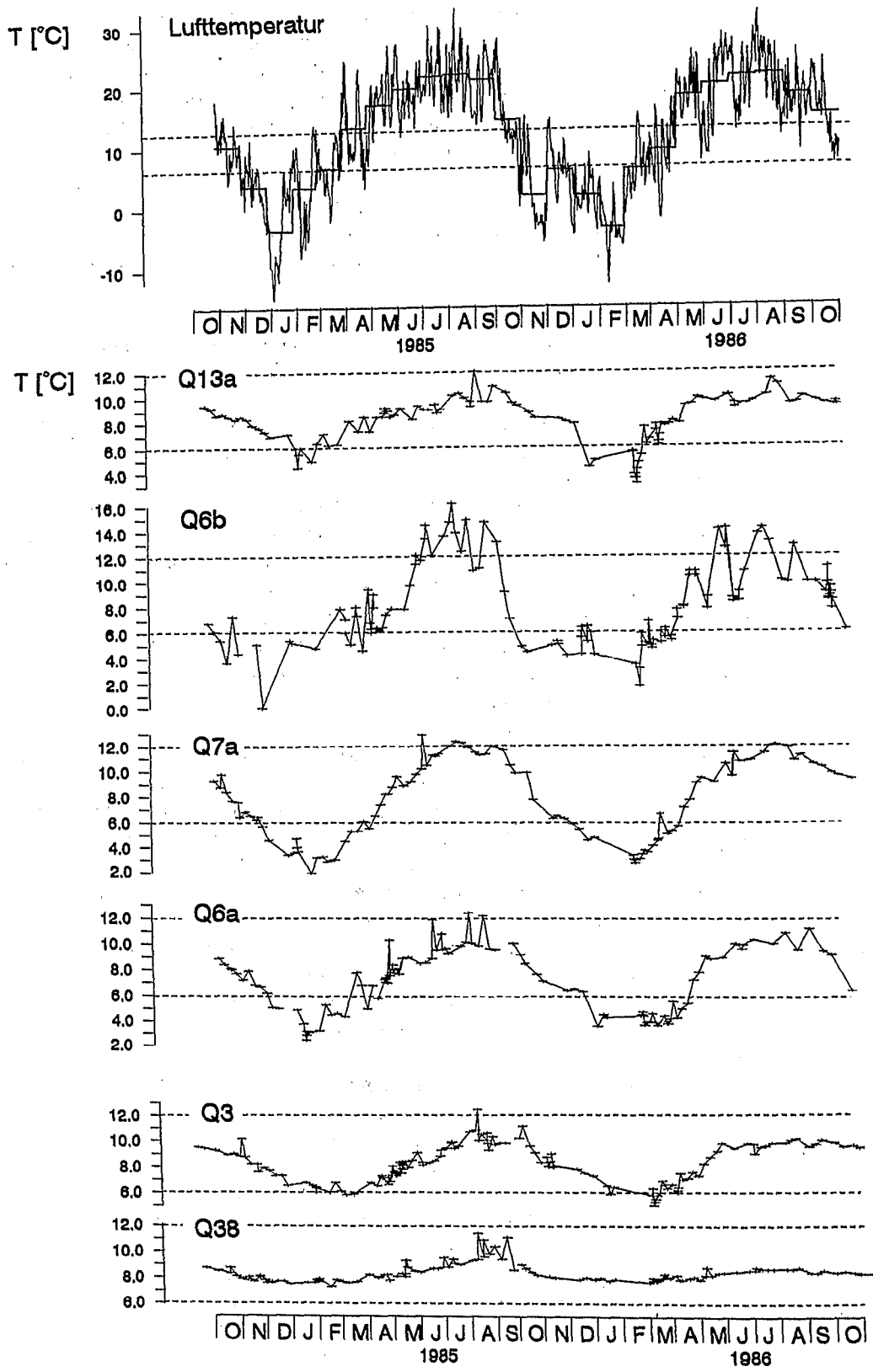


Abb. 5-8: Ganglinien der Lufttemperatur (14 Uhr-Werte) und der Quellwassertemperaturen an der Lias-Quelle Q 13a und ausgewählten Stubensandstein-Quellen.

5.5.2 Die Quellwassertemperaturen

Die Ganglinien der Grundwassertemperaturen gehen ein je nach der Grundwasserverweilzeit unterschiedlich stark gedämpftes Abbild der Lufttemperatur (Abb. 5-8, a), bzw. der Temperatur des versickernden Niederschlags wieder. Die höchsten Wassertemperaturen folgen der maximalen Lufttemperatur im Durchschnitt um 1-2 Monate verzögert.

Die Temperatur der Quellwässer (Abb. 5-8 und Abb. A-5-3 im Anhang) wird durch die Mächtigkeit der Aquiferüberdeckung, den Wasserumsatz, den Anteil einer rascher über Großklüfte abfließenden Grundwasserkomponente und eine während Schüttungserhöhungen mögliche Zumischung von Interflow beeinflusst.

Alle Quellen zeigen einen Jahresgang der Wassertemperatur, in dem sich die aus den Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Daten abgeleiteten Abflußverhältnisse wiederfinden. So variieren die Temperaturen der flachgründigen und von Interflow beeinflussten km4-Quelle Q 6b am stärksten (vgl. auch Tab. 5-20, unten). Bei Q 7a liegt wegen des oberflächennahen Einzugsgebietes ein ausgeprägter Jahresgang, nahezu unbeeinflusst von rascheren Abflußkomponenten, vor. Bei Q 6a sehr deutlich, aber auch bei Q 3 und Q 38 sind dagegen kurzfristige Frischwasser-Anteile von im Vergleich zur mittleren Grundwassertemperatur (T_m , Tab. 5-20) kälterem Schmelzwasser und wärmerem Niederschlagswasser zu erkennen.

Verhältnismäßig gering sind die Temperaturänderungen in den Lias-Quellen Q 13a und Q 13b (Abb. A-5-3, Anhang).

6. Der Stoffhaushalt

In 2 großen (P 1 und P 5/1) und 4 kleineren Untersuchungsgebieten (P 6, P 8, P 14 und P 17), die geologisch, pedologisch und in Bezug auf ihre Baumartenzusammensetzung zu unterscheiden waren (Kap. 3), wurden der Stoffeintrag durch Freiland- und Bestandesniederschläge und der Stoffaustrag durch Vorfluter zur Ermittlung des Stoffumsatzes bestimmt.

Eine Grundlage für die Untersuchungen bildeten die Messungen der Depositionen in Laub- und Nadelwaldbeständen, die auf je 2 Versuchsflächen mit einer Baumart durchgeführt wurden. Darauf aufbauend sollten die Auswirkungen der unterschiedlichen Stoffeinträge auf Waldböden und Sickerwässer sowie Grundwässer untersucht werden, um über Bilanzierungen möglicherweise längerfristige Tendenzen der Stoffverteilung, wie Speicherungs- und Auswaschungsvorgänge, zu erkennen.

Die Untersuchungen konnten auf den Ergebnissen der, im Rahmen des Schönbuchprojektes in denselben Teilgebieten, durchgeführten Arbeiten aufbauen (EINSELE, 1986a). Spezielle Fragestellungen nach der Zusammensetzung des Sickerwassers und des als Interflow abfließenden Bodenwassers kamen hinzu. Die für die Stoffhaushaltsuntersuchungen durchgeführten Messungen und Meßverfahren sind in Kap. 4 beschrieben. Die Probenahme wurde im Vergleich zu den früheren Untersuchungen allgemein häufiger und mehr ereignisorientiert durchgeführt. Deshalb liegen u.a. für die Konzentrations-Abfluß-Beziehungen an den Pegelmeßstellen (vgl. Kap. 6.1.4) genauere Ergebnisse vor.

6.1 Chemische Charakterisierung der Wasserhaushaltskomponenten - Konzentrationen und Konzentrationsänderungen

Erste Hinweise auf den Grad der Belastung eines Ökosystems durch atmosphärische Schadstoffe sind aus den Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe in den wäßrigen Lösungen, die die verschiedenen Ebenen eines Ökosystems passieren, abzulesen. Sie sind Grundlage zur Berechnung von transportierten Stoffmengen. Aus den Konzentrationsänderungen der verschiedenen Wasserinhaltsstoffe, sowohl im jahreszeitlichen Gang als auch während besonderer klimatischer Situationen, lassen sich Zusammenhänge und Mechanismen ableiten, die die transportierten Stoffmengen beeinflussen.

Der (Schad-)Stoffeintrag erfolgt in erster Linie mit dem Niederschlag (Kap. 6.1.1). Durch die Fil-

terwirkung des Kronenraums steigen die Konzentrationen im Bestandesniederschlag, unter Fichte stärker als unter Buche, an. In der Regel werden gegenüber dem Freilandniederschlag (NF) die Protonen-, Sulfat-, Nitrat-, Kalium-, Calcium-Magnesium- und Mangan-Konzentrationen im Bestandesniederschlag (NB) erhöht. Dies wirkt sich z.T. deutlich auf die Inhaltsstoffe der Sickerwässer (Kap. 6.1.2) und kaum noch auf die der Grundwässer aus.

Vom Stoffeintrag aus der Atmosphäre und den unterschiedlichen Filterwirkungen der Nadel- und Laubwaldbestände wird im Grundwasser lediglich die Höhe der Nitrat- und (nicht aus der Pyritverwitterung stammenden) Sulfatkonzentrationen beeinflusst. Der Lösungsinhalt in Grundwässern (vgl. Konzentrationen in Quellwässern, Kap. 6.1.3) aus tieferen Stubensandsteinhorizonten und Lias-Quellen wird dominiert durch geogene Ca-Mg-Hydrogenkarbonate, in Liasgebieten teilweise auch durch erhöhte geogene Sulfatgehalte.

Während Abflußerhöhungen ändert sich der Lösungsinhalt der Bachwässer (Kap. 6.1.4) als Folge wechselnder Anteile der am Gesamtabfluß (Q) beteiligten, unterschiedlich mineralisierten Abflußkomponenten (vgl. Modellvorstellung der Abflußbildung, Kap. 2.3). Mit steigenden Abflußmengen nimmt der Gesamtlösungsinhalt, hauptsächlich als Folge einer Verringerung der Konzentrationen der geogenen Komponenten Ca, Mg und HCO_3 , generell ab. Grund dafür ist ein zunehmender Anteil der als Q_{on} (Oberflächen- und oberflächennaher Abfluß, Interflow) abfließenden Komponenten IF_e und IF_{pe} mit einer im Vergleich zum GW allgemein niedrigeren Gesamtmineralisation. Dagegen kann die Konzentration einzelner Inhaltsstoffe mit steigendem Vorfluterabfluß auch ansteigen. Dies hängt mit teilweise sehr hohen SO_4 -, NO_3 - aber auch K-Konzentrationen (Auswaschungseffekte) im Bodenwasser zusammen, das als Interflow zum Gesamtabfluß beiträgt. Die durch Zumischung von Q_{on} beschriebenen Effekte können auch bei flachgründigen Quellen oder Quellen, die im Fassungsbereich Q_{on} anschneiden, beobachtet werden (vgl. dazu auch Kap. 2 und Kap. 5.5).

Um die Abflußkomponenten IF_e und IF_{pe} im Hinblick auf eine Quantifizierung im Gesamtabfluß (und eine Bestimmung des oberflächennahen Lösungsaustrags) chemisch charakterisieren zu können, muß der Lösungsinhalt des Bodenwassers und die verschiedenen, ihn beeinflussenden Faktoren untersucht werden. Weiter ist zu prüfen, aus welcher Tiefe und mit welcher chemischen Zusammensetzung Bodenwasser bei verschiedenen N-Q-Situationen als Interflow zum Gesamtabfluß beiträgt.

Eine zusammenfassende graphische Darstellung der mittleren Lösungsinhalte in den Wässern verschiedener Kompartimente (Kap. 6.1.5) zeigt die unterschiedliche Charakterisierung der am Gesamtabfluß beteiligten Abflußkomponenten. Daraus sind mögliche chemische Markierungen für eine Abflußseparation im Überblick abzuleiten.

6.1.1 Freiland- und Bestandesniederschlag

In Tab. 6-1 (Seite 70 und 71) sind die Konzentrationen in den Niederschlägen, getrennt nach den 4 Testflächen (S 1 - S 4), als Halbjahres- und Jahres-Mittelwerte, zusammengestellt. Unterschiedliche Gehalte im Freilandniederschlag zeigen räumliche Variationen an. Verschiedene Konzentrationen in den Bestandesniederschlägen werden dagegen vorwiegend durch die Bestandesart bestimmt. Die Konzentrationsangaben im NB basieren auf den Messungen des Kronendurchlasses, die Gehalte im Stammablauf der Laubholzbestände (Tab. 6-2) sind bei den Eintragsberechnungen (Kap. 6.2f.) mitberücksichtigt. In der jeweils dritten Spalte der Daten aus den 4 Untersuchungsgebieten sind die Durchschnittsgehalte in den zugehörigen Vorflutern dargestellt. Sie können mögliche Auswirkungen von unterschiedlich konzentrierten Bestandesniederschlägen auf den Lösungsinhalt im Gesamtabfluß verdeutlichen (vgl. dazu Kap. 6.1.4).

Tab. 6-2: Mittlere gewichtete Konzentrationen im Stammablauf von Laubholzbeständen des Schönbuchs nach BÜCKING et al. (1986).

	Bärloch (S 2)	Denzenberg (S 4)
	[mg/l]	
Ca ²⁺	2,1	2,8
Mg ²⁺	0,3	0,4
Na ⁺	0,6	0,8
K ⁺	5,9	6,5
NH ₄ ⁺	0,9	0,9
Cl ⁻	2,1	2,1
NO ₃ ⁻	5,2	5,9
SO ₄ ²⁻	12,4	13,6
H ⁺ [mMol/l]	0,14	0,09

Die Konzentrationen im Freilandniederschlag (NF) liegen für alle Inhaltsstoffe im Vergleich zu anderen Untersuchungsgebieten, wie z.B. dem Solling (ELLENBERG, 1986), recht niedrig. Sie bewegen sich im Konzentrationsbereich der Vergleichsdaten aus der vorausgegangenen Meßperiode 1979-82. Innerhalb des Schönbuchs sind nur geringe räumliche, nicht für alle Elemente einheitliche, Variationen erkennbar.

Die Konzentrationen im Kronendurchlaß sind im allgemeinen deutlich, unter Fichte wesentlich

stärker als unter Buche, erhöht. Sie können ein Vielfaches der Gehalte im NF erreichen. Die Konzentrationserhöhungen sind in erster Linie durch den Filterungseffekt des Kronenraums (Pflanzenoberflächen als Akzeptoren) bedingt. Die größere Blattoberfläche eines Fichtenbestandes führt sowohl zu einer intensiveren Filterwirkung für partikulär und gasförmig (trocken) deponierte Elemente, als auch zu einer stärkeren Stoffanreicherung infolge von Auswaschungseffekten aus den Pflanzen selbst ("leaching"). Deshalb erfolgt die Konzentrationserhöhung im NB elementspezifisch.

Die für den zweijährigen Meßzeitraum 1985/86 gemittelten pH-Werte des NF schwanken bei den 4 Meßstellen der Versuchsflächen nur wenig um den Durchschnittswert von pH = 4,7 (Tab. 6-1). (Zur Bildung der mit der Niederschlagsmenge gewichteten Mittel wurden die Werte entlogarithmiert und anschließend wieder in pH-Einheiten zurückgerechnet.) Die pH-Werte liegen in den Winterhalbjahren niedriger als in den Sommermonaten.

Die pH-Werte der Kronentraufe betragen in den beiden Fichtenbeständen durchschnittlich 3,75 und liegen damit ca. eine pH-Einheit unter dem NF, wobei auf der Versuchsfläche S 3 (Obere Lange Klinge) stets niedrigere Werte gemessen wurden. Im Gegensatz dazu steigen die Jahresmittelwerte im Laubwald von 4,7 im Freiland auf durchschnittlich 5,0, auch hier mit geringen lokalen Abweichungen, an. Bei den Laubwaldbeständen gibt es (im Gegensatz zu den Fichtenbeständen mit nur leicht erhöhten pH-Werten in den Sommerhalbjahren) eine deutlich ausgeprägte saisonale Schwankung. Im überwiegend laubfreien Winterhalbjahr sinkt der pH-Wert und nähert sich dem des NF um anschließend mit dem Laubaustrieb im Frühjahr stark anzusteigen (Abpufferung der Protonen an der Blattoberfläche durch Austauschvorgänge). Während der Vegetationsperiode wird ein Mittelwert von 5,25 erreicht. Die pH-Werte des Stammablaufs liegen im Jahresdurchschnitt des Meßzeitraums 1985/86 bei 4,2. Mit diesem Wert wurden die Protoneneinträge des Stammablaufs berechnet. Die in Tab. 6-2 nach Daten von BÜCKING et al. (1986) angegebenen mittleren Stoffkonzentrationen beziehen sich auf den Meßzeitraum 1979-82.

Der jahreszeitliche Verlauf ist an den pH-Einzelmessungen im Freiland- und Bestandesniederschlag am Beispiel der Versuchsflächenergebnisse von S 3 und S 4 in Abb. 6-1 und ergänzend für S 1 und S 2 (Abb. A-6-1, Anlage) graphisch dargestellt. Auswirkungen auf den Gesamtabfluß werden mit den pH-Werten der zugehörigen Vorfluter veranschaulicht.

Tab. 6-1: Mittlere, gewichtete Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe (mg/l) sowie pH- und Leitfähigkeitswerte in Freiland (NF)- und Bestandesniederschlägen (NB, hier nur Kronendurchlaß) sowie Vorflutern (Pegelmeßstellen) von 4 Teileinzugsgebieten.

Gebiet	Kleiner Goldersbach Schlagbaumlinde			Bärloch			Obere Lange Klinge			Denzenberg			
	NF	NB Fichte	P 8	NF	NB Buche	P 6	NF	NB Fichte	P 17	NF	NB Buche	P 14	
----- Angaben in mg/l -----													
Ca ²⁺	1.Hj. 85	0,55	3,24	45,05	0,56	1,59	66,25	0,29	4,91	60,74	0,63	1,93	53,63
	2.Hj. 85	1,02	1,31	33,12	1,35	1,57	45,51	1,11	4,05	48,80	2,03	1,93	37,78
	1.Hj. 86	0,37	3,79	37,02	1,13	0,89	49,04	0,98	5,47	35,02	0,85	1,51	40,41
	2.Hj. 86	0,64	1,85	42,66	0,67	1,64	56,05	0,64	2,72	38,44	0,53	2,09	43,34
	1985	0,82	1,89	36,63	1,03	1,11	50,30	0,69	4,32	53,93	1,45	1,93	42,23
	1986	0,54	2,68	39,11	0,86	1,30	52,86	0,80	3,87	36,72	0,67	1,81	41,97
	1985/86	0,65	2,36	37,92	0,92	1,23	51,57	0,76	4,03	42,67	1,00	1,86	42,09
Mg ²⁺	1.Hj. 85	0,10	0,56	18,75	0,10	0,47	11,42	0,06	0,68	7,63	0,10	0,43	32,17
	2.Hj. 85	0,14	0,25	11,53	0,13	0,20	7,74	0,14	0,65	7,16	0,23	0,33	22,31
	1.Hj. 86	0,10	0,53	12,63	0,10	0,18	8,63	0,14	0,68	6,59	0,09	0,27	32,80
	2.Hj. 86	0,11	0,38	16,48	0,12	0,34	9,78	0,13	0,49	6,58	0,13	0,43	25,32
	1985	0,12	0,35	13,65	0,12	0,78	8,59	0,10	0,66	7,36	0,18	0,37	25,08
	1986	0,10	0,44	14,06	0,11	0,26	9,26	0,14	0,57	6,58	0,11	0,36	28,82
	1985/86	0,11	0,40	13,86	0,11	0,47	8,92	0,12	0,60	6,85	0,14	0,36	27,09
Na ⁺	1.Hj. 85	0,47	0,69	8,45	0,73	0,43	7,17	0,36	1,01	4,68	0,27	0,61	4,12
	2.Hj. 85	0,78	0,64	5,38	0,72	0,25	4,45	0,72	1,31	4,06	0,59	0,41	2,64
	1.Hj. 86	0,36	0,97	5,37	0,76	0,57	5,25	0,66	1,44	3,41	0,53	0,80	2,86
	2.Hj. 86	0,47	0,74	7,06	0,66	0,64	5,77	0,57	0,72	3,71	0,38	0,45	3,11
	1985	0,64	0,66	6,29	0,72	0,33	5,08	0,51	1,21	4,33	0,46	0,48	3,05
	1986	0,43	0,84	6,00	0,70	0,61	5,53	0,61	1,02	3,56	0,45	0,62	2,99
	1985/86	0,52	0,76	6,14	0,71	0,50	5,30	0,57	1,09	3,83	0,45	0,56	3,02
K ⁺	1.Hj. 85	0,17	3,24	2,04	0,33	2,24	1,12	0,12	4,57	0,72	0,14	3,89	1,43
	2.Hj. 85	0,38	3,43	1,98	0,25	1,72	1,04	0,30	5,22	0,99	0,50	2,23	1,16
	1.Hj. 86	0,29	3,79	1,92	0,18	1,82	1,04	0,46	3,97	1,26	0,23	2,29	1,21
	2.Hj. 86	0,21	3,38	1,99	0,48	2,24	1,06	0,20	3,63	1,09	0,32	3,19	1,24
	1985	0,29	3,36	2,00	0,28	1,94	1,06	0,20	4,99	0,87	0,35	2,85	1,23
	1986	0,24	3,56	1,94	0,35	2,05	1,05	0,32	3,77	1,17	0,28	2,76	1,23
	1985/86	0,26	3,48	1,97	0,33	2,01	1,05	0,27	4,23	1,07	0,31	2,80	1,23
Cl ⁻	1.Hj. 85	1,14	3,16	3,95	1,33	1,75	7,18	1,01	4,40	5,67	0,89	2,36	4,49
	2.Hj. 85	0,60	2,36	3,03	0,56	1,20	5,03	0,58	3,33	5,16	0,64	1,00	3,72
	1.Hj. 86	0,70	2,64	3,19	0,67	1,27	5,51	0,67	4,61	4,59	0,75	1,57	3,82
	2.Hj. 86	0,61	1,57	3,63	0,71	0,87	6,02	0,59	1,92	4,80	0,57	0,84	3,96
	1985	0,81	2,62	3,30	0,85	1,43	5,53	0,76	3,71	5,38	0,72	1,51	3,94
	1986	0,65	2,02	3,35	0,69	1,05	5,79	0,62	3,05	4,69	0,66	1,19	3,90
	1985/86	0,72	2,28	3,33	0,76	1,20	5,66	0,68	3,30	4,93	0,68	1,32	3,92
SO ₄ ²⁻	1.Hj. 85	2,20	4,56	31,48	2,44	6,94	30,21	2,13	9,96	42,80	1,95	9,48	14,63
	2.Hj. 85	3,98	9,23	26,71	4,11	5,10	27,38	3,53	2,29	42,42	3,60	5,84	15,96
	1.Hj. 86	2,44	0,71	27,94	3,01	3,74	28,74	3,00	2,45	41,61	2,45	5,35	15,70
	2.Hj. 86	2,23	9,38	30,37	2,63	3,79	29,92	2,60	3,09	41,22	2,59	5,15	15,61
	1985	3,30	4,31	28,11	3,48	5,87	28,03	2,95	5,00	42,58	3,06	7,20	15,58
	1986	2,33	4,23	28,84	2,78	3,77	29,38	2,76	1,20	41,42	2,53	5,24	15,65
	1985/86	2,75	4,27	28,49	3,06	4,60	28,70	2,84	2,63	41,82	2,75	6,02	15,62
NO ₃ ⁻	1.Hj. 85	2,26	6,27	3,34	2,68	3,17	1,94	2,10	1,53	9,77	1,94	4,23	2,81
	2.Hj. 85	3,03	5,54	3,38	3,50	5,03	1,44	3,26	6,01	11,62	3,21	6,11	3,10
	1.Hj. 86	2,30	8,94	3,39	2,74	3,23	1,44	2,75	6,28	13,59	2,37	4,73	3,22
	2.Hj. 86	1,94	6,51	3,36	2,36	3,70	1,51	2,10	1,83	11,58	2,38	4,50	2,79
	1985	2,73	5,81	3,37	3,19	4,25	1,56	2,78	4,43	10,82	2,79	5,41	3,02
	1986	2,11	7,55	3,38	2,51	3,49	1,48	2,35	3,69	12,59	2,38	4,61	2,99
	1985/86	2,38	6,85	3,37	2,79	3,79	1,52	2,54	3,97	11,98	2,55	4,93	3,01

Gebiet		Kleiner Goldersbach Schlagbaumlinde			Bärloch			Obere Lange Klinge			Denzenberg		
		NF	NB Fichte	P 8	NF	NB Buche	P 6	NF	NB Fichte	P 17	NF	NB Buche	P 14
NH ₄ ⁺ (mg/l)	1.Hj. 85	0,44	1,68	<0.1	0,67	0,92	<0.1	0,20	3,38	<0.1	0,62	0,90	<0.1
	2.Hj. 85	1,56	1,52	<0.1	1,14	0,99	<0.1	2,13	6,12	<0.1	0,52	1,56	<0.1
	1.Hj. 86	1,06	1,63	<0.1	0,88	0,67	<0.1	0,68	3,80	<0.1	0,64	0,88	<0.1
	2.Hj. 86	0,92	2,15	<0.1	1,57	1,96	<0.1	0,61	2,86	<0.1	1,07	2,10	<0.1
	1985	1,02	1,57	<0.1	0,95	0,96	<0.1	1,34	5,06	<0.1	0,55	1,22	<0.1
	1986	0,97	1,94	<0.1	1,31	1,39	<0.1	0,64	3,24	<0.1	0,87	1,60	<0.1
	1985/86	0,98	1,80	<0.1	1,24	1,25	<0.1	0,92	3,82	<0.1	0,77	1,48	<0.1
pH	1.Hj. 85	4,64	3,68	7,98	4,58	4,50	8,17	4,80	3,80	7,89	4,73	4,85	8,15
	2.Hj. 85	4,82	4,11	7,55	4,62	5,08	7,87	4,69	3,89	7,65	4,75	5,36	7,94
	1.Hj. 86	4,48	3,72	7,70	4,42	4,69	8,00	4,52	3,48	7,40	4,46	4,79	7,96
	2.Hj. 86	4,64	3,69	7,92	5,11	5,17	8,10	4,85	3,61	7,55	4,99	5,30	8,03
	1985	4,75	3,97	7,67	4,60	4,84	7,94	4,73	3,86	7,75	4,74	5,17	8,00
	1986	4,57	3,70	7,78	4,83	4,95	8,05	4,70	3,56	7,47	4,75	5,06	8,00
	1985/86	4,65	3,81	7,73	4,72	4,91	7,99	4,71	3,67	7,57	4,75	5,10	8,00
Lf (μS/cm)	1.Hj. 85	25	138	361	29	44	441	24	327	362	26	54	503
	2.Hj. 85	31	75	237	31	37	347	29	160	303	29	43	354
	1.Hj. 86	28	140	260	31	40	367	30	225	242	28	48	377
	2.Hj. 86	22	74	327	23	35	388	23	106	267	23	36	403
	1985	29	96	274	30	40	369	27	219	328	28	47	396
	1986	25	102	285	26	37	379	26	156	254	25	42	391
	1985/86	26	100	280	28	38	374	26	180	280	26	44	393

Auch im Jahresgang zeichnen sich im Vergleich zum NB der Buchen niedrigere pH-Werte im NB der Fichten ab. Die pH-Werte der Niederschläge beschreiben einen sinusförmigen Verlauf mit niedrigeren Werten im Frühjahr und höheren Werten im Sommer. Der Jahresgang ist bei der Kronentraufe der Buchenbestände ausgeprägter als im Freilandniederschlag oder im Bestandesniederschlag der Fichten.

Die pH-Einzeldaten der Niederschläge in Buchenbeständen (vgl. NB-Buche in Abb. 6-1) zeigen im Vergleich zu den Halbjahresmittelwerten besser, daß die pH-Werte im Sommer 1986 niedriger als im Sommer 1985 lagen. Die im Jahr 1986 stärkeren Niederschläge sorgten dafür, daß eine Abpufferung der Protonen an der Blattoberfläche weniger wirksam wurde.

Im Gesamtabfluß der beiden km4-Gebiete P 17, mit überwiegend Nadelwald, und P 14, mit dominierendem Buchenbestand, wirken sich die unterschiedlichen pH-Werte im NB deutlich aus (Abb. 6-1). Im Mittel liegen die pH-Werte bei P 17 um 0,4 Einheiten niedriger (Tab. 6-1). Die Unterschiede im Gesamtabfluß von P 8 und P 6 betragen nur 0,2 pH-Einheiten (Abb. A-6-1, Anhang). Hier wirken sich z.B. andere geologische Gegebenheiten der Vergleichsgebiete mit unterschiedlichen Pufferwirkungen in den Grundwasserleitern aus.

Die Mittelwerte der Erdalkalien liegen im NB deutlich höher als im NF. Die Ca-Konzentrationen im NF schwanken bei den Halbjahreswerten zwischen ca. 0,3 und 2 mg/l (die Jahresdurchschnittswerte liegen um oder unter 1 mg/l). Der höchste, deutlich abweichende Halbjahreswert wurde im trockenen Sommerhalbjahr 1985 im Gebiet Denzenberg (S 4) ermittelt. Er ist vermutlich auf Staubeinwehungen von nahegelegenen, kalkhaltigen Wegeschottern zurückzuführen. Im Kronendurchlaß ist Calcium vor allem unter Fichte und dort besonders in den Winterhalbjahren gegenüber der Konzentration im NF um das durchschnittlich ca. 8- bis 10-fache angereichert. Im Mittel der beiden Gesamtjahre liegen die Ca-Konzentrationen im NB um das 4,5-fache höher als im NF. Unter Buche erhöhen sich die Ca-Gehalte insgesamt nur um den Faktor 1,5, in den einzelnen Halbjahren dagegen bis zum 4-fachen.

Die allgemein niedrigen Mg-Konzentrationen der Freilandniederschläge schwanken im Mittel von 1985/86 nur zwischen 0,11 und 0,14 mg/l. Die Schwankungsbreite der Halbjahre bewegt sich zwischen 0,06 bis 0,23 mg/l. Durch Anreicherungen im Kronenraum werden ca. 2- bis 5-fach erhöhte Konzentrationen, ohne nennenswerte Unterschiede zwischen den Bestandarten, erreicht.

Die Konzentrationserhöhungen bei der Passage des Kronenraums sind bei den Alkalien sehr un-

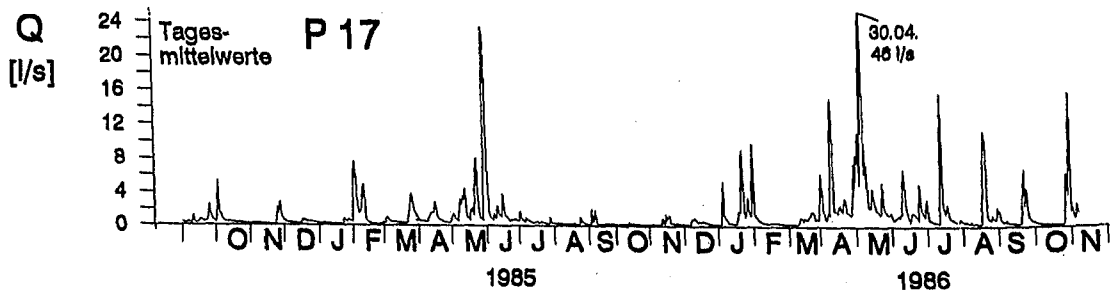
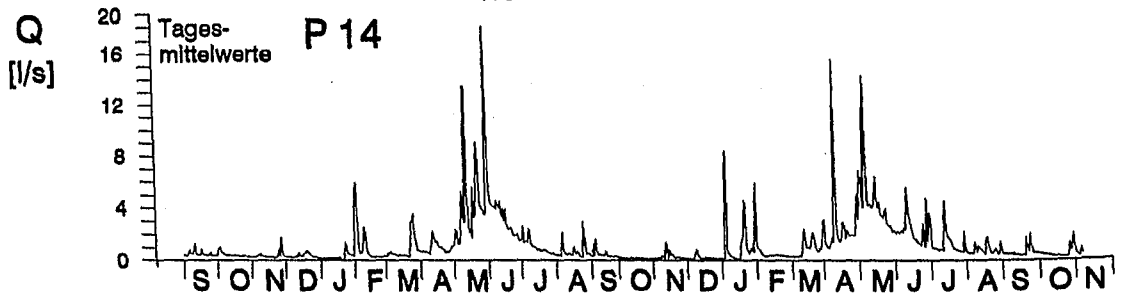
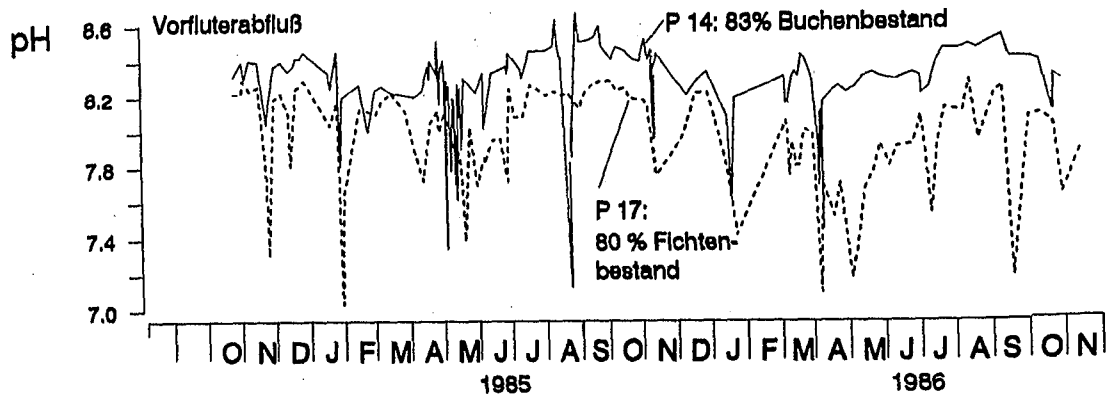
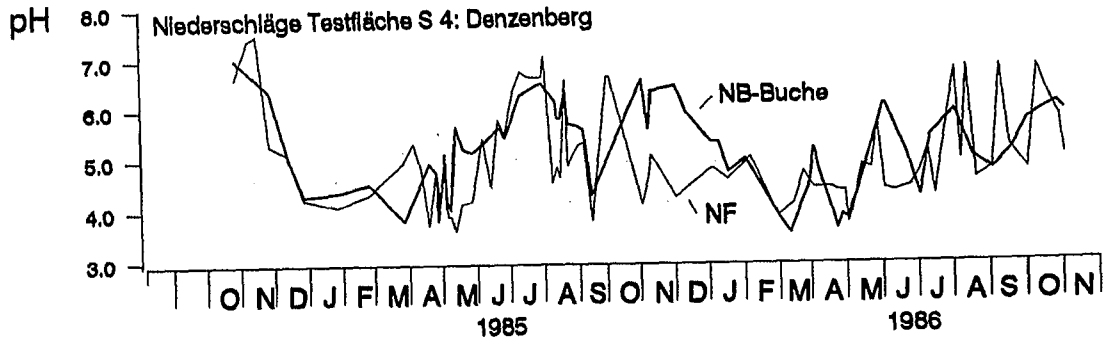
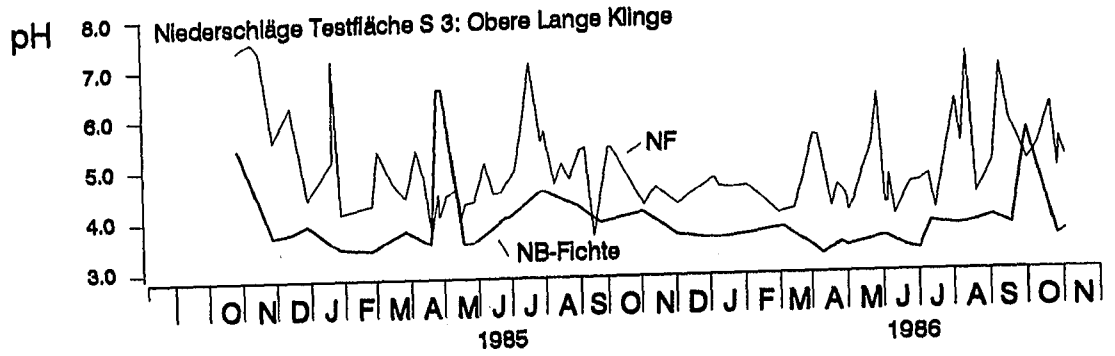


Abb. 6-1: Variationen der pH-Werte im Freiland- und Bestandesniederschlag der Fichtentestfläche Obere Lange Klinge (S 3) und der Buchentestfläche Denzenberg (S 4) sowie an den Pegelmeßstellen P 17 (Obere Lange Klinge) und P 14 (Denzenberg).

terschiedlich. Während sich die Na-Gehalte im NF von im Halbjahresdurchschnitt 0,3 bis 0,8 mg/l in Buchenbeständen durchschnittlich nicht und in Fichtenbeständen maximal auf das Doppelte erhöhen, weisen die K-Gehalte mit die höchsten Anreicherungsfaktoren auf. Im Laubwald steigen die Konzentrationen von durchschnittlich ca. 0,3 mg/l im NF bis auf das 6- bis 9-fache in der Kronentraufe und das 20-fache im Stammablauf an. Eine noch deutlichere Anreicherung findet im Kronenraum des Fichtenwaldes statt, wo sich die K-Gehalte im Mittel sogar bis um das ca. 15-fache, (bei Halbjahreswerten maximal um das 25-fache) erhöhen.

Die Chlorid-Konzentrationen verhalten sich ähnlich wie die Na-Gehalte. Bei Mittelwerten im Freiland von ca. 0,7 mg/l reichern sich die Niederschläge in Buchenbeständen auf das 1,5 bis 2-fache, in Fichtenbeständen bis auf das 4-fache an.

Die Sulfat-Gehalte im NF variieren an den Meßstellen im Durchschnitt beider Meßjahre nur wenig zwischen 2,7 und 3,1 mg/l. Unter Buche steigen die Werte im Mittel auf das 2-fache an. Im Stammablauf erhöhen sich die Gehalte bis zum 5-fachen. Unter Fichten sind die Anreicherungen wesentlich stärker und steigen bei den Halbjahreswerten im Winter bis auf das 14-fache, im Sommer dagegen nur auf das 5-fache des NF. Diese saisonalen Schwankungen sind am Standort S 1 deutlicher ausgeprägt als bei S 3. Auch im NF sind teilweise jahreszeitliche Variationen zu erkennen, die allerdings umgekehrt zu NB höhere Konzentrationen im Sommerhalbjahr aufweisen (vgl. ELLENBERG et al., 1986).

Weniger stark als Sulfat werden die Stickstoff-Verbindungen Nitrat und Ammonium im Bestand angereichert. Die lokal wenig unterschiedlichen NO_3^- -Konzentrationen im NF (Mittelwert 2,6 mg/l) steigen im NB der Buchen auf das 1,5- bis 2-fache an. Die Konzentrationserhöhung in den beiden Fichtenbeständen war sehr unterschiedlich. Auf der im Ostteil des Schönbuchs gelegenen Fläche S 1 sind die Werte 2- bis 3-fach, auf dem weiter westlichen Standort S 3 dagegen 5- bis 6-fach erhöht. Die NH_4^- -Gehalte, durchschnittlich 0,8 bis 1,2 mg/l im NF, reichern sich im Buchenbestand auf durchschnittlich 1,4 mg/l und im Fichtenbestand auf 2,8 mg/l an. Auch hier sind die Werte von S 3 stärker erhöht.

6.1.2 Bodenwasser

Die Beschaffenheit des vertikal (zum Grundwasserleiter) sickern und lateral als Interflow (Q_{on}) abfließenden Bodenwassers wird durch die mit dem Niederschlag eingetragenen Elemente

und durch die in der ungesättigten Bodenzone ablaufenden biologisch-chemischen Stoffwechselforgänge bestimmt. Nicht nur die Baumart, die die Zusammensetzung des NB reguliert, sondern vorwiegend auch die Bodeneigenschaften mit z.B. unterschiedlichen Durchlässigkeiten prägen die Stoffkonzentrationen im Bodenwasser. Deshalb sind Bodenwässer unter Fichten und Buchen sowie verschiedene Bodenprofile unter gleichem Bestand zu unterscheiden. Sickerwasseruntersuchungen aus der früheren Untersuchungsperiode des Schönbuchprojekts liegen von BÜCKING et al. (1986) vor.

6.1.2.1 Die chemische Zusammensetzung der Bodenwässer bei verschiedenen Ausgangsbedingungen - Überblick

Der Chemismus der Sickerwässer in Waldböden wird durch die unterschiedliche Zusammensetzung der Bestandesniederschläge von Fichten und Buchen deutlich mitbestimmt. Die stets höhere Gesamtmineralisation des NB unter Fichte wird im einzelnen vorwiegend durch erhöhte Konzentrationen der H^+ -, SO_4^{2-} -, NO_3^- -, K^+ -, Ca^{2+} -, aber auch der Na^+ -, Cl^- und Mg^{2+} -Ionen bewirkt (vgl. Kap. 6.1.1, Tab. 6-1). Entsprechend den höheren Konzentrationen im NB sind die Sickerwässer unter Fichte allgemein saurer und höher an NO_3^- und SO_4^{2-} konzentriert als die unter Buche. Auch bei Ca^{2+} und teilweise auch bei Mg^{2+} zeigen sich Auswirkungen des höher konzentrierten NB im Sickerwasser.

Durch Nährstoffaufnahme der Vegetation und Reaktion des Sickerwassers mit dem Mineralboden ändern sich die Konzentrationen vieler Inhaltsstoffe. So sind im Grundwasser von Fichtengebieten nur noch die erhöhten NB-Konzentrationen von H^+ , NO_3^- und SO_4^{2-} , das von den Pflanzen nur wenig aufgenommen wird, erkennbar (vgl. Grundwasserchemismus in Kap. 6.1.3 und pH-Werte in Niederschlägen und Vorflutern, Kap. 6.1.1, Abb. 6-1).

Durch Transpirations-Konzentration in schlecht drainierbaren Bodenporen und durch Lösungsverwitterung können erhebliche Anreicherungen stattfinden (unterschiedliche Wasserwegsamkeiten und mittlere Verweilzeiten wirken sich auf Kontaktzeiten mit dem Mineralboden und mit den Wurzeln aus). Somit stellt auch die Porenverteilung im Bodenprofil einen Faktor dar, der die chemische Zusammensetzung des Bodenwassers beeinflusst.

Aufgrund der genannten Mechanismen kann es in unterschiedlichen Bodenprofilen unter gleichem Baumbestand zu teilweise erheblichen Konzentrationsunterschieden im Bodenwasser kommen.

Das Bodenwasser, das besonders bei Abflußerhöhungen als IF zu Q_i beiträgt, fließt im besser durchlässigen Deckschutt, oberhalb des wasserstauenden Basisschutts, lateral ab. Je nach jahreszeitlich unterschiedlichen Bodenfeuchtezuständen kann in den Boden eindringendes Wasser als IF möglicherweise schneller über das durch Austrocknung geschaffene Sekundärporensystem (Schrumpfrisse, Makro- und Grobporen) oder bei (teilweiser) Wassersättigung durch Vermischung und Verdrängung älteren Bodenwassers langsamer abfließen. Ein Vergleich des Chemismus von direkt gewonnenen IF-Proben und mit Unterdruck-Plattenlysimetern in verschiedenen Tiefen und Horizonten entnommenen Bodenwasserproben kann aufzeigen, wie sich der Lösungsinhalt verschiedener Sickerwässer mit unterschiedlichen Verweilzeiten unterscheidet.

Mit der Anwendung des Exponentialmodells wurden unterschiedliche mittlere Verweilzeiten (MVZ) der in verschiedenen Tiefen gewonnenen Sickerwässer und des Interflow ermittelt (vgl. Kap. 7.3, $\delta^{18}\text{O}$ -Werte). Es wurde deutlich, daß mit den Plattenlysimetern im Deckschutt (< 60 cm), im Unterschied zum Interflow, ein größerer Anteil langsamer drainierendes Wassers mit mittleren Verweilzeiten von ca. 4 - 8 Monaten erfaßt wird. Für Interflow wurden mittlere Verweilzeiten von ca. 2 - 3 Monaten bestimmt und während der trockenen Sommermonate teilweise sogar direkt abfließender NB registriert. In den Wintermonaten, bei hoher Bodenfeuchte oder (teil)gesättigtem Deckschutt, sind die Verweilzeiten von IF und flachem Bodenwasser ähnlicher als bei beginnender Austrocknung des Bodens mit der einsetzenden Vegetationsperiode oder in den Sommermonaten (Vergrößerung des Porenraums).

Mit den Plattenlysimetern war nur eine Gewinnung von Sammelproben möglich. Einzelereignisse konnten durch gezielte Probenahmen deshalb weniger scharf abgegrenzt werden. Durch die an die Platten angelegte Saugspannung (600 cm Wassersäule, $pF = 2,78$) ist theoretisch neben dem schnell bis langsamer drainierenden ($pF 0 - 1,77 - 2,54$) auch ein Teil des pflanzenverfügbaren Wassers aus den Mittelporen ($pF > 2,5$) zu gewinnen. Wenn die horizontal eingebauten Platten keine Makroporen wie Grabgänge oder Wurzelröhren angeschnitten haben, ist jedoch eher mit einer Probenahme von weniger beweglichem Bodenwasser zu rechnen. Nur bei Vorhandensein von Schrumpfrissen kann auch eine Beprobung des rascher in den Boden eindringenden Wassers erfolgen (vgl. Kap. 4.1 und Abb. 2.2, Kap. 2).

6.1.2.2 Mittlere Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe im Bodenwasser

Abb. 6-2 und Abb. 6-3 zeigen die Stoffkonzentrationen im Bodenwasser der Fichtenversuchsfläche S 1 (Schlagbaumlinde) und der Buchenversuchsfläche S 4 (Denzenberg) als mit der jeweils gewonnenen Wassermenge gewichtete Halbjahres-Mittelwerte von 1985. Für das Gebiet S 1 sind zusätzlich die Konzentrationen in der "flachen" km⁴-Quelle Q 6b als Vergleichswerte dargestellt. Die entsprechenden Darstellungen für das Untersuchungsjahr 1986 und die Vergleichsgebiete S 2 (Bärloch, Buche) und S 3 (Obere Lange Klinge, Fichte) für 1985 und 1986 sind im Anhang beige-fügt (Abb. A-6-2, A-6-3 und A-6-4).

Da sich die untersuchten Bodenprofile von S 1 und S 4 in ihrer Porengrößenverteilung und Durchlässigkeit unterscheiden (vgl. Kap. 3 und Abb. 3.2), sind die Ergebnisse getrennt dargestellt. Bei den gleichartigen Bodenprofilen der Flächen S 2 und S 3 konnten die Ergebnisse der verschiedenen Platten aus gleicher Einbautiefe jeweils zu einem Wert für eine bestimmte Tiefe gemittelt werden.

Die Stoffkonzentrationen des IF sind als schwarze Balken dargestellt. Im Gebiet S 4 (Denzenberg) wurde der IF durchgehend gemessen, in den Gebieten S 1 und S 2 konnten IF-Proben dagegen nur sporadisch während Schneeschmelz- oder Niederschlagsereignissen in Aufgrabungen oder Geländeinschnitten beprobt werden. Auf der Fichten-Versuchsfläche S 3 war keine IF-Beprobung möglich.

Bei den dargestellten Mittelwerten ist die jeweils besondere klimatische Situation der untersuchten hydrologischen Halbjahre zu beachten. Die häufig im Frühjahr, bei hohen Bodenfeuchtegehalten, eintretenden kräftigen Abflußerhöhungen mit starkem IF fanden 1985 im Mai, d.h. im Sommerhalbjahr, und 1986 im März und April, d.h. noch im Winterhalbjahr, statt. Diese durch sehr hohe Sommerniederschläge zusätzlich modifizierte besondere klimatische Situation erschwert eine deutliche Abgrenzung von Sommer- und Winterhalbjahren und einen Vergleich beider Gesamtjahre. So können z.B. größere Sickerwassermengen zu niedrigeren mittleren Stoffkonzentrationen, möglicherweise aber zu höheren transportierten Stoffmengen führen.

Sickerwasser aus den Lysimeterplatten bis ca. 60 cm Tiefe konnte 1985 meist nur bis Juli und dann wieder ab November/Dezember gewonnen werden. In den Sommermonaten stieg die Wasser-spannung im Deckschutt über den an die Saugplatten angelegten maximalen Unterdruck (600 cm WS, $pF = 2,76$) an. Das Bodenwasser, das sich während dieser Monate nur sehr kurzfristig und in geringen Mengen als Interflow bewegt, konnte

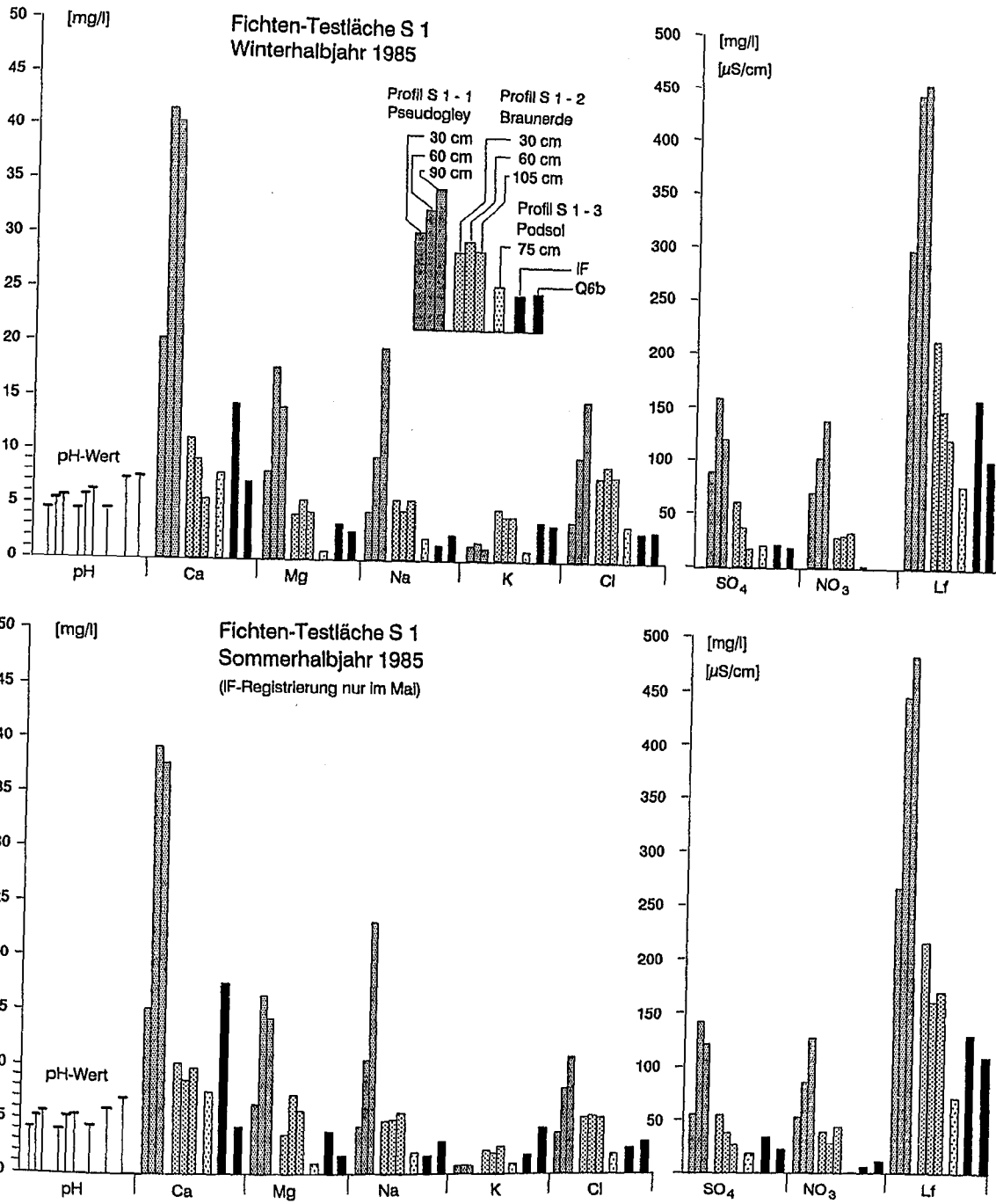


Abb. 6-2: Mittlere, mit der Wassermenge gewichtete Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe im Sickerwasser und Interflow für das Winter- und Sommerhalbjahr 1985 auf der km⁵/km⁴-Fichtentestfläche S 1 (Schlagbaumlinde).

mit den Plattenlysimetern in der Regel nicht erfaßt werden. (Nur aus den Profilen S 1-3 in 75 cm und S 4-3 in 90 cm konnten über das ganze Jahr hinweg Bodenwasserproben gewonnen werden.) Diese Profile weisen wegen eines kaum ausgeprägten Stauhorrizonts eine gute, tiefer reichende Wasserwegsamkeit auf, vgl. Abb. 3-2). In den feuchteren Sommermonaten 1986 fand dagegen wiederholt ein Wechsel zwischen (für die Probengewinnung) zu geringer und ausreichender Bodenfeuchte statt

(vgl. z.B. pF-Kurve in Abb. 5-2, Kap. 5.3.1).

Interflow war im Sommerhalbjahr 1985 i.w. auf den besonders niederschlags- und abflußreichen Monat Mai beschränkt. Aus diesem Monat stammen die IF-Proben des Sommerhalbjahres 1985 für die Gebiete S 1 und S 2. Nur aus dem Gebiet S 4 konnten mit der dort installierten Meßeinrichtung auch in den übrigen Monaten des Sommerhalbjahres IF-Proben, allerdings nur in sehr kleinen Mengen, gewonnen werden. Die IF-

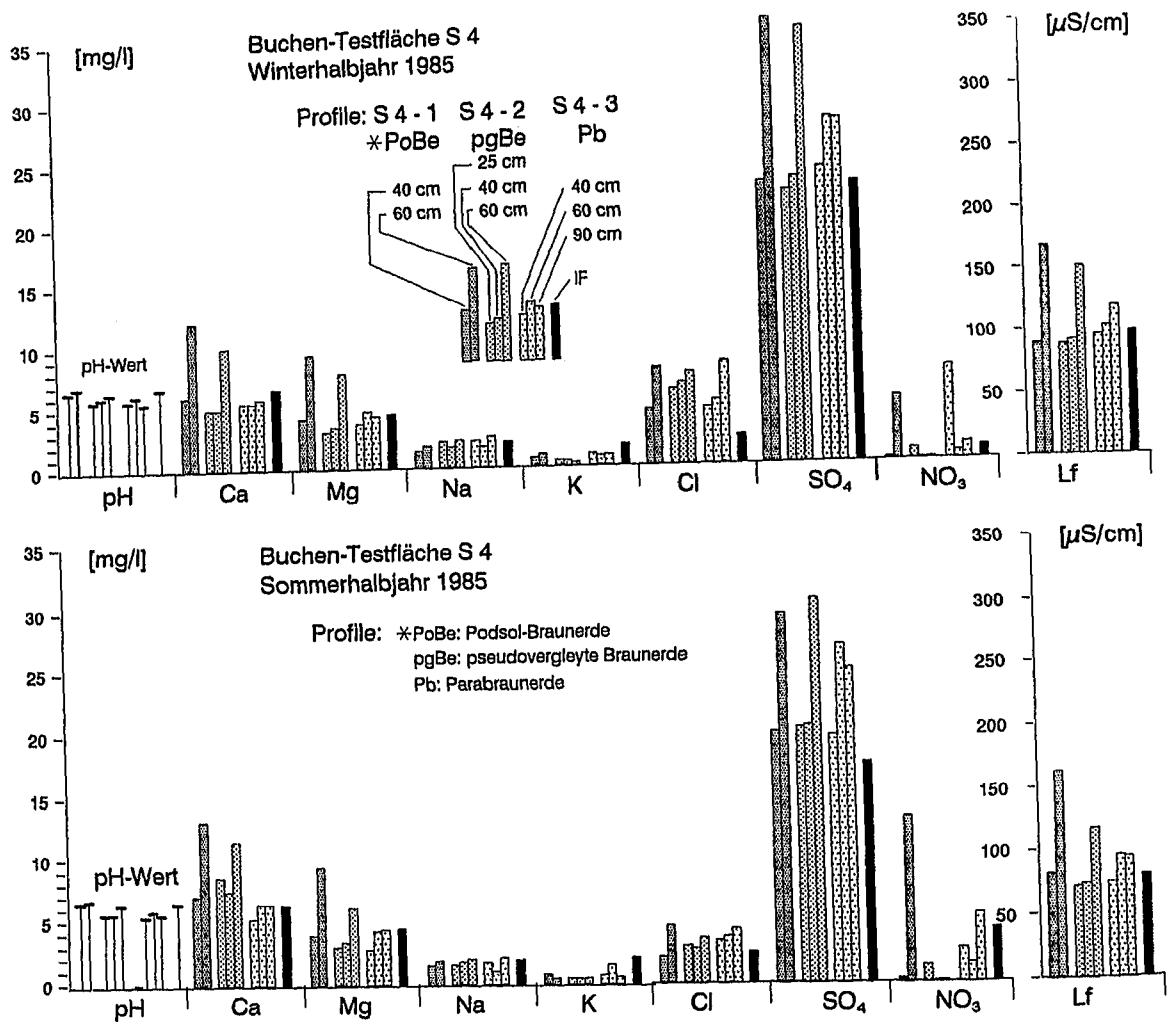


Abb. 6-3: Mittlere, mit der Wassermenge gewichtete Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe im Sickerwasser und Interflow für das Winter- und Sommerhalbjahr 1985 auf der km4-Buchentestfläche S 4 (Denzenberg).

Situation im Mai 1985 war der in den Monaten März und April 1986 ähnlich. Nach den frühjahrszeitlichen Abflußspitzen konnte wieder nur im Gebiet S 4 Interflow beprobt werden (vgl. Darstellung der IF-Situation in Kap. 8).

Exemplarisch werden im folgenden die in Abb. 6-2 und 6-3 dargestellten Ergebnisse der Fichten- und Buchentestflächen S 1 (Schlagbaumlinde) und S 4 (Denzenberg) von 1985 verglichen. Teilweise werden darüberhinaus die Daten von 1986 sowie die Mittelwerte der beiden Vergleichsgebiete S 2 (Bärloch, Buche) und S 3 (Obere Lange Klinge, Fichte) in den Vergleich einbezogen.

Die relativ zu Buchen unter Fichte höhere Säurebelastung wird auch in den Sickerwässern deutlich. Die mittleren pH-Werte (gewichtete Mittel der hydrologischen Halbjahre) der Sickerwässer liegen 1985 bis 30 cm bei S 1 zwischen 4,1 und 4,5 und bei S 4 (25 - 40 cm) zwischen 5,5 und 6,6. Mit zunehmender Tiefe nehmen die pH-

Werte bis auf 6,2 unter Fichte (Profil S 1-2, 105 cm) und 7,0 unter Buche (Profil S 4-1, 60 cm) zu. Die pH-Werte sind nie kleiner als die der zugehörigen Kronentraufen (vgl. Abb. 6-12a).

Die pH-Werte im Bodenwasser variieren in unterschiedlichen Bodenprofilen unter Fichte nur unwesentlich. Auf der Buchenfläche S 4 weisen dagegen die Bodenwässer mit der höchsten mittleren Verweilzeit (MVZ = 0,9 a, Profil S 4-1, 60 cm) auch die höchsten mittleren pH-Werte und die in dem besonders gut durchlässigen Profil S 4-3 mit geringeren mittleren Verweilzeiten (vgl. Tab. 7-1) die durchweg niedrigeren pH-Werte auf. Im letztgenannten Profil ist die in 90 cm gegenüber 60 cm leicht erhöhte Säurebelastung auf einen im Durchschnitt etwas rascheren Wasserzutritt (über Stammabfluß und Wurzelbahnen) in die in 90 cm Tiefe eingebaute Saugplatte zurückzuführen (MVZ 90 cm = 0,5 a; MVZ 60 cm = 0,6 a).

Die besonders unter Buchen deutlichen saisona-

len Schwankungen der pH-Halbjahreswerte des NB werden von den Halbjahreswerten selbst im flachen Sickerwasser kaum nachgezeichnet.

Im Fichtengebiet S 1 liegen die mittleren pH-Werte des IF deutlich über denen des flachen Sickerwassers aus dem Deckschutt. Im Buchengebiet S 4 liegen die pH-Werte des IF dagegen nur wenig über oder im Bereich der pH-Werte der flachen Sickerwässer. Ähnlich hoch wie die pH-Werte des IF im Gebiet S 1 liegen die pH-Werte der flachen km4-Quelle Q 6b in den Winterhalbjahren 1985 und 1986. In den Sommerhalbjahren ergaben sich in beiden Vergleichsgebieten niedrigere pH-Mittelwerte als im Winter.

Um die Beeinflussung der Kronentraufe auf das Bodenwasser im Detail zu veranschaulichen, sind in Abb. 6-4 pH-Einzelmessungen des NB und verschiedener Bodenwässer (Sickerwasser aus Plattenlysometern und Interflow) der Buchentestfläche S 4 (Denzenberg) im Jahresgang dargestellt (vgl. auch A-6-5 im Anhang mit weiteren untersuchten Bodenprofilen dieser Testfläche).

Die pH-Werte des Bestandesniederschlags beschreiben einen ausgeprägten Jahresgang mit Minima im März/April und Maxima in den Sommermonaten bei stärkster Belaubung (Kap. 6.1.1). Die pH-Werte im Sickerwasser (Abb. 6-4, oben) schwankten stark. Eine saisonale Variation zeigt hohe Werte im Winter 1985 und ein Absinken bis zum Trockenfallen im Sommer und Herbst auf NB-ähnliche pH-Werte. Ursache dafür ist, wie $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen gezeigt haben (vgl. Kap. 7.3), eine rasch über Schumpfrisse mögliche Zumischung von saurerem Wasser (IF_e -Komponente), das wegen der kürzeren mittleren Verweilzeit weniger stark abgepuffert ist. Mit zunehmender Bodenfeuchte in den Wintermonaten werden die Verweilzeiten des Bodenwassers länger und die pH-Werte steigen an. Infolge stärkerer Niederschläge im Jahr 1986 und der länger anhaltenden hohen Bodenfeuchte blieben die pH-Werte im Sommer und Herbst auf einem höheren Niveau und sanken erst ab August (vgl. Sickerwässer der Profile S 4-2 und S 4-3 in Abb. A-6-5, Anhang). Neben einer pH-Wert-Beeinflussung durch phasenweise schneller zutretendes Sickerwasser ist, besonders bei durchgehend hoher Bodenfeuchte, auch mit einem gegenüber dem NB phasenverschobenen Jahresgang zu rechnen.

Die pH-Werte im Interflow tendierten in den trockenen Sommer- und Herbstmonaten wesentlich stärker zu den niedrigeren pH-Werten des NB als im feuchten Winter und Frühjahr (Abb. 6-4 b). Dies ist auf den Einfluß des direkt abfließenden, saureren NB (IF_e) zurückzuführen. Bei höherem Bodenwassergehalt in den Monaten April und Mai 1985 und Dezember - Mai 1986 floß dagegen

Wasser mit höheren pH-Werten ab. Mit $\delta^{18}\text{O}$ -Daten konnte gezeigt werden (vgl. Kap. 7.3), daß der Interflow aus zum großen Teil älterem Vorereignis-Bodenwasser bestand (IF_{pe} -Komponente) und nicht aus aktuellem Ereigniswasser (IF_e -Komponente). Höhere pH-Werte durch Pufferungseffekte sind die Folge. Hinzuweisen ist auf zwei hohe pH-Werte (um 7) im Interflow in den Monaten September und Oktober 1985. In diesen Monaten konnte mit den Sickerplatten kein Wasser gewonnen werden und Interflow fand nur sporadisch mit sehr geringen Mengen statt. Durch die anhaltende Trockenheit erhöhte sich das Lösungsangebot im Mineralboden, sodaß der direkt als IF_e abfließende NB stark abgepuffert werden konnte.

Die mittleren Calcium-Konzentrationen der Kronentraufe lagen 1985 und 1986 in den Fichtenbeständen mit 3,2 mg/l durchschnittlich doppelt so hoch wie in den Buchenbeständen (1,5 mg/l, vgl. Tab. 6.1 in Kap. 6.1.1 und Abb. 6-12 in Kap. 6.1.5). Eine saisonale Schwankung der Halbjahreswerte ist nur unter Fichte erkennbar. Im Bodenwasser steigen die Ca-Konzentrationen deutlich und unter Fichten stärker als unter Buchen an. Auf der Fichtenfläche S 1 (Schlagbaumlinde) wurden im schlecht durchlässigen Profil 1 ab 60 cm über 40 mg/l gemittelt. In diesem Profil ist eine saisonale Schwankung mit höheren Konzentrationen im Winterhalbjahr, besonders in 30 cm, zu erkennen. In den sandigen Profilen S 1-2 (1985) und S 1-3 (1985 und 1986) liegen die Halbjahres-Konzentrationen wesentlich niedriger und nur wenig über den Ca-Gehalten des km4-Buchenstandortes S 4 (Denzenberg). Dort stiegen die Ca-Konzentrationen bei 60 cm in den Profilen 1 und 2 an der Grenze zum schlechter durchlässigen Basisschutt sprunghaft an (vgl. auch km4-Fichtenfläche S 3, mit stärkerem Ca-Anstieg in 40 cm.)

Die Ca-Mittelwerte des IF geben im Gebiet S 4 die des Sickerwassers bis 40 cm, im Profil 3 auch bis 60 cm wieder. Die Ca-Werte der IF-Proben liegen im Bereich des Sickerwassers aus 30 cm Bodentiefe und deuten damit eine laterale Wasserbewegung auf einem Stauhohizont an der Grenze Deckschutt/Basisschutt an.

Bezüglich der Ca-Konzentrationsänderungen einzelner Messungen wird auf die Besprechung von N-Q-Ereignissen in Kap. 8-5 verwiesen.

Die Mg-Konzentrationen erreichen in der Kronentraufe im Mittel nur 1/5 der Ca-Konzentration, ohne nennenswerte Unterschiede zwischen Fichten und Buchen. Auch in den Sickerwässern bleiben die Mg-Werte niedriger als die Ca-Konzentrationen. Nur im km4-Buchengebiet S 4 wurde eine relativ stärkere Mg-Anreicherung beobachtet. Der Verlauf der Mg-Konzentrationen im Bodenwasser

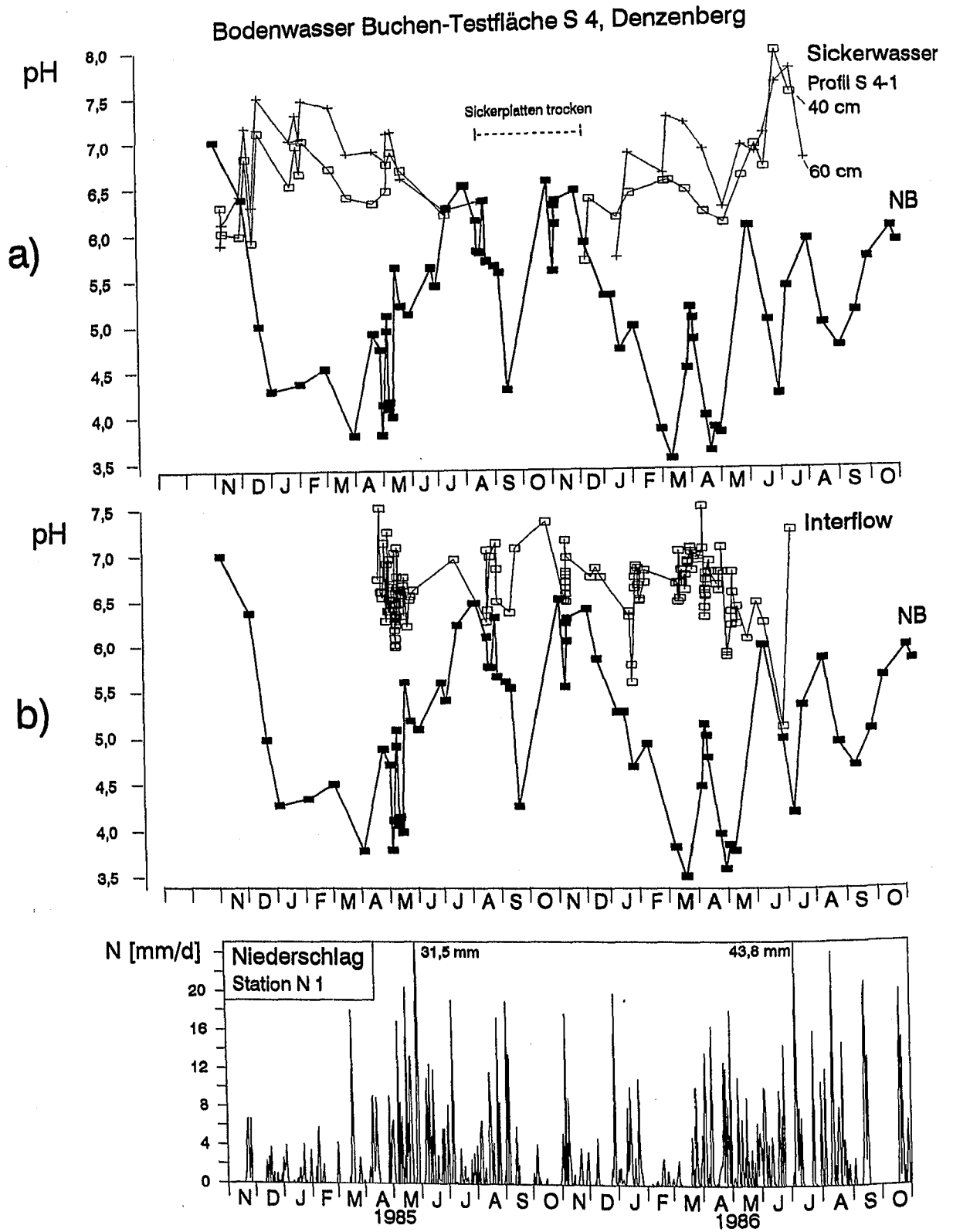


Abb. 6-4: pH-Werte im Sickerwasser des Profils a) S 4-1 in 40 cm und 60 cm Tiefe und b) des Interflow, jeweils im Vergleich zu den pH-Werten der Kronentraufe. Einzelmessungen von der Buchentestfläche S 4 (Denzenberg).

der verschiedenen Profile verhält sich allgemein ähnlich wie die Ca-Konzentrationen.

Die Natrium-Konzentrationen liegen im NB der Fichten mit 0,9 mg/l höher als unter Buchen mit 0,5 mg/l. Im Sickerwasser sind die Konzentrationen auf allen Standorten erhöht, in den Fichtengebieten stärker als unter Buche. Nur im Fichtengebiet S 1, in dem ab 60 cm schlecht durchlässigen Pseudogley (Profil 1) stieg die mittlere Na-Konzentration im Bodenwasser mit zunehmender Tiefe besonders stark bis auf 23,2 mg/l an.

Auf sandigen Standorten bleiben die Konzentrationen mit zunehmender Tiefe etwa gleich. Im Interflow von S 1 lagen die mittleren Na-Konzentrationen zwischen denen des flachen Sickerwassers und des NB. Im Gebiet S 4, wie auch im Buchen-Vergleichsgebiet S 2 (vgl. Abb. A-6-3, Anhang) stimmen die Konzentrationen mit den insgesamt wenig unterschiedlichen Sickerwasserkonzentrationen (S 4) oder den Konzentrationen aus dem Deckschuttbereich (S 2 - 30 cm) überein.

Die Kalium-Konzentrationen liegen im Niederschlag unter Fichte im Mittel bei 3,9 und unter Buche bei 2,4 mg/l. Eine saisonale Schwankung der Halbjahresmittelwerte ist wie bei Na nicht deutlich. Auf den sorptionsschwachen Sandstandorten unter Fichte (Profil S 1-2) liegen die K-Gehalte im Bodenwasser des Deckschutts höher als in den tonreicheren Bodenprofilen und entsprechen etwa den Konzentrationen der Kronentraufe (vgl. auch km4-Fichtenfläche S 3, Abb. A-6-4, Anhang). Geringere K-Konzentrationen im tieferen Boden mit einer abnehmenden Tendenz wie sie BÜCKING (1986) beschreibt, wurden nur im Gebiet S 3 festgestellt. Unter Buche lagen die K-Gehalte durchweg unter denen des NB und in besser durchlässigen, sorptionsschwächeren Böden (S 4-3) wiederum höher.

Die mittleren K-Konzentrationen des Interflow liegen im Gebiet S 4 über denen des Bodenwassers aus den Plattenlysimetern und unter denen der Kronentraufe. Die Ursache dafür ist die insgesamt kürzere MVZ des als IF abfließenden Bodenwassers und die damit verbundene geringere K-Aufnahme der Pflanzen. V.a. bei Niederschlag (N)-Abfluß(Q)-Ereignissen fließt ein Mischwasser als IF ab, das aus K-ärmerem, älterem Bodenwasser (IF_{pc}-Komponente) und aus K-reicherem, frischem Niederschlagswasser besteht.

Auch im Fichtengebiet S 1 variieren die K-Mittelwerte zwischen den Konzentrationen des NB und den deutlich niedrigeren Konzentrationen im Bodenwasser aus dem Deckschutt des Profils 1, das durch den deutlich ausgeprägten Stauhizont eine laterale Wasserbewegung ermöglicht.

Gegenüber den Chlorid-Konzentrationen der Kronentraufe von Fichten und Buchen (im Mittel

2,8 mg/l und 1,3 mg/l) sind die Bodenwasserkonzentrationen deutlich erhöht. Eine saisonale Schwankung der mittleren Cl-Konzentrationen im NB mit höheren Werten in den Winterhalbjahren zeichnet sich teilweise auch in den Mittelwerten der flachen Sickerwässer ab, deren mittlere Cl-Konzentrationen häufig auf das Doppelte der Kronentraufe angestiegen sind. Mit zunehmender Tiefe steigen die mittleren Cl-Konzentrationen, meist stärker in schlechter durchlässigen Bodenprofilen, an (vgl. dazu auch die Ergebnisse der Bodenwasseruntersuchungen in den Gebieten S 2 und S 3, die besonders am Stauhizont zwischen Deckschutt und Basisschutt Erhöhungen der Cl-Gehalte zeigen, Abb. A-6-3 und A-6-4.) Die mittleren Cl-Konzentrationen im Interflow liegen im Bereich zwischen den flachen Sickerwässern und der Kronentraufe.

Die Sulfat-Konzentrationen (Mittelwerte von 1985/86) liegen im NB der Fichten mit 18,5 mg/l deutlich höher als in der Kronentraufe der Buchen (5,3 mg/l). Saisonale Schwankungen der Halbjahreswerte sind nur unter Fichte ausgeprägt. Besonders deutlich, zwischen ca. 9 mg/l im Sommer und über 20 mg/l im Winterhalbjahr, schwankten die mittleren SO₄-Konzentrationen auf der Testfläche S 1. Im Sickerwasser sind dort nur bei S 1-1 in 30 cm und S 1-3 in 75 cm Schwankungen der Halbjahreswerte zu erkennen. Die mittleren Konzentrationen im Sickerwasser sind gegenüber den SO₄-Gehalten im NB durchweg stark erhöht. Auf der Fichtenfläche S 1, Schlagbaumlinde, stiegen sie im tonreicheren, schlecht durchlässigen Profil S 1-1 am höchsten an und erreichten in 60 cm mit ca. 165 mg/l den Maximalwert (Abb. 6-2).

Auf dem sandigeren, besser durchlässigen Standort S 1-2 liegen die Konzentrationen deutlich niedriger und sinken mit zunehmender Tiefe.

Die Sulfatkonzentrationen im Interflow der Fichtenfläche S 1 bewegen sich im Bereich der Gehalte der tieferen Sickerwässer auf Sandstandorten (S 1-2 und S 1-3) sowie der flachen km4-Quelle Q 6b. Sie kommen durch eine Mischung des älteren, sulfatreicheren flachen Sickerwassers und des rascher abfließenden, sulfatärmeren Bodenwassers aus aktuellem NB zustande. Dies wird durch die höheren mittleren Sulfatgehalte des IF im Sommerhalbjahr 1985, die nur den starken IF des Monats Mai wiedergeben, bestätigt. Als Folge des hohen Bodenwassergehaltes setzte sich der IF aus einem höheren Anteil einer langsameren, sulfatreicheren und einem niedrigeren Anteil einer rascheren, sulfatärmeren Bodenwasserkomponente zusammen.

Im km4-Fichtengebiet S 3 (vgl. Abb. A-6-4, Anhang) liegen die SO₄-Konzentrationen im Sickerwasser zwischen ca. 50 und 70 mg/l mit nur in

25 cm Tiefe schwachen saisonalen Schwankungen und einer leichten Konzentrationserhöhung in 40 cm Tiefe.

Im km4-Buchengebiet S 4 schwanken die mittleren SO_4 -Gehalte in den verschiedenen Profilen bis 40 cm nur wenig um und leicht über 20 mg/l. Ein markanter Anstieg bis ca. 35 mg/l ist in den Wässern aus 60 cm, besonders in den Profilen S 4-1 und S 4-2, die einen ausgeprägten Stauhorizont in diesem Tiefenbereich besitzen, zu erkennen. Die SO_4 -Mittelwerte des IF lagen nur im Winterhalbjahr 1985 im Bereich der flachen Sickerwässer, die anderen Halbjahreswerte leicht darunter. Die niedrigeren Werte der Sommerhalbjahre kommen durch den, bei "trockenen Bodenverhältnissen", größeren Anteil an sulfatärmerem und NB-ähnlichem Bodenwasser zustande (vgl. dazu auch Abb. 6-10).

Im Lias-Buchengebiet S 2 (vgl. Abb. A-6-3, Anhang) schwanken die mittleren SO_4 -Konzentrationen im Sickerwasser zwischen 15 und 18 mg/l, wobei in 60 cm eine durchgängig leicht niedrigere Konzentration auffällt. Dies steht im Gegensatz zu den Beobachtungen auf dem Testfeld Denzenberg S 4, wo in 60 cm Tiefe eine Erhöhung der SO_4 -Konzentrationen registriert wurde (S 4-1 und S 4-2). Vermutlich wurde bei S 4 der schon schlechter durchlässige Grenzbereich zum Basisschutt (mit Auswirkungen der Transpirations-Konzentration) erfaßt und bei S 2 der untere, noch gut durchlässige Bereich des Deckschutts (vgl. Abb. 3-2 und $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien der Sickerwässer, Abb. 7-2 bis 7-5).

Wie die SO_4 - sind auch die NO_3 -Konzentrationen im NB der Fichten höher als in der Kronentraufe der Buchen. Im Mittel der Untersuchungsjahre 1985/86 wurden unter Fichte 10,4 und unter Buchen 4,4 mg/l gemessen. Eine saisonale Schwankung der Halbjahreswerte der NO_3 -Konzentrationen ist im NB nicht ausgeprägt. Die NO_3 -Einzelwerte (teilweise Einzelereignisse) schwanken stark und erreichen Gehalte bis über 30 mg/l unter Buchen (NB S 4) und 60 mg/l unter Fichten (NB S 3). Auf den Fichtenflächen liegen die NO_3 -Konzentrationen der Sickerwässer deutlich über denen des NB (Ausnahme S 1 -3, 75 cm, Podsol). Auf dem lehmig-tonigen Standort S 1-1 wurden die höchsten Halbjahreswerte mit zunehmender Tiefe bis zu 140 mg/l gefunden. Auf dem sandigen Standort S 1-2 liegen die Konzentrationen insgesamt deutlich niedriger. Im Winterhalbjahr 1986 (vgl. Abb. A-6-2, Anhang) mit beginnender Wiederbefeuchtung des Bodens (ab Dezember 1985), wird eine erhöhte Auswaschung des NO_3 (zunächst gesteigerte Sickerwasserkonzentrationen) deutlich (vgl. auch Ergebnisse der Versuchsflächen S 3 in Abb. A-6-4, Anhang).

Die geringere Bodenfeuchte von August bis Dezember 1985 dürfte die Aufnahme von NO_3 durch Pflanzen vermindert und die Auswaschung durch das Sickerwasser verhindert haben. Dies hatte eine zu Beginn des Frühjahrs folgende NO_3 -Auswaschung, auch wegen des geringen bis fehlenden Pflanzenbedarfs (N-Überschuß), gefördert.

Unter Buche (Versuchsfläche S 4) liegen die NO_3 -Konzentrationen im Sickerwasser bis 40 cm allgemein unter denen des NB. (Die aktuell vorhandenen N-Mengen werden unter Buche mehr von $\text{NH}_4\text{-N}$ dominiert.) Im Profil S 4-1 in 60 cm (vermutlich im Bereich des Stauhorizonts, s.o.) wurden dagegen stark erhöhte NO_3 -Gehalte gemessen. Auch in diesem Gebiet fällt eine NO_3 -Auswaschung im Sommerhalbjahr 1986 bei S 4-3 in 90 cm auf, die sich schon 1985 durch erhöhte Konzentrationen bei S 4-3 in 40 cm, angekündigt hatte (Abb. 6-3 und A-6-2, Anhang). Eine Auswaschung von NO_3 im Winterhalbjahr 1986 nach dem trockenen Sommerhalbjahr 1985 ist im Buchengebiet S 2 noch ausgeprägter (vgl. Abb. A-6-3, Anhang).

Die NO_3 -Konzentrationen des Interflow von S 1 liegen wesentlich unter denen der Sickerwässer und im Konzentrationsbereich des NB. Nur in S 1-3 (Podsol) wurden noch niedrigere Konzentrationen gemessen. Die nicht durchgängige IF-Beprobung (Proben nur von Januar, März und April 1986) konnte keine NO_3 -Auswaschung im Winterhalbjahr 1986 über den IF nachweisen.

Die NO_3 -Gehalte im IF des km4-Buchenstandortes S 4 liegen zwischen den Konzentrationen der flachen Sickerwässer und des NB. Sie schwanken sehr stark zwischen 0,1 und 0,3 mg/l im Mai und bis zu 53 mg/l im August. Wegen der geringen Bodenfeuchte im trockenen Sommer wird eine NO_3 -Aufnahme verhindert und bei kurzfristigem Zwischenabfluß schon im Sommerhalbjahr 1985 über den IF ausgewaschen. (Teilweise finden auch hohe Einträge über den NB statt.) In den flachen Sickerplatten konnten während dieser Zeit keine Proben gewonnen werden, da das rasch als IF abfließende Sickerwasser nur unzureichend zur Wiederbefeuchtung beitrug.

Die elektrische Leitfähigkeit (Lf) der Bestandesniederschläge weist eine unter Fichten deutlich und unter Buchen nur sehr schwach ausgeprägte saisonale Schwankung auf. In den Fichtenbeständen wurden in den Winterhalbjahren ca. 2-fach höhere Lf-Werte als Halbjahresmittel bestimmt. Beispielsweise wurden für das Jahr 1985 im Gebiet S 1 im Winterhalbjahr 138 $\mu\text{S/cm}$ und im Sommerhalbjahr 75 $\mu\text{S/cm}$ bestimmt. Im Buchengebiet S 4 schwankten die Halbjahres-Lf-Werte 1985 nur zwischen 43 und 54 $\mu\text{S/cm}$. Die mittleren Lf-Werte im Sickerwasser steigen gegenüber

den Lf-Werten im NB allgemein stark an.

Auf der Fichtenfläche S 1 wurden die höchsten Lf-Werte im Sickerwasser des lehmig-tonigen Profils S 1-1 gemessen. Dort war in 30 cm noch eine saisonale Schwankung mit höheren Werten im Winter zu erkennen. Deutlich niedriger lagen die Gesamtlösungsinhalte im "sandigen" Profil S 1-2 und sogar NB-ähnlich im Podsol-Profil S 1-3. Die Leitfähigkeiten des IF bewegten sich zwischen NB und flachen Sickerwässern mit höheren Werten im Winterhalbjahr.

Auf der Buchenfläche S 4 variierten die mittleren Lf-Werte der flachen Sickerwässer (bis 40 cm) während der gesamten Meßperiode in einem sehr engen Bereich zwischen 58 und 96 $\mu\text{S}/\text{cm}$ mit einer schwach ausgeprägten, gleichsinnig zu NB verlaufenden saisonalen Schwankung. Mit beginnender Austrocknung im Sommer und Wiederbefeuchtung im Herbst/Winter 1985 stand einer geringeren Sickerwassermenge ein höheres Lösungsangebot zur Verfügung. Dies führte zu einem Anstieg der Leitfähigkeit im Bodenwasser vor dem Trockenfallen und zu einem Absinken nach der Wiederbefeuchtung. Die dennoch im Winterhalbjahr 1985 im Mittel höheren Lf-Werte des Bodenwassers sind auf die hohen Werte zu Beginn der Meßperiode (Wiederbefeuchtung im Herbst-Winter 1984/85) zurückzuführen. Im nassen Sommerhalbjahr 1986 blieben die Lf-Werte im fast durchgehend extrahierbaren Bodenwasser auf einem niedrigen Niveau.

Die mittleren Lf-Werte im Interflow entsprechen mit Werten zwischen 70 und 99 $\mu\text{S}/\text{cm}$ etwa den Lf-Mittelwerten der flachen Sickerwässer bis 40 cm Profiltiefe. Auch hier wurden im Winterhalbjahr 1985 höhere mittlere Lösungsinhalte gemessen als im darauffolgenden Sommerhalbjahr, in dessen Verlauf stark schwankende Einzelwerte zwischen dem Minimalwert der Meßperioden, 58 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im nassen Mai (vermindertem Lösungsangebot) und 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei minimalen IF-Mengen im Oktober gemessen werden.

Im Buchen-Vergleichsgebiet S 2 Bärloch liegen die mittleren LF-Werte jeweils leicht unter denen des flachen Sickerwassers. Hier wirkt sich offenbar eine raschere, niedriger mineralisierte und NB-ähnlichere Bodenwasserkomponente (IF) deutlicher aus. Ferner ist zu berücksichtigen, daß im Sommerhalbjahr 1985 nur Proben aus dem feuchten Mai (hohe Bodenfeuchte, relativ geringe Lösung von Stoffen aus dem Mineralboden bei permanentem Interflow, Auswaschung) zu gewinnen waren.

6.1.3 Grundwasser (Quellen)

Luftverunreinigungen wirken sich in Laub- und Nadelwaldbeständen unterschiedlich auf Bestandesniederschläge und Sickerwässer aus. Daraus ergibt sich die wichtige Frage, inwieweit davon auch der Chemismus des Grundwassers und damit auch des Gesamtabflusses im Vorfluter beeinflusst wird. In diesem Kapitel werden deshalb, neben den stark geogen geprägten Hauptinhaltsstoffen der untersuchten Quellwässer, die Auswirkung der in Nadelwaldbeständen stark erhöhten Sulfat- und Nitratgehalte auf das Grundwasser dargestellt (vgl. auch Kap. 6.1.5). Die vorliegenden, auf umfangreichen Analysen basierenden Ergebnisse schließen an die Untersuchungen von AGSTER und EINSELE (1986) an und ermöglichen eine längerfristige Betrachtung. Eine ausführliche Beschreibung des geogen bestimmten Lösungsinhaltes der Quellwässer wurde von AGSTER (1983) vorgenommen.

Nach der, gemäß den Ionenverhältnissen vorgenommenen Beschreibung der Quellwässer (AGSTER und EINSELE, 1986) sind die Stubensandstein- und Lias-Grundwässer als normal erdalkalisch und überwiegend hydrogenkarbonatisch zu bezeichnen. Der Anteil der Alkalien bleibt in der Regel unter 20 meq-%.

In Tab. 6-3 sind die Mittelwerte (gewichtet mit der Schüttungsmenge) und die Extremgehalte der wichtigsten Inhaltsstoffe (Einzelwerte) sowie die entsprechenden pH-Werte der untersuchten Quellwässer, getrennt nach Lias und Stubensandstein, zusammengestellt. Über das Schüttungsverhalten der Quellen wurde in Kap. 5.5 berichtet (vgl. auch Tab. 5-20, Abb. 5-5 bis 5-7 sowie A-5-1 und Abb. A-5-2 im Anhang).

6.1.3.1 pH-Werte und Stoffkonzentrationen

Die mittleren pH-Werte der Quellwässer liegen allgemein, einschließlich der flachgründigen km4-Quelle Q6b im Fichteneinzugsgebiet P 8, im neutralen bis schwach basischen Bereich. Nur unter Berücksichtigung einer Extremschüttung (mit hohem Anteil relativ sauren Bodenwassers), die die Ergebnisse der Mittelwertberechnung sehr stark beeinflusste, wurde für Q 6a ein (zu) niedriger Wert von 6,95 (sonst 7,47) bestimmt (vgl. Abb. 6-5). Die pH-Mittelwerte der 10 untersuchten Quellen schwanken damit in einem engen Bereich zwischen 7,2 und 7,69; Lias- und km4-Grundwässer zeigen keine markanten Unterschiede.

Tab. 6-3: Mittelwerte und Extremgehalte der Hauptkomponenten in 3 Lias- und 7 Stubensandstein-Quellwässern, Meßzeitraum 1985 und 1986.

	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻
	[mg/l]								
Lias									
Q 13a	7,41	82,1	11,7	9,48	1,18	7,23	55,84	0,95	280
min max	7,28 7,82	33,2 120	3,06 18,7	2,5 15,4	0,49 1,98	4,95 13,0	22,5 85,1	0,3 4,7	131 366
q 13b	7,20	51,4	5,8	8,54	0,64	4,89	21,1	1,3	170
min max	6,76 7,68	27,1 129	3,2 12,6	2,8 24,1	0,1 1,6	2,43 10,1	16,8 34,3	0,6 10,6	73 366
Q 31	7,38	70,9	5,2	2,02	1,29	4,59	49,8	4,5	195
min max	7,04 7,73	36,0 140	1,1 14,5	1,5 3,7	0,71 6,5	3,41 7,25	21,9 115	0,9 10,6	98 332
km4									
Q 3	7,32	79,2	41,4	6,02	1,76	5,36	12,3	3,2	442
min max	7,02 7,58	34,0 130	21,6 62,5	3,4 10	0,48 5,1	3,75 9,33	9,0 17,3	1,6 4,1	268 519
Q 6a	6,95	20,9	8,9	4,94	1,38	4,47	52,0	3,9	87
min max	6,24 8,05	15,7 80	5,8 49	3,7 26,3	0,5 3,36	2,8 7,1	30,1 63,9	3 8,7	37 488
Q 6a1	7,49	46,9	31,5	8,69	1,96	4,72	31,3	6,2	271
min max	7,14 7,89	22,5 70	15 66	2,4 15,3	0,83 8,8	3,61 5,9	23,9 45,1	2,4 9,2	134 78
Q 6b	7,20	7,0	2,5	2,74	3,88	2,77	21,8	10,7	24
min max	5,98 8,35	2,8 28	1,2 9,5	0,9 6,3	1,43 5,35	1,35 4,09	6,5 26,2	3 16,7	12 110
Q 7a	7,53	94,4	9,0	6,24	0,36	6,53	46,0	7,8	297
min max	7,28 7,77	78,5 128	6,2 15,2	2,5 7,4	0,48 0,68	5,88 7,64	39,9 52,2	6,4 9,2	268 336
Q 38	7,40	71,6	31,5	7,90	0,96	4,08	24,2	3,4	390
min max	7,14 7,61	40,6 89	15,3 41	4,2 10,7	0,3 1,33	2,49 5,17	19,9 34	1,5 4,5	195 461
Q 39	7,69	49,1	33,2	16,10	1,82	5,48	45,1	16,6	346
min max	6,88 8,26	13,0 109	4,6 59,9	2,3 28,2	0,4 6,06	3,05 7,59	27,5 63,1	4,6 52,5	40 537

*: Mittelwertberechnung ohne einmaligen Spitzenabfluß
min|max: minimale und maximale Konzentrationen in Einzelmessungen

Die pH-Einzelwerte variieren entsprechend den unterschiedlichen Anteilen von allgemein saurem Bodenwasser (Kap. 6.1.2) bei N-Q-Ereignissen wesentlich stärker. Auf die unterschiedlichen Möglichkeiten der Q_{on}-Zumischung wurde in Kap. 5.5 eingegangen. Die dort mit Hilfe von Schüttung, Leitfähigkeits- und δ¹⁸O-Werten gefundene und qualitativ beschriebene Quellwasserzusammensetzung spiegelt sich auch in den pH-Einzelwerten, dargestellt an ausgewählten Quellen in Abb. 6-5 und 6-6, wider. Besonders hohe Bodenwasseranteile werden durch Verringerungen des pH-Werts auf 5,98 (flache km4-Quelle Q 6b) und 6,24 (km4-Quelle Q 6a (mit länger anhaltender Q_{on}-Zumischung) erkennbar.

Negative Korrelationen zwischen starken Schüttungserhöhungen und pH-Werten sind nicht nur auf flache Quellen (wo Niederschlagswasser rasch eindringen und mobilisiertes saures Bodenwasser rasch zum Abfluß gelangen kann) beschränkt, sondern können auch bei tieferen Quellen mit Q_{on}-Anteilen (Q_{on}-Zumischung im Bereich des Quellaustritts) vorkommen (Beispiel Q 3 in Abb. 6-6).

Die pH-Werte von Q 7a liegen trotz der saure-

ren Niederschläge im zugehörigen Nadelwald-Einzugsgebiet insgesamt höher als die der Quelle Q 3 im Buchengebiet. Offenbar findet bei Q 7a eine stärkere Pufferung statt (vgl. höhere Ca-Gehalte). Die stark nach unten tendierenden pH-Werte im Sommer 1986 sind auf die starken Niederschläge mit durchgehend erhöhten Schüttungen und Anteilen saureren Bodenwassers zurückzuführen (vgl. auch SO₄-Gehalte von Q 7a, Abb. 6-7).

Aufgrund zahlreicher pH-Messungen konnte, im Gegensatz zu den früheren Untersuchungen (AGSTER, 1983), in verschiedenen Quellen ein deutlich ausgeprägter Jahresgang gefunden werden. Er wird jedoch nicht durch die jahreszeitlichen pH-Schwankungen des NB (besonders bei Buchen) geprägt, sondern durch höhere Anteile saureren Bodenwassers bei hohen Schüttungen. Deshalb sind besonders die flachen Quellen, Beispiel Q 6b (Abb. 6-5), davon betroffen.

Im Grundwasser aus den tieferen km4-Horizonten (Q 3, Q 6a1, Q 38, Q 39) und den Lias-Quellen dominieren die Erdalkalien und Hydrogenkarbonat, wobei höhere Mg-Gehalte im Stubensand-

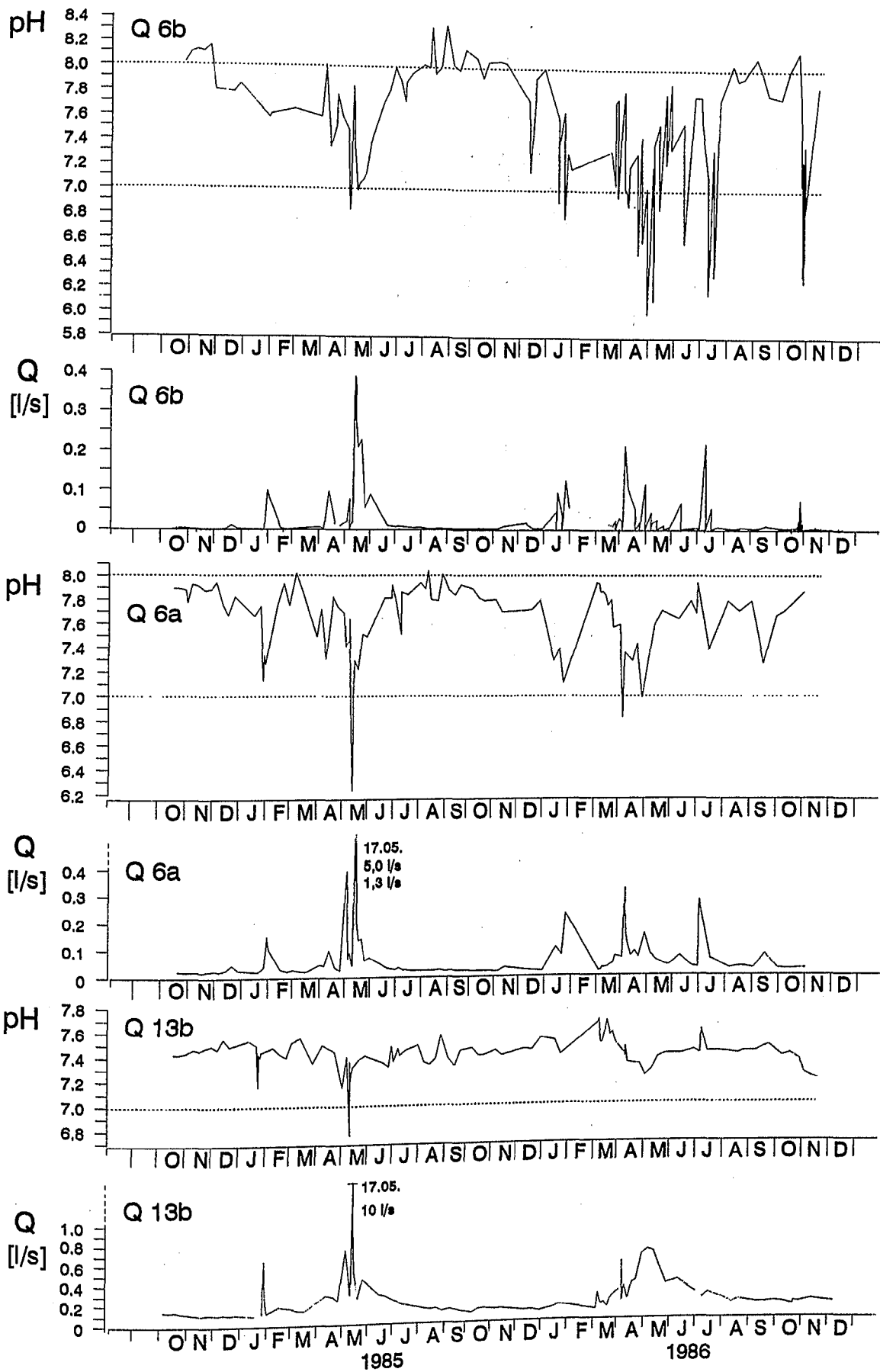


Abb. 6-5: Schwankungen der pH-Werte in der Schüttung der km4-Quellen Q 6b, Q 6a und der Lias-Quelle Q 13b.

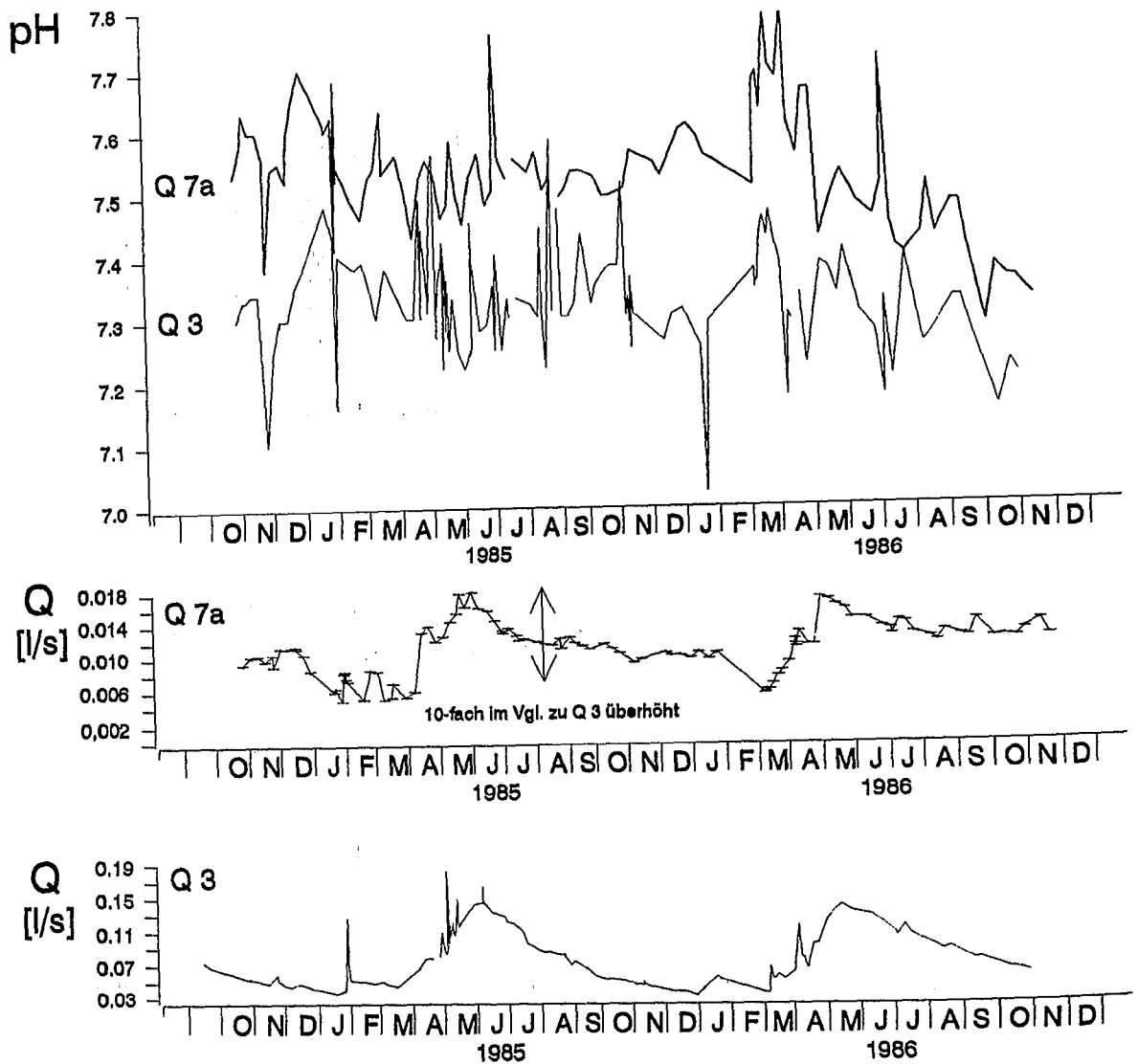


Abb. 6-6: Schwankungen der pH-Werte in der Schüttung der km4-Quellen Q 7a und Q 3.

stein vom dolomitischen Charakter des Bindemittels herrühren (Tab. 6-3). Höhere Sulfatgehalte in Lias-Quellen, bedingt durch den sulfidisch (in Pyrit) gebundenen Schwefel, treten bei den hier untersuchten Quellen nur bei den Extremgehalten deutlich in Erscheinung (Q 13a, Q 31). Die Sulfatgehalte in km4-Grundwässern sind nahezu ausschließlich auf den Eintrag zurückzuführen.

In den oberflächennahen oder stark von Q_{on} beeinflussten km4-Quellen sind die mittleren Ca-, Mg- und HCO_3 -Konzentrationen deutlich geringer (Q 6a, Q 6b und auch Q 13b). Dies ist auf Auslaugungserscheinungen und/oder einen raschen Wasserdurchsatz bzw. eine fehlende Aquiferpassage zurückzuführen.

Wegen der Vorherrschaft der geogenen Inhaltsstoffe besteht bei allen Quellen eine negative Korrelation zwischen Gesamtlösungsinhalt und Schüttung (vgl. Lf-Werte, u.a. Abb. 5-5, 5-6, 5-

7). Besonders bei flachen Quellen mit hohen Bodenwasseranteilen kommt es jedoch teilweise zu Erhöhungen der Sulfat-, Nitrat- und Kalium-Konzentrationen, die in der Bodenlösung, relativ zum Grundwasser, angereichert sind. Dieser Zusammenhang wird am Beispiel der Sulfatkonzentrationen (Einzelwerte) ausgewählter Quellen in Abb. 6-7 dargestellt (vgl. auch Ganglinien der Schüttung sowie der Lf-, $\delta^{18}O$ - und pH-Werte).

Die SO_4 -Gehalte der Quellen mit Fichtenbeständen (Q 7a, Q 6a, Q 6b in Abb. 6-7) und hohen SO_4 -Einträgen liegen deutlich höher als die der Quellen mit Buchenbeständen (Beispiel Q 3). Davon ausgenommen sind die Lias-Quellen, die wegen geogenem Sulfat auch in Buchengebieten höhere SO_4 -Gehalte aufweisen (z.B. Q 13b, Abb. 6-7). Die beiden km4-Quellen Q 3 und Q 7a sind wegen überwiegend Laub- bzw. Nadelwaldbeständen in den Einzugsgebieten und den deshalb

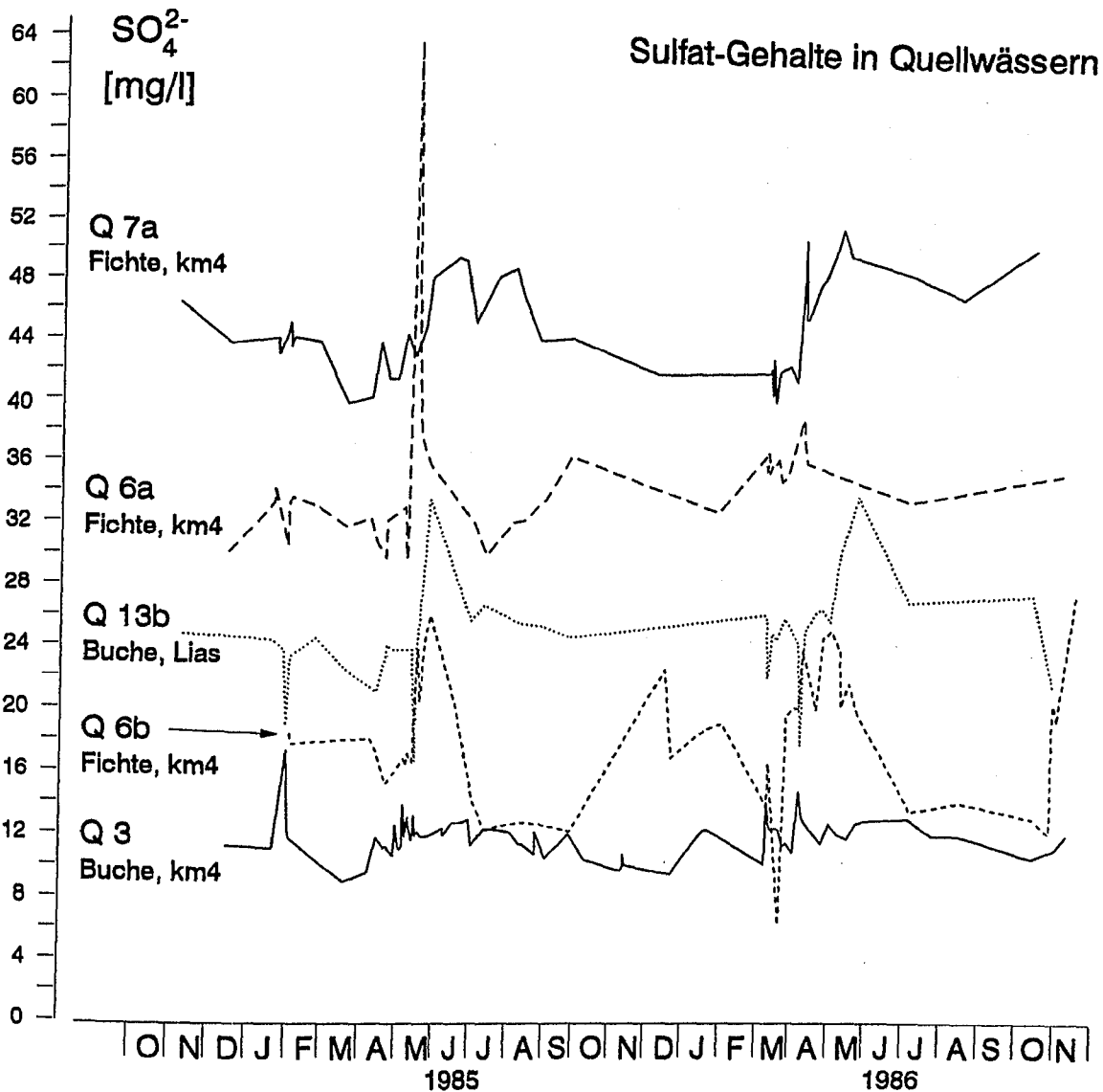


Abb. 6-7: Sulfatgehalte in den Stubensandstein-Quellen Q 3, Q 6a, Q 6b und Q 7a sowie der Lias-Quelle Q 13b.

unterschiedlichen SO_4 -Einträgen besonders gut zu unterscheiden (Abb. 6-7). Die oberflächennähere Quelle Q 7a zeigt im Jahresgang stärkere, aber weniger spontane SO_4 -Variationen. Q 3 dagegen reagiert bei Q_{on} -Zumischungen sehr kurzfristig mit SO_4 -Spitzen. Dieses Verhalten deckt sich mit dem aus anderen Parametern abgeleiteten Vorstellungen der Abflußbildung (Kap. 5-5, 6.1.3). Die SO_4 -Gehalte der stärker Q_{on} beeinflussten Quellen Q 6a, Q 6b und Q 13b schwanken besonders bei Schüttungserhöhungen im Frühjahr stark zu höheren Konzentrationen (vgl. Q-Ganglinien in Abb. 6-5 und 6-6).

Die Nitratgehalte der Quellwässer sind durchweg niedrig und liegen im Mittel meist deutlich unter 10 mg/l. Ein starker Anstieg auf maximal 16,7 mg/l in Q 6b ist auf Q_{on} -Anteile zurückzuführen. Höhere NO_3 -Werte in Q 39 stammen vermutlich von Düngemaßnahmen einer im Einzugsgebiet landwirtschaftlich genutzten Fläche.

Die im Vergleich zur "Buchen-km4-Quelle Q 3" (3,2 mg/l) höheren NO_3 -Gehalte der "Fichten-km4-Quelle" Q 7a (7,8 mg/l) sind wie bei Sulfat auf Eintragsunterschiede zurückzuführen. Noch niedriger liegen die NO_3 -Werte der Quellen Q 13a und Q 13b, die Buchen-Einzugsgebiete haben.

Die Alkaliegehalte in den Grundwässern rühren sowohl aus Einträgen mit dem NB, als auch aus Böden, Deckschichten und dem Aquifer selbst (Mergellagen, Feldspäte) her. Die Na-Gehalte liegen im Vergleich zu den K-Konzentrationen, die durch K-Fixierung (adsorptive Bindung an Tonminerale) und durch die Beteiligung am pflanzlichen Nährstoffkreislauf verringert werden, deutlich höher. Die höchsten mittleren K-Gehalte (3,88 mg/l) und mit die niedrigsten mittleren Na-Gehalte (2,74 mg/l) wurden in Q 6b gemessen. Dies ist auf hohe Bodenwasseranteile bzw. geringe Anteile Na-reicheren, tieferen Grundwassers zurückzuführen. In den übrigen Quellen lagen die

Na-Mittelwerte meist deutlich unter 2 mg/l.

Die mittleren Chloridgehalte schwanken in einem engen Bereich zwischen ca. 4 und 7 mg/l. Der Eintrag erfolgt ausschließlich über den Niederschlag, Anreicherungen finden über Verdunstung statt (vgl. Chlorid-Methode zur Bestimmung der Grundwasserneubildung, SCHULZ, 1972; Kap. 5.4.3).

6.1.3.2 Sulfat- und Nitratgehalte im langjährigen Vergleich

Aus der Meßperiode 1985/86 liegt eine höhere Probennahmedichte mit einer häufigeren Erfassung von Schüttungserhöhungen vor als aus der früheren Meßreihe 1979-82. Mittlere Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe aus beiden Meßperioden können deshalb nicht zur Abschätzung von Entwicklungen herangezogen werden. Proben während spätsommerlich/herbstlicher Niedrigwasserbedingungen, die von aktuellen Niederschlagsereignissen und Zumischungen von Q_{on} unbeeinflusst sind, können jedoch Trends im Lösungsinhalt der Grundwässer, eine Art Grundlast, wiedergeben. Dies soll durch die Konzentrationsentwicklung der in den letzten Jahrzehnten durch Luftverunreinigungen erhöht eingetragenen Sulfat- und Nitratmengen in den hier besprochenen Quellen verdeutlicht werden. Mit den früheren Daten von 1979/80 und 1983 (AGSTER und EINSELE, 1986) und der ergänzenden Probenserie von 1989 (FLEGR und MONN, 1990) liegt eine 10-jährige Meßreihe vor.

Grundsätzlich sind flache Grundwässer wegen des geringeren Flurabstandes und der allgemein kürzeren Verweilzeiten stärker der Wirkung von erhöhten Einträgen ausgesetzt. Dieser Effekt kann jedoch durch bestandestypische Unterschiede überprägt werden. Im Vergleich mit dem tieferen km4-Grundwasser aus Q 3 sind die Nitratgehalte in den flacheren Quellen Q 7a und Q 6b im Niedrigwasserabfluß erhöht (vgl. Abb. A-6-6, Anhang). Ein eindeutiger Trend ist nicht erkennbar. Während in Q 6b und Q 3 eine kontinuierliche NO_3 -Zunahme zu verzeichnen ist, nehmen in den anderen km4-Quellen die Konzentrationen, möglicherweise nur vorübergehend (Q 6a1), ab.

In den flachen Quellen wurden nach deutlicher Zunahme bis 1985/86 wieder niedrigere Sulfat-Konzentrationen gemessen. Die hohen Werte von 1985/86 sind u.a. auf Auswaschungseffekte aus der sulfatreichen Bodenzone im nassen Jahr 1986 zurückzuführen (Abb. 6-7, z.B. Q 7a). Bei den für Q 3 ermittelten hohen mittleren Verweilzeiten aus Tritiumuntersuchungen sind hier erst später Auswirkungen erhöhter Einträge zu erwarten.

6.1.4 Vorfluter

Der Chemismus der Bachwässer wird von geologischen Gegebenheiten, Aquiferpetrographie und Deckschichtenausbildung, verschiedenen Waldbeständen und anthropogenen Belastungen geprägt. Bei Niedrigwasserbedingungen wird der Vorfluterabfluß nur aus dem Grundwasserleiter gespeist. Seine chemische Zusammensetzung entspricht dann, eine einheitliche Aquiferpetrographie vorausgesetzt, etwa der des in Quellen beprobten Grundwassers (Kap. 6.1.3). Abweichungen, z.B. der Ca- und HCO_3 -Konzentrationen, können durch Temperaturänderungen und Verschiebungen im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht stattfinden (Kalksinterbildung bei Quellaustritten, z.B. bei Q 13b, Q 3). Jahreszeitliche Schwankungen sind nur schwach ausgeprägt.

Während Abflußerhöhungen bei Niederschlags- oder Schneeschmelzereignissen sind im Bachwasser (und auch im Quellwasser, Kap. 6.1.3) meist wesentlich deutlichere Änderungen der verschiedenen Inhaltsstoffe durch vorübergehende Zumischungen schnell abfließenden Wassers zu verzeichnen. In der Regel nehmen die geogenen Inhaltsstoffe Ca, Mg, HCO_3 , die den Gesamtlösungsinhalt dominieren, infolge eines zunehmenden Anteils des an diesen Stoffen niedriger mineralisierten Niederschlags bzw. Interflow (Q_{on}), ab. Die Lf-Werte beschreiben einen, besonders zu den HCO_3 -Werten, parallelen Verlauf. In Einzugsgebieten mit Lias- (P 6, P 8, P 5/1) und Gipskeuper(km1)-Anteilen (P 1) und geogenem Sulfat im Grundwasser, sind ähnliche Effekte auch für SO_4 zu erwarten. Dabei kommt es in Nadelwaldgebieten bei Abflußerhöhungen mit hohen Anteilen SO_4 -reichen Bodenwassers zu einer Vermischung des geogenen Sulfats mit dem aus dem atmosphärischen Eintrag stammenden Sulfat. Je nach Anteil der Komponenten und ihren SO_4 -Gehalten kann es z.B. zu unveränderten SO_4 -Gehalten im Gesamtabfluß kommen. Die geogenen SO_4 -Konzentrationen im Lias-Grundwasser sind geringer als in dem vom Gipskeuper beeinflussten Grundwasser. Auch in Laubwaldgebieten, wie dem Lias-Einzugsgebiet von P 6, wo der atmosphärische Eintrag geringer ist, wird die Gesamt- SO_4 -Konzentration von geogenem Sulfat dominiert. Aus Untersuchungen mit Schwefel-Isotopen wurden für reine Lias-Gebiete geogene SO_4 -Anteile zwischen 77 und 85% bestimmt. Im Gebiet von P 1 wird der Gipskeuper angeschnitten (km1-Anteil nur 3,1%) was zu einem SO_4 -Anstieg im Niedrigwasser bis zu maximal 410 mg/l, der höchsten Ca-Konzentration der Meßreihe, führt.

Andere Wasserinhaltsstoffe, die im Bodenwasser gegenüber dem Grundwasser angereichert

sind, können zu Konzentrationserhöhungen im Gesamtabfluß führen, wenn sie bei Niederschlags- oder Schneeschmelzeignissen ausgewaschen werden und über Q_{on} abfließen. Dies kann bei den aus dem atmosphärischen Eintrag stammenden Ionen SO_4^{2-} und NO_3^- , aber auch bei K^+ auftreten.

Im Rahmen des Schönbuchprojektes (EINSELE, 1986) sind im Zeitraum 1979-82 zahlreiche Oberflächengewässer im Schönbuch auf ihre Hauptinhaltsstoffe und deren Herkunft, u.a. für die Berechnungen zum Lösungsaustrag (AGSTER, 1986) untersucht worden.

Die chemischen Untersuchungen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit an 6 Pegelmeßstellen im Zeitraum 1985/86 für die Berechnungen zum Stoffumsatz (Kap. 6.2f.) und für die Untersuchungen der Auswirkungen unterschiedlicher Waldbestände und anthropogener Belastungen auf den Chemismus der Bachwässer (besonders Sulfat und Nitrat) fortgesetzt.

Aus dem Konzentrationsverlauf, insbesondere während Hochwasserereignissen, sollten ferner Rückschlüsse auf die am Abfluß beteiligten Komponenten gezogen werden. Durch die intensive Beprobung der Wässer aus verschiedenen Ebenen des Ökosystems (Niederschläge: NF und NB; Bodenwasser: Sickerwasser und Interflow; Grundwasser; Gesamtabfluß) sollten, neben den Isotopenuntersuchungen, auch chemische Markierungen der am Abfluß beteiligten Komponenten, herausgestellt werden.

Im folgenden (vgl. auch Kap. 6.1.5) wird deshalb weniger auf die von AGSTER (1983) bereits ausführlich diskutierte geogen bestimmte "Basiszusammensetzung" der Bachwässer, sondern mehr auf bestandesabhängige (unterschiedliche atmosphärische Einträge) und besonders auf abflußabhängige (unterschiedliche Beteiligung verschiedener Abflußkomponenten) Veränderungen der Bachwässer eingegangen. Der Konzentrationsverlauf während einzelner Ereignisse wird in Kap. 8.5 diskutiert.

In Tab. 6-4 sind die Konzentrations-Mittelwerte der Hauptinhaltsstoffe in den untersuchten Bachwässern mit ihren Extremwerten während der 2-jährigen Beobachtungszeit zusammengestellt (vgl. auch Halbjahreswerte der mittleren Konzentrationen im Gesamtabfluß von 4 Teilgebieten in Tab. 6-1). Die Mittelwertberechnung der einzelnen Stoffkonzentrationen im Gesamtabfluß erfolgte auf Tagesbasis. Es wurden dabei auf der Grundlage der für jede Pegelmeßstelle aufgestellten Konzentrations-Abfluß-Diagramme und den mittleren Tagesabflußwerten mittlere tägliche Konzentrationen berechnet.

Die mittleren pH-Werte in den Bachwässern

liegen alle im schwach alkalischen Bereich. Sie schwanken zwischen 7,57 (P 17) und 8,0 (P 14). Die Abweichungen während Abflußerhöhungen bleiben trotz der teilweise sehr niedrigen pH-Werte in den Bestandesniederschlägen gering (gute Pufferkapazität von Böden und Grundwasserleiter) und reichen nur bei extremen Hochwässern in Nadelwaldgebieten (P 17 und P 8) an oder knapp unter den Neutralpunkt. In Abb. 6-1 und A-6-1 (Anhang) sind die Jahresganglinien der pH-Werte an den 4 Pegeln der kleineren Teileinzugsgebiete dargestellt. Besonders deutlich sind die Ganglinien der beiden km⁴-Gebiete des Laubwaldgebietes P 14 mit stets höheren und des Nadelwaldgebietes P 17 mit stets niedrigeren pH-Werten (Abb. 6-1) zu unterscheiden.

Auch ohne Berücksichtigung der durch einzelne Abflußspitzen hervorgerufenen negativen Peaks beschreiben die Ganglinien einen etwa sinusförmigen Verlauf mit Minima im Frühjahr in der Zeit der höchsten Gebietsabflüsse. Dieser Jahresgang wird im wesentlichen durch den, besonders im Frühjahr, hohen Anteil von Interflow verursacht, der im Vergleich zum Grundwasser stets saurer ist.

Im Gebiet P 17 ist ein nicht unerheblicher Interflow-Anteil am Gesamtabfluß erkennbar. Darauf weisen folgende Beobachtungen hin:

- 1.) Die pH-Ganglinien von P 14 und P 17 verlaufen zwar prinzipiell parallel, doch weichen sie zu Zeiten höherer Gebietsabflüsse im Frühjahr stärker voneinander ab als in anderen Jahreszeiten. Hier machen sich die im Nadelwaldgebiet P 17 wesentlich saureren Bodenwässer als Interflow-Anteil bemerkbar.
- 2.) Die pH-Werte des km⁴-Grundwassers aus der Quelle Q 7a (Abb. 6-6) sind im Vergleich mit Q 3 (Gebiet P 14) deutlich basischer. Die dennoch im Vergleich zu P 14 niedrigeren pH-Werte an P 17 können nur durch eine starke Q_{on} -Zumischung (mit saurerem Bodenwasser) zustande kommen.
- 3.) Ein im abflußreicheren Jahr 1986 gesteigerter Anteil von stärker versauertem Q_{on} führt zu einem im Vergleich zum Vorjahr (pH-Wert 1985: 7,75) niedrigeren pH-Durchschnittswert von 7,47. Im Gebiet P 14 bleibt der Wert in beiden Jahren gleich.

Die mittleren (mit dem Abfluß gewichteten) Lf-Werte variieren zwischen 270 und 393 $\mu S/cm$ (Tab. 6-4). Die Minima der Einzelmessungen (dargestellt als Lf-Q-Diagramme in Abb. 6-8 und 6-9 für P 14, P 17 und P 1 sowie im Anhang: Abb. A-6-7 für P 6, P 8 und P 5/1) werden während der stärksten Abflußerhöhungen bzw. während der Schneeschmelze als Folge der starken Q_{on} -Zumischung erreicht. Die Leitfähigkeit sinkt bei den einzelnen Pegeln auf sehr niedrige Werte

Tab. 6-4: Mittelwerte und Extremgehalte der Hauptkomponenten im Vorfluterabfluß von 6 Einzugsgebieten im Meßzeitraum 1985 und 1986.

	Nd	pH	Lf	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻
	[%]		µS/cm	[mg/l]							
P 6	11	7,99	374	51,6	8,9	5,38	1,1	5,7	28,7	1,5	182
min		7,07	120	20,9	2,84	0,8	0,5	1,9	19,3	0,2	64
max		8,53	544	107	16,8	11,0	2,2	9,1	44	6,3	335
P 8	67	7,73	280	37,9	13,9	6,1	1,97	3,3	28,5	3,4	148
min		6,89	124	15,2	5,4	1,5	0,9	1,2	16,3	0,6	28
max		8,55	667	82	42,5	23,4	9,8	6,6	47	6,9	403
P 14	19	8,00	393	42,1	27,1	3,0	1,2	3,9	15,6	3,0	242
min		7,13	170	16,0	10,3	0,2	0,5	2,5	6,3	0,5	92
max		8,66	684	91	57,5	6,4	6,9	6,6	24	8,5	445
P 17	80	7,57	280	42,7	6,9	3,82	1,1	4,9	41,8	12,0	113
min		7,04	160	15,5	4,0	0,6	0,6	3,6	33,9	5,2	31
max		8,30	537	126	13,2	6,0	1,8	7,4	53	11,6	244
P 1	60	7,87	333	74,2	20,6	8,8	3,3	6,0	158	4,2	227
min		7,55	207	26,2	6,6	3,1	0,7	2,3	33,1	1,0	76
max		8,58	989	144	39,1	17,2	10,8	8,8	410	8,2	360
P 5/1	50	7,94	270	57,5	14,2	15,4	2,0	15,2	39,6	5,3	223
min		7,68	174	29	4,4	6,2	0,7	3,6	20,6	1,5	98
max		8,67	659	92	31,6	31	10,8	67	69	8,27	360

Nd: Nadelwaldanteil im Einzugsgebiet; min,max: minimale und maximale Konzentrationen in Einzelmessungen

zwischen 120 µS/cm (P 6) und 207 µS/cm (P 1) ab. Die Maxima werden während bzw. am Ende des Sommerhalbjahres erreicht (vgl. dazu jahreszeitlicher Verlauf der Lf-Werte in den Vorflutern in Kap. 7, Abb. 7-6 bis 7-9). Sie erreichen Werte zwischen 537 µS/cm im Gebiet P 17 mit flacherem, niedriger mineralisiertem km4-Grundwasser und 989 µS/cm bei P 1, dem einzigen Gebiet mit Gipskeuperanteil (vgl. maximale SO₄- und Ca-Konzentrationen).

Die geogenen Elemente Calcium, Magnesium und Hydrogenkarbonat dominieren den Lösungsinhalt der Bachwässer. In Gebieten mit Lias- und/oder Gipskeuper-Anteilen (alle Gebiete außer P 14 und P 17) kommt aus der Pyritverwitterung bzw. der Gipslösung geogenes Sulfat hinzu. Die mittleren Ca-Konzentrationen schwanken in einem relativ engen Bereich zwischen ca. 38 und 58 mg/l. Nur bei P 1 werden 74 mg/l erreicht. In den Gebieten, die tiefe km4-Horizonte anschneiden, liegen die Mg-Konzentrationen im Mittel zwischen ca. 14 (P 5/1, P 8) und 27 mg/l (P 14). Die hohen Mg-Gehalte stammen aus der Lösungsverwitterung von dolomitischem Bindemittel im Stubensandstein-Aquifer her, das im flachen km4-Gebiet P 17 (Mg-Gehalt: 6,9 mg/l) bereits weitgehend ausgetragen ist. Ähnlich niedrig wie bei P 17 lie-

gen die Mg-Gehalte bei P 6, dem einzigen km4-freien Gebiet.

Mit steigenden Abflußwerten und zunehmendem Anteil niedriger mineralisiertem Q_{on} nehmen die geogenen Inhaltsstoffe Ca, Mg und HCO₃, parallel zur elektrischen Leitfähigkeit bei allen untersuchten Pegelmeßstellen stark ab (Abb. 6-8, 6-9 und A-6-7 im Anhang). Dieses Verhalten ist auch bei SO₄ in Gebieten mit überwiegend geogenem Sulfat zu beobachten, wie z.B. im Gebiet P 1 (Abb. 6-9) aber auch in anderen Gebieten mit Lias-Anteilen (Abb. A-6-7, Anhang) und im Vergleich zu Q_{on} höheren SO₄-Konzentrationen im Grundwasser (vorwiegend Laubwaldgebiete).

Fehlt dagegen die geogene SO₄-Komponente, wie in den km4-Gebieten P 14 und 17 (Abb. 6-8) vollständig, dann verändern sich die Sulfatgehalte im Bachwasser je nach Anteil und Konzentration des Q_{on} am Gesamtabfluß. Wie aus Abb. 6-8 hervorgeht, können sich während einzelner Abflußerhöhungen die SO₄-Konzentrationen ändern (Gebiet P 14) oder auf ähnlichem Niveau bleiben (P 14 und P 17).

In Gebieten mit überwiegend geogenem Sulfat (z.B. P 6) können sich während Abflußerhöhungen mit einer Zumischung von Sulfat aus dem atmosphärischem Eintrag unter Umständen weniger die absoluten SO₄-Konzentration als die Zusam-

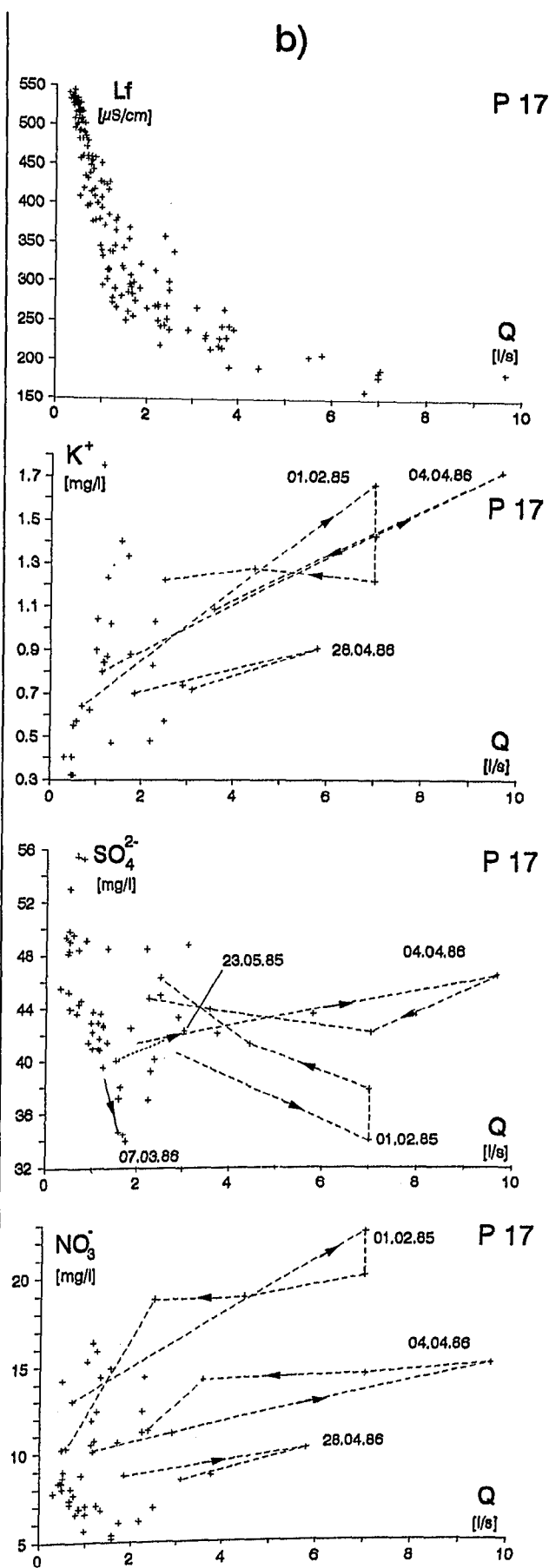
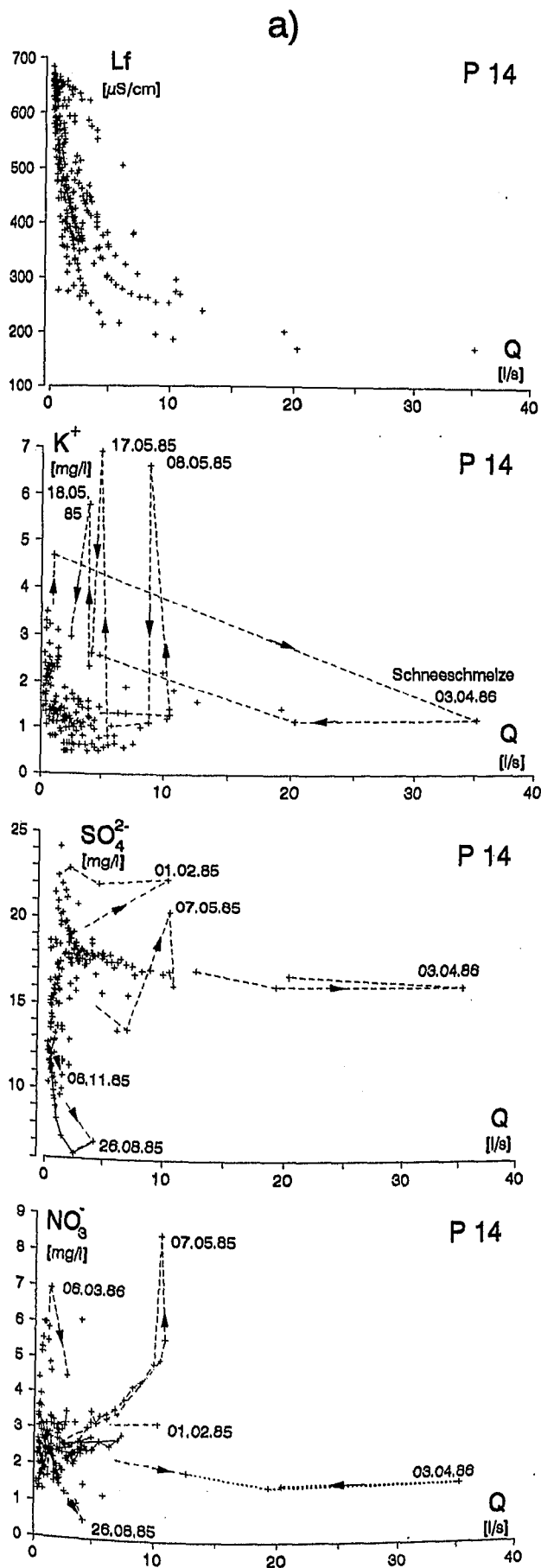


Abb. 6-8: Konzentrationen gelöster Inhaltsstoffe (Lf , K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^-) im Bachwasser in Abhängigkeit von den Abflußmengen in den Stubensandstein-Gebieten a) Denzenberg (P 14, überwiegend Laubwald) und b) Obere Lange Klinge (P 17, Nadelwald).

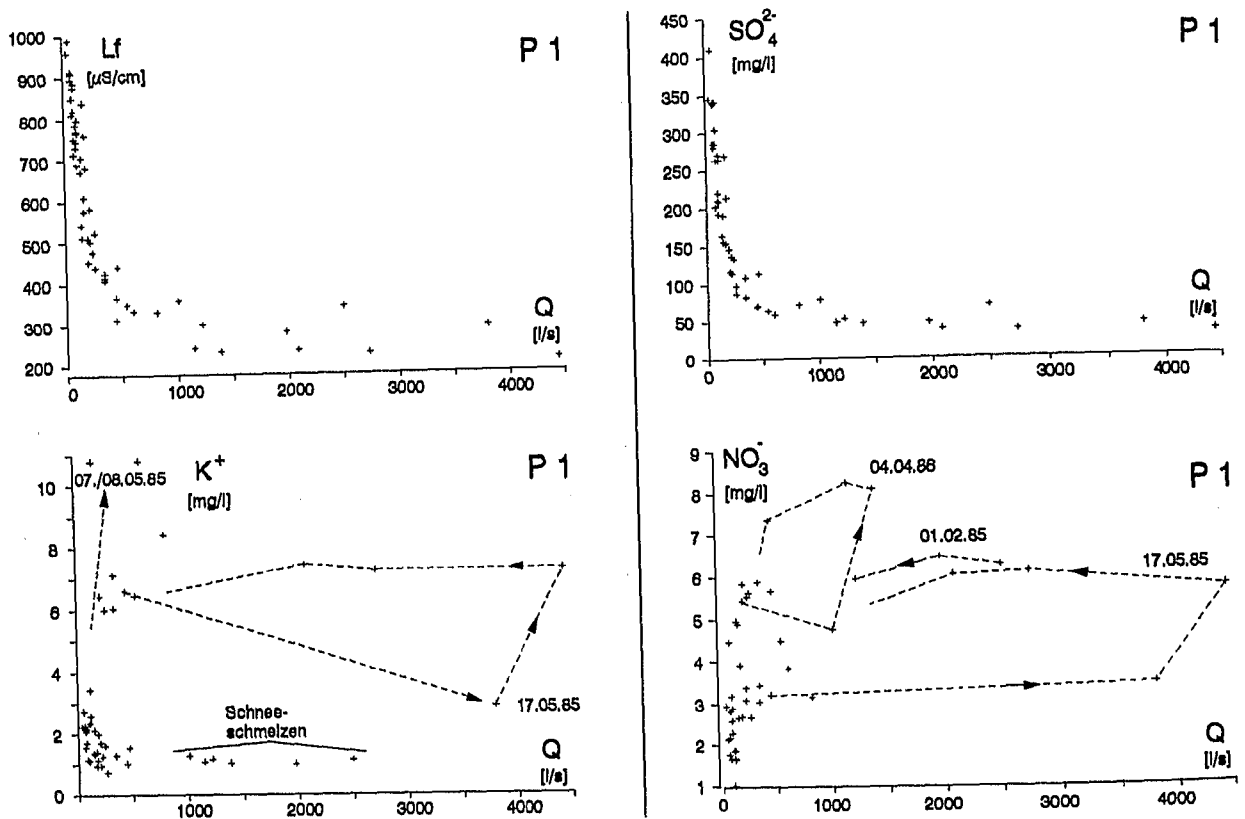


Abb. 6-9: Konzentrationen gelöster Inhaltsstoffe (Lf , K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^-) im Bachwasser in Abhängigkeit von den Abflusssmengen im übergreifenden Einzugsgebiet Großersbach (P 1, km1 - Lias, Mischwald).

mensetzung des aus 2 verschiedenen Quellen stammenden Sulfats im Gesamtabfluß ändern. Dieses Verhalten liegt vermutlich im Gebiet P 6, während der sehr starken Abflußerhöhung um den 17.05.1985, vor (Abb. A-6-7, Anhang).

Die mittleren Sulfat-Konzentrationen in den Bachwässern sind nach den geologischen Verhältnissen und der Baumartenzusammensetzung zu unterscheiden. Bei P 14, an dem der Abfluß aus einem km4-Laubwaldgebiet (kein geogenes Sulfat, geringere Konzentrationen im NB) erfaßt wird, wurden die niedrigsten SO_4 -Gehalte, im Mittel 15,6 mg/l, gemessen. Die höheren NB-Konzentrationen im km4-Nadelwaldgebiet P 17 ließen die mittleren SO_4 -Gehalte auf 41,8 mg/l ansteigen (Tab. 6-4, Abb. 6-8). Bachwässer aus Einzugsgebieten mit geogenem Sulfat und gemischten Waldbeständen weisen mittlere SO_4 -Konzentrationen zwischen 28,7 und 39,6 mg/l auf. Im Einzugsgebiet von P 1, in dem auch der Gipskeuper angeschnitten wird, erreichen die mittleren SO_4 -Konzentrationen 158 mg/l. In diesem Gebiet wurde auch die größte Schwankungsbreite (33 - 410 mg/l) gemessen (bei Niedrigwasser wird der Gipskeuper-Einfluß deutlicher). In Gebieten mit geogenem Sulfat werden die mini-

malen SO_4 -Gehalte bei Hochwasserereignissen erreicht. Sie nähern sich mit wachsendem Anteil von Q_{on} der Konzentration dieser, in der Regel sulfatärmeren, Abflußkomponente. In Gebieten ohne geogenes Sulfat steigen die SO_4 -Gehalte bei Abflußerhöhungen als Folge des dort, im Vergleich zum Grundwasser, sulfatreichereren Interflow häufig an. Nur bei einem raschen direkten Abfließen des NB (vgl. N-Q-Ereignisse im August und November 1985, Abb. 6-8, P 14) oder bei Schneeschmelzen mit relativ SO_4 -ärmeren, aber hohen Q_{on} -Anteilen (P 17, Abb. 6-8, Ereignisse vom 01.02.1985 und 07.03.1986) verringern sich die SO_4 -Gehalte in Richtung NB. Bei P 14 wurden minimal 6,3 mg/l registriert (vgl. auch Abb. 6-10).

Auch die Nitratkonzentrationen der Bachwässer liegen in Nadelwaldgebieten allgemein höher als in Laubwaldgebieten. Die Mittelwerte der 2-jährigen Beobachtungszeit bewegen sich zwischen 1,5 und 3,4 mg/l in den Laubwaldgebieten P 6 und P 14 bzw. zwischen 3,4 und maximal 12 mg/l (P 17) in den Mischwald- und ausgesprochenen Nadelwaldgebieten (Tab 6-4). In Abb. 6-8 sind die NO_3^- -Konzentrationen in Abhängigkeit zu den Abflusssmengen für die beiden km4-Vergleichsgebiete

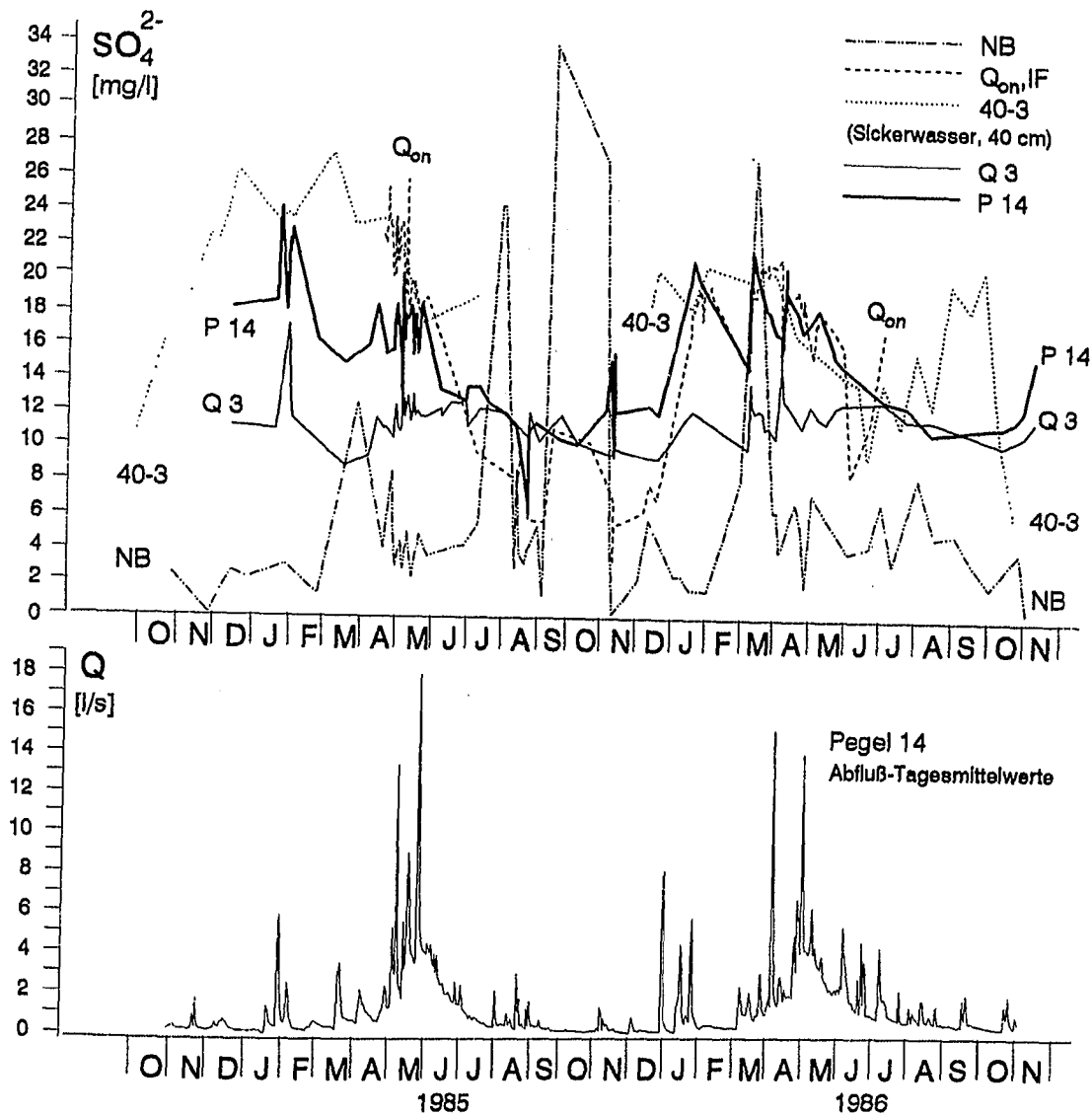


Abb. 6-10: Sulfat-Konzentrationen (Einzelmessungen) im Bestandesniederschlag, Interflow (Q_{on}), Quellwasser (Q 3) und Gesamtabfluß (P 14) im Einzugsgebiet Denzenberg während der hydrologischen Jahre 1985 und 1986.

P 14 und P 17 dargestellt. Neben den absolut höheren NO_3 -Gehalten bei P 17 wird die Konzentrationsentwicklung während einzelner Ereignisse hervorgehoben. Die NO_3 -Gehalte verändern sich (wie bei SO_4) während Abflußerhöhungen in Abhängigkeit von Anteil und Konzentration der Q_{on} -Komponenten (vgl. auch NO_3 -Ganglinien von NB, Q_{on} und Q_t am Beispiel von P 14 in Abb. 6-11). Bei diesem nicht geogenen Inhaltsstoff werden auch bei anderen Pegelmessstellen in der Regel Konzentrationserhöhungen im Gesamtabfluß während Hochwassersituationen registriert.

In Abb. 6-10 und 6-11 sind die zweijährigen Ganglinien der SO_4 - und NO_3 -Konzentrationen von Bestandesniederschlag (NB), Interflow (Q_{on}), Quellwasser (Q 3) und Gesamtabfluß (P 14) exemplarisch für das Gebiet Denzenberg dargestellt. Die Konzentrations-Ganglinien der Bach- und

Quellwässer verlaufen, ähnlich wie die pH-Werte (dargestellt in Abb. 6-1, Kap. 6.1.1), etwa sinusförmig. Bei NO_3 liegt ein relativ enger Schwankungsbereich vor. Stärkere, nur sehr kurzfristige Abweichungen treten während Abflußerhöhungen auf. Der Jahresgang mit höheren Werten im Frühjahr und niedrigeren im Spätherbst stimmt mit den Schwankungen der Gesamtabflußhöhe im Vorfluter überein. Die hohen Werte im Frühjahr sind auf einen hohen Q_{on} -Anteil (mit zu dieser Zeit höheren SO_4 - und NO_3 -Gehalten) zurückzuführen.

Der Konzentrationsanstieg von SO_4 und NO_3 während der Frühjahrsmonate ist primär auf die während der Wintermonate erhöhten NO_3 - und SO_4 -Gehalte in den Niederschlägen zurückzuführen (Heizperiode und spezielle klimatische Bedingungen, z.B. Nebel, Inversionswetterlagen). Dadurch werden die Konzentrationen dieser Inhalts-

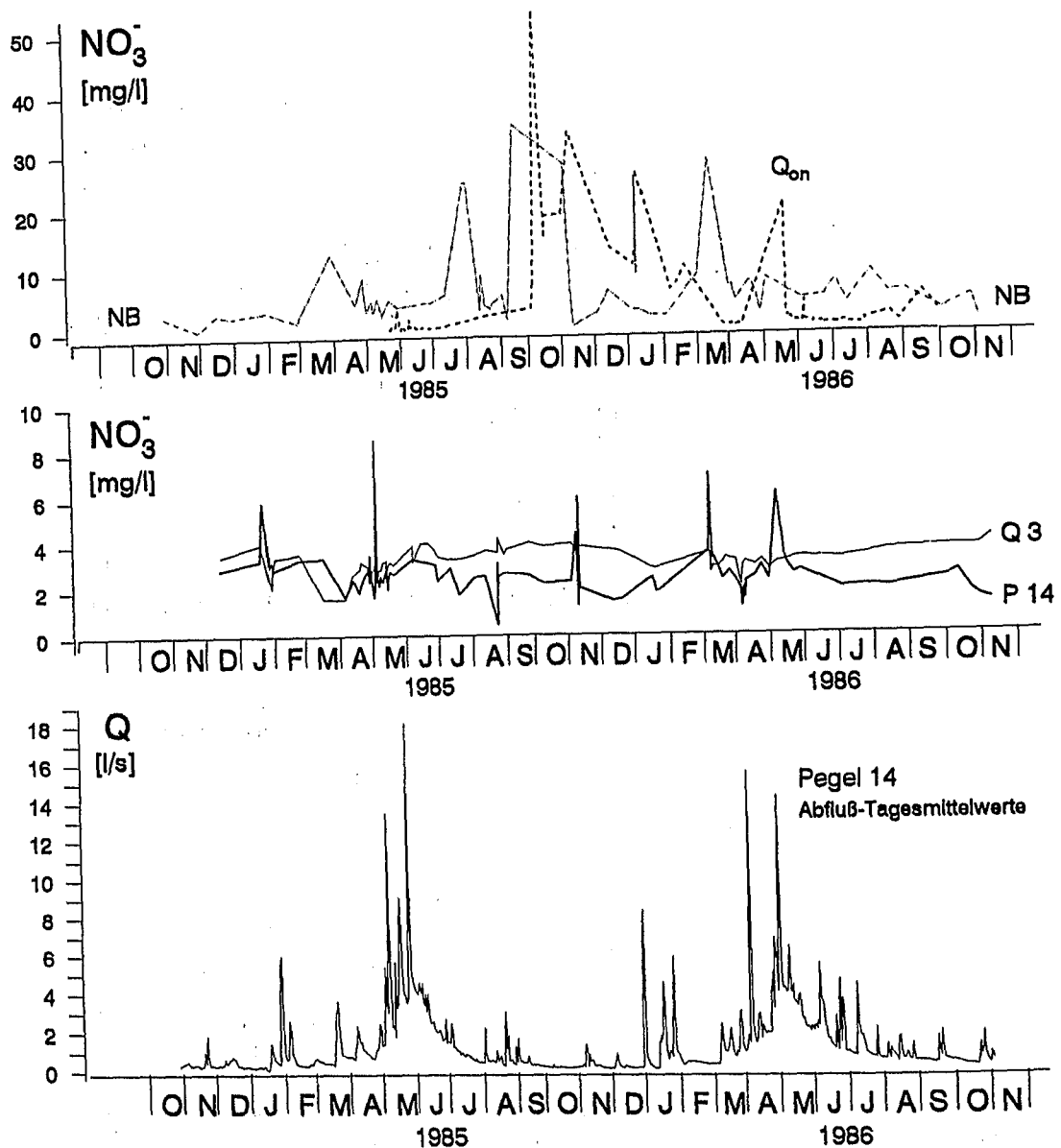


Abb. 6-11: Nitrat-Konzentrationen (Einzelmessungen) im Bestandesniederschlag, Interflow (Q_{on}), Quellwasser (Q3) und Gesamtabfluß (P14) im Einzugsgebiet Denzenberg während der hydrologischen Jahre 1985 und 1986.

stoffe im Bodenwasser erhöht, das als Q_{on} im wesentlichen nur während der Winter- und Frühjahrsmonate rasch zum Vorfluter gelangt. In den Sommer- und Herbstmonaten gleichen sich bei fehlendem Q_{on} -Einfluß die SO_4 -Konzentrationen im Quell- und Vorfluterwasser einander an. Die Mineralisierung von organischer Substanz stellt indirekt eine zweite Quelle für die Konzentrationserhöhungen dar, wie für Nitrat nachgewiesen werden konnte (FLEGR et al. 1989).

Der in der warmtrockenen Jahreszeit (Spätsommer/Herbst) angehäuften NO_3 -Stickstoff (vgl. auch Halbjahres-Konzentrationen im Sickerwasser, z.B. Abb. 6-2) wurde dabei erst in Zeiten der Wiederbefeuchtung der Böden ab Dezember, während einer Periode geringen Pflanzenbedarfs

und zunehmendem Auftreten von Interflow, ausgewaschen. Aufgrund der zu dieser Jahreszeit durchschnittlichen Verweilzeit des als Interflow abfließenden Bodenwassers von 2 - 3 Monaten und der durch starke Niederschläge oder Schneeschmelzen ausgelösten Interflow-Aktivität wurden die höchsten NO_3 -Konzentrationen im Frühjahr erreicht. Danach nahmen die NO_3 -Konzentrationen im Vorfluter wieder ab, was auf das Nachlassen des Q_{on} und den zunehmendem Pflanzenbedarf zurückzuführen ist.

In der Regel sind die K-Konzentrationen im Bodenwasser höher als im Gesamtabfluß der Bachwässer. Dies führt, besonders bei starken Abflüßerhöhungen mit Interflow (z.B. im Mai 1985), teilweise zu einem Anstieg der K-Gehalte

im Bachwasser bis maximal 10,8 mg/l (P 1, P 5/1). Die Minima schwanken zwischen 0,5 und 0,9 mg/l. Dieser Auswaschungseffekt des in den vorausgegangenen Wintermonaten gespeicherten K-Vorrats konnte bei allen Pegelmeßstellen beobachtet werden (Abb. 6-8, 6-9, A-6-7). Daneben sind auch negative K-Konzentrations-Korrelationen bei kleineren Abflußsteigerungen mit geringeren Q_{on} -Anteilen oder bei Schneeschmelz-Ereignissen und teilweise noch gefrorenem Oberboden oder bereits erfolgter Auswaschung, zu erkennen.

Die mittleren K-Gehalte der 6 untersuchten Bachwässer schwanken zwischen 1,1 und 3,3 mg/l. Die im NB der Buchen niedrigeren Konzentrationen zeigen sich auch in den mittleren Konzentrationen der Vorfluter (P 6 und P 14 mit 1,1 und 1,2 mg/l). Der Gesamtabfluß aus den Gebieten mit Fichtenbeständen weist dagegen mit Werten zwischen ca. 2 mg/l (P 8) und 3,3 mg/l (P 1) höhere K-Konzentrationen auf. Eine Ausnahme bildet das reine Nadelwald-Gebiet P 17, wo die K-Gehalte mit 1,1 mg/l deutlich niedriger liegen. Hier geht der höhere K-Eintrag offenbar weitgehend in den Pflanzenbedarf ein (vgl. Kap. 6.2).

Die mittleren Na-Konzentrationen in den Bachwässern schwanken zwischen 3,0 und 8,8 mg/l. Deutlich höher, infolge einer anthropogenen Beeinflussung durch den Einsatz von Streusalz auf einer das Einzugsgebiet querenden Bundesstraße, liegt der mittlere Na-Gehalt im Einzugsgebiet P 5/1 (15,4 mg/l). Als Na-Quelle sind neben dem Eintrag über den Niederschlag, Lösungen aus tonigen Verwitterungsböden, Deckschichten und aus dem Aquifer (mergelige Lagen, Feldspäte) zu nennen. Auch infolge von möglichen Ionenaustauschvorgängen mit Na-Anreicherungen schwanken die Na-Konzentrationen stark. Bei Abflußerhöhungen treten durch Zumischung von Q_{on} Verdünnungseffekte auf, die die Konzentrationen bis zu 0,2 mg/l (P 14) reduzieren.

Chlorid wird ausschließlich durch den Niederschlag (mit Ausnahme der Streusalzeinwirkung) eingetragen. Anreicherungen finden über Verdunstung statt (vgl. Chlorid-Methode zur Bestimmung der Grundwasserneubildung, SCHULZ, 1972; Kap. 5.4.3).

Die mittleren Cl-Gehalte variieren in einem relativ engen Bereich zwischen 3,3 und 6,0 mg/l. Die Schwankungsbreite der Einzelwerte ist bei den verschiedenen Meßstellen ähnlich und reicht von 1,2 mg/l bis 9,1 mg/l. Eine Ausnahme mit höheren Cl-Gehalten durch Salzstreuung bildet wieder der Kirnbach bei P 5/1. Bei P 17 ist infolge geringerer Abflußerhöhungen und deshalb weniger wirksamen Verdünnungseffekten, eine kleinere Schwankungsbreite beobachtet worden. Längerfristig gespeicherte Bodenwässer weisen

z.T. höhere Cl-Gehalte auf als Grund- und Bachwässer (vgl. "Konzentrationsprofile", Abb. 6-12 in Kap. 6.1.5). Kurzfristige Mobilisierungen dieser Wässer können Cl-Verdünnungen im Gesamtabfluß entgegenwirken.

6.1.5 Übersicht der mittleren Konzentrationen in Wässern aus verschiedenen Kompartimenten

Im folgenden werden mittlere Konzentrationen der Wässer aus verschiedenen Meßebenen der 4 Testflächen sowie der zugehörigen Grund- und Vorfluterwässer für die 2-jährige Beobachtungszeit zusammenfassend dargestellt (Abb. 6-12 a - e). Die genauen Konzentrationswerte sind den vorangegangenen Abschnitten (6.1.1 - 6.1.4) zu entnehmen.

Die unterschiedliche chemische Charakterisierung der am Gesamtabfluß beteiligten Abflußkomponenten weist auf die Zusammensetzung des Gesamtabflusses bzw. auf die Abflußanteile verschiedener Komponenten hin.

Die mittleren Leitfähigkeitswerte (Abb. 6-12a) nehmen in der Regel mit zunehmender Fließstrecke in der Reihenfolge NF, NB, Sickerwasser und Grundwasser zu. Der Interflow im Gebiet Denzenberg ist ähnlich hoch mineralisiert wie das flache Sickerwasser. Sickerwässer mit längerer Verweilzeit (vgl. Kap. 7, Tab. 7-1), z.B. im Gebiet Schlagbaumlinde, weisen höhere Lf-Werte auf. Die Gesamtmineralisation in den aus verschiedenen Komponenten zusammengesetzten Vorfluter-Wässern liegt im allgemeinen unter dem längerfristigen Grundwasser. Nur die flachen Quellen im Gebiet P 8 (Q 6a, Q 6b/b1) haben als Folge von häufig zugemischtem Interflow niedrigere Lf-Werte.

Die mittleren pH-Werte (Abb. 6-12a) im NF der 4 Vergleichsgebiete schwanken im 2-jährigen Mittel in einem sehr engen Bereich zwischen 4,65 und 4,72. Im NB (Kronentraufe und Stammablauf) sinken die pH-Werte bei den Fichtenbeständen deutlich ab. Unter Buche dagegen steigen sie in der Kronentraufe leicht an, nur im Stammablauf-Wasser (das ca. 2 - 5% der NB-Menge ausmacht) sind sie erheblich abgesenkt. Aus den "pH-Wert-Profilen" ist abzulesen, daß die Sickerwässer nie saurer als die entsprechenden Kronentraufen sind. Unter Fichtenbeständen liegen sie niedriger als unter Buchenbeständen. Im allgemeinen nehmen die pH-Werte in den Sickerwässern der verschiedenen Bodenprofile von oben nach unten zu. Die mittleren pH-Werte des durchgängig erfaßten Interflow im Gebiet Denzenberg sind dem Sickerwasser (Profil 1, 40 und

60 cm sowie Profil 2, 60 cm) sehr ähnliche. Sporadisch entnommene Proben aus anderen Gebieten waren alkalischer. Die mittleren pH-Werte der Quell- und Vorfluterwässer liegen in der Regel über dem Neutralpunkt. Nur die stark von Interflow beeinflussten Quellen im Gebiet Schlagbaumlinde/Kleiner Goldersbach (vgl. auch Lf-Werte) zeigen im Mittel leicht saure pH-Werte.

Die Calcium-Konzentrationen (Abb. 6-12b) verhalten sich ähnlich wie die Werte der elektrischen Leitfähigkeit. Unter Fichte wurden in den Niederschlags- und Bodenwässern deutlich höhere Konzentrationen gemessen. Nicht mehr durch erhöhte Einträge, sondern geologisch bedingt liegen die Ca-Gehalte im Grundwasser und den Vorflutern wesentlich höher. Die Ca-Konzentrationen im Interflow entsprechen etwa dem flachen Sickerwasser. Nur im Gebiet Bärloch liegen sie höher (vgl. auch Lf- und pH-Werte).

Die Magnesium-Gehalte (Abb. 6-12b) im NB sind gegenüber dem NF um das ca. 3- bis 5-fache angereichert. In den Sickerwässern der Fichtentestfläche Schlagbaumlinde (S 1) werden im Vergleich zur Buchentestfläche Bärloch (S 2) deutlich höhere und mit zunehmender Tiefe ansteigende Mg-Konzentrationen gemessen. Anreicherungen sind auf längere Verweilzeiten (Bodenwasser im Gebiet Schlagbaumlinde, Profil 1 und 2) und pedogene Unterschiede, weniger auf unterschiedliche Einträge (Kap. 6.2) zurückzuführen. In den Vergleichsgebieten auf Stubensandstein (S 3 und S 4) sind keine wesentlichen Unterschiede erkennbar.

Die mittleren Natrium-Konzentrationen (Abb. 6-12c) im Niederschlagswasser steigen bei der Kronenraumpassage nur in Fichtenbeständen an. In den Sickerwässern werden höhere Na-Gehalte gemessen, die mit zunehmender Tiefe und längerer Verweildauer weiter ansteigen. Die höchsten Werte liegen aus dem Gebiet Schlagbaumlinde vor, wo mit durchschnittlich 20,2 mg/l (Profil 1: 90 cm, MVZ > 3a, vgl. Kap. 7, Tab. 7-1) der Maximalwert bestimmt wurde. Im Interflow liegen die Werte im Bereich der flacheren Sickerwässer (Denzenberg, Bärloch) oder der Sickerwässer mit geringerer Verweilzeit (Schlagbaumlinde, Profil 3: 75 cm, MVZ ca. 1 a).

Mit die höchsten Anreicherungsfaktoren weisen die Kalium-Konzentrationen (Abb. 6-12c) im Niederschlag nach der Passage des Kronenraums auf. Im NB der Fichtenbestände werden bis zu 15-fach erhöhte Gehalte gemessen. Beeinflusst durch die hohen Konzentrationen der Kronentraufe wurden in den flacheren Sickerwässern häufig höhere Konzentrationen ermittelt als im tieferen Bodenwasser. Diese im Vergleich zu den anderen Hauptionen gegenläufige Tendenz ist besonders gut im Gebiet Obere Lange Klinge zu erkennen.

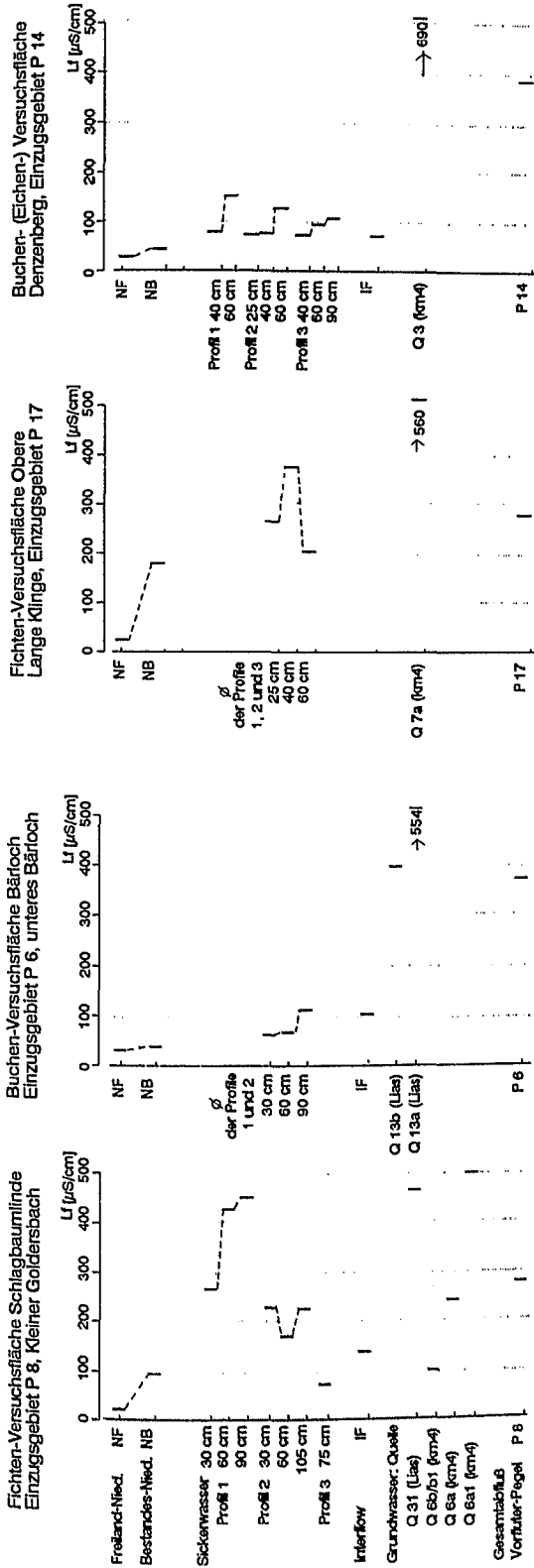
Bemerkenswert höhere K-Konzentrationen wurden im Sickerwasser des sorptionsschwachen Sandbodens auf der Tesfläche S 2 (Schlagbaumlinde) registriert. Im Interflow tendieren die K-Werte wegen der allgemein geringeren Verweilzeit in Richtung NB (z.B. Denzenberg, Bärloch).

Die Chlorid-Konzentrationen (Abb. 6-12d) reichen sich vom NF über den NB zu den Sickerwässern an. Die Quellwässer liegen im Bereich der Sickerwässer, die Bachwässer dagegen etwas niedriger. Die Cl-Gehalte im Interflow bewegen sich um die Werte des NB.

Die Sulfat-Konzentrationen (Abb. 6-12e) im Niederschlag werden bei der Kronenraumpassage, bei Fichten stärker als bei Buchenbeständen, angereichert. Im Bodenwasser der Fichtenflächen sind die SO_4 -Gehalte im Vergleich zu den Buchenflächen sehr stark erhöht, wobei in den Sandböden des Gebietes Schlagbaumlinde (Profile 2 und 3) niedrigere und nach unten abnehmende (Profil 2) Werte registriert wurden. Die im tonreichen, sehr schlecht durchlässigen Profil 1 der Fläche Schlagbaumlinde gemessenen Konzentrationen übersteigen die des Quell- und Bachwassers um ein mehrfaches. Die SO_4 -Gehalte im Interflow liegen ähnlich hoch wie im flachen bzw. kurzfristigen Sickerwasser. Im Vergleich der km⁴-Gebiete P 17 und P 14 paust sich der Bestandesunterschied in den SO_4 -Gehalten des Bach- und Vorfluterwasser durch. Bei den Vergleichsgebieten P 8 und P 6 werden diese Unterschiede durch geogene SO_4 -Anteile im Gebiet P 6 verwischt.

Ausgehend von wenig unterschiedlichen Nitrat-Konzentrationen (Abb. 6-12e) im NF (zwischen 2,4 und 2,8 mg/l) steigen die NO_3 -Gehalte unter Fichte stärker als unter Buche an. Im Sickerwasser der Fichtenflächen wurden extrem hohe mittlere NO_3 -Gehalte bis 140 mg/l (S 3, 40 cm) bestimmt. Unter Buchen bewegen sich die NO_3 -Konzentrationen im Sickerwasser dagegen im Bereich oder unter den Gehalten des NB. Die NO_3 -Gehalte im Interflow variieren im Gebiet Denzenberg zwischen den Werten des flachen Sickerwassers und des NB; im Gebiet P 8 geben sie eher die Konzentration des NB wieder. In Fichten-Einzugsgebieten sind die Konzentrationen in Quellen und Vorflutern niedriger als im Sickerwasser. Die allgemein deutlich geringeren NO_3 -Gehalte in Buchengebieten (vgl. Maßstabsänderung, Abb. 6-12d) werden auch von den Quell- und Bachwässern wiedergegeben. Die Ammonium-Konzentrationen (Abb. 6-12d) erhöhen sich bei der Kronenraumpassage in Fichtenbeständen (in S 3 mehr als in S 1) stärker als in Buchenbeständen. In den Sicker-, Quell- und Bachwässern konnte NH_4 im allgemeinen nicht oder mit nur minimalen Gehalten nachgewiesen werden.

Elektrische Leitfähigkeit



pH-Werte

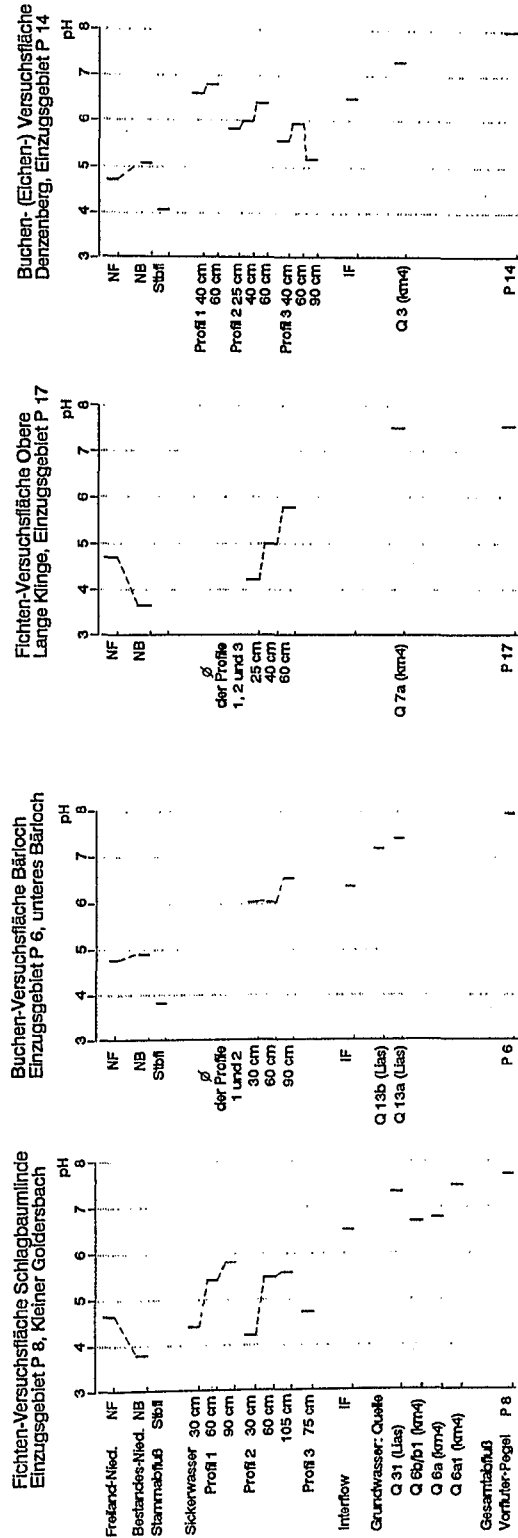
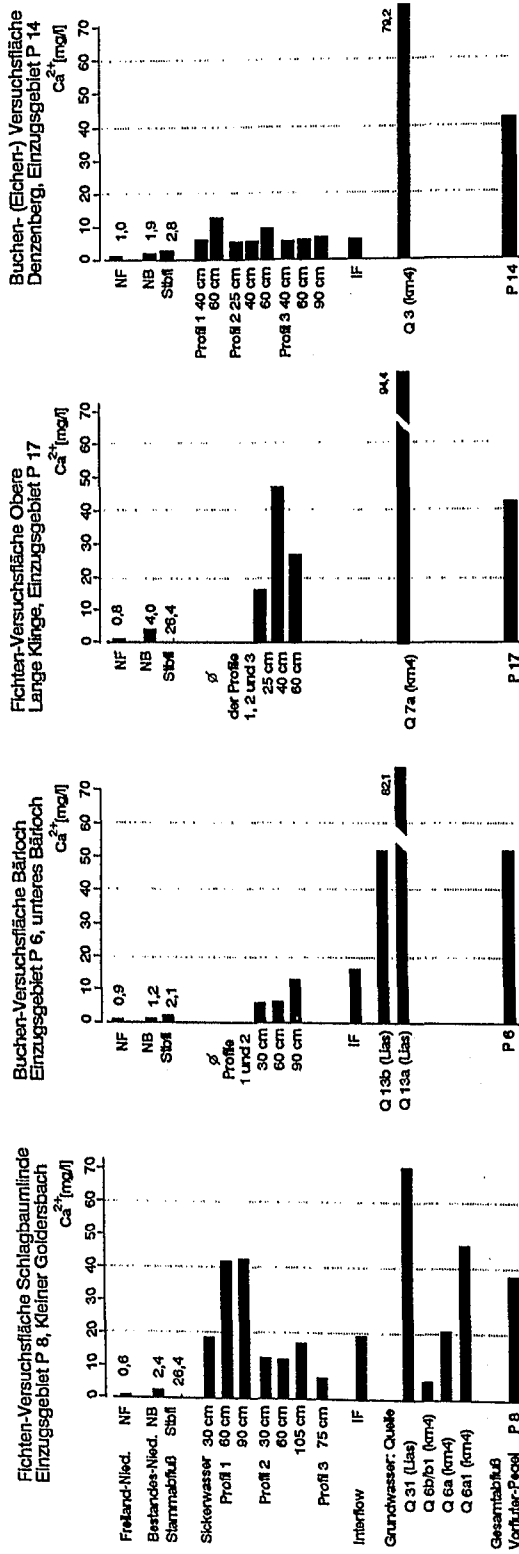


Abb. 6-12: a) Leitfähigkeit und pH.

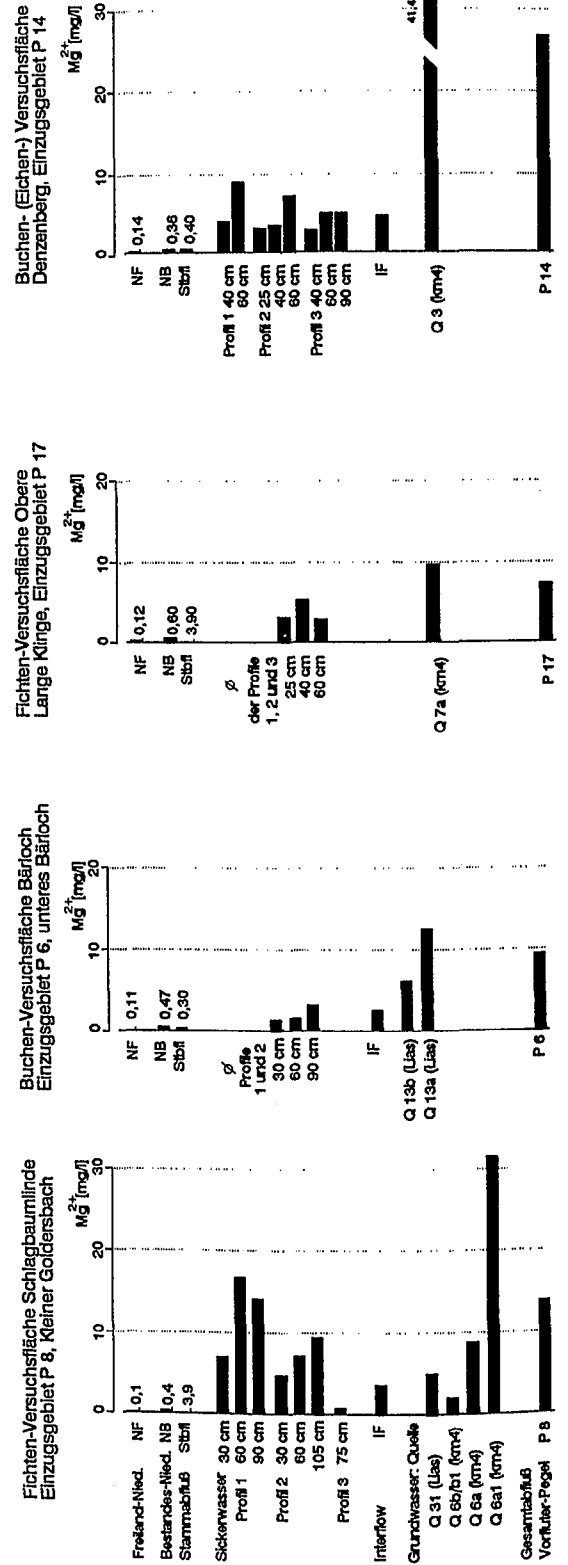
Abb. 6-12 (a - e): Mittlere Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe in den Wasserproben aus verschiedenen Meßebenen von 4 Einzugsgebieten; a) Leitfähigkeit und pH, b) Calcium und Magnesium, c) Natrium und Kalium, d) Sulfat und Nitrat, e) Chlorid und Ammonium. Ergebnisse der Fichten- und Buchen-Versuchsflächen mit zugeordneten Quellen und Vorfluter. Konzentrationen im Vorfluter basieren auf den Fracht-Abfluß-Berechnungen (vgl. Kap.6.1.4), sonst gewichtete Mittelwerte. Stammabfluß-Daten nach BÜCKING et al. (1986). (Dargestellt nur für Buche, da bei Fichte nur 1% der NF-Höhe, BÜCKING und KREBS, 1986).

Calcium-Konzentrationen



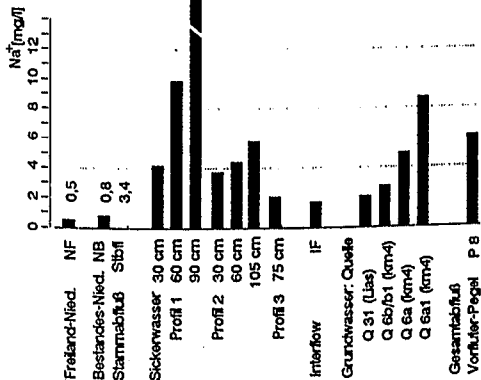
Fortsetzung Abb. 6-12: b) Calcium und Magnesium.

Magnesium-Konzentrationen

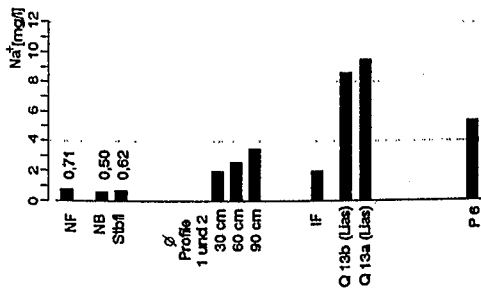


Natrium-Konzentrationen

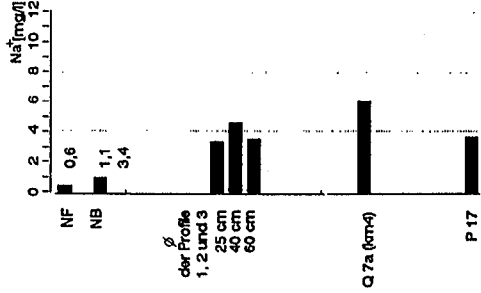
Fichten-Versuchsstfläche Schlagbaumlinde
Einzugsgebiet P 8, Kleiner Goldersbach



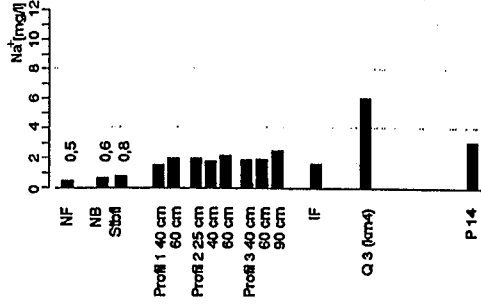
Buchen-Versuchsstfläche Bärloch
Einzugsgebiet P 6, unteres Bärloch



Fichten-Versuchsstfläche Obere
Lange Klinge, Einzugsgebiet P 17

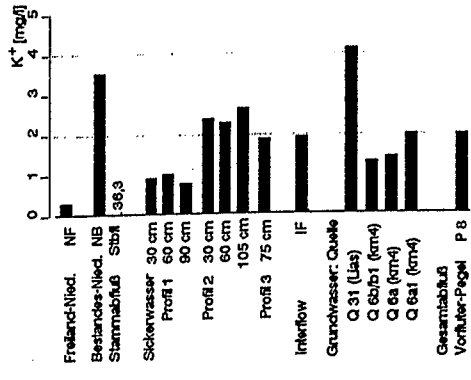


Buchen- (Eichen-) Versuchsstfläche
Denzenberg, Einzugsgebiet P 14

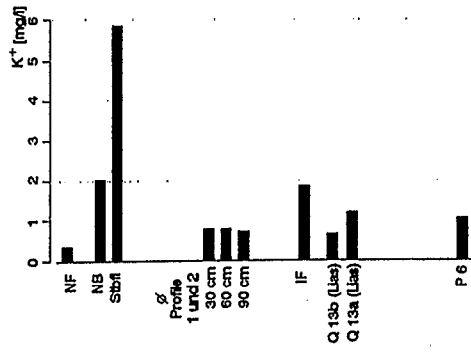


Kalium-Konzentrationen

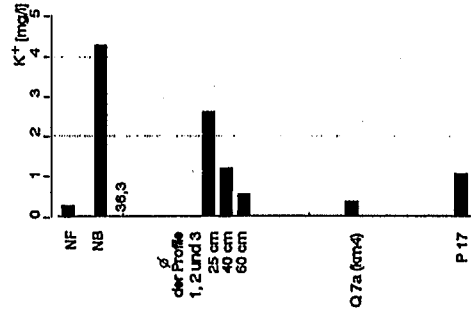
Fichten-Versuchsstfläche Schlagbaumlinde
Einzugsgebiet P 8, Kleiner Goldersbach



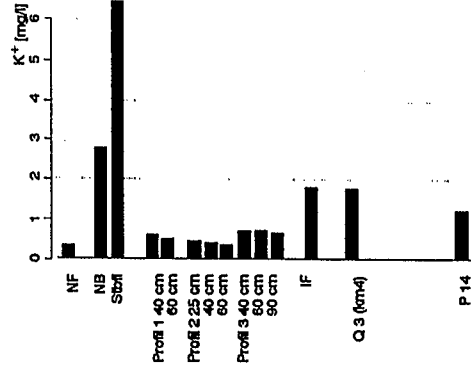
Buchen-Versuchsstfläche Bärloch
Einzugsgebiet P 6, unteres Bärloch



Fichten-Versuchsstfläche Obere
Lange Klinge, Einzugsgebiet P 17

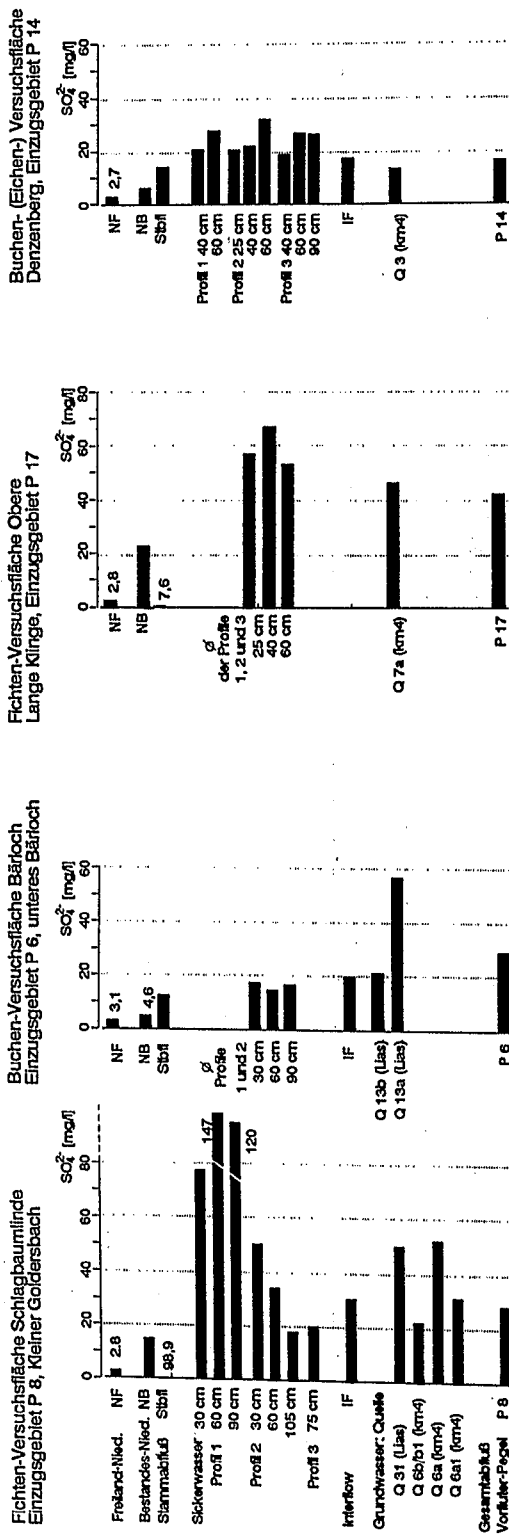


Buchen- (Eichen-) Versuchsstfläche
Denzenberg, Einzugsgebiet P 14

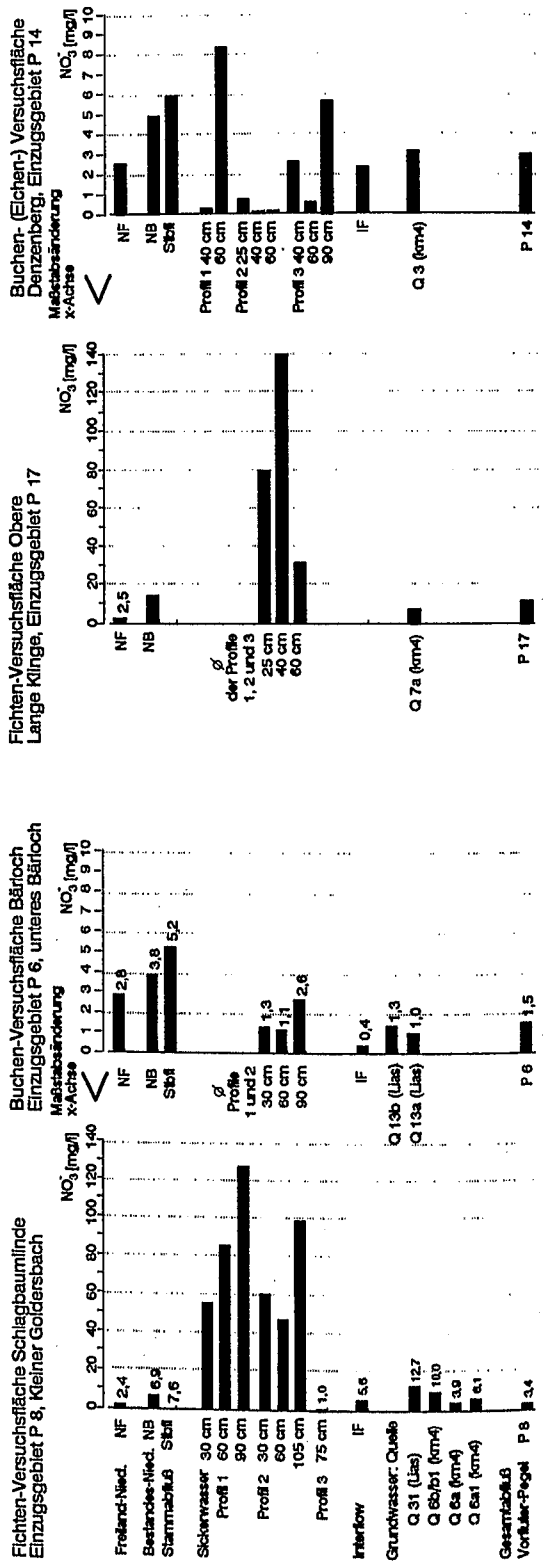


Fortsetzung Abb. 6-12: c) Natrium und Kalium.

Sulfat-Konzentrationen

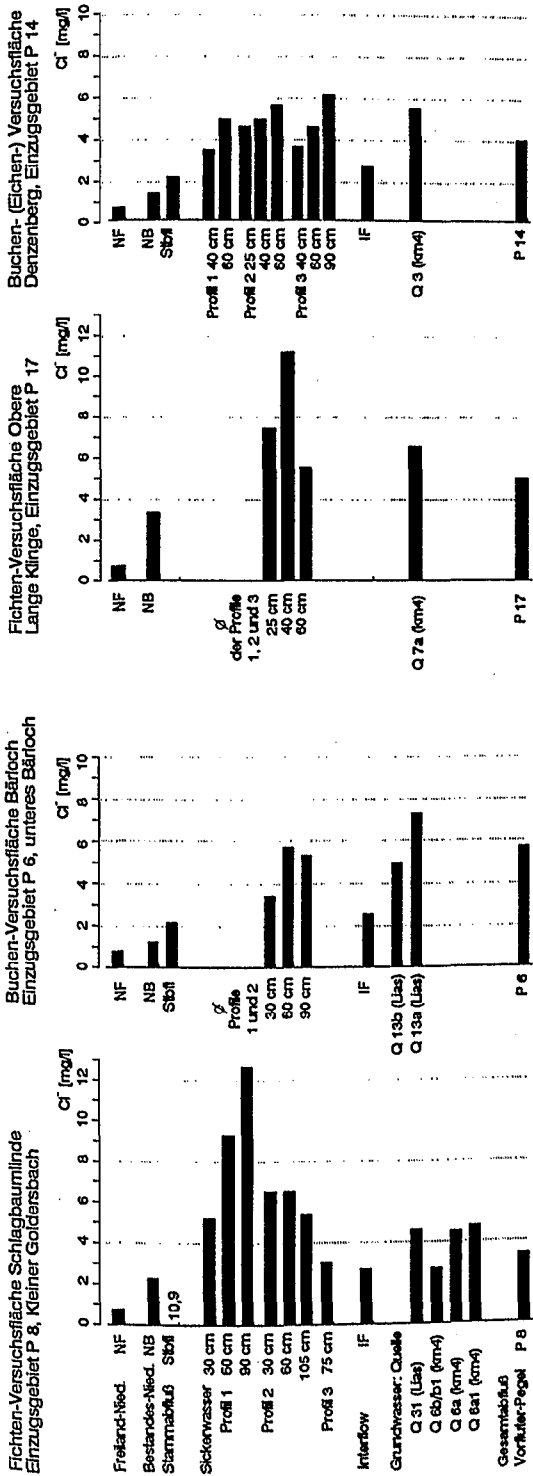


Nitrat-Konzentrationen

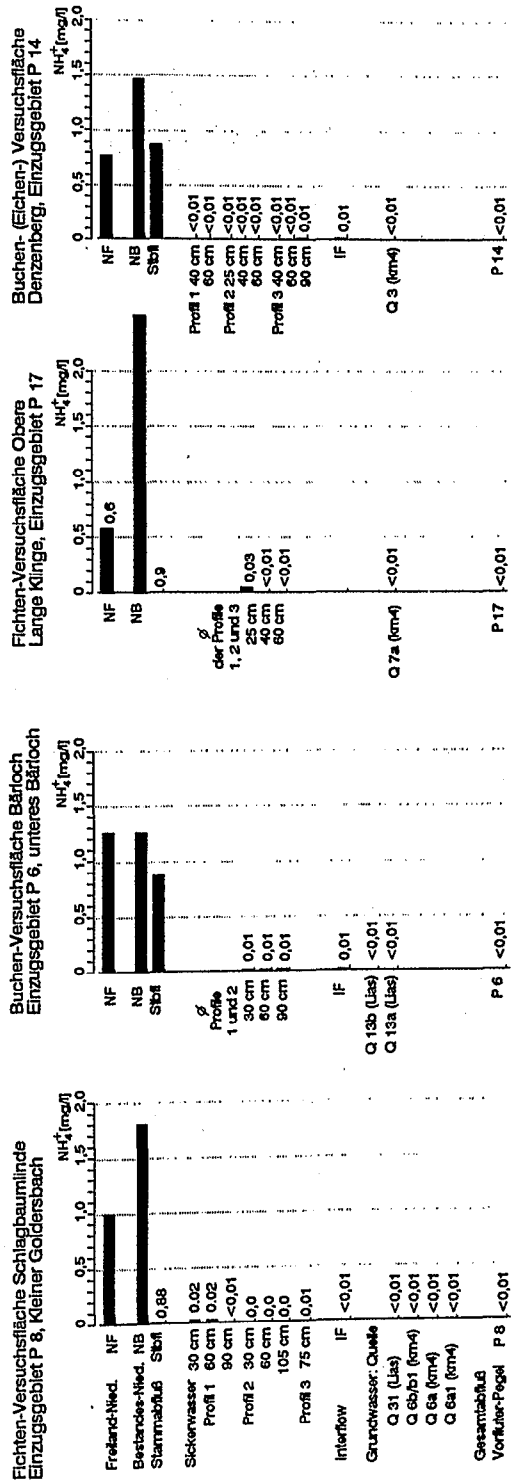


Fortsetzung Abb. 6-12: d) Sulfat und Nitrat.

Chlorid-Konzentrationen



Ammonium-Konzentrationen



Fortsetzung Abb. 6-12: e) Chlorid und Ammonium.

6.2 Stoffeintrag

Die für Ökosysteme eigentlich belastungsbestimmende Größe sind die eingetragenen Stoffmengen, die aus Niederschlagshöhen und Stoffkonzentrationen zu berechnen sind. Im folgenden werden die auf den Versuchsflächen ermittelten und die auf die Einzugsgebiete hochgerechneten Eintragsmengen diskutiert.

6.2.1 Der Stoffeintrag mit dem Freiland- und Bestandesniederschlag

In Abb. 6-13 sind die Stoffeinträge mit dem Freiland- und Bestandesniederschlag in die beiden Fichten- und Buchentestflächen dargestellt. Die genauen Ergebnisse der Eintragsberechnung für die Versuchsflächen S 1 - S 4 sind in Tabelle A-6-1 (Anhang) zusammengestellt. Trotz allgemein niedrigerer Konzentrationen im Niederschlag lag der Stoffeintrag im sehr niederschlagsreichen Jahr 1986 höher als im normal nassen Vorjahr.

Wegen der ganzjährigen Benadelung sind Filterwirkung und Auswaschungsgefährdung (von Pflanzennährstoffen) in den Fichtenbeständen stärker ausgeprägt.

Aufgrund der höheren Niederschlagssumme war 1986 auch der Effekt der Pflanzenauswaschung verstärkt. Dies wird vor allem für Kalium im Buchenbestand durch den Vergleich der laubfreien Winterhalbjahre mit den Sommerhalbjahren und der beiden Sommerhalbjahre 1985 und 1986 deutlich (Abb. 6-13). Auch im Nadelwald erfolgte eine erhöhte Kaliumauswaschung, die jedoch etwas schwächer als die im Buchenbestand war. Wie ULRICH et al. (1979) zeigen konnten, stammt der erhöhte Kaliumeintrag im Bestand gegenüber dem Freiland bei Buche praktisch vollständig und bei Fichte zum größten Teil aus der Blattmasse und ist auf die Pflanzenauswaschung zurückzuführen.

Auch bei Calcium ist durch Pflanzenauswaschung ein deutlicher Eintragszuwachs mit dem NB zu verzeichnen, unter Fichte stärker als unter Buche. Dabei fällt auf, daß der Fichtenstandort Obere Lange Klinge (S 3) stets eine besonders große Ca-Deposition im Bestand aufweist. Eine mögliche Erklärung dafür wäre Staubeintrag mit dem Wind aus dem westlich vorgelagerten, landwirtschaftlich intensiv genutzten "Oberen Gäu". Das kann auch für den Buchenstandort Denzenberg (S 4) gelten.

Ähnlich hohe Anstiege wie bei dem Kalium-Eintrag sind in den Beständen auch bei Sulfat und den Stickstoffverbindungen zu beobachten - unter Fichte, infolge höherer Effektivität der Filterung

ihrer Kronen, wieder deutlicher ausgeprägt. Bei den Fichtenstandorten S 3 und S 1 fällt ein von W nach E gerichtetes Depositionsgefälle auf. Es betrifft besonders Stickstoff.

Der Eintrag von SO_4 , NO_3 und NH_4 ist mit einem entsprechenden Protoneneintrag verbunden, der durch Austauschvorgänge an den Zellwänden der Blattoberflächen, bei Buchen und Fichten unterschiedlich stark, abgepuffert wird. Dies hat im Fichtenbestand gegenüber der Freilanddeposition einen erheblichen Anstieg, im Buchenbestand dagegen einen deutlichen Rückgang der H^+ -Konzentration im NB zur Folge, zumindest während der Vegetationszeit mit Belaubung. Der Protoneneintrag insgesamt liegt allerdings auch unter Buche im Jahresdurchschnitt etwas höher als im Freiland. Der Anstieg der Einträge ist jedoch deutlich geringer als auf den Fichtenstandorten (vgl. Abb. 6-13).

Da die Pufferwirkung der Blattoberflächen vor allem durch Austausch von Ca^{2+} gegen 2H^+ mit anschließender Ca^{2+} -Auswaschung erfolgt (ELLENBERG et al., 1986), könnte der oben erwähnte, auffallend hohe Ca-Eintrag mit dem NB am Standort Obere Lange Klinge (S 3) auch als Folge einer besonders hohen Säurebelastung interpretiert werden. Dabei würde die durchschnittlich zur Verfügung stehende Ca-Menge an den Nadeloberflächen nicht ausreichen (wegen möglicherweise unzureichender Nachlieferung aus dem Boden?), um die Säurebelastung einigermaßen abpuffern zu können (was wiederum zu hohen Protoneneinträgen führt).

Berechnet man die jeweiligen Anteile von Schwefel und Stickstoff im NB, so ergibt sich z.B. für den Fichtenstandort Obere Lange Klinge (S 3), daß sie zusammen im Mittel der Jahre 1985/86 rund 56% des Eintrags in den Bestand betragen (SO_4 -S: 27,8%, NH_4 - und NO_3 -N: 28%).

Der Eintrag von Luftschadstoffen in den Schönbuch hat, vergleicht man die Daten aus der früheren Meßperiode von 1979-82 mit denen von 1985/86, generell deutlich zugenommen (Tab. 6-5). Dies betrifft besonders die Stickstoffverbindungen. Der Zuwachs innerhalb weniger Jahre (jeweils bezogen auf die Mittelwerte beider Untersuchungszeiträume) beträgt bei den Buchenbeständen rund 56%, in den Fichtenbeständen sogar über 95%; er hat sich also nahezu verdoppelt. Bei Schwefel verläuft der Anstieg mit 14% unter Buche und 13% unter Fichte nicht so stark. Ein Vergleich mit den Depositionen im Solling, einem durch Luftverunreinigungen wesentlich stärker betroffenen Gebiet, zeigt jedoch, daß der Schönbuch noch immer als gering belastetes Gebiet angesehen werden kann.

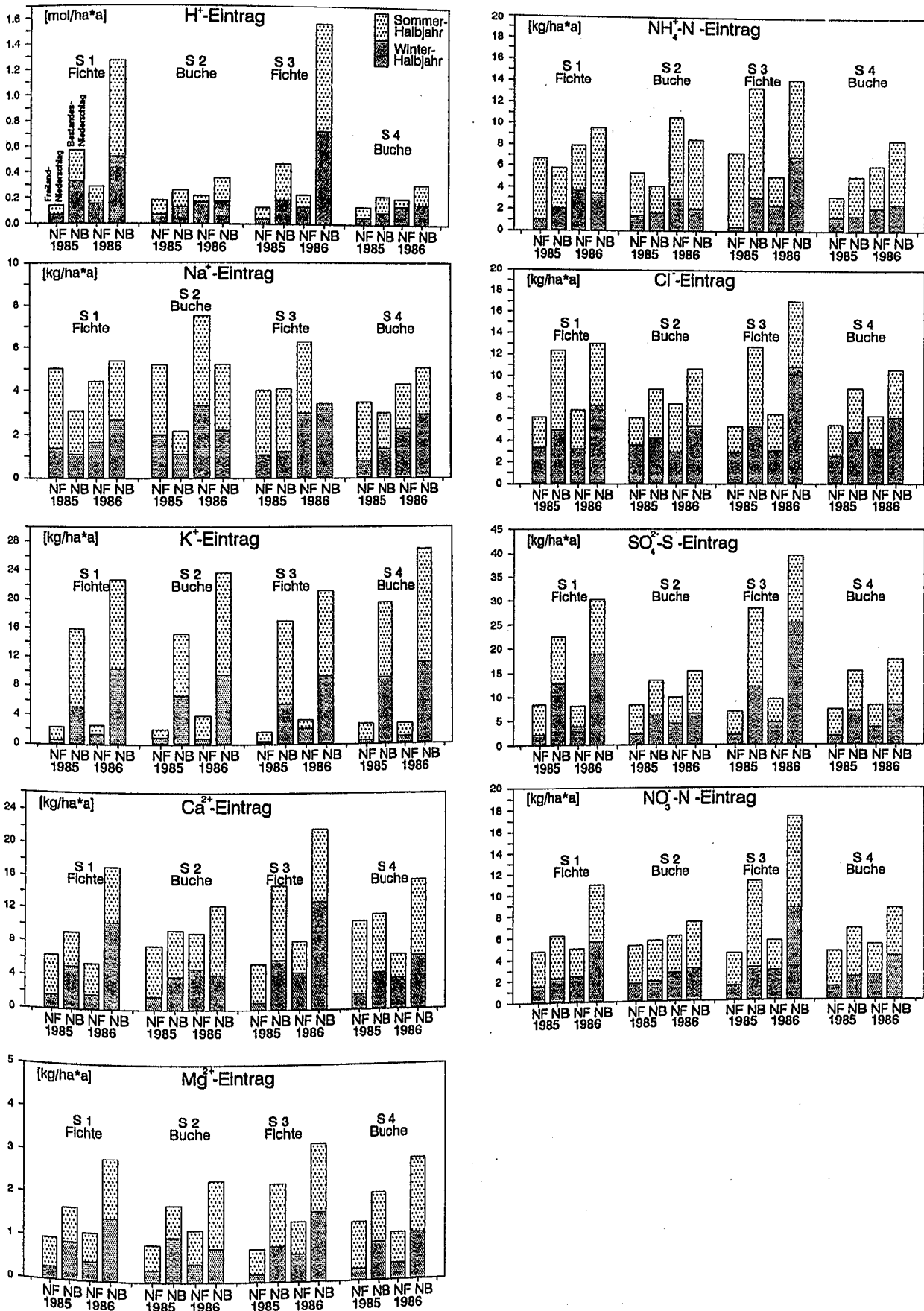


Abb. 6-13: Einträge der Hauptinhaltsstoffe mit dem Freiland (NF)- und Bestandesniederschlag (NB: Kronentraufe und Stammablauf) in die Versuchsflächen S 1 und S 3 (Fichte) sowie S 2 und S 4 (Buche), Untersuchungsjahre 1985 und 1986. Angaben in kg/ha·a, bei H⁺ in mol/ha.

Es kommt hinzu, daß die Nadelwälder des Schönbuchs gegenüber denen des Solling wesentlich mehr Schwefel-Verbindungen aus der Atmosphäre herausfiltern als die jeweiligen Buchenbestände. Im Schönbuch gelangt fast 96%, im Solling dagegen nur rund 69% mehr $\text{SO}_4\text{-S}$ in den Fichtenbestand als in den Buchenbestand. Damit wird die Aussage einer relativ höheren SO_4 -Belastung der Fichtenbestände, wie sie bereits AGSTER (1986b) für den Zeitraum 1979-82 beschrieben hat, mit nahezu den gleichen Werten bestätigt. Generell gilt diese Mehrbelastung der Nadelwälder des Schönbuchs im Vergleich zum Solling auch für Stickstoff, jedoch sind hier die Unterschiede mit 43% gegenüber 35% weniger groß.

Tab. 6-5: Sulfat- und Stickstoffeinträge (kg/ha·a) im Freiland und in Waldbeständen des Schönbuchs in den Jahren 1985/86 im Vergleich zur Meßperiode 1979-82 und zu Ergebnissen aus dem Solling (1969-83).

	Freiland		Buche		Fichte	
	$\text{SO}_4\text{-S}$	N ³⁾	$\text{SO}_4\text{-S}$	N ³⁾	$\text{SO}_4\text{-S}$	N ³⁾
Schönbuch ¹⁾ 1979-82 (NF=745 mm)	6.4	7.7	13.5	8.7	26.6	11.3
Schönbuch ⁴⁾ 1985 (NF=725 mm)	7.7	10.3	14.3	10.7	25.3	18.2
1986 (NF=1021 mm)	8.9	12.8	16.4	16.4	34.9	25.9
1985/86 (NF=873 mm)	8.3	11.6	15.4	13.6	30.1	22.1
Solling ²⁾ 1969-83 (NF=1017 mm)	23.4	20.0	50.3	22.9	85.2	31.0

1) aus AGSTER (1986b)

2) aus ELLENBERG et al. (1986)

3) N = $\text{NO}_3\text{-N}$ + $\text{NH}_4\text{-N}$

4) errechnet aus Versuchsflächen S1 - S4

6.2.1.1 Der Stoffeintrag mit dem Stammablauf

Die Angaben zu Stoffeinträgen mit dem NB (Tabellen 6-5 und A-6-1 sowie Abb. 6-13) beinhalten Kronentraufe und Stammablauf. Der Anteil des Stammablaufs am Gesamtstoffeintrag wurde für die Buchenstandorte S 2 und S 4 mit Hilfe der von BÜCKING et al. (1986) mitgeteilten Konzentrationen (vgl. Tab. 6-2) und der entsprechenden Niederschlagsmenge, die im Durchschnitt 15% des NF beträgt, auf Halbjahresbasis berechnet. Danach macht der Stammablauf bei den meisten Makroelementen 20-28% des Gesamtstoffeintrages in den Bestand aus. Bei Kalium, das als Pflanzennährstoff einerseits und aufgrund seiner

hohen Mobilität andererseits am bestandesinternen Stoffkreislauf in hohem Maße beteiligt ist, steigt dieser Wert auf über 38% an. Das aus der atmosphärischen Luftbelastung stammende Sulfat hat mit 37% ebenfalls einen sehr hohen Anteil. Die Stickstoff-Verbindungen sind im Stammablauf überraschend schwach angereichert: 23% des $\text{NO}_3\text{-N}$ - und nur 14% des $\text{NH}_4\text{-N}$ -Eintrags gelangen mit dem Stammablauf auf den Waldboden. Wie aus Tab. A-6-1 (Anhang) und Abb. 6-13 hervorgeht, liegt die mit dem gesamten NB eingetragene NH_4 -Menge ohne erkennbare Regel teilweise sogar niedriger als diejenige der Freilanddeposition (S 1: 1. Hj. 85; S 2: während der gesamten Untersuchungsperiode). Nach ULRICH et al. (1979) ist der geringe NH_4 -Eintrag im Bestand auf eine erhöhte NH_4 -Assimilation durch Mikroorganismen in der Phyllosphäre zurückzuführen.

Die für Laubwaldbestände des Schönbuchs errechneten Stoffeintrags-Anteile des Stammablaufs am NB stimmen für die verschiedenen Inhaltsstoffe gut mit den von FÜHRER et al. (1988) angegebenen Werten überein. Lediglich beim Protoneneintrag besteht mit rund 77% im Schönbuch gegenüber dem Wert von 50% bei FÜHRER ein wesentlicher Unterschied.

6.2.1.2 Der Stoffeintrag mit dem Streufall

Der Stoffeintrag mit dem Streufall wurde im Rahmen dieses Projekts nicht untersucht. Nach BÜCKING (1987) ist die Stoffanlieferung mit der Streu für einige Makroelemente beträchtlich, wobei es wiederum baumartenspezifische Unterschiede gibt. Für die Elemente Ca, Mg, K und N liegt der Eintrag in der Größenordnung des Bestandesniederschlags, z.T. auch deutlich (bei N und Ca) darüber. Dies überrascht nicht, da es sich um Pflanzennährstoffe handelt, die der Blattauswaschung unterliegen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß der Bestand eine entsprechende Stoffmenge im internen Stoffkreislauf zu seiner Versorgung aus dem Boden wieder aufnimmt.

6.2.2 Der Stoffeintrag in die Teileinzugsgebiete des Schönbuchs

In Kap. 6.2.1 wurde, ausgehend von den Meßergebnissen der Versuchsflächen S 1 - S 4, der Stoffeintrag in Flächen mit einheitlichen Baumbeständen verglichen. Entsprechend ihrem Nadel-/Laubwald-Verhältnis wurde der Stoffeintrag für die untersuchten Teileinzugsgebiete ermittelt. Die Halbjahres- und Jahreswerte der Niederschlagsdepositionen für 1985 und 1986 sind in Tab. 6-6 zu-

sammengestellt. Dabei wurden die Ergebnisse der Versuchsflächen (S 1 - S 4) wie folgt den Einzugsgebieten (an den Pegelmeßstellen P) zugeordnet:

S 1 (Fichte) und S 2 (Buche): P 8, P 6 und P 5/1; S 1, S 3 (Fichte), S 4 (Buche): P 14 und P 17.

Im folgenden werden die Auswirkungen des Eintrags der Makroelemente, die als atmosphärische Schadstoffe gelten, diskutiert.

Der Eintrag von $\text{SO}_4\text{-S}$ nimmt mit steigendem Nadelwaldanteil in den Gebieten generell zu. Dementsprechend ist die höchste Depositionsrate im Gebiet Obere Lange Klinge zu verzeichnen. Beim Eintrag der Stickstoffverbindungen NO_3 und NH_4 ist dies nicht eindeutig, obwohl die Fichten stets auch größere N-Mengen aus der Luft herausfiltern als die Buchen. Ferner ist zu beobachten, daß der Eintrag von NO_3 und NH_4 von West nach Ost deutlich abnimmt. Im mit 81% Buchenwald bestockten Gebiet Denzenberg liegt die N-Deposition fast immer über derjenigen des Gebietes Kleiner Goldersbach (67% Nadelwald) und stets über derjenigen des Gebietes Bärloch (89% Buchenwald). Zu erklären ist dies mit der in Hauptwindrichtung von West nach Ost abnehmenden Beeinflussung durch direkte/indirekte anthropogene Emissionen. Industrie und der starke Kraftfahrzeugverkehr (u.a. Bodenseeautobahn) dürften die Quellen für das NO_3 darstellen, während die Herkunft des NH_4 in den organischen Düngern der intensiv bewirtschafteten Acker- und Wiesenflächen des westlich vorgelagerten "Oberen Gäus" zu suchen ist.

Der Eintrag von $\text{SO}_4\text{-S}$ und N-Verbindungen ist stets auch mit einer entsprechenden Deposition von Protonen verknüpft. Auch hier sind die Gebiete mit höherem Nadelwaldanteil stärker betroffen. Die höchsten Depositionen werden allgemein im niederschlagsreichen Jahr 1986 (Tab. 6-6, Teil 2), speziell im Gebiet Obere Lange Klinge mit über 1,3 kmol/ha·a festgestellt. Da diese Protonenmenge an den Pflanzenoberflächen abgepuffert wird, was zu einem Ionenaustausch in äquivalenter Größenordnung führt, sind erhöhte Protoneneinträge in die Gebiete immer auch mit erhöhten Ca-Depositionen mit dem NB gekoppelt, wobei vor allem in den Buchenbeständen Kalium noch hinzukommt. Diese Koppelung von Protoneneintrag und Ca-Auswaschung ist im niederschlagsreicheren Jahr 1986 deutlicher ausgeprägt. Im vergleichsweise trockenen Jahr 1985 wird dieser Vorgang evtl. durch den Einfluß einer gewissen Staubsedimentation, die ebenfalls vom "Oberen Gäu" herrührt, überdeckt (vgl. Kap. 6.1.1).

Gegenüber den Mittelwerten der Meßperiode 1979 - 82 (vgl. AGSTER, 1986), ist die Deposi-

tion von Stickstoff im Durchschnittsjahr 1985 in den Einzugsgebieten mit vorherrschend Nadelwald tendenziell leicht (P 8) bis sehr stark (P 17) angestiegen, während sie in den Gebieten mit vorherrschend Laubwald ungefähr gleich geblieben ist. Die Entwicklung der Deposition von $\text{SO}_4\text{-S}$ verläuft unabhängig von der Dominanz einer bestimmten Baumart: sie ist in dem im Osten des Schönbuchs liegenden Einzugsgebieten allgemein deutlich zurückgegangen, im Gebiet Kleiner Goldersbach (P 8) stärker als im Gebiet Bärloch (P 6). Im Westen des Schönbuchs dagegen ist sie in den Gebieten Denzenberg (P 14) und Obere Lange Klinge (P 17) stark angestiegen. Insgesamt ist also die Belastung aus atmosphärischem Eintrag im Westteil des Schönbuchs wesentlich höher als im Ostteil, sie nimmt dort sogar, im Vergleich zu früheren Jahren noch laufend zu.

Hochgerechnet auf das größte untersuchte Einzugsgebiet, Pegel 1: Großer Goldersbach, wurden 1985 im Vergleich zur früheren Meßperiode höhere Stickstoff-Einträge ($\text{NO}_3\text{-N}$: 7,8 gegenüber 6,1; $\text{NH}_4\text{-N}$: 7,8 gegenüber 3,9) und annähernd gleich hohe Sulfat-Einträge ($\text{SO}_4\text{-S}$: 21,3 gegenüber 20,7) ermittelt.

6.3 Stoffaustrag aus Teileinzugsgebieten des Schönbuchs

Die Beschaffenheit des Grundwassers wird in erster Linie durch die Petrographie des Aquifers bestimmt, diejenige des Sickerwassers und des oberflächennahen Zwischenabflusses (Interflow) dagegen häufig durch die mit dem Niederschlag eingetragenen Elemente sowie die in der ungesättigten Bodenzone ablaufenden biologisch-biochemischen Stoffwechselfvorgänge (Kap. 6.1.2 und 6.1.3). Wie im Abschnitt 6.1.3.2 gezeigt wurde, gelangen mit dem versickernden Bodenwasser aber auch Stoffe aus dem atmosphärischen Eintrag nach einiger Zeit in das tiefere Grundwasser.

Der Gebietsabfluß der untersuchten Teileinzugsgebiete wurde jeweils an Vorfluter-Pegelmeßstellen erfaßt (Abb. 4-2). Aus den zahlreichen Analysedaten von Proben bei verschiedenen Abflußmengen wurden gebietspezifische Konzentrations-Abfluß-Beziehungen aufgestellt. Mit Hilfe der mittleren Tagesabflußmengen wurde der Stoffaustrag mit dem Gebietsabfluß berechnet.

In diesem Kapitel werden die Halbjahreswerte des Stoffaustrags (1985/86) von den 2 großen, übergreifenden Einzugsgebieten (P 1 und P 5/1) sowie den 4 kleineren Gebieten (P 6, P 8, P 14 und P 17) den entsprechenden Stoffeinträgen gegenübergestellt.

Die Höhe des Stoffaustrages hängt unter ande-

Tab. 6-6: Stoffeinträge (Ein) mit dem Bestandesniederschlag (NB) und Stoffausträge (Aus) mit dem Vorfluterabfluß aus den Teileinzugsgebieten P 8 Kleiner Goldersbach und P 17 Obere Lange Klinge (überwiegend Nadelwald, Nd) und P 6 Bärloch und P 14 Denzenberg (überwiegend Laubwald, Lb) sowie den größeren Einzugsgebieten P 1 Großer Goldersbach (westlicher Schönbuch) und P 5/1 Kirnbach (östlicher Schönbuch).
Teil 1: Abflußjahr 1985; Teil 2: Abflußjahr 1986

Teil 1: Stoffumsatz 1985

Nd/Lb		Kl. Gold.b.		Bärloch		Ob. L. Kl.		Denzenberg		Gr. Gold.b.		Kirnbach	
		Ein	Aus	Ein	Aus	Ein	Aus	Ein	Aus	Ein	Aus	Ein	Aus
		NB	P 8	NB	P 6	NB	P 17	NB	P 14	NB	P 1	NB	P 5/1
		67/33		11/89		80/20		19/81		60/40		50/50	
Nied. (mm)	1.Hj	180	47	221	48	136	40	189	58	164	65	192	66
	2.Hj	319	114	329	160	241	53	311	147	292	101	322	146
	1985	498	161	550	208	378	92	499	205	457	166	514	212
H ⁺ (mol/ha)	1.Hj	259	0,005	149	0,003	166	0,005	108	0,004	189	0,004	226	0,003
	2.Hj	207	0,013	145	0,022	251	0,012	155	0,017	208	0,009	188	0,012
	1985	466	0,018	294	0,025	417	0,017	264	0,021	397	0,012	414	0,015
Ca ²⁺ (kg/ha)	1.Hj	4,6	21,4	4,0	31,8	5,6	24,1	4,6	30,9	5,0	55,5	4,4	45,2
	2.Hj	4,6	37,6	5,4	61,2	8,6	25,7	7,4	55,7	6,7	66,4	4,8	74,0
	1985	9,2	59,0	9,4	92,9	14,1	49,8	12,0	86,5	11,7	121,9	9,3	119,1
Mg ⁺ (kg/ha)	1.Hj	0,9	8,9	1,0	5,5	0,8	3,0	0,9	18,5	0,9	15,3	0,9	12,3
	2.Hj	0,8	13,1	0,7	10,4	1,4	3,8	1,2	32,9	1,1	18,2	0,8	17,1
	1985	1,7	22,0	1,7	15,9	2,2	6,8	2,1	51,4	2,0	33,5	1,7	29,4
Na ⁺ (kg/ha)	1.Hj	1,1	4,0	1,1	3,4	1,2	1,9	1,3	2,4	1,2	6,6	1,1	11,4
	2.Hj	1,7	6,1	1,2	6,0	2,6	2,1	1,9	3,9	2,1	8,0	1,5	20,2
	1985	2,8	10,1	2,2	9,4	3,8	4,0	3,2	6,3	3,3	14,6	2,6	31,5
K ⁺ (kg/ha)	1.Hj	5,6	1,0	6,4	0,5	6,2	0,3	8,4	0,8	6,8	1,8	5,8	1,2
	2.Hj	10,0	2,3	8,7	1,4	11,2	0,5	10,5	1,7	10,8	4,0	9,6	3,4
	1985	15,5	3,2	15,2	1,9	17,4	0,8	18,9	2,5	17,5	5,8	15,4	4,6
Cl ⁻ (kg/ha)	1.Hj	4,7	1,9	4,2	3,4	5,1	2,3	4,8	2,6	4,9	4,2	4,5	11,7
	2.Hj	6,5	3,4	4,9	6,8	6,8	2,7	4,7	5,5	6,1	5,4	6,0	19,3
	1985	11,1	5,3	9,1	10,2	11,9	5,0	9,5	8,1	11,0	9,6	10,5	30,9
SO ₄ -S (kg/ha)	1.Hj	10,5	5,0	6,8	4,8	11,0	5,7	8,0	2,8	10,2	41,3	9,4	9,2
	2.Hj	8,8	10,1	7,5	12,3	14,7	7,4	9,8	7,8	11,1	45,7	8,4	18,4
	1985	19,4	15,1	14,3	17,1	25,7	13,1	17,8	10,6	21,3	87,0	17,8	27,6
NO ₃ -N (kg/ha)	1.Hj	2,1	0,4	1,9	0,2	2,9	0,9	2,3	0,4	2,4	0,5	2,0	0,6
	2.Hj	3,9	0,9	3,8	0,4	7,4	1,4	5,2	1,0	5,4	1,1	3,8	1,8
	1985	5,9	1,2	5,7	0,6	10,3	2,3	7,5	1,4	7,8	1,6	5,9	2,4
NH ₄ -N (kg/ha)	1.Hj	1,9	<0.01	1,7	<0.01	2,8	0.01	1,8	<0.01	2,1	0,0	1,8	0,0
	2.Hj	3,3	<0.01	2,6	<0.01	8,9	0.01	4,9	<0.01	5,6	0,0	3,1	0,0
	1985	5,2	<0.01	4,3	<0.01	11,7	0.01	6,7	<0.01	7,8	0,0	4,9	0,0
HCO ₃ ⁻ (kg/ha)	1.Hj	n.b.	99	n.b.	119	n.b.	62	n.b.	179	n.b.	165	n.b.	177
	2.Hj	n.b.	134	n.b.	225	n.b.	66	n.b.	321	n.b.	203	n.b.	270
	1985	n.b.	233	n.b.	345	n.b.	128	n.b.	500	n.b.	368	n.b.	447

Teil 2: Stoffumsatz 1986

Nd/Lb		Kl. Gold.b.		Bärloch		Ob. L. Kl.		Denzenberg		Gr. Gold.b.		Kirnbach	
		Ein	Aus	Ein	Aus	Ein	Aus	Ein	Aus	Ein	Aus	Ein	Aus
		NB	P 8	NB	P 6	NB	P 17	NB	P 1	NB	P 1	NB	P 5/1
		67/33		11/89		80/20		19/81		60/40		50/50	
Nied. (mm)	1.Hj	306	108	364	92	261	88	340	112	298	94	324	120
	2.Hj	401	64	463	111	343	87	395	128	372	78	463	119
	1985	707	172	827	203	603	175	736	240	670	171	744	240
H ⁺ (mol/ha)	1.Hj	405	0,021	210	0,009	611	0,035	263	0,012	435	0,007	345	0,007
	2.Hj	559	0,008	245	0,009	699	0,025	281	0,012	534	0,005	464	0,007
	1985	963	0,029	455	0,018	1310	0,060	544	0,024	969	0,012	809	0,014
Ca ²⁺ (kg/ha)	1.Hj	8,3	40,1	4,8	45,3	11,5	30,8	7,6	45,4	9,5	64,1	7,2	69,0
	2.Hj	7,2	27,3	8,1	62,1	8,9	33,5	9,1	54,1	8,3	60,5	7,5	72,1
	1985	15,5	67,4	12,9	107,3	20,4	64,3	16,7	99,6	17,8	124,6	14,7	141,0
Mg ⁺ (kg/ha)	1.Hj	1,2	13,7	0,8	8,0	1,5	5,8	1,2	26,8	1,3	17,9	1,1	16,8
	2.Hj	1,4	10,5	1,5	10,8	1,6	5,7	1,7	31,6	1,6	16,8	1,5	17,9
	1985	2,7	24,2	2,4	18,8	3,1	11,5	2,9	58,4	2,9	34,8	2,6	34,7
Na ⁺ (kg/ha)	1.Hj	2,5	5,8	2,2	4,8	3,3	3,0	3,0	3,2	3,0	7,5	2,4	18,5
	2.Hj	2,8	4,5	3,0	6,4	2,3	3,2	2,2	3,9	2,4	7,2	2,9	19,2
	1985	5,3	10,3	5,2	11,2	5,6	6,2	5,2	7,1	5,3	14,7	5,3	37,7
K ⁺ (kg/ha)	1.Hj	10,0	2,1	9,6	1,0	9,7	1,1	10,7	1,4	10,3	3,1	9,9	2,4
	2.Hj	12,9	1,3	13,9	1,2	12,6	0,9	15,0	1,6	13,5	2,2	13,2	2,3
	1985	23,0	3,4	23,5	2,1	22,3	2,1	25,8	2,9	23,9	5,3	23,1	4,6
Cl ⁻ (kg/ha)	1.Hj	6,6	3,5	5,5	5,1	9,9	4,0	7,0	4,3	7,8	5,4	6,3	18,6
	2.Hj	5,6	2,3	5,3	6,7	5,9	4,2	4,8	5,0	5,4	4,8	5,5	19,2
	1985	12,2	5,8	10,9	11,8	15,7	8,2	11,8	9,2	13,2	10,2	11,8	37,7
SO ₄ -S (kg/ha)	1.Hj	14,8	10,1	7,9	8,8	21,9	12,2	11,5	5,9	16,5	44,5	12,7	15,9
	2.Hj	10,5	6,5	9,0	11,0	13,2	12,0	10,3	6,5	11,4	43,7	10,1	16,1
	1985	25,3	16,6	16,9	19,9	35,1	24,2	21,8	12,4	28,0	88,2	22,7	32,0
NO ₃ -N (kg/ha)	1.Hj	4,7	0,8	3,3	0,3	7,7	2,7	4,9	0,8	5,9	0,9	4,3	1,8
	2.Hj	5,0	0,5	4,4	0,4	7,8	2,3	5,2	0,8	6,0	0,7	4,8	1,3
	1985	9,7	1,3	7,7	0,7	15,5	5,0	10,2	1,6	11,8	1,6	9,1	3,1
NH ₄ -N (kg/ha)	1.Hj	3,0	<0.01	2,2	<0.01	6,0	<0.01	3,3	<0.01	4,1	0,0	2,8	0,0
	2.Hj	6,2	<0.01	6,4	<0.01	7,0	<0.01	6,2	<0.01	6,4	0,0	6,3	0,0
	1985	9,2	<0.01	8,6	<0.01	13,0	<0.01	9,5	<0.01	10,5	0,0	9,0	0,0
HCO ₃ ⁻ (kg/ha)	1.Hj	n.b.	145	n.b.	168	n.b.	80	n.b.	258	n.b.	201	n.b.	260
	2.Hj	n.b.	116	n.b.	233	n.b.	89	n.b.	318	n.b.	186	n.b.	272
	1985	n.b.	261	n.b.	402	n.b.	169	n.b.	576	n.b.	387	n.b.	532

rem stark von der Abflußhöhe und damit von der Höhe des Niederschlags ab. Im Naßjahr 1986 lag der NF um 41% und die Bestandesniederschläge im Laubwald um durchschnittlich 45%, im Nadelwald um durchschnittlich 55% höher als im "Normaljahr" 1985. Dies hatte unterschiedliche Stoffausträge zur Folge.

Die mittleren Stoffkonzentrationen im Gesamtabfluß (Tab. 6-1) lagen 1986 für viele Elemente z.T. deutlich niedriger als im Vorjahr (vgl. auch niedrigere Konzentrationen in Niederschlägen 1986). Dies kann mit einem höheren Anteil der oberflächennahen, insgesamt geringer mineralisierten Abflußkomponente begründet werden. Bei einem Vergleich der Einzugsgebiete ergibt sich dabei allerdings kein einheitliches Bild; bei einigen Elementen, z.B. Ca, Mg und K, sind die Tendenzen sogar gegenläufig. Die Ursachen für diesen scheinbaren Widerspruch sind in den verschiedenen geologischen, speziell petrographischen Verhältnissen der Einzugsgebiete sowie bestandesabhängig wechselnden Auswirkungen auf Wasser- (z.B. Abflußbildung) und Stoffhaushalt zu suchen. In der Regel werden die überwiegend geogenen Wasserinhaltsstoffe (Ca, Mg, HCO_3 , z.T. auch SO_4) durch einen höheren Anteil oberflächennahen Wassers im Gebietsabfluß am Pegel relativ abgereichert, während die anthropogenen, aus atmosphärischem Eintrag stammenden Elemente infolge erhöhter Abschwemmung relativ angereichert werden (vgl. Kap. 6.1.4). Insgesamt ist jedoch bei allen Makroelementen mit steigendem Gebietsabfluß auch ein höherer Stoffaustrag festzustellen.

Die Stoffausträge ($\text{kg/ha}\cdot\text{a}$) der vier kleineren Vergleichsgebiete P 6, P 8, P 14 und P 17 (Tab. 6-7) lagen 1986 im Mittel um 14% über denjenigen von 1985, am Pegel 17 (Obere Lange Klinge) sogar um mehr als 38%. Je nach lithologischer Zusammensetzung des Grundwasserleiters und der daraus folgenden Mineralisierung des Grundwassers sowie den Abflußverhältnissen sind die Stoffausträge der einzelnen Einzugsgebiete unterschiedlich hoch.

Die größten Stoffmengen (in den 4 Vergleichsgebieten) werden stets aus dem Gebiet Denzenberg (P 14), die niedrigsten aus dem Gebiet Obere Lange Klinge (P 17) ausgebracht. Diese Gebietsunterschiede beruhen hauptsächlich auf der unterschiedlichen Morphologie, der Entwässerung verschiedener Grundwasserstockwerke (unterschiedlicher Mineralisierung und Verweilzeit des Grundwassers) sowie auf verschiedenen Waldbeständen. Der weitaus höhere Gesamt-Stoffaustrag aus dem Gebiet Denzenberg ist auf die sehr hohen Austragsmengen von Mg und HCO_3 zurückzuführen,

was auf die Lösungsverwitterung von dolomitischem Bindemittel im km⁴-Grundwasserleiter hindeutet, das im Gebiet P 17 bereits ausgebracht ist. Ähnlich hohe Mg-Austräge treten nur im Gebiet Kleiner Goldersbach (P 8) und in den beiden großen Einzugsgebieten Goldersbach (P 1) und Kirnbach (P 5/1) auf, wo ebenfalls höher mineralisiertes Wasser aus tieferen km⁴-Grundwasserstockwerken in den Vorfluter übertritt. Die von allen Gebieten höchsten Gesamtstoffausträge wurden für das Gebiet P 5/1 ermittelt. Sie sind auch auf stark nach oben abweichende Na- und Cl-Gehalte zurückzuführen (Tab. 6-6), die auf eine anthropogene Beeinflussung (winterliche Salzstreuung) zurückgehen.

In allen Gebieten bestimmen die überwiegend geogenen Elemente gewichtsmäßig den Stoffaustrag. Erdalkalien und Hydrogenkarbonat, in den Gebieten Kleiner Goldersbach (P 8), Bärloch (P 6) und Kirnbachtal (P 5/1) auch Sulfat aus der Oxidation von Pyrit-Schwefel, sind mit 93 - 96% an der Zusammensetzung des Stoffaustrags beteiligt. Der mit durchschnittlich knapp 90% etwas niedrigere geogene Frachtanteil im Gebiet P 5/1 ist auf die die Gesamtfracht erhöhenden Na- und Cl-Frachten zurückzuführen. Es fällt auf, daß im reinen Nadelwaldgebiet P 17 Sulfat mit durchschnittlich 7,3% überdurchschnittlich hoch vertreten ist. Dies ist, bei Fehlen von geogenem Sulfat, auf den hohen atmosphärischen Eintrag zurückzuführen (Tab. 6-13). Der noch höhere Sulfatanteil im Gebiet P 1 (über 13%) ist auf den Anschnitt des Gipskeupers zurückzuführen (Tab. 6-7).

Am Beispiel P 17 wird deutlich, daß ein zunehmender Nadelwaldanteil an der Bestockung eines Gebietes nicht nur eine Erhöhung des Stoffein-, sondern auch des Stoffaustrages bewirkt. Der Sulfat-Austrag wird in den Gebieten P 8, P 6, P 5/1 und besonders P 1 durch einen geogenen Anteil zusätzlich erhöht. Im trockenen Durchschnittsjahr 1985 (Tab. 6-6, Teil 1) war er deshalb in diesen Gebieten höher als in den reinen Stubensandstein-Gebieten im Westen des Schönbuchs (P 14 und P 17). Dort fehlt geogenes Sulfat weitgehend, gleichzeitig erfolgt jedoch ein im Vergleich mit den östlichen Gebieten höherer Schadstoffeintrag (Kap. 6.2.2).

Bei einem gesteigertem Schadstoffeintrag im sehr niederschlagsreichen Jahr 1986 (Tab. 6-6, Seite 2) lag der SO_4 -S-Austrag im km⁴-Gebiet P 17 mit 24,2 $\text{kg/ha}\cdot\text{a}$ wesentlich über oder im Bereich der 3 Gebiete mit Lias α -Anteilen und geogenem Sulfat (P 8, P 6 und P 5/1) und war fast doppelt so hoch wie im km⁴-Vergleichsgebiet Denzenberg (P 14). Der auf Gipslösung beruhende, sehr viel höhere Sulfataustrag bei P 1 (ca. 88 $\text{kg/ha}\cdot\text{a}$) wurde allerdings nicht erreicht.

Tab. 6-7: Austrag an gelösten Stoffen mit dem Gebietsabfluß aus Teileinzugsgebieten des Schönbuchs im Meßzeitraum 1985 und 1986, Vergleich mit den Daten des Meßzeitraums 1979 - 1982 sowie relative Anteile geogener und anthropogener Wasserinhaltsstoffe am Gesamtstoffaustrag.

		P 6	P 8	P 14	P 17	P 1	P 5/1	
		Bu	Fi > Bu	Bu	Fi > Bu	Fi > Bu	Fi = Bu	
		[kg/ha·a]				[kg/ha·a]		
Gesamtstoffaustrag								
Normaljahr	1985	493	349	667	210	646	693	
Naßjahr	1986	574	390	767	291	666	823	
Durchschnitt	1979-1982 ¹⁾	523	373	732	235	630		
Anteile (Gew.-%) an der Gesamtfracht								
		[%]				[%]		
SO ₄ ²⁻ -S	1985	3,5	4,3	1,6	6,3	13,5	4,0	
	1986	3,5	4,3	1,6	8,3	13,2	3,9	
NO ₃ ⁻ -N	1985	0,1	0,3	0,2	1,1	0,2	0,3	
	1986	0,1	0,3	0,2	1,7	0,2	0,4	
HCO ₃ ⁻	1985	70,0	66,8	75,0	61,0	57,0	64,5	
	1986	70,1	66,9	75,1	58,2	58,1	64,6	
Ca ²⁺ + Mg ²⁺	1985	22,1	23,2	20,7	27,0	24,1	21,4	
	1986	22,0	23,5	20,6	26,1	23,9	21,3	
Geogene Frachtanteile an der Gesamtfracht (%) ²⁾								
		1985/86	93,5	94,5	95,7	85,7	94,9	89,9

1) umgerechnet nach AGSTER (1986b); 2) Ca, Mg, HCO₃⁻, bei P 6, P 8 und P 1, P 5/1 auch SO₄

Der 1986 bei P 17 hohe, zusätzliche Sulfateintrag scheint dabei überwiegend mit dem oberflächennahen Abfluß und dem flachen Grundwasser sehr rasch in den Vorfluter gelangt zu sein. (Einer SO₄-S-Eintragserrhöhung von 9,4 kg/ha·a steht eine Austragserrhöhung von 11,1 kg/ha·a gegenüber). Dadurch erhöhte sich der relative Anteil des SO₄-S am Gesamtstoffaustrag im Jahre 1986 gegenüber 1985 im Gebiet P 17 deutlich von 6,3 auf 8,3%, im Gebiet P 14 dagegen unmerklich von 1,59 auf 1,62%. (Vgl. dazu auch die im Gebiet P 17 rel. höheren Abflußsteigerungen von 1985 auf 1986, Tab. A-5-7, Anhang.)

Bei Stickstoff ist der relative Austragszuwachs als Folge verstärkter Ausschwemmung in nassen Jahren noch stärker als beim Sulfataustrag, wenngleich er in Relation zum Gesamtaustrag eher von untergeordneter Bedeutung ist. Wie aus Tab. 6-7 hervorgeht, ist der relative Anteil des Nitrats am Stoffaustrag mit dem Nadelwaldanteil im Einzugsgebiet verknüpft.

Der Protonenaustrag betrug nur einen Bruchteil des Gesamtstoffaustrages (Tab. 6-6) und läßt (ähnlich wie der Sulfat- und Nitrataustrag) einen deutlichen Zusammenhang mit der Bewaldung im Einzugsgebiet erkennen. Die pH-Werte im Gesamtabfluß bei P 14 und P 17 wurden mit den pH-Werten der zugehörigen Bestandesniederschläge

verglichen (Kap. 6.1.1, Abb. 6-1) und in Kap. 6.1.4 mit weiteren Stoffkonzentrationen diskutiert. Die pH-Wert-Ganglinien beschreiben einen sinusförmigen Jahresgang. Zu Zeiten hoher Gebietsabflüsse im Winter und Frühjahr werden in der Regel die niedrigsten pH-Werte gemessen, so daß in dieser Zeit ein großer Teil des Protonenaustrages stattfindet.

Zu Zeiten höherer Gebietsabflüsse im Frühjahr weichen die pH-Ganglinien der beiden Vergleichsgebiete P 14 und P 17 stärker voneinander ab als in den anderen Jahreszeiten. Im Frühjahr weist der oberflächennahe Abfluß vergleichsweise hohe Anteile am Gebietsabfluß auf. Aus dem Verlauf der pH-Jahresganglinien kann deshalb geschlossen werden, daß der Interflow (bzw. hier wegen der sehr geringen Überdeckung möglicherweise flaches Grundwasser) im Gebiet P 17 einen höheren Anteil am Gebietsabfluß ausmacht oder stärker versauert ist als im Laubwaldgebiet P 14. Daraus folgert wiederum ein höherer Protonenaustrag. Die im Gebiet P 17 vergleichsweise höchsten Q_{on}-Anteile am Gesamtabfluß Q_t (P 17: 38% 1985 und 46% 1986; P 14: 29% 1985 und 34% 1986, vgl. Kap. 5.4.3, Tab. 5-19) bestätigen das aus den pH-Werten abgeleitete Abflußverhalten.

Die pH-Mittelwerte blieben im Gebiet P 14 in

beiden Jahren unverändert bei 8,0. Im Gebiet P 17 lag der pH-Wert im abflußreichen Jahr 1986 mit 7,5 aufgrund des gestiegenen Anteils an stärker versauertem Wasser (Interflow, flaches Grundwasser) deutlich niedriger als im Durchschnittsjahr 1985 (pH = 7,75). Dies zeigt, daß der pH-Wert eines Vorfluters zwar von der Bestandesart eines Einzugsgebietes beeinflusst wird, der Protonenaustrag jedoch ganz erheblich von den Niederschlag-Abfluß-Verhältnissen und den Q_{on}/Q_t -Anteilen während eines Abflußjahres abhängig ist, und demzufolge von Jahr zu Jahr schwanken kann.

Die Höhen der Gesamtstoffausträge (Tab. 6-7) mit dem Gebietsabfluß aus den 4 kleineren Teileinzugsgebieten schwankten in den Jahren 1985 und 1986 um die von AGSTER (1986b) für den Meßzeitraum 1979-82 errechneten Mittelwerte. Die Frachtsummen des Durchschnittsjahres 1985 lagen durchweg etwas niedriger. Im großen westlichen Einzugsgebiet von P 1 waren die Schwankungsbreiten der Gesamtstoffausträge geringer, lagen jedoch 1985 und 1986 über dem Mittelwert der früheren Untersuchungsperiode. Gekoppelt an überdurchschnittlich hohe Gesamtabflüsse wurden für P 5/1 die höchsten Frachtsummen bestimmt.

Die NO_3 -N-Stofffrachten (NH_4 -N wird mit dem Vorfluter normalerweise nicht ausgetragen) sind, bezogen auf den Durchschnittswert von 1979-82, 1985 in fast allen Gebieten, teilweise sehr stark, gestiegen. Lediglich im Gebiet Bärloch (P 6) ergab sich ein leichter Rückgang (Tab. 6-8). Nur in diesem Gebiet und, wesentlich stärker, im Gebiet P 1 waren Anstiege des SO_4 -S-Austrages zu verzeichnen. In den übrigen Gebieten ist dagegen der SO_4 -S-Austrag etwas zurückgegangen.

Tab. 6-8: Änderungen der NO_3 -N und SO_4 -S-Stofffrachten zwischen den Mittelwerten der Jahre 1979-82 (umgerechnet nach AGSTER, 1986b) und dem Durchschnittsjahr 1985.

	Austrag 1985		Differenz zu 1979/82	
	SO_4 -S	NO_3 -N	SO_4 -S	NO_3 -N
	[kg/ha·a]			
P 6:	17,1	0,6	+1,8	-0,2
P 8:	15,1	1,2	-1,9	+0,5
P 14:	10,6	1,4	-0,7	+0,7
P 17:	13,1	2,3	-2,9	+0,4
P 1:	87,0	1,6	+22,7	+0,4

Auch der Austrag von NO_3 -N und SO_4 -S erfolgt während eines hydrologischen Jahres nicht gleichmäßig. Wie oben bei pH-Werten und Protonenaustrag diskutiert, verlaufen auch die Ganglinien der NO_3 - und SO_4 -Konzentrationen sinusförmig (Maxima im Frühjahr, Minima im Spätherbst) mit einer geringen Amplitude, wobei le-

diglich die Werte von einzelnen Hochwasserereignissen teilweise stark, jedoch nur sehr kurzfristig vom Jahresgang abweichen (vgl. auch Erläuterungen in Kap. 6.1.4 und Ganglinien von P 14 in Abb. 6-10 und 6-11).

Während die absolute Höhe der Stoffkonzentration im Vorfluter (neben geologischen Faktoren) wesentlich von der Baumartenzusammensetzung eines Einzugsgebietes mitbestimmt wird (vgl. Tab. 6-1, z.B. P 17 und P 14), ist der relative Verlauf des Stoffaustrages auch bei SO_4 und NO_3 von klimatischen Bedingungen und den Abflußverhältnissen (N-Q-Ereignissen), abhängig. Auch bei Nitrat und Sulfat fallen Konzentrationsmaxima und Zeiten hoher Gebietsabflüsse zusammen. In den Frühjahrsmonaten bei relativ hohen Interflow-Anteilen am Gesamtabfluß (vgl. Kap. 8.2), erfolgt der überwiegende Teil des Stoffaustrages.

Dabei wird der in der 2. Hälfte des hydrologischen Sommerhalbjahres im Boden angehäufte NO_3 -N mit zunehmendem Auftreten von Interflow (nach der Wiederbefeuchtung der Böden in den Wintermonaten) ausgewaschen (vgl. auch Kap. 6.1.4 und Abb. 6-11). Für SO_4 -S sind ähnliche Vorgänge im Hinblick auf die S-Ausschwemmung zu vermuten. Über die Deposition von Luftschadstoffen werden im Laufe der Zeit größere S-Mengen im Hauptwurzelraum akkumuliert (FISCHER und REHFUESS, 1988). Auch in den Beständen des Schönbuschs stehen teilweise ganz erhebliche S-Mengen für eine Auswaschung mit dem Sickerwasser oder Interflow aus dem Hauptwurzelraum zur Verfügung (FLEGR und MONN, 1990). Gemessen an den Austragungsraten mit den Vorflutern wurde allerdings bislang nur ein vergleichsweise kleiner Teil der akkumulierten Schwefelvorräte tatsächlich mobilisiert. Die Adsorptionsfähigkeit der Böden scheint daher für Schwefel noch nicht überschritten zu sein (FLEGR et al., 1989 und FLEGR, in Vorbereitung).

6.4 Stoffumsatz und -bilanz für Teileinzugsgebiete im Schönbusch

Die Haushaltsgrößen Stoffeintrag mit dem Bestandesniederschlag und -austrag mit dem Gebietsabfluß (Kap. 6.2 und 6.3) konnten für die beschriebenen Teileinzugsgebiete im Schönbusch meßtechnisch gut erfaßt und deshalb auch recht genau quantifiziert werden. (Tab. 6-5 bis 6-8, A-6-1, Anhang; Abb. 6-13). Im Zusammenhang sind die Ergebnisse der Berechnungen zum Stoffein- und -austrag der Tab. 6-6 zu entnehmen und in Abb. 6-14 veranschaulicht.

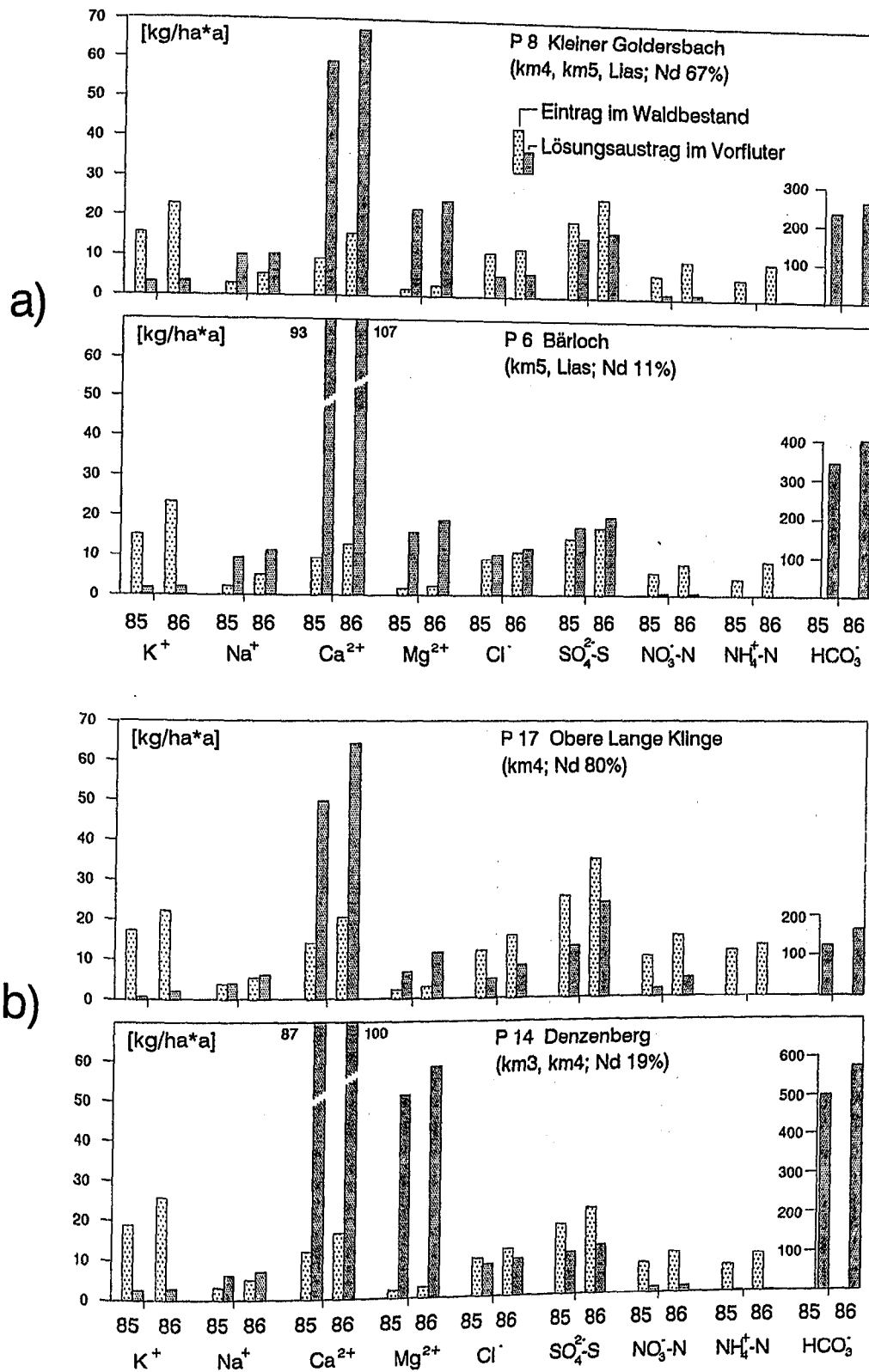
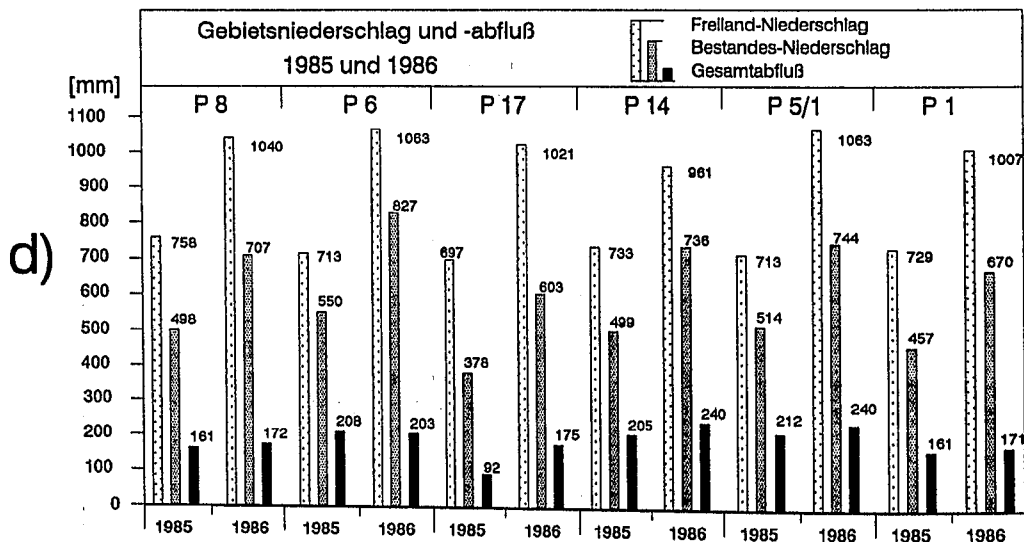
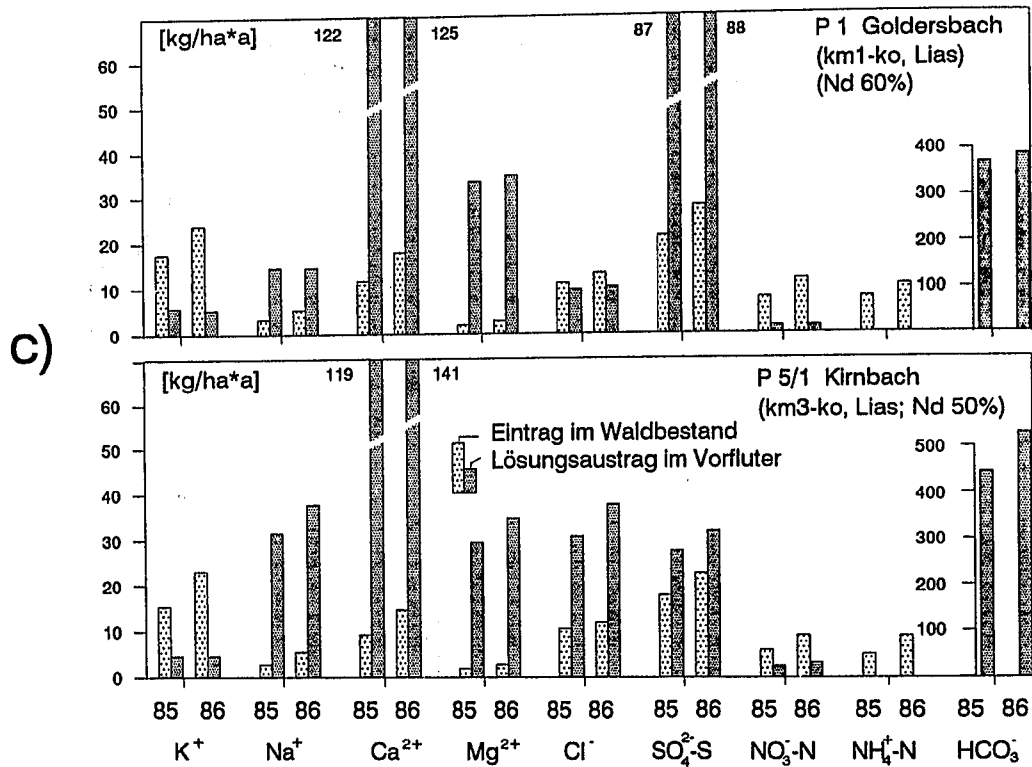


Abb. 6-14: a) Gebiete P 8 und P 6, b) Gebiete P 17 und P 14.

Abb. 6-14: Stoffumsatz in 4 kleineren Einzugsgebieten a) (km4-) km5-Lias-Gebiete P 8 (überwiegend Fichte) und P 6 (überwiegend Buche) und b) km4-Gebiete P 17 (überwiegend Fichte) und P 14 (überwiegend Buche) sowie c) P 6 (überwiegend Buche) und b) km4-Gebiete P 17 (überwiegend Fichte) und P 14 (überwiegend Buche) sowie c) P 6 (überwiegend Buche) und b) km4-Gebiete P 17 (überwiegend Fichte) und P 14 (überwiegend Buche) sowie d) Gebietsniederschlag- und Abflußhöhen.



Fortsetzung Abb. 6-14: c) Übergreifende, größere Gebiete P 1 und P 5/1 d) Gebietsniederschlag- und Abflußhöhen.

Ein einfacher Vergleich von Eintrags- und Austragsgrößen des Stoffhaushaltes eines Ökosystems ermöglicht nicht ohne weiteres Angaben zu den systeminternen Vorgängen. Mit Hilfe der Angaben von ULRICH et al. (1979), u.a. zum Nährstoffbedarf, läßt sich der Einfluß des Waldbestandes für einige Makroelemente abschätzen (vgl. dazu auch Abb. 6-13 und Tab. A-6-1 im Anhang).

Dem relativ hohen Kalium-Eintrag mit dem NB durch Pflanzenauswaschung steht ein nur geringer

Stoffaustrag mit dem Gebietsabfluß gegenüber. Der Kalium-Gebietsaustrag ist praktisch identisch mit der Deposition im Freiland (Tab. A-6-1, Anhang). 1985, das als durchschnittliches Abflußjahr mit den Mittelwerten des Meßzeitraumes 1979 - 1982 gut vergleichbar ist, besteht im Gebiet Denzenberg (P 14) sogar ein Defizit (d.h. kleinerer Austrag mit dem Vorfluter als Eintrag mit dem Freilandniederschlag), das auch für den früheren Untersuchungszeitraum (AGSTER, 1986b) festgestellt wurde. Ebenfalls defizitär ist die Kaliumbi-

lanz mittlerweile im Gebiet Obere Lange Klinge (P 17). Anscheinend reicht in diesen Stubensandstein-Gebieten der Eintrag mit dem NF für eine entsprechende Nährstoffversorgung nicht aus, so daß die Pflanzen auf die Nachlieferung aus der Silikatverwitterung in den Böden angewiesen sind.

Auch Calcium und Magnesium sind wichtige Pflanzennährstoffe, die je nach Baumart in Mengen von 16 - 20 kg/ha·a benötigt werden. Im Schönbuch ist in allen Gebieten ein hoher Austrag festzustellen, der ein Vielfaches des Eintrages ausmacht. Die karbonatischen Bindemittel des Stubensandsteins sowie die Kalkbänke und -sandsteine des Lias α liefern hier infolge der Lösungsverwitterung große Mengen nach, so daß auf die Erdalkalien und das in äquivalenten Mengen ausgetragene Hydrogenkarbonat im Durchschnitt weit über 90% des Gesamtstoffaustrages entfallen (Kap. 6.3, Tab. 6-7). Der Eintrag nur mit dem NF würde, unter Vernachlässigung der Interzeptionsdeposition (Staub), nicht für die Deckung des Nährstoffbedarfs von Pflanzen ausreichen.

Natrium und Chlorid werden über den Niederschlag oder lokale anthropogene Immissionen nur in vergleichsweise kleinen Mengen eingetragen. Als Pflanzennährstoff werden sie in nur geringem Umfang benötigt, so daß dem Eintrag ein Austrag in derselben Größenordnung gegenübersteht. Dabei ist der Natrium-Austrag mit dem Gebietsabfluß bei allen Gebieten leicht erhöht, in den Lias-Gebieten P 6 und P 8 relativ stärker als in den Stubensandstein-Gebieten. Dies wird auf den Einfluß des geogenen Lösungsastrages zurückgeführt. Aufgrund des Einsatzes von Streusalz, verhält sich der Na-Austrag im Gebiet P 5/1 extrem abweichend. Chlorid wird außer in den Gebieten Bärloch (P 6) und Kirnbach (P 5/1) dagegen tendenziell weniger ausgetragen, wobei das Chlorid in einer Menge von ca. 2 kg/ha·a etwas stärker benötigt wird als das Natrium mit 0,8 - 1,0 kg/ha·a. Somit kann der Pflanzenbedarf für beide Elemente rein rechnerisch voll aus dem atmosphärischen Eintrag gedeckt werden.

Im Rahmen der Untersuchungen der vorangegangenen Meßperiode 1979 - 1982 wurde festgestellt, daß die Sulfat- und Nitratausträge im Mittel deutlich unter den jeweiligen Einträgen liegen. Dem Umsatz dieser Komponenten galt besondere Beachtung. Die Nitrat- und Ammonium-Stickstoff-Einträge in den Schönbuch variieren räumlich und bestandesabhängig stark und betragen pro Jahr zwischen 10 kg/ha·a (P 6) und 22 kg/ha·a (P 17). Dabei ist zu berücksichtigen, daß der organisch gebundene Stickstoff darin nicht enthalten ist, der nach ULRICH et al. (1979) in den Waldbeständen des Sollings etwa 30% des Gesamtstickstoffeintrages ausmacht. Überträgt man diese

Vorstellung auf den Schönbuch, so beläuft sich die Gesamt-N-Deposition auf Raten zwischen 14 und 31 kg N/ha·a. Diesem Eintrag steht ein Nährstoffbedarf von 12 - 13 kg/ha·a gegenüber.

Der Stickstoffbedarf der Waldbestände des Schönbuchs kann also ganz aus dem atmosphärischen Eintrag gedeckt werden. Abzüglich der Menge, die mit dem Vorfluter das Gebiet verläßt, verbleibt ein Überschuß, der i.d.R. zwischen 0,6 und 2,2 kg N/ha·a, im Gebiet Obere Lange Klinge (P 17) sogar bei ca. 17 kg N/ha·a beträgt. Die Höhe dieses Überschusses ist im Schönbuch eng mit dem Nadelwaldanteil der Waldbestände des jeweiligen Teileinzugsgebiets einerseits und der örtlichen Belastungssituation aus dem Schadstoffeintrag andererseits verknüpft, die sich hier von Ost nach West verstärkt. Die überschüssigen Stickstoffmengen werden im Boden "angereichert", was zu entsprechend erhöhten Konzentrationen im Sickerwasser bis zu 324 mg NO₃/l (Fichten-Testfläche S 3, Obere Lange Klinge, Gebiet P 17) führt. In niederschlagsreichen Jahren wie 1986 wird ein Teil dieses gespeicherten Stickstoffs mit dem oberflächennahen Abfluß wieder aus dem Boden ausgeschwemmt (vgl. Winterhalbjahr 1986, Abb. A-6-4 im Anhang und Daten in Tab. 6-6). (Vgl. auch NO₃-reiche Sickerwässer der Fichtentestfläche S 1 (Schlagbaumlinde (Abb. 6-2) und hoher Anteil der über Interflow ausgetragenen NO₃-Menge (Kap. 8.6, Abb. 8-17).

Dabei steigt der N-Austrag relativ zum Eintrag im Gebiet Obere Lange Klinge (P 17) stark an, während es in den anderen Gebieten, in deren Böden nur sehr kleine überschüssige Stickstoffmengen gespeichert sind, eher zu einer relativen Abnahme kommt (Tab. 6-9). Daß es insgesamt noch nicht zu stärkeren Steigerungen des Stickstoffaustrags an den Pegelmeßstellen der Gebiete mit hohen N-Überschüssen kommt (Beispiel NO₃-N-Austrag im Gebiet P 17: ϕ 1979-82: 1,9; 1985: 2,3; 1986 (bei überdurchschnittlichen Gebietsabflüssen): 5,0 kg N/ha·a), mag an entsprechenden Verzögerungseffekten und Verweilzeiten liegen.

Schwefel wird von den Waldbeständen in einer Menge von 1,1 - 1,4 kg/ha·a gebraucht. Wie bei Stickstoff gilt auch hier, daß dieser Bedarf allein aus dem Eintrag mit der Niederschlagsdeposition gedeckt werden kann. Wegen des großen Filtereffektes der Nadelbäume sind diese jedoch durch hohe Schwefeleinträge belastet, was vor allem für den Westen des Schönbuchs zutrifft. Auch bei Schwefel wird ein Teil des Überschusses aus dem atmosphärischen Eintrag im Gebiet deponiert.

Da die Schwefelbilanz durch einen geogenen Anteil am Stoffaustrag in den Teilgebieten Bärloch (P 6), Großer und Kleiner Goldersbach (P 1, P 8) sowie Kirnbach (P 5/1) beeinflusst wird, kann

Tab. 6-9: Austrag von Sulfat-Schwefel (S) und Gesamt-Stickstoff ohne N_{org} (N) mit der Vorflut in Prozent der jeweils mit dem Bestandesniederschlag eingetragenen Stoffmengen für die Teileinzugsgebiete im Schönbuch.

	P 6		P 8		P 14		P 17		P 1		P 5/1	
	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N
	----- Austrag/Eintrag (%) -----											
1985	120	7	78	11	60	10	51	10	408	10	155	22
1986	118	4	66	7	57	8	69	17	315	7	141	17
φ 1985/86	119	5	72	9	58	9	60	14	362	9	148	20

diese Speicherung nur in den reinen Stubensandsteingebieten gut beobachtet werden.

Im Einzugsgebiet Denzenberg (P 14) kommt es unter Berücksichtigung des Pflanzenbedarfs zu einem Schwefelüberschuß von etwa 2,5 - 3 kg/ha·a, im Gebiet Obere Lange Klinge (P 17) sogar von rund 8,0 kg/ha·a. Durch vermehrten Austrag über flaches Grundwasser oder oberflächennahen Abfluß in niederschlagsreichen Zeiten wird dann verstärkt dieser zwischengespeicherte Schwefel ausgetragen (Tab. 6-9). Vermutlich findet auch in den östlichen Gebieten des Schönbuchs eine, hier allerdings nur geringe, Speicherung des Schwefels statt. Dies läßt sich jedoch anhand der einfachen Bilanzierung nicht feststellen, da mit zunehmendem Lias α -Anteil am geologischen Bau des Einzugsgebietes auch mehr geogener Schwefel aus der Pyritverwitterung hinzukommt. Daher ergibt sich rein rechnerisch und ungeachtet der unterschiedlichen Herkunft der Schwefelkomponente im Gebiet Bärloch (P 6) (Lias-Anteil rund 95%), ein größerer Austrag als Eintrag. Im Gebiet Kleiner Goldersbach (P 8) (Lias-Anteil 28%), ist eine praktisch ausgeglichene Bilanz festzustellen, sofern man den Pflanzenbedarf mitberücksichtigt.

Auch die beiden großen Einzugsgebiete Großer Goldersbach (P 1) und Kirnbach (P 5/1) weisen eine negative Schwefelbilanz aufgrund von geogenen Sulfatanteilen im Stoffaustrag auf.

Von den 4 kleineren Teilgebieten weist nur das Gebiet Bärloch (P 6) eine negative Schwefelbilanz auf, was im Vergleich zu den Meßergebnissen aus dem Zeitraum 1979 - 1982 (damals etwa ausgeglichene Bilanz) nicht als "Trendwende" interpretiert werden sollte. Jährliche Schwankungen im Stoffeintrag mit dem NB infolge unterschiedlicher Niederschlagsmengen verschieben auch bei insgesamt gleichbleibender Belastung der Atmosphäre mit anthropogenen Schadstoffen die Bilanz in wechselnde Richtungen und sind deshalb kein Indiz für steigende oder sinkende Luftverschmutzung. Tatsächliche Tendenzen lassen sich nur aus mehrjährigen Meßreihen ableiten. Eine genauere

Interpretation des Schwefelumsatzes im Gebiet P 6 findet sich bei FLEGR et al. (1989).

Der Eintrag von Luftschadstoffen wie NO_x und SO_2 bzw. HNO_3 und H_2SO_4 bedeutet stets auch Protoneneintrag, wovon die beiden fichtenwaldbetonten Gebiete P 8 und P 17 stärker betroffen sind. Allgemein erscheint auf der Austragsseite nur ein minimaler Bruchteil der eingetragenen Protonenmenge, was auf die Abpufferung im Boden und im tieferen Untergrund zurückgeht. Das heißt jedoch nicht, daß es in der ungesättigten Bodenzone bzw. dem Wurzelraum der Waldbestände nicht zu einer Versauerung kommen kann. Besonders die basen-armen, da bereits weitgehend ausgelaugten Böden des Stubensandsteins sind hiervon betroffen.

Die Ergebnisse der 1985 und 1986 durchgeführten Bilanzuntersuchungen sind, bezogen auf die hier vorgestellten Aspekte, wie folgt zusammenzufassen:

An den untersuchten Standorten bzw. in den Teileinzugsgebieten des Schönbuchs setzte sich der Trend zunehmender SO_4 - und N-Einträge im Freiland und im Bestand fort. Es konnte ein von W nach E gerichtetes Depositionsgefälle, auch H^+ betreffend, festgestellt werden. Der Gesamtdeposition an Protonen entspricht im wesentlichen eine Pufferung im Kronenraum. Die Pufferraten sind abhängig von der Dauer der Belaubung. Beteiligt an der Pufferung sind besonders Kalium in den Buchenbeständen, Calcium in den Fichten- (dort sogar Mangan) und Magnesium in den Buchenbeständen. Im Vergleich zu den Daten aus dem Soliling (ELLENBERG et al., 1986) kann der Schönbuch im untersuchten Zeitraum als gering immisionsbelastet gelten.

Die Bilanzen für die Einzugsgebiete sind bei Schwefel bestimmt durch eine Speicherung in den Böden, im Osten mehr als im Westen. Wegen der Mobilisierung von geogenem Sulfat aus den Gesteinsschichten, v.a. im Osten, sind auch die Schwefel-Austräge mit den Vorflutern, gemessen

an der Schwefel-Deposition, höher.

Bei Stickstoff werden die Bilanzen durch Speicherung im Zuwachs der Bestände bestimmt. Bei Betrachtung nur der Stickstoff-Immissionen ($\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$) in den Teileinzugsgebieten sind die Bilanzen nahezu ausgeglichen. In einem überwiegend mit Fichte bestandenen Gebiet ist eine

negative Boden- bei dadurch positiver Gesteinsbilanz mit "Überschußnitrifikation" zu erklären.

Der Einfluß von Interflow bei der Auswaschung von SO_4 und NO_3 aus den Böden war bei den Bilanzuntersuchungen deutlich erkennbar. Daraus leitete sich der Bedarf ab, den IF quantitativ über das Jahr hinweg zu erfassen und seine Lösungsfracht zu bestimmen (Kap. 8-6).

7. Charakterisierung der Wasserhaushaltskomponenten und spezielle Analyse der Abflußbildung durch Sauerstoff-18 ($\delta^{18}\text{O}$)

In Kap. 2 wurde ein Überblick über den Einsatz von Tracern bei Komponentenseparationen gegeben. Der Gesamtabfluß bzw. einzelne Abflußteile (z.B. Niederschlagswasser, Bodenwasser oder Quellwasser) können in einzelne Komponenten getrennt werden, um z.B. den Interflow (mit seinen Abflußteilen) und den Grundwasserabfluß quantitativ zu bestimmen. Über die Anwendung des Exponentialmodells können durch Vergleich der allgemein sinusförmigen $\delta^{18}\text{O}$ -Jahresganglinien des Niederschlags und des Abflusses (bzw. des Bodenwassers) mittlere Verweilzeiten der einzelnen Wasserhaushaltskomponenten ermittelt werden.

Das Umweltisotop ^{18}O stellt als atomarer Bestandteil des Wassermoleküls einen idealen Tracer mit konservativem Verhalten dar. Der ^{18}O -Gehalt wird als relative Abweichung vom Internationalen Standard (V-SMOW, Standard Mean Ocean Water, Vienna) angegeben:

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{R_{\text{Probe}}}{R_{\text{Standard}}} - 1 \right) \cdot 1000 \text{ (‰)}$$

Dabei ist R das Isotopenverhältnis von $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ für Probe bzw. Standard. Die Meßgenauigkeit wird allgemein mit ca. $\pm 0,10\text{‰}$ angegeben. Die Gehalte dieser Isotope im Niederschlagswasser zeigen aufgrund temperaturabhängiger Fraktionierungseffekte prinzipiell einen sinusförmigen Jahresgang mit höheren ^{18}O -Konzentrationen (größere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte) im Sommer und geringeren im Winter. Die Isotopengehalte in Einzelniederschlägen können jedoch stark variieren. Die Grundwässer weisen je nach Verweilzeit einen, gegenüber dem der Niederschläge, gedämpften Jahresgang auf. Für Ganglinienseparationen bei einzelnen Abflußerhöhungen ist u.a. eine deutlich unterschiedliche Markierung der zu trennenden Komponenten erforderlich. (Eine grundlegende Einführung in die Isotopenhydrogeologie, ihre Meßverfahren und Anwendung geben MOSER und RAUERT, 1980).

Für die hier vorgestellten Untersuchungen wurden ab Mai 1984 bis Ende 1986 Messungen des ^{18}O -Gehalts in Niederschlägen, Quellen und Vorflutern vorgenommen. Ab September 1984 bis Juni 1986 wurden auch Sickerwässer durchgehend beprobt. Da bei der Kronenraumpassage des Niederschlags Fraktionierungseffekte durch Interzeption möglich sind (vgl. Kap. 2), wurden die Bestimmungen des $\delta^{18}\text{O}$ -Inputs für die bewaldeten Einzugsgebiete in NB-Proben (Bestandesniederschlag) durchgeführt. Auf vorausgegangene Unter-

suchungen zur Abflußseparationen mit $\delta^{18}\text{O}$ (KÖRNER et al., 1986) konnte Bezug genommen werden.

7.1 $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Niederschlag

Abb. 7-1 (oben) zeigt die $\delta^{18}\text{O}$ -Monatsmittelwerte (aus ca. 250 Einzelproben, gewichtet mit der Niederschlagshöhe) der 4 zu den Versuchsflächen S 1 - S 4 gehörenden Meßstationen (Kap. 4.3). Die Ganglinien verlaufen gleichsinnig mit Abweichungen der Monatswerte bis zu $2,4\text{‰}$. Die Kurven beschreiben den typischen sinusförmigen Jahresgang mit Maxima im Sommer und Minima im Winter. Besonders stark an ^{18}O abgereichert sind die Schneeniederschläge im März 1985 und Februar 1986. Gegenüber 1984 fallen die sehr ^{18}O -reichen Sommerniederschläge von 1985 auf. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Extremwerte liegen bei $-5,99\text{‰}$ und $-3,55\text{‰}$ (August 1984 bzw. Oktober 1985, S 1) und $-19,56\text{‰}$ bzw. $-19,05\text{‰}$ (März 1985, S 3 bzw. Feb. 1986, S 4). Die Daten einer halbjährigen Meßreihe von 1981 (KÖRNER, 1983) stimmen mit dem entsprechenden Kurvenabschnitt von 1984 sehr gut überein (Abb. 7.1).

Die stark an ^{18}O abgereicherten Winterniederschläge oder die im Oktober 1985 untypisch ^{18}O -reichen Niederschläge verwischen den sonst gut erkennbaren sinusförmigen Jahresgang der Isotopen-Input-Funktionen (Abb. 7-1). Die noch stärkeren Schwankungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte einzelner Niederschlagsproben (vgl. Darstellung von N-Q-Ereignissen, Kap. 8.5f.) werden durch die Bildung von gewichteten Monatsmitteln ausgeglichen. Ohne gleichwertige Berücksichtigung der extremen ^{18}O -Gehalte von nur sehr geringen Schneeniederschlägen im März 1985 und Februar 1986, bzw. geringer Regenfälle im Oktober 1985 beträgt die mittlere Schwankungsbreite der Niederschlags-Monatsmittelwerte (Input Funktion) ca. 10‰ .

Eine möglicher, auch von der Niederschlagshöhe gesteuerter Einfluß der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Sicker- und Grundwasser wird durch eine kombinierte Darstellung von $\delta^{18}\text{O}$ -Monatsmittelwerten und Niederschlagshöhen veranschaulicht (Ganglinien der einzelnen Meßstationen (Kap. 7.3.1.1 - 7.3.1.4, Abb. 7-2 bis 7-5).

7.2 $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Sickerwasser und Interflow

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Sickerwassers (Output Funktion) beschreiben als Abbild der Input Funktion einen sinusförmigen Verlauf mit einer mehr oder weniger stark gedämpften Amplitude und einer

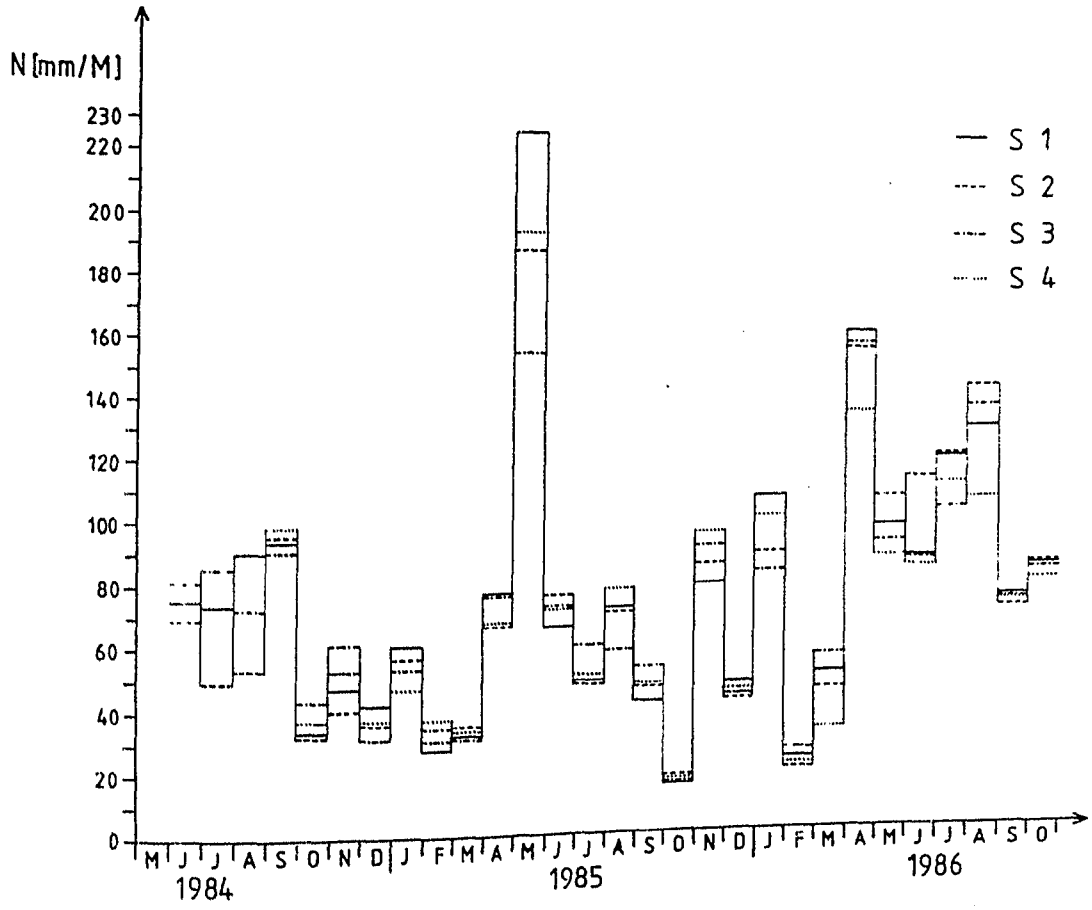
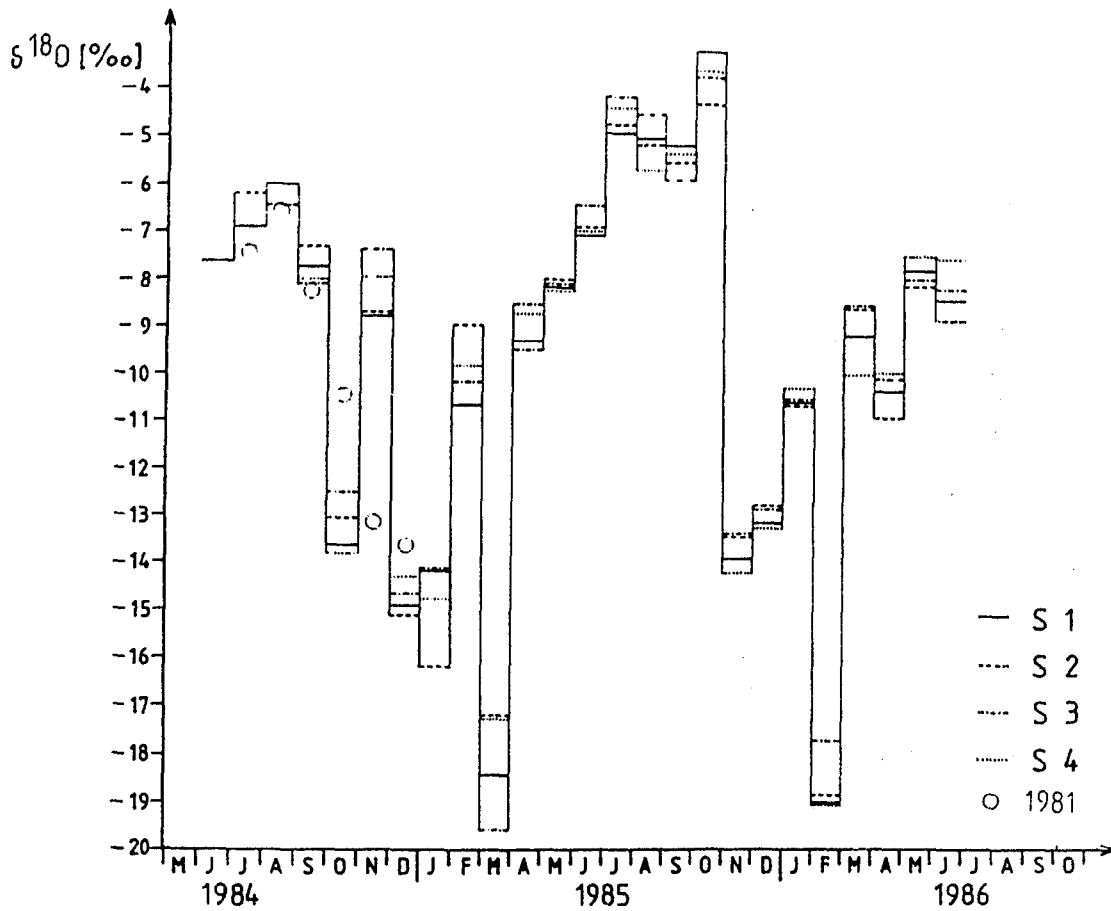


Abb. 7-1: $\delta^{18}\text{O}$ -Monatsmittelwerte der Bestandesniederschläge (oben) und monatliche Niederschlagshöhen (unten) von 4 Versuchsflächen (S 1 - S 4).

Phasenverschiebung. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Monatsmittelwerte der Sickerwässer (Durchschnitt der mit der gewonnenen Wassermenge gewichteten Einzelproben) und der zugehörigen Niederschläge sind in Abb. 7-2 bis 7-5 dargestellt.

Die in kürzeren zeitlichen Intervallen durchgeführten $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen des Sickerwassers während der Schneeschmelze, Anfang Februar 1985 (genaue Ausführungen in Kap. 8.5.2.1) haben im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen zum ersten Mal deutlich gemacht, daß älteres, schon vor dem Ereignis im Boden gespeichertes Wasser durch das versickernde aktuelle Niederschlags- und Schmelzwasser mobilisiert und teilweise verdrängt wird. BLUME et al. (1966) konnten diesen Effekt in einer Löß-Parabraunerde mit Tritium nachweisen. Auch detaillierte, langjährige Untersuchungen von STICHLER et al. (1984) in einem Sandlysimeter belegen diesen Vorgang.

Die Untersuchungen von BLUME et al. (l.c.) ergaben, daß ein Vordringen des Niederschlagswassers ohne vollständiges Verdrängen älteren Bodenwassers insbesondere bei Starkregen möglich ist, wenn der Niederschlag in Größtporen nach unten dringen kann und wenn "nach längeren Trockenperioden an den Oberflächen humoser Aggregate infolge sorbierter Luft Benetzungswiderstände auftreten, die eine Durchfeuchtung der Aggregate verhindern". Dabei kann rasches Sickerwasser über Klüfte zwischen den noch geschrumpften Polyedern vordringen und auf diese Weise auch Tonbeläge an den Aggregatoberflächen ausbilden. Ein ähnlicher Effekt auf die Abflußbildung kann von einer Wasserbewegung in Grabgängen und Wurzelbahnen auch bei höherer Bodenfeuchte ausgehen (vgl. Kap. 2).

Neben der in Sickerplatten beprobten vertikalen Komponente muß der auf tongründigen Böden auftretende Interflow berücksichtigt werden. Messungen des im Deckschutt (Kap. 2.3, 3.3), bevorzugt in 30 - 60 cm abfließenden Interflow haben ergeben, daß besonders in den feuchten Winter- und Frühjahrsmonaten eine Verdrängung älteren Bodenwassers, in den trockeneren Sommermonaten dagegen ein, dann sehr geringer Abfluß des aktuellen Niederschlagswassers dominiert (vgl. Kap. 7.3.1.2 Gebiet Bärloch und 7.3.1.4 Gebiet Denzenberg).

Detaillierte Ausführungen zu den Interflow-Messungen sind dem Kap. 8f. und der Besprechung von Einzelereignissen in verschiedenen Teilgebieten (Kap. 8.5f.) zu entnehmen. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien der Sickerwässer und des Interflow werden in Zusammenhang mit der Abschätzung der mittleren Verweilzeit in den Kap. 7.3.1.1 - 7.3.1.4 erläutert. Es ist darauf hinzuweisen, daß die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Sickerwässer zu

Beginn des Meßzeitraums (November und Dezember 1984) z.T. durch das beim Einbau der Plattenlysimeter verwendete Wasser (ca. -12‰) beeinflusst sind (vgl. z.B. Abb. 7.3, Profil S 2-1).

7.3 Sickergeschwindigkeit und Grundwasserneubildung aus Sauerstoffisotopen-Messungen

Neben anderen herkömmlichen Verfahren (vgl. Kap. 5.4.3) kann die Grundwasser(GW)-Neubildung auch direkt über die Bestimmung der Sickeraten unter der durchwurzelten Bodenzone abgeschätzt werden. Damit läßt sich auch der Stoffaustausch mit dem Sickerwasser ermitteln (FLEGR et al., 1989).

Das stabile Sauerstoffisotop ^{18}O ist als Tracer für die Wasserbewegungen in der ungesättigten Bodenzone sehr gut geeignet, da es einen Bestandteil des Wassermoleküls selbst bildet. Störende Mechanismen wie Dispersion und Adsorption, wie sie z.B. bei Markierungsstoffen oder bei Salzen bestehen, können ausgeschlossen werden. Ferner von Vorteil sind der flächenhafte Eintrag sowie eine Passage durch die Bodenzone, die nicht durch chemische Prozesse (wie z.B. pH-Wert-Empfindlichkeit von Uranin) beeinträchtigt wird.

Die Markierung einzelner Niederschlagsereignisse mit deutlich voneinander abweichenden ^{18}O -gehalten erlaubt es, dieses Niederschlagswasser während der Bodenpassage zu verfolgen und seinen Anteil im gesamten Bodenwasser oder Gesamtabfluß zu ermitteln (Kap. 8.5f.). Im größeren zeitlichen Rahmen können bei einer ausreichend dichten und kontinuierlichen Beprobung aus dem Vergleich der jährlichen Schwankungsbreiten der Isotopengehalte im Niederschlags- und Sickerwasser mittlere Verweilzeiten (MVZ, Kap. 7.3.1), Sickergeschwindigkeiten und näherungsweise die GW-Neubildung (Kap. 7.3.2) bestimmt werden.

In mehreren Isotopenstudien in Einzugsgebieten Mitteleuropas wurden mittlere Verweilzeiten des "indirekt" abfließenden Wassers aus der Variation der Isotopengehalte im Niederschlag und im Vorfluter abgeschätzt (DINCER et al., 1970; MARTINEC et al., 1974; BEHRENS et al., 1979; MALOSZEWSKI et al., 1974; MALOSZEWSKI et al., 1983). Die berechneten MVZ lagen allgemein zwischen 2 und 4 Jahren. Diese Berechnungen wurden in der Regel mit dem Exponentialmodell (EM) durchgeführt und geben im wesentlichen die MVZ des Grundwassers wieder. Im folgenden Kapitel (7.3.1) wird das EM auf Bodenwasser bis ca. 1 m Tiefe angewendet.

7.3.1 Abschätzung der mittleren Verweilzeit des Sickerwassers

Das Exponentialmodell (EM) geht von der Annahme aus, daß sich das abfließende Wasser aus verschiedenen alten Niederschlagswässern zusammensetzt, wobei der Anteil der Wässer aus früheren Zeiträumen an dem gesamten Abfluß mit zunehmendem Alter gesetzmäßig abnimmt. Ein Sickerwasser mit einer MVZ von z.B. 10 Monaten besteht demnach aus 9 Prozentanteilen Niederschlägen des Vormonats, 3,7 Prozentanteilen 10 Monate alter Niederschläge und noch 0,5 Prozentanteilen 30 Monate alter Niederschläge.

Setzt man vereinfachend den Isotopengehalt des Niederschlags (input) als Sinuskurve mit einer Periodizität von einem Jahr an, so ergibt sich bei Gültigkeit des EM ebenfalls eine Sinuskurve für den Isotopengehalt des Sickerwassers (output), jedoch mit veränderter Amplitude und einer Phasenverschiebung (z.B. MALOSZEWSKI & ZUBER, 1982). Die Verweilzeit kann aus der Amplitudendämpfung abgeschätzt werden. Für die mittlere Verweilzeit (T, in Jahren) gilt:

$$T = (2\pi)^{-1} \cdot (f^2 - 1)^{1/2}$$

wobei f dem Verhältnis der Amplituden von Output- zu Input-Funktion (A_{out}/A_{in}) entspricht (vgl. z.B. STICHLER & HERRMANN, 1985).

In Tab. 7-1 sind die $\delta^{18}\text{O}$ -Extremwerte (gewichtete Monatsmittelwerte) der aus verschiedenen Bodenprofilen und -tiefen entnommenen Sickerwasserproben zusammengestellt. Die f-Werte schwanken zwischen 0,46 (S 4-1: 40 cm) und 0,02 (S 1-1 90 cm) woraus sich mittlere Verweilzeiten von knapp 4 Monaten bis zu 3 oder mehr Jahren ergeben. Eine Sonderstellung nimmt das Profil S 4-3 (Denzenberg) ein, das sehr nahe an einem Baumstamm angelegt wurde. Zumindest in 40 cm wurde dort teilweise Stammablaufwasser bzw. rasch über Wurzelbahnen abfließendes Niederschlagswasser beprobt, wie die große, dem Interflow ähnliche $\delta^{18}\text{O}$ -Schwankung und die geringe MVZ von 0,1 Jahren zeigt (vgl. auch Abb. 7-5).

Der Einsatz von $\delta^{18}\text{O}$ als Tracer läßt nur Bestimmungen der MVZ bis zu ca. 3 Jahren zu, da sich die gedämpfte Amplitude der output-Funktion dann im Schwankungsbereich der Meßgenauigkeit bewegt. Zum jahreszeitlichen Verlauf der Monatswerte und zur MVZ der verschiedenen Sickerwässer vgl. Kap. 7.3.1.1 bis 7.3.1.4 und Abb. 7-2 bis 7-5.

7.3.1.1 Gebiet S 1 Schlagbaumlinde

In Abb. 7-2 sind für das Gebiet Schlagbaumlinde die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Niederschlags (mit Kennzeichnung der Niederschlagsmenge) und die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Sickerwässer (aufgefangen mit Plattenlysimetern, keramische Platte P 80, Kap. 3) als mit der aufgefangenen Wassermenge gewichtete Monatsmittel dargestellt. Zusätzlich sind in den Graphiken des Niederschlags und des Profils S 1-2 die $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinie des Interflow, Monatsmittelwerte wie oben, dargestellt. (Die Messungen des Interflow beruhen in diesem Gebiet nur auf wenigen, Einzelmessungen an kleineren Aufgrabungen und Hangkanten.) Alle Ganglinien der Sickerwässer zeigen eine saisonale Schwankung, die gegenüber der des Niederschlags in den flacheren Sickerwässern (30 cm) deutlich, in den tieferen (60 und 90 cm) sehr stark gedämpft und phasenverschoben ist (Profile S 1-1 und S 1-2).

Die mit zunehmender Tiefe abnehmende Schwankungsbreite der $\delta^{18}\text{O}$ -Monatswerte bewegt sich im Profil S 1-1 in 90 cm nur noch im Rahmen der Meßgenauigkeit. In den Sommer- und Herbstmonaten konnte in den Profilen S 1-1 und S 1-2 kein Wasser gewonnen werden. Deutlich wird die länger andauernde Wasserbewegung in 90 cm (S 1-1) bzw. in 105 cm Tiefe (S 1-2) im Sommer 1985 und die nach dem Ende der Vegetationsperiode raschere Bodenfeuchtezunahme im oberen Profilverbereich (Wassergewinnung in den 30 cm-Platten ab Dezember 1985). Im Profil S 1-3 (Abb. 7-2 c), an einer Hangkante knapp über einem flachen Quellhorizont gelegen, muß mit einem permanenten Zustrom eines flachen Grundwassers gerechnet werden, da diese Platte während der gesamten Meßperiode nie trockenfiel. Ein ähnlicher Verlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien der in diesem Geländeteil zutage tretenden flachen Quellen bestätigt dies (Beispiel Q 6b, Kap. 5.1.5.1, Abb. 5.6).

Wie aus der Graphik in Abb. 7-2 a) ersichtlich, waren die ^{18}O -Gehalte im Interflow im November 1985 und Februar 1986 sowie im Januar 1986 dem Niederschlag sehr ähnlich (Wasserbewegung über Kleinklüfte von noch geschrumpften Polyedern). Sie wichen erst nach der Schneeschmelze bzw. starken Frühjahrsniederschlägen, infolge sehr hoher Bodenfeuchte (teilweise Wassersättigung) und einer Wasserbewegung über Verdrängung und langsame Durchmischung im April/Mai 1985 und März 1986, von der Niederschlagskurve ab (vgl. auch $\delta^{18}\text{O}$ -Monatsmittelwerte des Interflow, Meßstelle Denzenberg, die auf einer wesentlich höheren Probenanzahl basieren, Kap. 7.3.1.4).

Der geschilderte Effekt kann aus der vergleichenden Darstellung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Interflow und des Sickerwassers im Profil S 1-2 (Abb. 7-2c)

Tab. 7-1: Minima und Maxima der gewichteten $\delta^{18}\text{O}$ -Monatsmittelwerte von Sickerwasserproben aus verschiedenen Tiefen und Bodentypen der 4 Testflächen sowie nach dem EM abgeschätzte mittlere Verweilzeiten (MVZ). f-Wert: Amplitudendämpfung, Verhältnis der Amplituden der $\delta^{18}\text{O}$ -Sinuskurven von Sickerwasser und Niederschlag.

Versuchsfläche Bodentyp	Meß- stelle	Tiefe	$\delta^{18}\text{O}$		f-Wert	MVZ Jahre
			Minimum (‰)	Maximum (‰)		
Schlagbaumlinde Pseudogley	S 1-1	30 cm	- 9,72	- 7,63	0,24	0,66
	S 1-1	60 cm	- 9,23	- 8,65	0,06	2,74
	S 1-1	90 cm	- 9,36	- 9,16	0,02	>3,00
Schlagbaumlinde Braunerde	S 1-2	30 cm	-11,25	- 8,37	0,29	0,53
	S 1-2	60 cm	-10,60	- 9,33	0,13	1,24
	S 1-2	105 cm	- 9,61	- 9,00	0,06	2,61
Schlagbaumlinde Podsol	S 1-3	75 cm	-10,40	- 9,00	0,14	1,13
Bärloch Pseudogley- Parabraunerde	S 2-1	30 cm	-11,38	- 9,18	0,22	0,71
	S 2-1	60 cm	-10,63	- 9,72	0,09	1,74
	S 2-1	90 cm	-10,91	- 9,32	0,16	0,99
Bärloch Pseudogley- Parabraunerde	S 2-2	30 cm	-11,44	- 8,48	0,30	0,51
	S 2-2	60 cm	-10,47	- 9,55	0,09	1,74
	S 2-2	90 cm	-10,66	- 9,28	0,14	1,14
Obere Lange Klinge Braunerde- Parabraunerde	S 3-2	25 cm	-11,73	- 8,97	0,28	0,55
	S 3-2	40 cm	-11,20	- 9,06	0,21	0,73
Obere Lange Klinge Braunerde- Parabraunerde	S 3-3	25 cm	-10,40	- 8,08	0,23	0,67
	S 3-3	60 cm	-10,16	- 8,64	0,17	0,92
Denzenberg podsol. Braunerde	S 4-1	40 cm	-12,63	- 8,04	0,46	0,31
	S 4-1	60 cm	-10,86	- 9,17	0,17	0,93
Denzenberg pseudovergleyte Braunerde	S 4-2	25 cm	-12,23	- 7,69	0,45	0,31
	S 4-2	40 cm	-11,64	- 8,03	0,36	0,41
	S 4-2	60 cm	-11,21	- 9,11	0,21	0,74
Denzenberg Parabraunerde	S 4-3	40 cm	-16,14	- 7,77	0,84	0,10
	S 4-3	60 cm	-11,01	- 8,55	0,25	0,63
	S 4-3	90 cm	-10,77	- 8,77	0,20	0,78

f-Wert: Amplitudenverhältnis der Output/Input-Variation ($A_{\text{out}}/A_{\text{in}}$)

abgelesen werden. Das langsamere Sickerwasser ist im Winterhalbjahr 1985 deutlich vom schnellen, niederschlagsähnlichen Interflow zu unterscheiden, gleicht sich aber in den Monaten April und Mai mit zunehmender Durchfeuchtung und Durchmischung an das Sickerwasser an. Der gleiche Vorgang ist auch 1986 in den Monaten März und April zu erkennen, wobei hier zusätzlich die Übereinstimmung der Sickerwässer von 30 und 60 cm mit dem Interflow erkennbar wird.

Nach dem EM weisen die Sickerwässer in 30 cm (Profile 1 und 2) eine MVZ von ca. 6 - 8 Monaten auf. Das aus größeren Tiefen gewonnene Wasser unterscheidet sich bei beiden Profilen deutlich. Im Profil 1 findet wegen der starken Abnahme des Grobporenraums (Abb. 3-2) kaum noch eine Wasserbewegung statt. Es muß hier von

einer MVZ von über 3 Jahren ausgegangen werden, während im Profil 2 ca. 15 Monate in 60 cm und ca. 2,5 Jahre in 105 cm Tiefe ermittelt wurden. Das aus 75 cm im vergleichsweise gut durchlässigen Podsol-Profil S 1-3 beprobte Wasser ergab eine MVZ von etwas mehr als einem Jahr.

Die MVZ des Interflow kann nach der Schwankungsbreite der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte auf ca. 0,6 Jahre abgeschätzt werden. Diese Altersangabe stellt einen Höchstwert dar, da ein bei sommerlicher Trockenheit teilweise direkt als Interflow abfließender Niederschlag hier nicht beprobt werden konnte (vgl. dazu Interflow im Gebiet Denzenberg, Kap. 7.3.1.4).

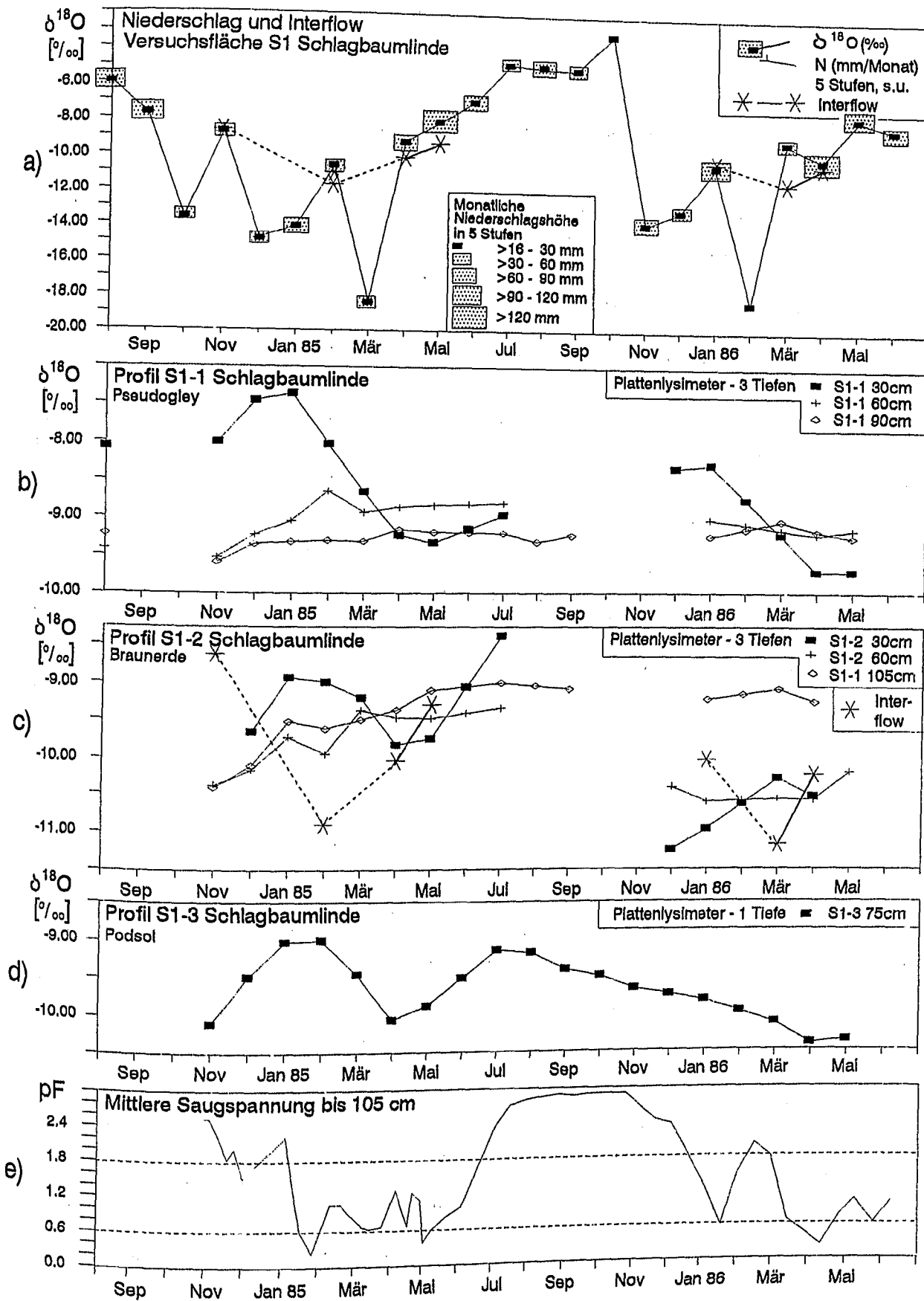


Abb. 7-2: Gebiet S 1 Schlagbaumlinde: Ganglinien der $\delta^{18}\text{O}$ -Monatsmittelwerte von a) Niederschlag, a), c) Interflow und Sickerwasser aus den Bodenprofilen b) S 1-1, c) S 1-2 und d) S 1-3 (Entnahmetiefen 30, 60, 75 und 90 cm) sowie e) mittlere Saugspannung (pF-Werte) im Zeitraum September 1985 bis Mai 1986.

7.3.1.2 Gebiet S 2 Bärloch

Im Gebiet Bärloch wurden Sickerwässer aus zwei verschiedenen Profilen des gleichen Bodentyps beprobt. Ihre $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien verlaufen sehr ähnlich und erreichen ihre Extremwerte etwa im gleichen Zeitraum (Abb. 7-3). Die Wässer in 30 cm Tiefe zeigen erwartungsgemäß den stärksten Jahresgang. Es fällt auf, daß die Dämpfung der $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien der Wässer aus 60 cm Tiefe schwächer ausgeprägt ist als die der aus 90 cm (vgl. f-Werte in Tab. 7-1). Dies dürfte an dem in dieser Tiefe ausgebildeten, wenig durchlässigen B_{tg} -Horizont der pseudovergleyten Parabraunerde liegen (Abb. 3-2). Bei beginnender Austrocknung im Sommer 1985 (August) kann das Wasser rascher durch Schrumpfrisse (geweitete Poren und Klüfte) weiter nach unten sickern und eine deutliche, sprunghafte $\delta^{18}\text{O}$ -Änderung in 90 cm bewirken. Dieser Effekt ist in beiden Profildanglinien gut zu erkennen. Für die Wässer aus 30 cm Tiefe ergaben die Berechnungen nach dem EM Verweilzeiten von im Mittel ca. 7 Monaten, für die aus 90 cm von ca. 13 Monaten. In den Platten aus 60 cm (weniger gut durchlässiger Bereich) betrug die MVZ des Wassers ca. 1,7 Jahre.

In den Monaten Februar bis Mai 1985 und März bis Mai 1986 konnten zahlreiche Interflow-Proben in offenen Gruben gewonnen werden. Die gemittelten $\delta^{18}\text{O}$ -Monatswerte zeigen im Vergleich mit den Niederschlagsdaten (Abb. 7-3 a), daß vom aktuellen Niederschlag gut zu unterscheidendes Bodenwasser (hier vermutlich unterschiedlich zusammengesetztes Mischwasser aus älterem und aktuellem Niederschlagswasser) durch versickerndes Niederschlags- und Schmelzwasser mobilisiert und teilweise verdrängt wird. Besonders der bei sehr hoher Bodenfeuchte (nach Schneeschmelze und starken Frühjahrsniederschlägen) im Mai 1985 und 1986 stärker vom Niederschlag abweichende Verlauf der Interflow- $\delta^{18}\text{O}$ -Werte macht dies deutlich (vgl. dazu auch Gebiet Denzenberg, Kap. 7.3.1.4 und Kap. 8).

Wie im Gebiet Schlagbaumlinde gleichen sich auch im Gebiet Bärloch die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der verschiedenen Sickerwässer und des Interflow in den Monaten mit quasi gesättigten Bodenverhältnissen (Mai 1985 und 1986) einander an (Abb. 7-3 b - d). Dabei tritt ein möglicher Direktabfluß über gut wasserwegsame Bahnen zurück und der Interflow entspricht etwa dem in den Saugplatten beprobten Bodenwasser. Die MVZ des Interflow läßt sich nach den vorliegenden Daten auf höchstens 10 Monate, ähnlich dem flachen Sickerwasser aus 30 cm, abschätzen, wobei hier das schneller über Schrumpfrisse abfließende Wasser in den trockeneren Monaten nicht erfaßt und berücksichtigt ist.

7.3.1.3 Gebiet S 3 Obere Lange Klinge

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien der Sickerwässer aus 25 und 60 cm Tiefe im Profil S 3-3 (Abb. 7-4 c) verlaufen gegenüber der Niederschlags- $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve und auch gegeneinander phasenverschoben, in der Amplitude jedoch nur mit geringem Unterschied.

Ein klar erkennbarer Ausschlag zu abnehmenden ^{18}O -Gehalten in 25 cm wird offenbar durch die sehr starken Niederschläge im Mai 1985 (vgl. auch Abb. 7-1) ausgelöst. Die Änderung im $\delta^{18}\text{O}$ -Verlauf zu einem Monats-Mittelwert von -10.29‰ wird aber nicht durch die Mai-Niederschläge direkt bewirkt, die mit $\delta^{18}\text{O} = -8.02\text{‰}$ deutlich weniger negativ sind, sondern durch eine Verdrängung älteren Bodenwassers verursacht. Auch die Tendenz der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Interflow (Profil S 3-2, Abb. 7-4 b, hier Daten der IF-Meßstelle Denzenberg) zeigen diesen Vorgang.

Aufgrund der ähnlichen Amplitude kann aus der Phasenverschiebung ein relativer Unterschied in den Verweilzeiten der Sickerwässer aus 25 und 60 cm (Profil S 3-3) von 2 - 3 Monaten abgeschätzt werden. Diese Differenz ergibt sich auch bei Anwendung des EM. Für das Sickerwasser aus 25 cm haben sich ca. 8 und für das aus 60 cm Tiefe ca. 11 Monate als MVZ ergeben. Die für die Sickerwässer im Bodenprofil S 3-2 (Abb. 7-4 b) berechneten mittleren Verweilzeiten von ca. 7 Monaten (25 cm) und ca. 9 (40 cm) stimmen mit den Daten von S 3-2 gut überein.

Da im Gebiet Obere Lange Klinge keine direkte Interflow-Beprobung möglich war, wurden die Daten der zweiten km⁴-Testfläche Denzenberg (Kap. 7.3.1.4) in die Graphik des Profils S 3-2 einbezogen. Setzt man die Gültigkeit der Interflow- $\delta^{18}\text{O}$ -Werte für dieses Gebiet voraus, so werden die oben beschriebenen Effekte der Angleichung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Sickerwasser und Interflow bei hoher Bodenfeuchte auch in diesem Gebiet deutlich. Wegen der 1985 hier erst Ende Mai (in anderen Gebieten schon Anfang Mai) erreichten maximalen Bodenfeuchte findet die Angleichung vermutlich erst im Juni statt. 1986 wurden dagegen bei früher einsetzender hoher Bodenfeuchte schon ab Januar zunächst mit dem Sickerwasser aus 40 cm und ab April auch mit dem aus 25 cm sehr ähnliche $\delta^{18}\text{O}$ -Werte erreicht. Hier wird die wassergesättigte Zone auf dem Stauhori-zont in 40 cm (Abb. 3-2) offenbar mächtiger.

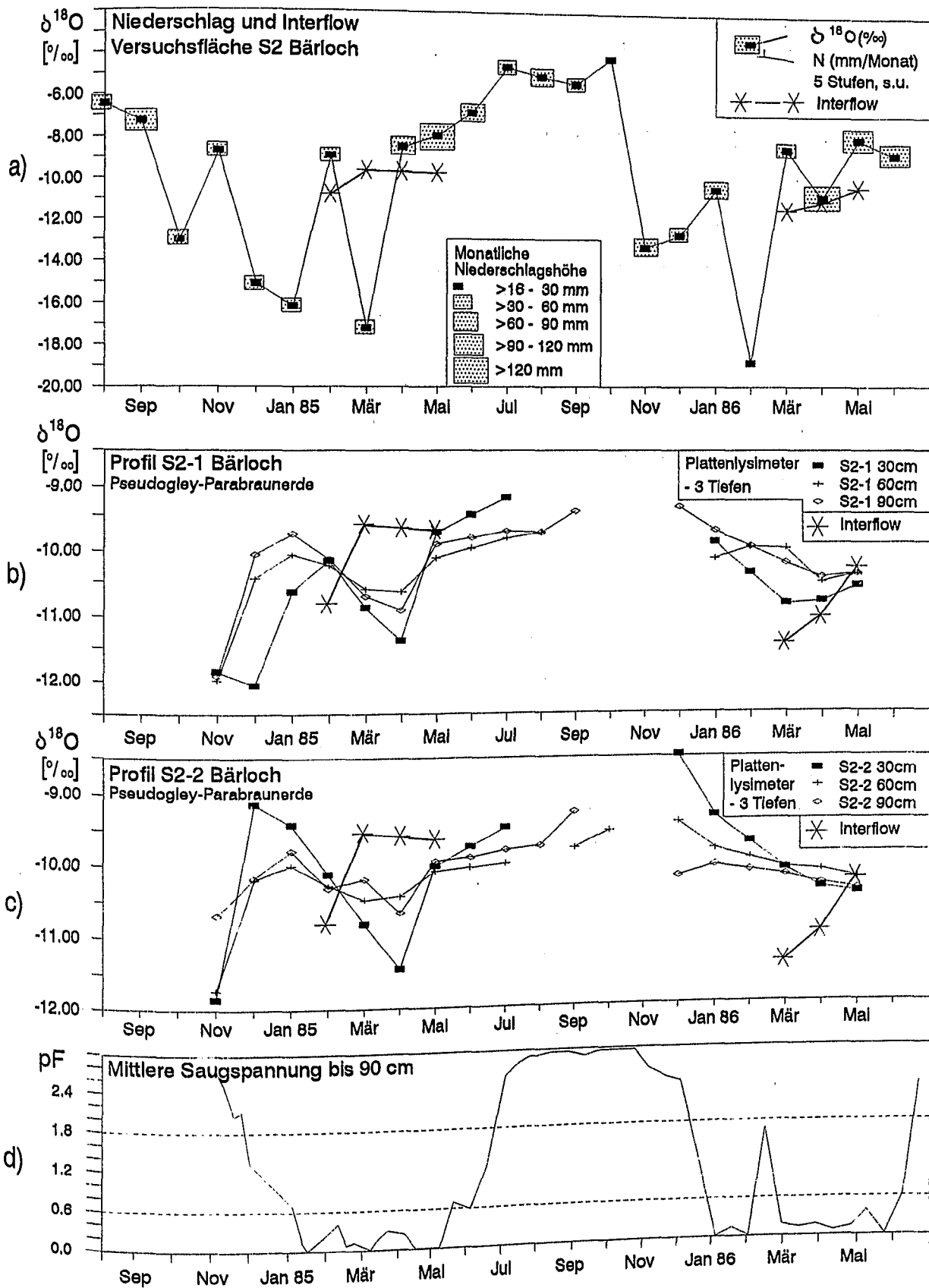


Abb. 7-3: Gebiet S 2 Bärloch: Ganglinien der $\delta^{18}O$ -Monatsmittelwerte von a) Niederschlag, a) - c) Interflow und Sickerwasser aus den Bodenprofilen b) S 2-1 und c) S 2-2 (Entnahmetiefen 30, 60, 90 cm) sowie d) mittlere Saugspannung (pF-Werte) im Zeitraum September 1985 bis Mai 1986.

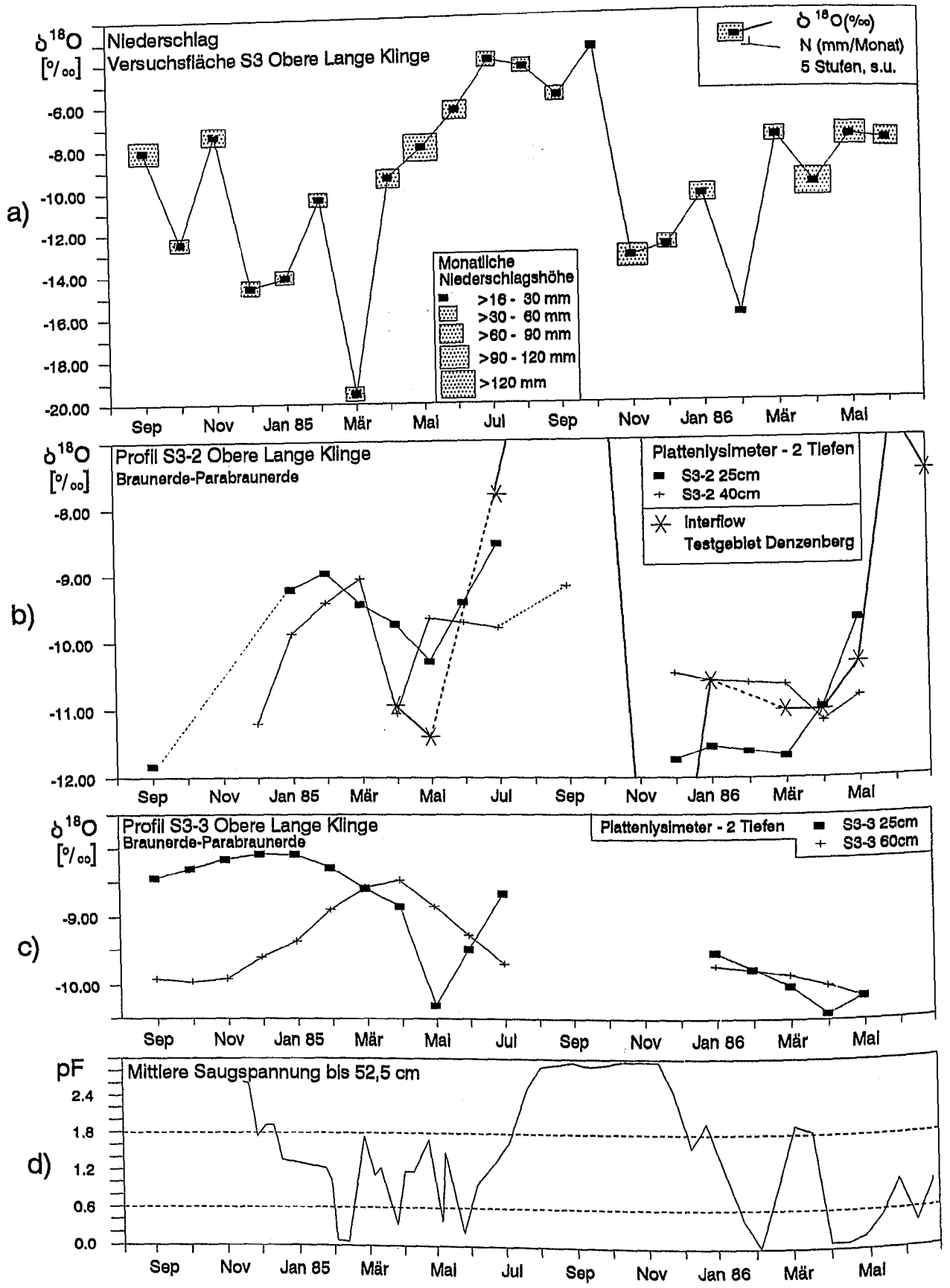


Abb. 7-4: Gebiet S 3 Obere Lange Klinge: Ganglinien der $\delta^{18}O$ -Monatsmittelwerte von a) Niederschlag, b) Interflow (hier Ergebnisse der Testfläche S 4, Denzenberg) und b, c) Sickerwasser (Bodenprofile S 3-2 und S 3-3 mit Entnahmetiefen 25 cm, 40 cm und 60 cm) sowie d) mittlere Saugspannung (pF-Werte) im Zeitraum September 1985 bis Mai 1986.

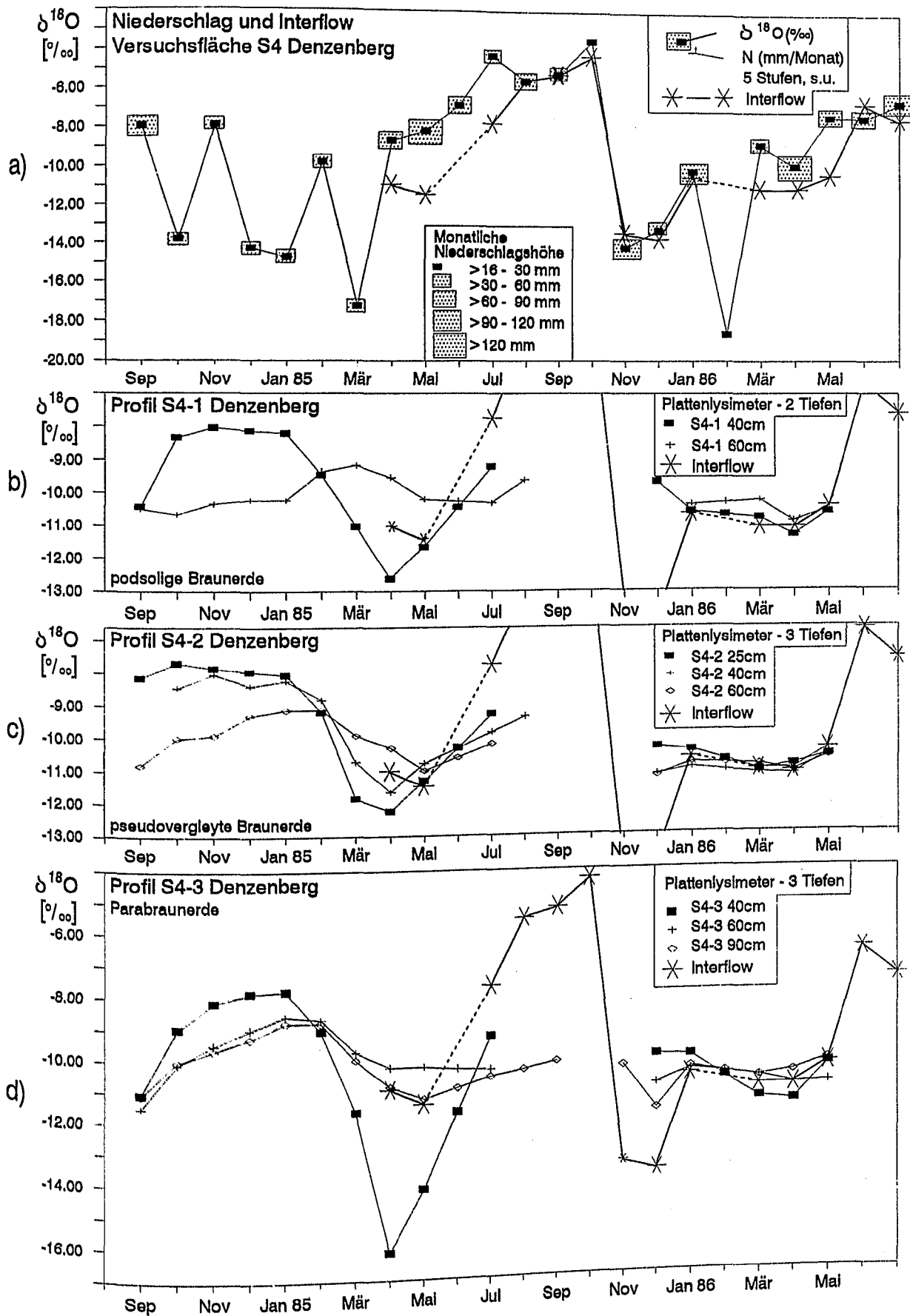


Abb. 7-5: Gebiet S 4 Denzenberg: Ganglinien der $\delta^{18}O$ -Monatsmittelwerte von a) Niederschlag und Interflow (durchgehende Beprobung IF-Meßeinrichtung) sowie b) - d) Sickerwasser aus verschiedenen Bodenprofilen (S 4-1, S 4-2 und S 4-3) und -tiefen (25, 40, 60 und 90 cm) im Zeitraum September 1985 bis Mai 1986.

7.3.1.4 Gebiet S 4 Denzenberg

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien der verschiedenen Sickerwässer im Testgebiet Denzenberg verlaufen allgemein etwa phasengleich mit Minima im April/Mai 1985 bzw. März/April 1986 und gegenüber der Niederschlagskurve um 2-3 Monate verschoben (Abb. 7-5). Teilweise ist der Wiederanstieg der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in den tieferen Sickerwässern um einen Monat versetzt (z.B. Profil S 4-2, 60 cm, Abb. 7-5 c). Auffällig schwach ausgeprägt und, in der ersten Hälfte des Beobachtungszeitraums deutlich gegenüber dem flacheren Sickerwasser (40 cm) phasenverschoben (beim Wiederanstieg 1985 ca. 3 Monate), ist der Jahresgang des Sickerwassers aus 60 cm im Profil S 4-1 (Abb. 7-5 b). Dieses Wasser stammt aus einem schlechter durchlässigen Bereich (Stauhorizont) und weist mit über 11 Monaten die höchste MVZ der untersuchten Bodenwässer im Testgebiet Denzenberg auf. Der $\delta^{18}\text{O}$ -Kurvenverlauf ist dem des Sickerwassers aus dem 2. Sandgebiet (Obere Lange Klinge, Profil S 3-3, 60 cm) sehr ähnlich.

In allen Profilen ist die, gegenüber dem ^{18}O -Input durch den Niederschlag, nach unten zunehmende Dämpfung des $\delta^{18}\text{O}$ -Jahresgangs gut zu erkennen. Am Beispiel der Profile S 4-1 und S 4-2 wird deutlich, daß die Amplituden (und somit die daraus berechneten mittleren Verweilzeiten) der Sickerwässer aus 25 und 40 cm (ausgenommen Profil S 4-3, 40 cm, s.u.) recht einheitlich und von den tieferen aus 60 und 90 cm Jahren zu unterscheiden sind. Die Wässer bis 40 cm Tiefe ergeben in guter Übereinstimmung beider Profile ca. 4 Monate als MVZ. Für die Wässer aus 60 cm können dagegen 9 - 11 Monate abgeschätzt werden (Tab. 7-1).

Eine gewisse Sonderstellung nehmen die Sickerwässer des Profils S 4-3 ein. Hier findet, besonders in 40 cm, eine starke Beeinflussung durch Stammablaufwasser und an Wurzelbahnen versickerndes Niederschlagswasser bis zum Ende der 1. Jahreshälfte 1985 statt. Dies zeigt beispielsweise auch der Verlauf der pH-Werte an (Abb. A-6-5, Anhang). Auch die in 90 cm eingebaute Platte wurde vermutlich über ein Sekundärporensystem rascher mit Wasser versorgt als die in 60 cm. Dies zeigt der gleichmäßige Kurvenverlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in den Frühjahrsmonaten.

Ab Juli 1985 kann in allen Profilen eine Austrocknung des Bodens am Trockenfallen der zunächst flacheren und später der tieferen Sickerplatten abgelesen werden. Als Folge stärkerer Niederschlags- und Schmelzwasserzutritte wurden höheren Bodenfeuchtegehalte gemessen. Dies führte dazu, daß sich die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Sickerwässer im Winterhalbjahr 1986 sehr viel weniger

als im Vergleichszeitraum des Vorjahres unterscheiden.

Die $\delta^{18}\text{O}$ - Monatsmittelwerte des Interflow, die mit der IF-Meßstelle auf dieser Versuchsfläche gewonnen wurden, sind in Abb. 7-5, zusammen mit den Niederschlagswerten und den Ganglinien der Sickerwässer, dargestellt. Zahlreiche Proben der Monate April/Mai 1985 und März/April 1986, die vom Niederschlag stark unterschiedliche, untereinander aber wenig schwankende $\delta^{18}\text{O}$ -Werte aufweisen, belegen die Verdrängung älteren Bodenwassers durch aktuelles Niederschlags- oder Schmelzwasser. Mit zunehmender Austrocknung des Bodens in den Sommer- und Herbstmonaten August - November 1985 ($pF < 1,8$, vgl. Abb. 5-2) floß ein Teil des aktuellen Niederschlags als Interflow (über Schrumpfrisse im Oberboden) direkt ab. Während der feuchten Frühjahrsmonate ließ sich für den Interflow ein "time-lag" gegenüber dem Niederschlags-Input von ca. 2 Monaten abschätzen.

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Interflow entsprechen etwa dem Mittelwert der Sickerwässer. Mit zunehmender Bodenfeuchte gleichen sich die Isotopengehalte an das flache Sickerwasser an (vgl. April-Mai 1985, Profile S 4-1 und S 4-2). Genauere Ausführungen zum Interflow-Verhalten auch in Beziehung zur Bodenfeuchte sind dem Kap. 8 zu entnehmen.

7.3.2 Abschätzung der Grundwasserneubildung

Aus den mit Hilfe des Exponentialmodells abgeschätzten mittleren Verweilzeiten der Sickerwässer lassen sich stark vereinfachend Sickergeschwindigkeiten ableiten.

In den zweischichtigen, tongründigen Böden ist ein besser wasserwegsamere, oberer Bereich (Deckschutt) von einem schlechter durchlässigen tieferen Bereich (Basisschutt) durch den in 30 - 60 cm Tiefe stark abnehmenden Grobporenanteil zu unterscheiden (vgl. Abb. 3-2).

Aus kleineren mittleren Verweilzeiten des Bodenwassers im Deckschutt (vgl. Beschreibung oben), ergeben sich höhere Sickergeschwindigkeiten als im tieferen Basisschutt. Das bedeutet, daß ein Teil des "Deckschutt-Wassers" als Interflow abfließt, und ein anderer (abzüglich der Transpiration) weiter zum Grundwasser sickert. Für eine Abschätzung der lokalen GW-Neubildung sind die Ergebnisse der tieferen Sickerplatten unter der durchwurzelten Bodenzone heranzuziehen.

Die ermittelten Sickergeschwindigkeiten und die jeweils daraus mit Hilfe des mittleren Grobporenanteils berechnete GW-Neubildung sind in Tab. 7-2 zusammengestellt.

Tab. 7-2: Lokale jährliche Grundwasserneubildung auf den Versuchsflächen. (Ermittelt aus mittlerer Verweilzeit, Sickergeschwindigkeit und Grobporenanteil mit Hilfe von $\delta^{18}\text{O}$ -Daten von Niederschlag und Sickerwasser und Anwendung des Exponentialmodells.)

Bodenprofil	Tiefe (cm)	Sickergeschw. (cm/a)	Grobporenanteil (%)	GW-Neubildung (mm/a)
S 1-1	90 cm	(≥ 11.3)*	7.0	(≥ 9)*
S 1-2	105 cm	40.3	9.9	40
S 1-3	75 cm	66.6	18.1	121
S 2-1	90 cm	91.0	7.3	66
S 2-2	90 cm	78.8	7.3	57
S 3-3	60 cm	65.0	10.8	70
S 4-1	60 cm	64.6	22.9	148
S 4-2	60 cm	80.9	11.6	94
S 4-3	90 cm	115.4	13.5	156

*Angaben für S 1-1 basieren auf einer MVZ von ≥ 3 Jahren (vgl. Kap. 7.3.1.1, und Tab- 7-1).

Es ist zu beachten, daß die angegebenen GW-Neubildungsraten nur lokal gültig sind und das jeweils untersuchte Bodenprofil betreffen. Um mit diesem Verfahren die Grundwasserneubildung für ein Gesamtgebiet abschätzen zu können, sind gegebenenfalls auch besser durchlässige Bereiche mit stellenweise fehlenden Deckschichten oder Verebnungsflächen mit flachgründigen Böden (Lias $\alpha 2$, km4) zu berücksichtigen.

In den 3 verschiedenen Bodenprofilen der Testfläche Schlagbaumlinde (S 1) im Gebiet Kleiner Goldersbach (P 8) wurden sehr unterschiedliche Grundwasser (GW)-Neubildungshöhen ermittelt. Im Profil S 1-1 (Pseudogley) findet praktisch keine Tiefensickerung statt. Für die Profile S 1-2 (Braunerde) und S 1-3 (Podsol) wurde eine mittlere Sickerung von 81 mm/a bestimmt. Dieser Wert entspricht etwa den für das Gesamtgebiet von P 8 ermittelten GW-Neubildungsraten der Jahre 1985 und 1986, die 76 mm und 83 mm ergaben (vgl. Kap. 5.1.4.3, I_g -Werte in Tab. 5-19). Auch die von AGSTER (1986) berechnete mittlere GW-Neubildung für das Gesamtgebiet von P 8 (1979-82; $I_g = 84$ mm) liegt ähnlich hoch. (Bei einer Gesamtabflußhöhe von im Mittel ca. 160 mm/a weisen diese GW-Neubildungsraten auf einen sehr hohen Q_{on} -Anteil von ca. 50% hin, vgl. Tab. 5-19).

Das Testgebiet zeigt damit eine Bandbreite verschiedener Wasserwegsamkeiten, die, wie die Ergebnisse zeigen, im Mittel für das gesamte Einzugsgebiet gelten können. Sie reicht von gut durchlässigen Bodenprofilen auf der Lias-Verebnung (flachgründige, skelettreiche Böden, Sickerung vergleichbar mit Profil S 1-3, bis zu wasserstauenden Profilen (tonreiche Böden über km5, vgl. auch S 1-1).

Auf der Testfläche S 2 Bärloch liegt die für die Profile S 2-1 und S 2-2 (Pseudogley-Parabraunerde) bestimmte mittlere Sickerrate in 90 cm Tiefe mit nur 62 mm/a sehr niedrig. Für das Gesamtgebiet wurden GW-Neubildungsraten von 109 mm (1985) und 141 mm (1986) bzw. 159 mm (1979-82, AGSTER, 1986a) bestimmt (I_g -Werte, Tab. 5-19). Die niedrigen Sickerraten auf der Testfläche gelten für die Hangböden mit Interflow. Für das Gesamtgebiet ist eine, wie oben angegeben, höhere GW-Neubildung plausibel, da in weiten Teilen sehr geringmächtige, steinreiche Deckschichten eine Tiefensickerung begünstigen. Die für das Gesamtgebiet bestimmten Q_{on} -Höhen betragen ca. 1/3 (38 - 40%) vom Gesamtabfluß (Tab. 5-19). In den Q_{on} begünstigenden Hangböden der Testfläche kehrt sich das Verhältnis um. Bei ca. 60 mm GW-Neubildung und ca. 180 mm Gesamtabfluß ist dort mit $2/3 Q_{on}/Q_t$ (ca. 120 mm) zu rechnen.

Die auf der Testfläche S 3, Obere Lange Klinge in 60 cm im Übergangsbereich zwischen Boden und anstehendem Stubensandstein (Profil S 3-3, Braunerde-Parabraunerde) berechnete Sickerrate von 70 mm/a stimmt gut mit der für das Gesamtgebiet ermittelten GW-Neubildung überein. Es wurden 1985 und 1986 durchschnittlich 77 mm/a und 1979-82 72 mm/a (AGSTER, 1986a) ermittelt (vgl. I_g -Werte in Tab. 5-19). Das Profil S 3-3 kann als für das Gesamtgebiet repräsentativ angesehen werden, wenn auch auf inselartig auftretenden reinen Sandstandorten lokal höhere GW-Neubildungsraten zu erwarten sind. Die im Bodenprofil S 3-3 ermittelte mittlere Sickerrate bestätigt die für das Gesamtgebiet bestimmten GW-Neubildungshöhen (Tab. 5-19). Damit sind im Gebiet Obere Lange Klinge zwischen 38 und 46% Q_{on}/Q_t zu erwarten.

Verschiedene GW-Neubildungshöhen ergaben sich für die untersuchten Bodenprofile auf der Testfläche S 4 Denzenberg. Die Werte variieren zwischen 94 mm/a (Profil S 4-2, pseudovergleyte Braunerde) und 148 bzw. 156 mm/a in den Profilen S 4-1 (podsolige Braunerde) und S 4-3 (Parabraunerde).

Diese Daten streuen um die für das Gesamtgebiet errechneten Mittelwerte, die 1985 129 mm/a und 1986 182 mm/a ergaben (vgl. I_g , Tab. 5-19). Im Rahmen der früheren Untersuchungen von 1979-82 wurden 122 mm/a ermittelt (AGSTER, 1986a).

Unter der Voraussetzung, daß die 3 untersuchten Bodenprofile die Bodenverteilung im Gesamtgebiet repräsentieren, wobei das Profil S 4-3 für besser durchlässige Bereiche mit fehlenden Deckschichten und flachgründige Böden (an Hangkanten) steht (vgl. Kap. 7.3.1.4), ergibt sich eine

mittlere GW-Neubildung von 133 mm/a. Dieser Wert stimmt nahezu mit dem Mittelwert der früheren Meßperiode und der GW-Neubildung für das Normaljahr 1985 (129 mm/a) überein.

Zusammenfassend lassen sich bei den für die untersuchten Bodenprofile abgeschätzten, lokalen GW-Neubildungsraten die besser durchlässigen, sandigen Böden (Podsol, podsolige Braunerde) von den schlechter durchlässigen Ton- und Lehmböden gut unterscheiden. In einem untersuchten Pseudogley-Bodenprofil fand nur eine minimale Tiefensickerung statt. Die Übertragung der mit Hilfe des $\delta^{18}\text{O}$ -Jahresgangs errechneten, lokal geltenden Ergebnisse auf die Gesamtgebiete erbrachte im Vergleich mit den auf andere Weise ermittelten GW-Neubildungsraten durchgehend gute Übereinstimmungen.

7.4 $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Abfluß

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Output wurden zur Erfassung des Grundwasserabflusses an mehreren Quellen der beiden Hauptgrundwasserleiter, Lias α und km4, sowie zur Erfassung des Gesamtabflusses an 6 Pegelmeßstellen (4 kleineren Einzugsgebiete: P 6, P 8, P 14 und P 17; 2 größere, übergreifende Einzugsgebiete: P 1 und P 5/1) untersucht. Zusätzlich dienten die Meßstellen P 9 und P 18 zur Beprobung von Deckschichtenabfluß und flachem Lias-Grundwasser.

Im Kapitel 5.1.5.1 wurden die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der untersuchten Quellen vorgestellt (Abb. 5-6 bis 5-7 und A-5-1, A-5-2 im Anhang) und daraus abgeleitete Aquifereigenschaften sowie das Schüttungsverhalten und die unterschiedlich starke Beeinflussung durch rasch abfließenden Interflow diskutiert.

Im Gegensatz zu diesen Beobachtungen an Quellen, die nur Teilabflüsse eines Einzugsgebietes betreffen, wird an den Vorfluterpegeln die Summe aller Abflußkomponenten aus den zugehörigen Einzugsgebieten erfaßt. Im folgenden werden die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Vorfluterproben im jahreszeitlichen Verlauf vorgestellt und die Änderungen im Überblick diskutiert. Dazu sind die $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien zusammen mit den Abflußmengen (Q-Tagesmittelwerte in l/s) und den Änderungen der elektr. Leitfähigkeit dargestellt (Abb. 7-6 bis 7-9).

7.4.1 Änderungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Basisabfluß der Vorfluter und Quellen

Die ^{18}O -Gehalte in den Bachwässern und ihre Änderungen werden von den ^{18}O -Gehalten der am

Gesamtabfluß beteiligten Komponenten reguliert. Ohne die möglichen direkten Auswirkungen von aktuellen Niederschlägen geben die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Bachwassers im Basisabfluß ein Abbild der im Jahresgang sinusförmigen $\delta^{18}\text{O}$ -Input-Kurve des Niederschlags (vgl. Abb. 7-1) wieder. Die Output-Kurve ist je nach Verweilzeit des Wassers im Untergrund mehr oder weniger phasenverschoben und in ihrer Schwankungsbreite gedämpft.

Mit Hilfe des Exponentialmodells (Kap. 7.3.1) können die mittleren Verweilzeiten des Basisabflusses berechnet werden. Der Basisabfluß wird hauptsächlich durch den Abfluß aus den Grundwasserleitern gespeist, da ein Abfluß aus den Deckschichten allgemein nur in den Winter- und ersten Frühjahrsmonaten länger anhält. Deshalb sind die Variationen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Basisabfluß im Bereich oder nur wenig über den Schwankungsbreiten der betreffenden Quellwässer zu erwarten (Tab. 7-3). Dies kann am Beispiel der geologisch einheitlich aufgebauten Stubensandsteingebiete Denzenberg (Vorfluterpegel P 14 mit km4-Quelle Q 3) und Obere Lange Klinge (P 17 mit Q 7a) sowie auch im Lias-Gebiet Bärloch (P 6 mit Q 13a und Q 13b) gut aufgezeigt werden (Tab. 7-3 a, Abb. 7-6 und 7-7 a).

Der Grundwasserabfluß zeigt im Gebiet P 17 eine wesentlich geringere, nur im Rahmen der Meßgenauigkeit variierende, $\delta^{18}\text{O}$ -Schwankung als im Gebiet P 14 (Differenz der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte 0,63 und 0,14). Das im Vergleich zu P 14 mit einer höheren MVZ verbundene, insgesamt trägere Verhalten des Grundwasserabflusses im Gebiet P 17 (MVZ hier >3 a gegenüber ca. 2,5 a im Gebiet P 14) ist auch deutlich an der Q-Ganglinie des Gesamtabflusses abzulesen (Abb. 7-6). Im Vergleich zu P 14, wo der Basisabfluß einen deutlich ausgeprägten jahreszeitlichen Gang mit Maxima im Mai/Juni 1985 und Mai 1986 aufweist, schwankt er im Gebiet P 17 wesentlich geringer. Die mittleren $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Basisabfluß bzw. Grundwasser dieser beiden Vergleichsgebiete liegen einheitlich zwischen $-9,45$ und $-9,54$ ‰.

Auch im Lias-Gebiet P 6 (Abb. 7-7a) liegt der mittlere $\delta^{18}\text{O}$ -Wert im Basisabfluß im Bereich der beiden km4-Gebiete ($-9,51$ ‰); dabei liegt die Schwankungsbreite etwas höher als bei P 17 (MVZ >3 a). Der aus der Q-Ganglinie erkennbare Jahresgang ist dagegen ähnlich ausgeprägt wie im Gebiet P 14. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Änderung bei P 18 (Abb. 7-8, a), einem eher Deckschichtenabfluß erfassenden Teilgebiet von P 6, tendiert wegen einer stärkeren, weil weniger verzögerten, Beeinflussung durch Niederschlagswasser in den Sommermonaten zu niedrigeren $\delta^{18}\text{O}$ -Werten im Vergleich zu P 6. Dies vergrößert die Schwankungsbreite insgesamt.

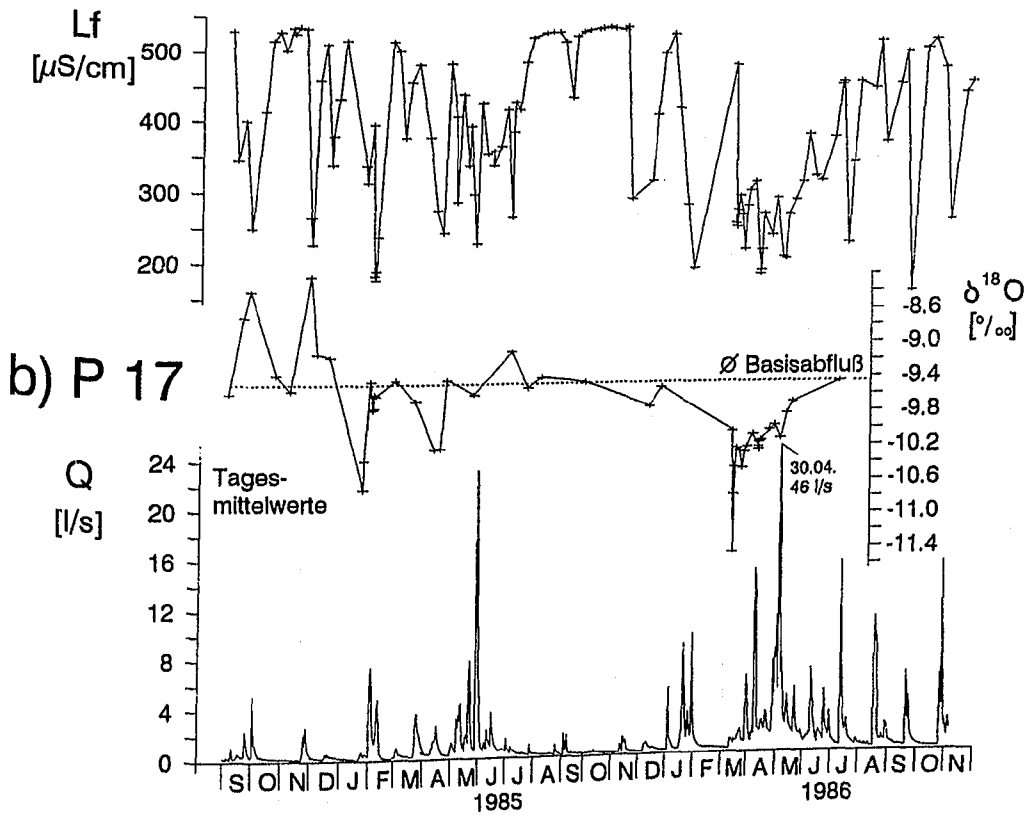
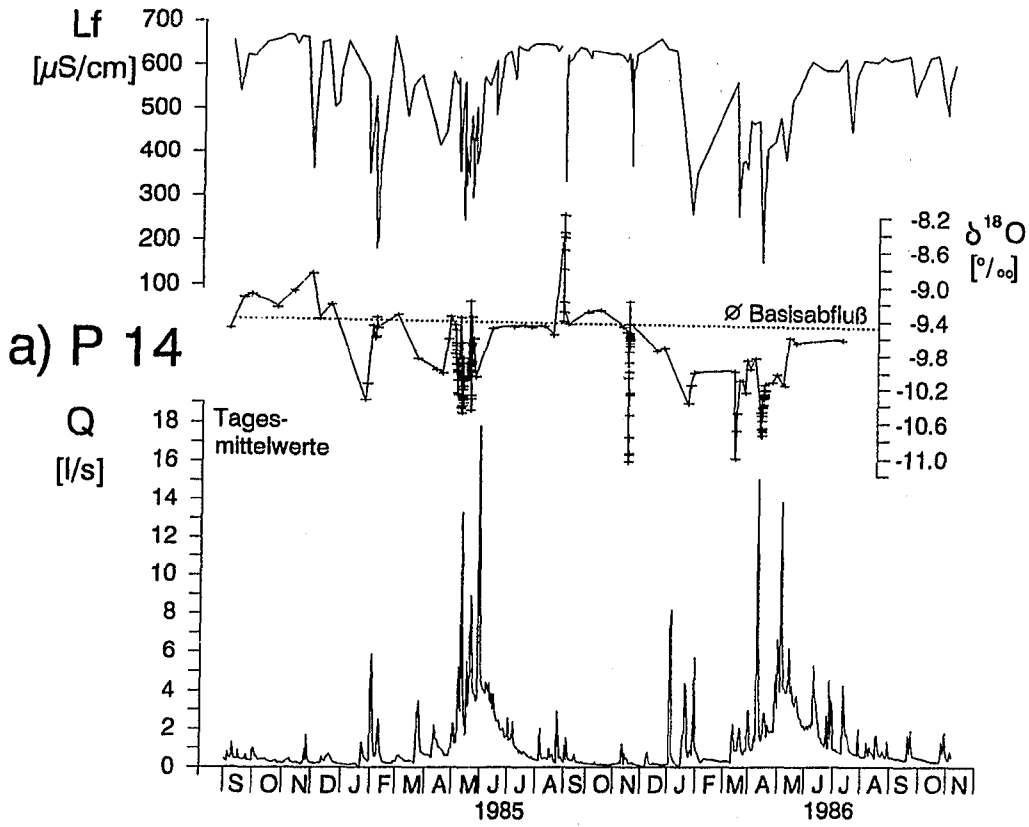


Abb. 7-6: Änderungen des Gesamtabflusses (Tagesmittelwerte Q in l/s), des ^{18}O -Gehalts ($\delta^{18}\text{O}$ -Werte in ‰) und der elektrischen Leitfähigkeit (Lf in $\mu\text{S}/\text{cm}$) an den Vorfluterpegeln a) P 14 Denzenberg und b) P 17 Obere Lange Klinge.

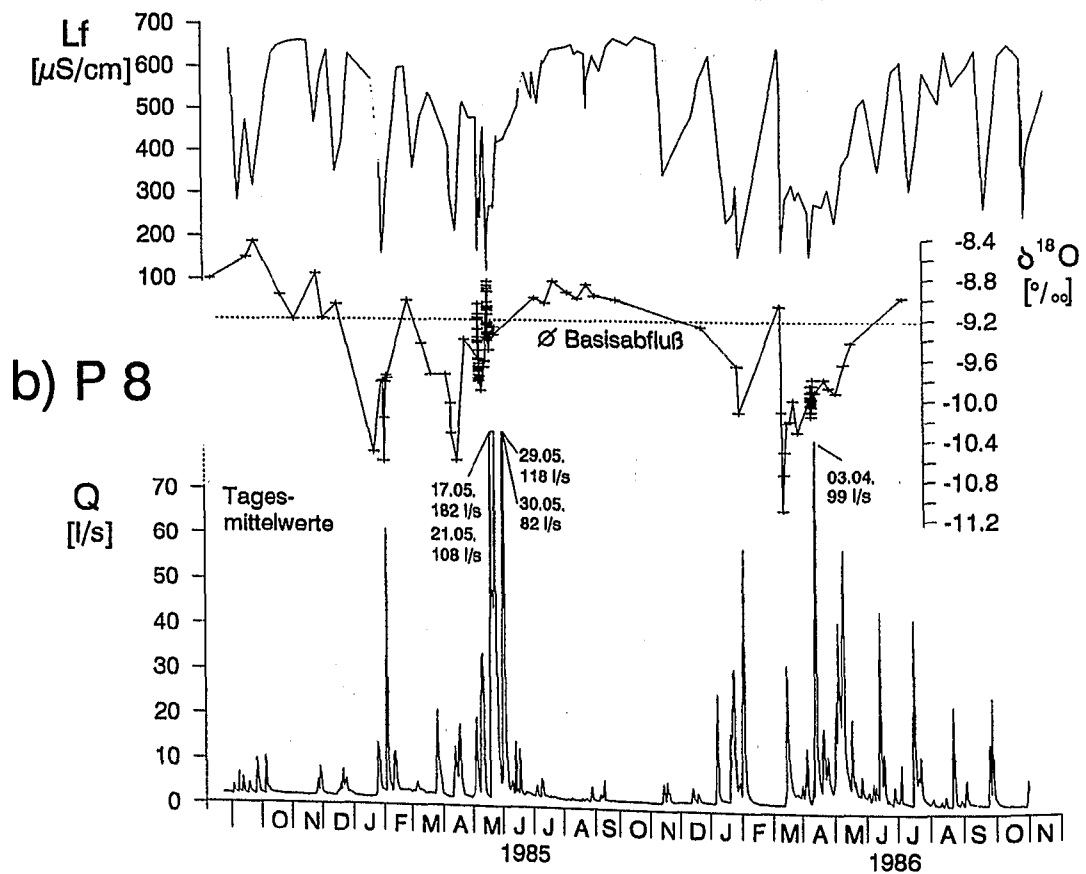
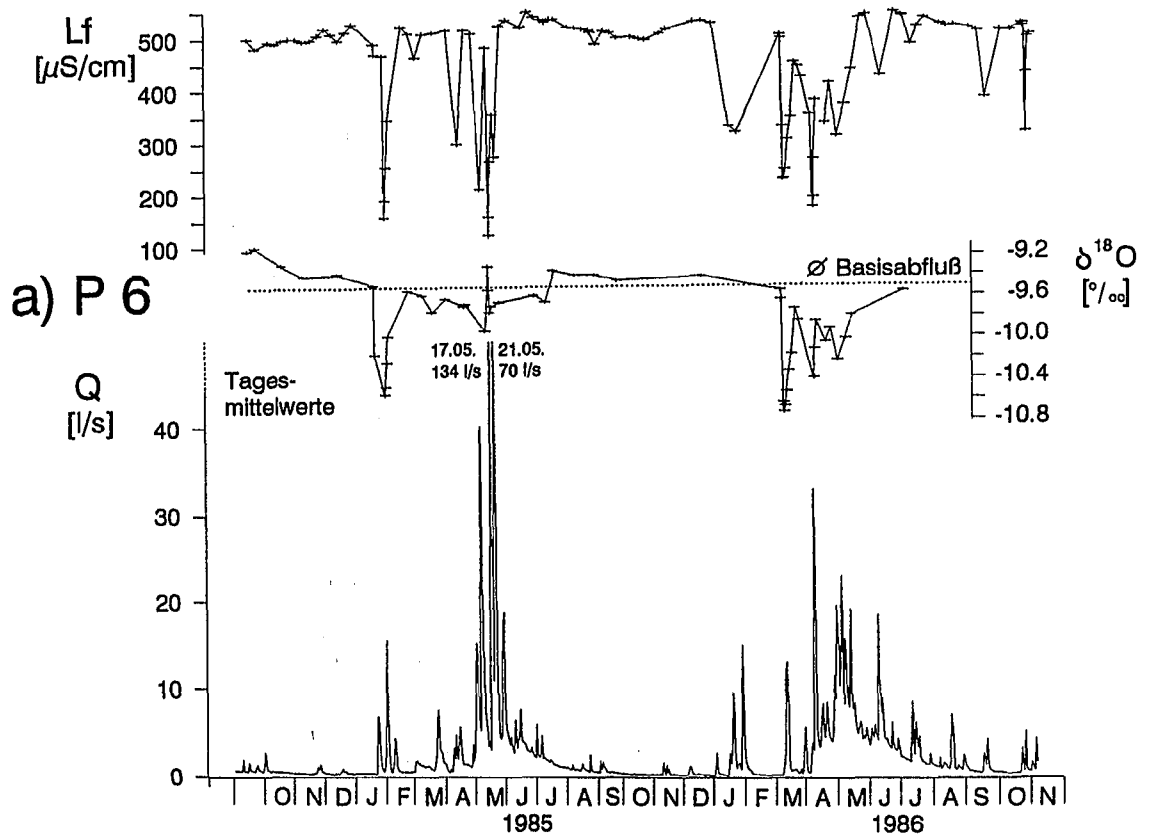


Abb. 7-7: Änderungen des Gesamtabflusses (Tagesmittelwerte Q in l/s), des ^{18}O -Gehalts ($\delta^{18}\text{O}$ -Werte in ‰) und der elektrischen Leitfähigkeit (Lf in $\mu\text{S}/\text{cm}$) an den Vorfluterpegeln a) P 6 Bärloch und b) P 8 Kleiner Goldersbach.

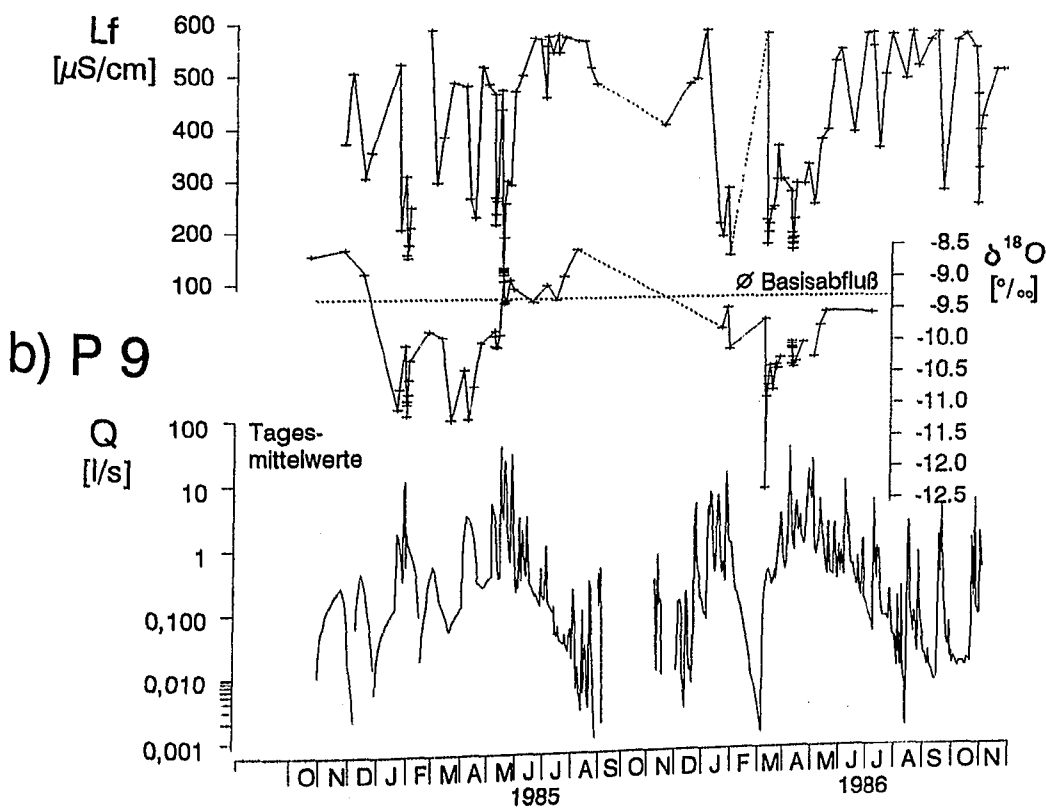
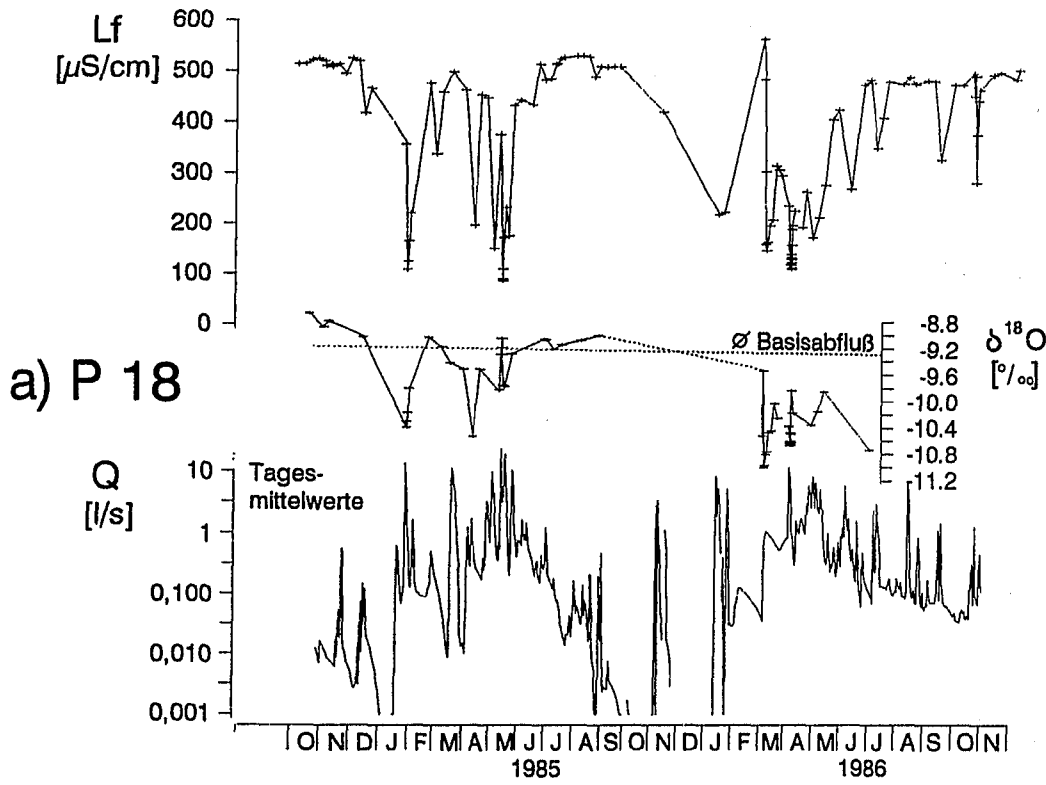


Abb. 7-8: Änderungen des Gesamtabflusses (Tagesmittelwerte Q in l/s), des ^{18}O -Gehalts ($\delta^{18}\text{O}$ -Werte in ‰) und der elektrischen Leitfähigkeit (Lf in $\mu\text{S}/\text{cm}$) an den Vorfluterpegeln a) P 18 Oberes Bärloch - Teilgebiet von P 6 und b) P 9 Josefsruh - Teilgebiet von P 8.

Tab. 7-3: $\delta^{18}\text{O}$ -Kennwerte des Basisabflusses in den Vorfluterpegeln (P) und Quellwässern (Q) sowie daraus mit Hilfe des Exponentialmodells (EM) berechnete mittlere Verweilzeiten (MVZ).

a) Gebiete mit nur einem abflußrelevanten Aquifer (km4 oder Lias) und einheitlichem geologischen Aufbau (vgl. Tab. 3-1)

	$\delta^{18}\text{O}_{\text{min}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{max}}$	ϕ	Delta	MVZ
	[‰]				[a]
km4					
P 14	-9,78	-9,15	9,47	0,63	2,5
Q 3	-9,77	-9,22	-9,50	0,55	2,9
P 17	-9,52	-9,38	9,45	0,14	>3
Q 7a	-9,64	-9,43	-9,54	0,21	>3
Lias					
P 6	-9,64	-9,37	9,51	0,27	>3
Q 13a	-9,55	-9,35	-9,45	0,20	>3
Q 13b	-9,60	-9,32	-9,46	0,28	>3
(P 18	-9,60	-8,93	9,27	0,67	2,4)

b) Gebiete mit zwei abflußrelevanten Aquifern (km4 und Lias) und uneinheitlichem geologischen Aufbau ("Mischgebiete")

km4 - Lias					
P 8	-9,61	-8,83	9,22	0,78	2
km5 - Lias					
(P 9	-9,68	-8,92	9,30	0,76	2,1)
km4-Quellen					
Q 6a	-9,61	-9,18	-9,40	0,43	>3
Q 6a1	-9,58	-9,29	-9,44	0,29	>3
Lias-Quelle					
Q 31	-9,86	-9,17	-9,50	0,69	1,9

c) Übergreifende, größere Einzugsgebiete

km1 - Lias					
P 1	-9,71	-9,17	9,44	0,54	2,9
km4 - Lias					
P 5/1	-9,74	-8,90	9,32	0,84	1,9
weitere km4-Quellen					
Q 38	-9,36	-9,11	-9,24	0,25	>3
Q 39	-9,10	-8,82	-8,96	0,28	>3

$\delta^{18}\text{O}_{\text{min}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{max}}$ und ϕ : Extrem- und Durchschnittswerte sowie Delta: Schwankungsbreite der Extremwerte;

(P 18, P 9): Im Sommer bzw. Herbst trockenfallend, mit vergleichsweise höheren Anteilen von Deckschichtenabfluß.

Am Pegel P 8 (Gebiet Kleiner Goldersbach) wird Grundwasserabfluß aus dem km4- und dem Lias-Aquifer erfaßt. Abflußbestimmend sind ferner die mit 46% an der Gesamtfläche weitverbreiteten Knollenmergelhänge, die einen hohen Q_{on} -Anteil am Gesamtabfluß bewirken (vgl. u.a. Tab. 5-19 und folgendes Kap. 7.4.2). Die Variationsbreite

der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Basisabfluß ist die vergleichsweise höchste der untersuchten kleineren Einzugsgebiete (Tab. 7-3 b, Abb. 7-7 b). Die Extremwerte im Basisabfluß werden durch das km4- und Lias-Grundwasser (Tab. 7-3 b), in erster Linie aber durch ein Mischwasser aus Lias-Grundwasser (Q 31) und km5-Deckschichtenabfluß bestimmt, das bei P 9 erfaßt wird und bis Anfang September (im Normaljahr 1985) abfließt (Abb. 7-8 b). Demzufolge ergibt sich eine relativ geringe MVZ von ca. 2 Jahren.

Das Einzugsgebiet Großer Goldersbach P 1 (Tab. 7-3 c, Abb. 7-9 a), im Westteil des Schönbuchs, schließt die Gebiete P 8, P 14 und P 17 ein. Die Schwankungsbreite der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Basisabfluß liegt mit $0,54\text{‰}$ etwa im Mittel der untersuchten km4-, Lias- und Lias/km5-Teileinzugsgebiete. Im östlich gelegenen, P 6 einschließenden, Kirnbachgebiet P 5/1 (Abb. 7-9 b), schwanken die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Basisabfluß ähnlich weit wie im Gebiet P 8. Auch in diesem teilweise relativ steilen Einzugsgebiet ist mit länger anhaltendem Deckschichtenabfluß zu rechnen, der zu einer Amplitudenvergrößerung und zu einer MVZ von nur ca. 1,9 Jahren führt. Die Quellen Q 38 und Q 39 repräsentieren den km4-Aquifer in diesem Einzugsgebiet (vgl. $\delta^{18}\text{O}$ -Variation von Q 7a, Q6a1).

7.4.2 Änderungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Gesamtabfluß der Vorfluter

Während Abflußerhöhungen finden teilweise sehr starke, allgemein kurzfristige Abweichungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte vom Jahresgang des Basisabflusses statt. Sie sind auf Zumischung einer oder mehrerer Abflußkomponenten mit vom Basisabfluß abweichenden $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnissen zurückzuführen. Erst eine genügend große Differenz zwischen den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten von "pre-event"- und "event"-Komponente ermöglicht die Anwendung der ^{18}O -Tracermethode zur Komponentenseparation. Da das zugemischte Wasser bei den hydrogeologischen Verhältnissen im Schönbuch durchweg niedriger mineralisiert ist, gehen die Abflußerhöhungen mit Verringerungen der elektrischen Leitfähigkeit einher (vgl. jeweils Lf-Ganglinie in den Abbildungen). In Tab. 7-4 sind die Extremwerte der $\delta^{18}\text{O}$ - und Lf-Werte der Einzelmessungen, einschließlich der erfaßten N-Q-Ereignisse, sowie die der mittleren Tagesabflußmengen (vgl. Ganglinien, Abb. 7-6 bis 7-9) zusammengestellt.

Die Amplitude der $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen während Abflußerhöhungen im Gesamtabfluß hängt von der Menge und dem ^{18}O -Gehalt (Abweichung von der ^{18}O -Markierung des Basisabflusses) der

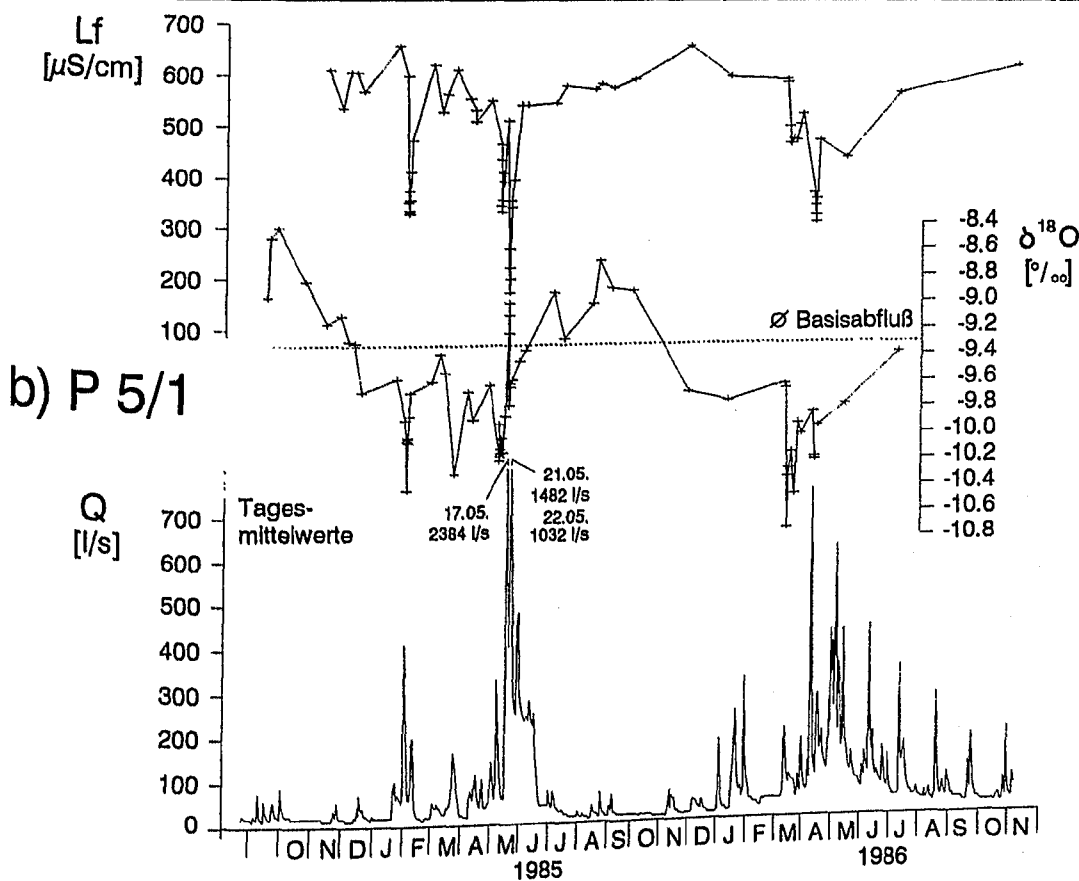
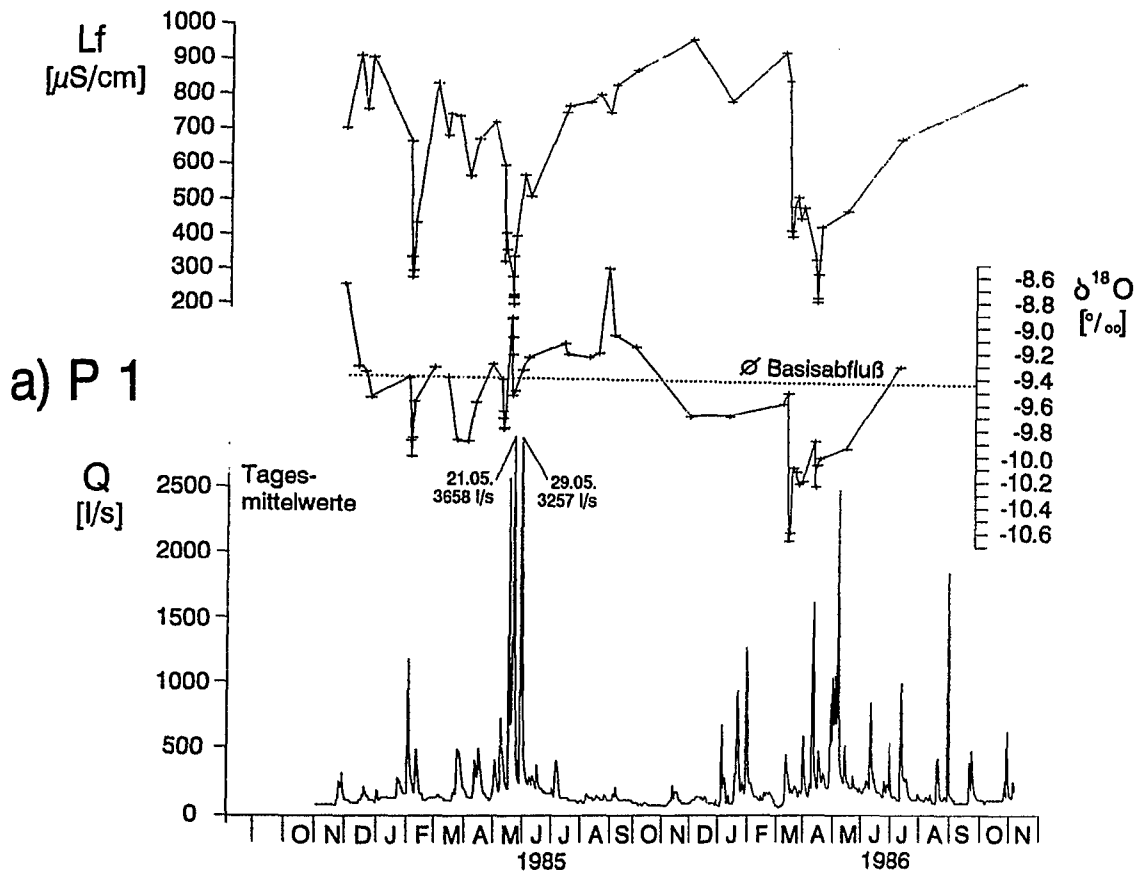


Abb. 7-9: Änderungen des Gesamtabflusses (Tagesmittelwerte Q in l/s), des ^{18}O -Gehalts ($\delta^{18}\text{O}$ -Werte in ‰) und der elektrischen Leitfähigkeit (Lf in $\mu\text{S}/\text{cm}$) an den Vorfluterpegeln a) P 1 Großer Goldersbach - Bebenhausen und b) P 5/1 Kirnbach.

Tab. 7-4: Extremwerte von Abfluß (Tagesmittelwerte), elektrischer Leitfähigkeit und ^{18}O -Gehalt (jeweils Einzelmessungen) der untersuchten Vorfluter im Untersuchungszeitraum 1985 und 1986.

	Tagesmittel		----- Einzelmessungen -----		-----			Abb.-Nr.	
	Q_{\min}	Q_{\max}	NQ : HQ	Lf_{\min}	Lf_{\max}	$\delta^{18}\text{O}_{\min}$	$\delta^{18}\text{O}_{\max}$		Delta δ
	-- [l/s] -			[$\mu\text{S}/\text{cm}$]		--- [‰] ---			
P 14	0,10	18	1 : 180	170	684	-11,06	-8,24	2,82	7-6 a)
P 17	0,25	46	1 : 184	160	537	-11,46	-8,21	3,25	7-6, b)
P 6	0,39	134	1 : 344	120	544	-10,73	-9,30	1,43	7-7, a)
P 8	0,33	182	1 : 552	124	667	-11,10	-8,76	2,34	7-7, b)
P 18	0	26	-	92	544	-11,02	-8,93	2,09	7-8, a)
P 9	0	33	-	106	592	-12,33	-8,56	3,77	7-8, b)
P 1	42	3658	1 : 87	207	989	-10,66	-8,58	2,08	7-9, a)
P 5/1	12	2384	1 : 199	174	659	-10,72	-8,67	2,05	7-9, b)

Q_{\min} , Q_{\max} : Minimaler und maximaler Abfluß (Tagesmittelwerte)
 NQ : HQ: Quotient aus niedrigstem und höchstem mittlerem Tagesabfluß
 -: Kennwert nicht bestimmbar

zugemischten Abflußkomponenten ab. Die Mengenanteile (z.B. Interflow/ Q_i) werden von klimatischen Ausgangsbedingungen (z.B. Niederschlags-höhe und -intensität, Ausgangsbodenfeuchte, Vegetationsperiode oder vegetationslose Zeit) und hydrogeologischen Gegebenheiten in den unterschiedlichen Einzugsgebieten bestimmt. Die $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnisse in den Ereignisniederschlägen oder den während Abflußerhöhungen mobilisierten Vor-Ereignis-Bodenwässern hängen von verschiedenen und unterschiedlich wirksamen Fraktionierungseffekten bzw. bei Bodenwässern von ihren mittleren Verweilzeiten ab.

Die anhand der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im jahreszeitlichen Verlauf erkennbaren Beziehungen zwischen Niederschlag, Interflow, Grundwasser und Gesamtabfluß werden für das Gebiet Denzenberg exemplarisch mit einer gemeinsamen Darstellung der einzelnen Ganglinien in Kap. 8 vorgestellt (vgl. auch $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Niederschlag, Sickerwasser und Interflow der 4 Testflächen in Kap. 7.3.1.f). Quantitative Ganglinienseparationen für einzelne N-Q-Ereignisse unter Anwendung einer dafür konzipierten Methode, mit Hilfe von 2 Tracern 3 Abflußkomponenten im Gesamtabfluß zu unterscheiden, werden in Kap. 8.5 diskutiert.

Da auf das Einzugsgebiet Denzenberg der Schwerpunkt der Untersuchungen zur Abflußseparation gelegt wurde, konnten an der Meßstelle P 14, verglichen mit den anderen Gebieten, mehr Abflußerhöhungen mit $\delta^{18}\text{O}$ -Analysen untersucht werden.

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinie von P 14 (Abb. 7-6, a) zeigt kurzfristige, auf den etwa sinusförmigen Jahresgang des Basisabflusses aufgesetzte Spitzen, die, je nach Isotopengehalt der zugemischten Komponente, zu positiveren oder negativeren $\delta^{18}\text{O}$ -Werten tendieren. Die Abflußerhöhungen

werden von Verringerungen der Lf-Werte begleitet. Bemerkenswert sind die besonders starken und sehr kurzfristigen Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen im August und November 1985. Die sehr dichte Probenserie vom Mai 1985 zeigt trotz der sehr starken Abflußerhöhungen nur geringere $\delta^{18}\text{O}$ -Schwankungen. Hier liegen die ^{18}O -Gehalte der den Gesamtabfluß erhöhenden Komponenten Niederschlag und Interflow näher am Basisabfluß als während der N-Q-Ereignisse im August und November (vgl. Kap. 8 und 9). Im Gebiet P 17 (Abb. 7-6 b) fallen, bei ausgeglicheneren $\delta^{18}\text{O}$ -Werten des Basisabflusses, die ^{18}O -Änderungen während Schneeschmelz-Ereignissen (Februar 1985, März 1986) stärker aus, was zu einer größeren Bandbreite der $\delta^{18}\text{O}$ -Extremwerte führt. Der bei P 17 wesentlich unruhigere und häufiger zu niedrigeren Werten tendierende Verlauf der Lf-Kurve zeigt den im Vergleich zu P 14 insgesamt deutlich höheren Q_{on} -Anteil am Gesamtabfluß (1985: 38% gegenüber 29% und 1986: 46% gegenüber 34% (vgl. Tab. A-5-7, Anhang).

Die Lf-Ganglinien der beiden Vergleichsgebiete P 6 und P 8 sind in ihrem Verlauf besser zu unterscheiden (Abb. 7-7). Bei P 6 wird nach jeweils kurzen Verdünnungsvorgängen sehr rasch wieder die Ausgangsleitfähigkeit erreicht, wohingegen bei P 8 eine nahezu parallel zum $\delta^{18}\text{O}$ -Jahresgang verlaufende Lf-Variation mit einzelnen Auslenkungen beobachtet werden kann. Daraus lassen sich für das Gebiet P 8, im Vergleich zu P 6, insgesamt länger anhaltende, niedrig mineralisierte Q_{on} -Zumischungen ableiten (vgl. Tab. A-5-7: Q_{on}/Q_i -Anteile 1985: 50% gegenüber 38% und 1986: 52% gegenüber 40% im Gebiet P 6). Die minimalen Lf-Werte von ca. 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ deuten in beiden "Tongebieten" P 6 und P 8 auf sehr hohe Q_{on} -Anteile in extremen Abflußsituationen (wie

im Mai 1985) hin. In den Sandgebieten P 14 und P 17 liegen die Lf-Minima bei 160 - 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Auch die Spitzenwerte der mittleren Tagesabflüsse und die daraus berechneten NQ/HQ-Quotienten lassen die "Sandgebiete" mit niedrigeren Spitzenabflüssen von den "Tongebieten" klar unterscheiden.

Neben dem ausgeprägteren $\delta^{18}\text{O}$ -Jahresgang im Basisabfluß bei P 8 (Auswirkungen eines länger anhaltenden Deckschichtenabflusses, Kap. 7.4.1) führen die im Vergleich zu P 6 negativeren Extremwerte während der Schneeschmelze 1986 zu einer größeren $\delta^{18}\text{O}$ -Variation der Einzelwerte (Tab. 7-4). Auslenkungen zu weniger negativen $\delta^{18}\text{O}$ -Werten wurden in den Gebieten P 6 und P 8 nur im Mai 1985 gemessen. Vorherrschend waren Ereignisse mit an ^{18}O abgereichertem Gesamtabfluß durch Zumischungen leichter Schmelzwässer.

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Variationen bei P 18, dem oberen Teileinzugsgebiet von P 6, sind infolge einer stärkeren Beeinflussung von Deckschichtenabfluß stärker als bei P 6. Auch hier kommt die größere Schwankungsbreite durch negativere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte während der Schneeschmelze 1986 zustande. Die sehr starken Verringerungen der Lf-Werte (Minimum 92 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im Mai 1985) zeigen den dominierenden Q_{on} -Anteil am Gesamtabfluß während

Spitzenabflüssen. Dies trifft auch für das Einzugsgebiet P 9 mit einem Lf-Minimum von 106 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zu. In diesem Gebiet mit Q_{on} -begünstigenden km5-Hängen wurde die größte Schwankungsbreite der $\delta^{18}\text{O}$ -Einzelwerte (3,77 $^{\circ}/\text{‰}$) festgestellt. In den großen, übergreifenden Einzugsgebieten P 1 und P 5/1 liegen die gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ -Extremwerte, bei nahezu gleichen Schwankungsbreiten um ca. 2 $^{\circ}/\text{‰}$, sehr dicht beieinander.

Die in den kleineren Einzugsgebieten erkennbaren, größeren oder kleineren Bandbreiten der Extremwerte (Differenz der $\delta^{18}\text{O}$ -Extremwerte: 1,43 bis 3,25 $^{\circ}/\text{‰}$, vgl. Tab. 7-4) sind auf lokal wirksame Effekte zurückzuführen, die sich in den großen Gebieten offenbar ausgleichen. $\delta^{18}\text{O}$ -Minima während der Schneeschmelzereignissen und Maxima im Mai und August 1985 bestätigen die in den Teilgebieten beobachteten Tendenzen der $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen.

Die minimalen Lf-Werte liegen bei P 5/1 mit 174 $\mu\text{S}/\text{cm}$ niedriger als bei P 1 (207 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Die relativ große Lf-Verringerung bei P 1 ist auf die nur bei Niedrigwasser dominierende hohe Mineralisation aus dem Gipskeuper zurückzuführen. Die Änderungen der Gesamtabflußmenge fallen bei P 5/1 infolge der mehr Q_{on} -begünstigenden höheren Lias- und km5-Anteile wesentlich stärker aus, was an den NQ : HQ-Verhältnissen abzulesen ist.

8. Spezielle Untersuchungen zur Abflußbildung und zum Stoffaustausch mit dem Interflow

Das Gebiet Denzenberg bildete den Schwerpunkt der Untersuchungen zur Abflußbildung mit Interflow. Um das Interflow-Verhalten im "Sandgebiet" Denzenberg mit dem in einem "Tongebiet" zu vergleichen, wird zusätzlich das Abflußverhalten am Pegel 9 (Josefsruh, Oberlauf des Kleinen Goldersbachs) im jahreszeitlichen Verlauf näher betrachtet. Das Gebiet besteht fast vollständig aus Knollenmergelhängen. Da bei P 9 hauptsächlich Oberflächen- bzw. oberflächennaher Abfluß erfaßt wird (vgl. Kap. 3.4.1), kann dieser Pegel als Meßstelle für den Interflow herangezogen werden. Auch in diesem Gebiet werden die Interflow-Höhen in Beziehung zu der Höhe des Bestandesniederschlags, der Bodenfeuchte und des Gesamtabflusses (Abfluß am Pegel 8) gesetzt (Kap. 8.2.1.1, Kap. 8.2.1.2).

Die IF-Anteile am Bestandesniederschlag und am Gesamtabfluß bei P 14 wurden für die gesamte Untersuchungsperiode, sowohl mit direkten Messungen als auch mit Separationsberechnungen ($\delta^{18}\text{O}$), bestimmt. Aus der Differenz von Gesamtabfluß und Interflow konnte die Höhe des Grundwasserabflusses berechnet und mit den auf graphischem Weg ermittelten Daten verglichen werden.

Es wird eine Methode der 3-Komponenten-Separation eingeführt, die zwischen Frischwasser aus aktuellem Niederschlag (IF_c -Komponente), älterem Vor-Ereignis-Bodenwasser (IF_{pe} -Komponente) und Grundwasser (GW-Komponente) unterscheidet.

8.1 Die Niederschlag(N)-Abfluß(Q)-Situation während des Untersuchungszeitraums im Einzugsgebiet Denzenberg

Ergänzend zur Beschreibung der allgemeinen N-Q-Situation während der Untersuchungsperiode (Kap. 5.3.1) wird im folgenden detaillierter auf die Verhältnisse im Einzugsgebiet Denzenberg eingegangen (vgl. auch Schüttungs- bzw. Abflußverhalten der Meßstellen Q 3 und P 14, Kap. 5.5.1 und 7.4.2).

Die höchsten Tagesabflußwerte an der Meßstelle P 14 wurden in dem mit 117 mm NB-Höhe extrem nassen Mai 1985 (Q_t maximal 8,42 mm/d am 29.05.1985) und während der ausgeprägten Schneeschmelzen mit Hochwasserereignissen im April 1986 (Q_t maximal 7,19 mm/d am 03.04.1986) gemessen. In diesen Monaten wurden auch die höchsten IF-Mengen mit der IF-Meßstelle aufgefangen (Abb. 8-1 c). Auch von der Pegelmeßstelle P 9, an der weitgehend nur In-

terflow erfaßt wird, liegen aus diesen Monaten die höchsten Abflußwerte vor, vgl. Abb. A-8-1, Anhang, und Abb. 7-8). Die geringsten Abflußhöhen wurden jeweils zum Ende des hydrologischen Jahres und während der Wintermonate gemessen. Die Abflußminima, zwischen Oktober 1985 und Januar 1986, lagen zwischen 0,06 und 0,08 mm/d. Nach dem sehr nassen Sommer 1986 lag der geringste Abfluß im hydrologischen Jahr 1986 bei 0,15 mm/d (18.10.1986).

Während des von AGSTER (1983) beschriebenen früheren Meßzeitraums wurden mit 5,12 mm/d kleinere Maxima (Schneesmelze 1979) aber ähnliche Minimalabflüsse (0,08 mm/d) gemessen.

Die Abflußspitzen sind auf einen saisonal stark schwankenden Basisabfluß "aufgesetzt". Die Peaks sind weniger scharf ausgeprägt als am Pegel 1, Großer Goldersbach, (vgl. Abb. 5-2), obwohl das Gebiet P 14 im Vergleich zum großen, übergreifenden Einzugsgebiet des westlichen Schönbuchs (P 1) kleiner und steiler ist. Dies ist auf den Einfluß der im Gebiet P 1 weit verbreiteten, weniger gut durchlässigen Deckschichten (Lias, km5) zurückzuführen, die prozentual höhere Q_{on}/Q_t -Anteile bewirken (vgl. Tab. A-5-7 im Anhang und Abb. 5-4 b).

Die Abflußspitzen fallen bei höherer Bodenfeuchte (vgl. pF-Ganglinie, Abb. 8-1 c) relativ zum Basisabfluß wesentlich stärker aus. In den trockenen Sommer- und Herbstmonaten (vgl. z.B. Abflußspitzen im August und November 1985) wird ein größerer Teil des Niederschlags vom Boden aufgenommen. Die in Abb. 8 mit Pfeilen markierten Abflußspitzen wurden detailliert ausgewertet (Kap. 8.5).

Die gute Korrelation von Quellschüttung (Q 3) und Basisabfluß (P 14) weist auf einen großen Einfluß eines, durch das Schüttungsverhalten der Quelle Q 3 beschriebenen, relativ homogenen Aquifers hin. Die starke Zunahme des Grundwasserabflusses ab Mai 1985 bzw. ab Ende März 1986 (vgl. ungleiche Verteilung der Q_g -Abflußhöhen auf die hydrologischen Halbjahre, Kap. 5) sorgt in beiden Untersuchungsjahren für den im Vergleich zum Einzugsgebiet von P 1 wesentlich höheren Gesamtabfluß im Gebiet Denzenberg (vgl. Tab. A-5-7, Anhang). Die aus der Schüttungsganglinie abzuleitende Phase der Grundwasserneubildung reicht 1985 bis Mitte Juni und 1986 bis Anfang/Mitte Mai.

Abgesehen von den kurzfristigen, durch Q_{on} hervorgerufenen, Schüttungsspitzen (maximal 0,182 l/s, Ereignis am 07.05.1985) weist der sonst ausgeglichene Kurvenverlauf mit einem hohen Schüttungsquotienten von 1 : 4,4 (mit Maximum 0,14 l/s und Minimum 0,032 l/s) auf ein gu-

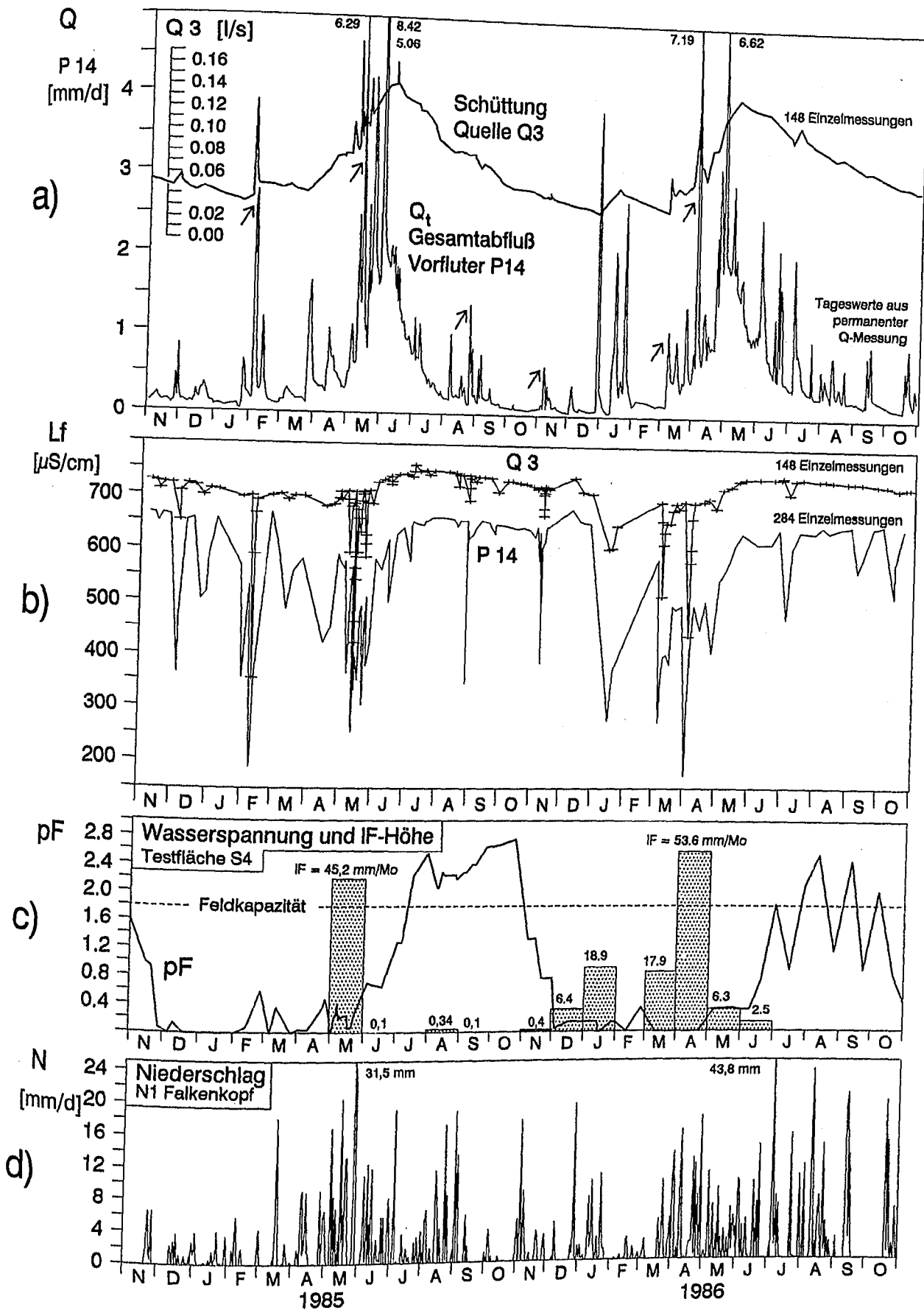


Abb. 8-1: a) Gesamtabfluß am Pegel 14 (Q_t , mm/d), Schüttung der km4-Quelle Q3 (l/s), b) Änderungen der elektrischen Leitfähigkeiten (Lf) bei P14 und Q3, c) Interflow-Höhe (IF, mm/Mo) und Wasserspannung (pF) auf der Testfläche S4 Denzenberg, d) Niederschlagshöhe (N, mm/d) im Untersuchungszeitraum 1985-1986. Wasserspannung: 102 pF-Mittelwerte, 9 Tensiometer (0,12 m und 1,0 m u. Gel.). Interflow: Erfassung über IF-Meßstelle, Fläche 560 m². Pfeilmarkierung an Q_t : ausgewertete N-Q-Ereignisse, vgl. Kap. 8.5.

tes Retentionsvermögen des Stubensandstein-Aquifers hin (vgl. Kap. 5.5.1). Dies belegt auch der mit $\alpha = 0,0057 \text{ d}^{-1}$ niedrige Leerlaufkoeffizient (vgl. Tab. 5-20). Es ist von einer Grundwasser-Speicherung vorwiegend in Feinklüften und Poren auszugehen, aus denen eine langsame Abgabe erfolgt (vgl. VILLINGER, 1969; RICHTER und LILLICH, 1975; KREBS, 1979; HOLZWARTH, 1980). Nur bei hohen Grundwasserständen werden Bereiche mit höherer Wasserwegsamkeit (Kluftweite, -dichte) wirksam, für die α -Werte um $0,2 \text{ d}^{-1}$ ermittelt wurden (vgl. Besprechung einzelner N-Q-Ereignisse, Kap. 8.5).

Der Jahresgang des Grundwasserabflusses kann mit dem Gang der Bodenfeuchte, die als Mittelwert aller Tensiometerdaten der Versuchsfläche Denzenberg dargestellt ist, wie folgt korreliert werden. Der höchste Füllungsgrad des Aquifers wird jeweils am Ende der Periode mit hoher Bodenfeuchte, Winter- und Frühjahrsmonate, bzw. bei beginnender Austrocknung des Bodens (Wiederanstiegs der pF-Kurve) erreicht.

Die kurzfristigen Schüttungsspitzen werden in der Hauptsache auf Zumischung von rasch abfließendem Interflow zurückgeführt. Infolge der hohen Beteiligung von niedrig mineralisiertem Interflow sinkt die Gesamtmineralisation in der Quellschüttung von Q 3 während kurzfristiger Schüttungsspitzen ebenso nur sehr kurzzeitig stark ab (Abb. 8-1 a, vgl. auch $\delta^{18}\text{O}$ -Werte, Kap. 5.5.1). Minimale Lf-Werte wurden im Februar 1985 mit $359 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Schneeschnelzereignis mit der relativ größten Schüttungssteigerung) und $427 \mu\text{S}/\text{cm}$ (N-Q-Ereignis im Mai 1985) registriert.

Die sonst sehr gleichmäßig mit einer nur geringen Schwankungsbreite zwischen ca. 700 und $750 \mu\text{S}/\text{cm}$ verlaufende Lf-Ganglinie zeigt einen Jahresgang mit Maxima im Juli 1985 und Juni 1986, jeweils ca. 1 Monat nach dem Schüttungsmaximum.

Die Lf-Ganglinie von P 14 verläuft weitgehend parallel zu der von Q 3, wobei sie sich, auch zu Trockenzeiten, auf einem um ca. $50 - 100 \mu\text{S}/\text{cm}$ niedrigerem Niveau bewegt. Dies kann durch eine Beteiligung von flacherem, geringer mineralisiertem Grundwasser am Basisabfluß bei P 14 erklärt werden. Die bei Niedrigwasser gemessenen Lf-Werte bewegten sich im allgemeinen um $650 \mu\text{S}/\text{cm}$ mit einer Schwankungsbreite von ca. $\pm 15 \mu\text{S}/\text{cm}$. Während Hochwasserereignissen mit kurzfristig höheren Q_{on} -Anteilen und bei länger anhaltenden Zumischungen von niedriger mineralisiertem Interflow während der Schneeschmelze und den feuchten Frühjahrsmonaten wird die Differenz beider Ganglinien größer.

Die im Vergleich zu Q 3 während der Winter- und Frühjahrsmonate breiteren negativen Lf-

Peaks im Gesamtabfluß bei P 14 lassen auf jeweils länger wirksame Beeinflussungen durch niedriger mineralisierten Interflow schließen. Dies wird besonders im Februar und Mai 1985 sowie im März und April 1986 deutlich. Während dieser Zeit kehren die Lf-Werte von Q 3 rasch wieder auf das Ausgangsniveau zurück, die von P 14 bleiben jedoch nach Extremwerten auf niedrigerem Niveau. In den trockeneren (vgl. auch Bodenfeuchte, s.u.) Sommer- und Herbstmonaten zeigen die bei Ereignissen im August und November 1985 registrierten Lf-Abnahmen auch bei P 14 eine nur sehr kurzfristige Zumischung niedriger mineralisierten Wassers an.

Die niedrigsten Lf-Werte im Gesamtabfluß (Q, P 14) wurden während Hochwasserereignissen Anfang Februar 1985 ($187 \mu\text{S}/\text{cm}$) und April 1986 ($170 \mu\text{S}/\text{cm}$) gemessen. Neben diesen und den eingehend untersuchten Ereignissen im Mai 1985 werden die bei trockenen Bedingungen (niedrigerer Füllungsgrad des Bodenwasservorrats und des Grundwasserspreichers) stattfindenden Abflußerhöhungen im August und November 1985 diskutiert (vgl. Kap. 8.5.). Bei den letztgenannten fielen die Lf-Werte relativ zum jeweiligen Vor-Ereignis-Wert ebenfalls sehr stark, jedoch nur ganz kurzfristig auf $348 \mu\text{S}/\text{cm}$ und $390 \mu\text{S}/\text{cm}$.

8.2 Quantitative Erfassung des Interflow und seine Bildungsbedingungen - Testfläche Denzenberg

Zur direkten Messung und Beprobung des Interflow wurde in Zusammenarbeit mit Herrn W. Fleck eine Versuchsanlage als IF-Meßstelle konzipiert und im April 1984 bei der Versuchsfläche S 4 (Kap. 3.4.3) im Einzugsgebiet Denzenberg (Kap. 3.4.1) eingerichtet. Die Meßeinrichtung ist in Abschnitt 4.1 und Abb. 4-1 beschrieben. Erste Ergebnisse der mit dieser IF-Meßstelle durchgeführten Interflow-Mengenmessung wurden von FLECK (1987) vorgestellt.

Aus den während des Meßzeitraums April 1985 bis Juni 1986 mit der IF-Meßstelle gemessenen IF-Mengen und ihren Beziehungen zu den klimatischen Faktoren Bestandesniederschlag (NB) und Wasserspannung (pF-Werte) werden im folgenden die Bildungsbedingungen des Interflow abgeleitet.

Den Arbeiten an der Meßeinrichtung waren feucht-kühle Winter- und Frühjahrsmonate vorausgegangen. Verschiedene Frostperioden mit anschließenden Schneeschmelzen endeten im März 1985. Der April war durch einzelne Schneeregenfälle gekennzeichnet. Die Wasserspannungen in verschiedenen Tiefen des Bodenprofils lagen wäh-

rend des gesamten Aprils unter $pF = 1$, d.h. deutlich über der Feldkapazität (vgl. Abschnitt 8.2.1.3).

Sofort nach Ausheben des Sammelgrabens (vgl. Kap. 4.1) war Tropfwasser entlang von Wurzeln und in Hohlräumen (Sekundärporen) zu beobachten. An der Basis des sandig-lehmigen Deckschutts war über der tonreichen Basisfolge eine mehrere Zentimeter mächtige, gesättigte Bodenschicht ausgebildet. Das liegende dieser wasserführenden Schicht, der Basisschutt, und die unterlagernden km4-Mergel konnten dagegen als vergleichsweise trocken angesprochen werden.

Diese Beobachtung hat die Modellvorstellung für Perioden mit hoher Bodenfeuchte bestätigt, daß sich das in den Boden eindringende Wasser nach kurzer vertikaler Sickerung an der Grenzschicht Deckschutt/Basisschutt staut und lateral im Deckschutt als Interflow abfließen kann (vgl. Kap. 2 und Kap. 8.2.1.3, Abb. 8-3).

8.2.1 Das Interflow-Verhalten im jahreszeitlichen Verlauf

8.2.1.1 Monatssummen von Interflow und Bestandesniederschlag

In Tab. 8-1 sind die monatlichen Höhen des Bestandesniederschlags (Ergebnisse der an die IF-Meßstelle angrenzenden Versuchsfläche S 4) und des Interflow (IF, Ergebnisse der IF-Meßstelle) für den Zeitraum Mai 1985 bis Juni 1986 zusammengestellt. Für die Berechnung der IF-Abflußhöhe (mm/Monat) wurde eine entwässerte Hangfläche von 560 m² angenommen (vgl. Kap. 4.1).

Tab. 8-1: Monatssummen des Interflow (IF, IF-Meßstelle) und des Bestandesniederschlags (NB-Versuchsfläche) sowie IF/NB-Verhältnisse im Untersuchungszeitraum Mai 1985 bis Juni 1986 (Gebiet Denzenberg).

	IF	NB	IF/NB
	---- [mm]	----	[%]
1985 Mai	45,20	117,0	38,6
Juni	0,07	41,5	0,2
Juli	0,02	17,1	0,1
August	0,34	55,8	0,6
September	0,11	26,1	0,4
Oktober	0,00	6,1	0,0
November	0,43	66,6	0,7
Dezember	6,43	28,6	22,5
1986 Januar	18,90	53,3	35,5
Februar	0,08	13,7	0,6
März	17,90	33,8	53,0
April	53,60	105,4	50,9
Mai	6,25	44,5	11,0
Juni	2,50	56,5	4,4

Interflow wurde in nennenswerter Höhe nur in den Wintermonaten, beginnend im Dezember,

und den folgenden, meist niederschlagsreichen Frühjahrsmonaten bis Mai, gemessen. Für diese Monate wurden im Einzugsgebiet der IF-Meßstelle IF-Höhen zwischen 6,25 mm (Mai 1986) und 53,6 mm (April 1986) bestimmt. In dieser Zeit flossen zwischen 11% (Mai 1986) und 53% (März 1986) des NB als Interflow aus dem Versuchsfeld ab.

Während der Vegetationsperiode und den trockenen Sommer- und Herbstmonaten wurde entweder kein Interflow registriert oder er spielte, bezogen auf die Niederschlagsmenge, nur eine untergeordnete Rolle. Die IF/NB-Anteile lagen in den Monaten Juni - November 1985 unter 1%. Im insgesamt feuchteren Juni 1986 wurden noch 2,5 mm Interflow registriert (vgl. auch Abb. 8-1).

Aus den IF/NB-Verhältnissen sind zwei gut zu unterscheidende Phasen der Abflußbildung mit und ohne Interflow abzulesen. Im Mai 1985 flossen noch ca. 39% der Bestandesniederschlagsmenge als Interflow ab, jedoch schon im Juni wurde nahezu kein IF mehr registriert. Auch im Frühjahr 1986 klang die Interflow-Periode, die im Februar wegen geringer und als Schnee fallender Niederschläge nur vorübergehend unterbrochen war, sehr rasch ab. Markant war das plötzliche Wiederauftreten von stärkerem Interflow ab Dezember 1985. Trotz der im Vergleich zum November wesentlich geringeren Niederschlagsmenge stieg das Verhältnis IF/NB von 0,6% auf 22,5% sprunghaft an.

Das Einzugsgebiet von P 8 (Kleiner Goldersbach) mit seinem Teilgebiet am Pegel 9 (Josefsruh) wird als Vergleichsgebiet für das Interflow-Verhalten im Gebiet Denzenberg herangezogen (s.o.). Im Gebiet von P 14 herrschen mehr sandige, im Gebiet von P 8 mehr tonige Deckschichten vor. Da bei P 9 hauptsächlich Oberflächen- bzw. oberflächennaher Abfluß erfaßt wird (vgl. Kap. 3.4.1), kann dieser Pegel als Meßstelle für Interflow angesehen werden.

Aus dem Leerlaufverhalten am Pegel 8, an dem auch km4-Grundwasser erfaßt wird, können, wie bei P 14, zwei Speichertypen unterschieden werden. Ein langsamer Speicher mit $\alpha = 0,079 \text{ d}^{-1}$ und ein schnellerer mit $\alpha = 1,24 \text{ d}^{-1}$. Für das aus km5-Hängen bestehende Teilgebiet bei P 9 wurde ausschließlich der kurzfristige Speichertyp mit $\alpha = 0,99 \text{ d}^{-1}$ ermittelt (Durchschnittswert der Auswertung von 6 Hochwasserwellen (Kap. 8.5, vgl. FLECK, 1987)). Dies zeigt, daß die Abflußspitzen im Gesamtabfluß bei P 8 dem Interflow-Speicher der Knollenmergelhänge zuzuordnen sind. Damit stellt das Einzugsgebiet von P 9 näherungsweise eine Interflow-Meßstelle dar.

Auch die Monatssummen des am Pegel 9 gemess-

senen Abflusses (IF: Q-P 9, vgl. Tab. A-8-1, Anhang) geben das mit der IF-Meßstelle registrierte Interflow-Verhalten mit interflow-reichen und -armen Phasen wieder. Hier dauerte die erste Periode mit nennenswertem Interflow von Januar bis Juni 1985. In diesen Monaten (Ausnahme März) wurden IF/NB-Verhältnisse zwischen ca. 9% bis maximal ca. 26% ermittelt. Die höchsten IF/NB-Anteile und absoluten IF-Höhen wurden im Mai mit 25,2% bzw. 39,3 mm/Mo registriert.

Der Übergang zwischen Monaten mit und ohne Interflow fand in diesem Gebiet zwischen Juni und Juli 1985 statt. Er war nicht so klar abzugrenzen wie auf der Versuchsfläche Denzenberg, da das Leerlaufen des Bodenwasserspeichers hier länger andauert (größeres Gebiet, höhere nFk) und Lias-Grundwasser bis August zum Abfluß beitrug (vgl. Schüttungsverhalten Q 31, Abb. A-5-2, Anhang). In den Sommer- und Herbstmonaten blieben die IF/NB-Anteile bis einschließlich November, wie im Gebiet Denzenberg, um und unter 1%, um im Dezember 1985 wieder sprunghaft anzusteigen (vgl. auch Abb. A-8-1, Anhang). Auch in der 2. Interflow-Phase erreichten die monatlichen absoluten IF-Höhen und IF/NB-Verhältnisse nicht ganz die Werte der IF-Meßstelle.

8.2.1.2 Monatssummen von Interflow und Gesamtabfluß

Aus den im Gebiet Denzenberg ermittelten monatlichen IF- und Q_t -Höhen (Tab. 8-2) wird deutlich, daß bei hohem Gesamtabfluß nicht immer entsprechend hohe IF-Mengen abfließen, bzw. daß bei ähnlich hohen monatlichen Gesamtabflüssen durchaus sehr unterschiedliche IF-Höhen zum Abfluß gelangen (vgl. z.B. Abflußhöhen im Mai und Juni 1985 sowie April und Mai 1986).

Tab. 8-2: Monatssummen des Interflow (IF, IF-Meßstelle) und des Gesamtabflusses (Q_t am Pegel 14, Denzenberg) sowie IF/ Q_t -Verhältnis im Untersuchungszeitraum Mai 1985 bis Juni 1986.

	IF	Q_t	IF/ Q_t
	---- [mm]	---	[%]
1985 Mai	45,20	68,4	66,1
Juni	0,07	43,7	0,2
Juli	0,02	15,2	0,1
August	0,34	10,6	3,2
September	0,11	6,4	1,7
Oktober	0,00	3,1	0,0
November	0,43	4,8	9,0
Dezember	6,43	11,2	57,4
1986 Januar	18,90	17,6	107,4
Februar	0,08	5,5	1,4
März	17,90	17,7	101,1
April	53,60	55,5	96,6
Mai	6,25	50,0	12,5
Juni	2,50	29,8	8,4

Die monatlichen IF/ Q_t -Verhältnisse nehmen sprunghaft von Mai-Juni 1985 und April-Mai 1986 ab. Dies bedeutet eine scharfe Trennung zwischen Perioden mit und ohne Interflow. Die teilweise über 100% reichenden IF/ Q_t -Anteile weisen darauf hin, daß die Interflow-Höhe im Einzugsgebiet der IF-Meßstelle (Einzugsgebiet: 560 m²) nicht auf das Gesamtgebiet (Einzugsgebiet: 18,5 ha) übertragen werden kann. Teilflächen des Gesamtgebietes haben entweder keinen Interflow oder sie sind interflow-ärmer als die Meßstellenfläche (vgl. Kap. 8.4).

Die im Vergleichsgebiet Kleiner Goldersbach (P 8, P 9) ermittelten monatlichen IF/ Q_t -Verhältnisse geben prinzipiell das Ergebnis der Testfläche Denzenberg wieder (Tab. A-8-1, Anhang). Auch hier ändern sich die IF/ Q_t -Verhältnisse, wie z.B. von Dezember 1984 auf Januar 1985, April auf Mai 1985 oder November auf Dezember 1985 sprunghaft. Die Unterschiede zwischen den monatlichen IF/ Q_t -Verhältnissen sind im Vergleich zu den Ergebnissen der IF-Meßstelle Denzenberg weniger ausgeprägt. Im Durchschnitt liegen die IF/ Q_t -Anteile über denen des Einzugsgebietes Denzenberg (vgl. Kap. 8.4.3.2). Im Januar und April 1985 erreichen die IF/ Q_t -Verhältnisse Werte von 87 und 99%. Dies bedeutet, daß auch im Gesamtgebiet von P 8 die Interflow-Höhe unter der bei P 9 gemessenen Höhe bleibt. Die Interflow besonders begünstigenden km5-Hänge, die im Gebiet von P 9 einen Flächenanteil von 59% einnehmen, machen am Gesamtgebiet von P 8 nur ca. 46% aus.

8.2.1.3 Bestandesniederschlag und Interflow einzelner Niederschlag-Abfluß-Ereignisse

In Abb. 8-2 sind für insgesamt 28 Einzelereignisse oder Hochwasserperioden die IF-Mengen in Beziehung zu der die Abflußerhöhung auslösenden Niederschlagshöhe (NB-Höhe) gesetzt. Mit dieser Darstellung lassen sich die saisonal stark schwankenden IF-Mengen typisieren.

Die IF/NB-Verhältnisse sind sehr deutlich in 2 Wertegruppen zu untergliedern (zu beachten ist die logarithmische Darstellung der IF-Menge). Als Typ A können die Niederschlag-Interflow-Ereignisse in den Winter- und Frühjahrsmonaten zwischen Januar und Mai, als Typ B Ereignisse während der Monate Juni bis Dezember zusammengefaßt werden.

Die sprunghafte Änderung der als Monatswerte zusammengefaßten IF/NB-Verhältnisse (Tab. 8-1) läßt sich an zeitlich eng aufeinanderfolgenden Einzelereignissen, in Abb. 8-2 durch Datum und

Versuchsfläche Denzenberg:
Bestandesniederschlag und Interflow

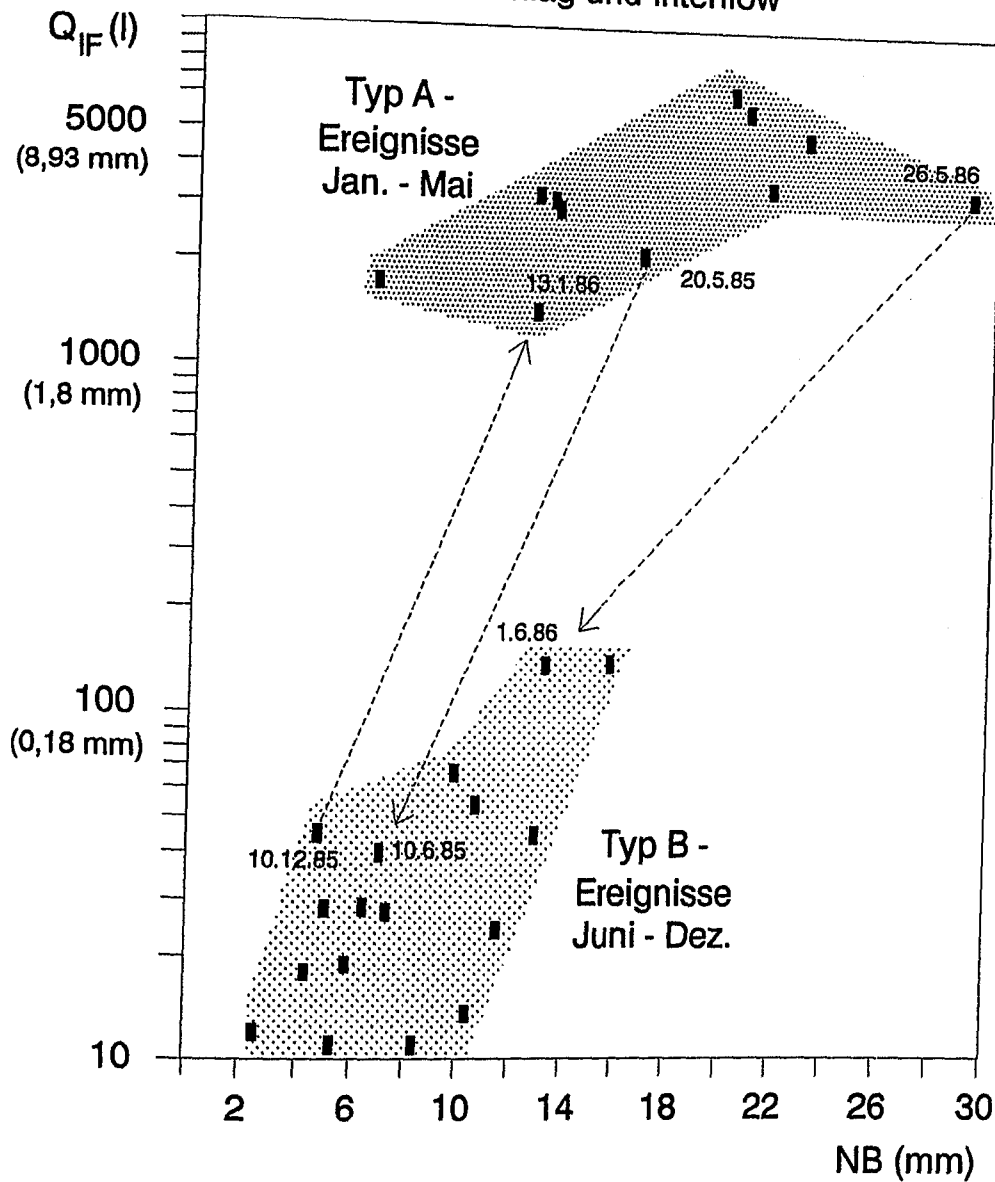


Abb. 8-2: Beziehung zwischen der mit der IF-Meßstelle gemessenen Interflow-Menge (Q_{IF} in l) und der Niederschlagshöhe im Bestand (NB in mm) für einzelne Niederschlag-Abfluß-Ereignisse oder Hochwasserperioden. Typ A-Ereignisse (hohe Q_{IF} /NB-Verhältnisse), Typ B-Ereignisse (niedrige Q_{IF} /NB-Verhältnisse). Markierungen mit Datum: jeweils erstes und letztes Ereignis während der Typ A- oder Typ B-Periode.

Verbindungsline markiert, festmachen. Sowohl 1985 als auch 1986 fand der Übergang von Typ A nach Typ B im Zeitraum Ende Mai bis Anfang Juni statt. Am 10.06.1985 und am 01.06.1986 wurden die jeweils ersten Ereignisse mit sehr geringen IF/NB-Verhältnissen registriert. Ereignisse mit NB/IF-Verhältnissen zwischen den als Typ A oder B zusammengefaßten Wertebereichen konnten nicht ermittelt werden.

Der Übergang von Typ A- zu Typ B-Ereignis findet in der Phase einer erkennbar einsetzenden Bodenfeuchtereduzierung statt (vgl. Abb. 8-1 und

genauere Beschreibung der Bodenfeuchteänderung mit Auswirkungen auf das Interflow-Verhalten, Kap. 8.2.1.4). Die in den kühleren Monaten stark eingeschränkte Evaporation bedingt eine hohe Bodenfeuchte mit Wassergehalten um und über der Feldkapazität. Unter diesen Bedingungen kommt es offenbar zu kräftigem Interflow des Typs A. In den wärmeren Monaten der Vegetationsperiode und dem allgemein trockenen Herbst herrscht dagegen allgemein ein Bodenfeuchtedefizit. Der durch höhere Interzeptionsverluste reduzierte Bestandesniederschlag wird vollständig oder zum

großen Teil im Boden aufgenommen und von den Pflanzen verbraucht. Diese interflow-hemmende oder -reduzierende Pufferwirkung des Bodens kann zu ausbleibendem oder zu sehr geringem Interflow des Typs B führen.

So wurde während eines Einzelereignisses, Ende Mai 1985, zum ersten Mal während der Meßperiode kein Interflow gemessen. Nach Ereignissen mit sehr geringen IF-Mengen Anfang Juni führten die weiteren Juni-Niederschläge nach dem 10.6.1985 wie auch die zwischen dem 01.6.1986 und dem 21.06.1986 zu keinem meßbarem Interflow, obwohl Niederschlagshöhen und -intensitäten anderen vorangegangenen und folgenden Ereignissen mit Interflow ähnlich waren.

Diese Übergangssituation ist nach den oben angeestellten Überlegungen bei Bodenfeuchtegehalten knapp unterhalb der Feldkapazität, wie sie während der saisonalen Austrocknungs- oder Wiederbefeuchtungsphase auftreten, denkbar. Der versickernde Niederschlag dient zur Auffüllung des Bodenfeuchtedefizits. Ein möglicher Überschuß fließt als vergleichsweise schwacher Interflow ab (vgl. Kap. 8.2.1.4).

In den folgenden Sommer- und Herbstmonaten kann es, trotz fortgeschrittener Austrocknung und höherem Bodenfeuchtedefizit, auch bei relativ niedrigeren NB-Höhen, zu geringem Interflow des Typs B kommen. Die Interflow-Bildung kommt dabei vermutlich nicht wie bei Typ A-Ereignissen über die Verdrängung und Mobilisierung älteren Bodenwassers (Bodenfeuchte im Sättigungsbereich) sondern über eine rasche, direkte Wasserbewegung in Grob- und Gröbstoporen (Schrumpfrissen) zustande. Diese Vermutung kann durch Traceruntersuchungen mit $\delta^{18}\text{O}$ belegt werden (Kap. 8.4 und Kap. 8.5).

Der weitaus größte Teil des versickernden Niederschlags wird auch bei einem "offenen" Sekundärporensystem vom Boden aufgenommen (Typ B). Die IF-Menge hängt dann von der Höhe und Intensität des Niederschlags ab. Auch heftige Sommergewitter mit hoher N-Intensität führten zu Niederschlag-Interflow-Verhältnissen des Typs B mit geringen Interflow-Mengen.

Eine schematische Darstellung in Abb. 8-3 zeigt das Prinzip der unterschiedenen Interflow-Typen.

8.2.1.4 Jahresgang der Wasserspannung und des Wassergehalts im Deckschutt und deren Bedeutung für die Interflow-Bildung

Abb. 8-4 zeigt den Verlauf der mittleren Wasserspannung im Deckschutt für den Zeitraum der Interflow-Beobachtung von April 1985 bis Juni

1986. Aus der durchschnittlichen Porengrößenverteilung (vgl. Abb. 3-2) wurden die mittleren Wassergehalte im Deckschutt bis 60 cm (WG in mm) bei den verschiedenen pF-Werten ermittelt.

Nach den nassen Wintermonaten mit z.T. vollständiger Wassersättigung (vgl. Abb. 8-1) verlor der Boden ab Ende Mai 1985 durch Entwässerung der Gröb- und Grobporen rasch an Feuchtigkeit. Im Juli wurde die Feldkapazität unterschritten. Vom 30.07.1985 und 22.10.1985 lagen mit $pF = 2,90$ und $pF = 2,94$ die Höchstwerte der mittleren Wasserspannung vor.

Innerhalb von nur ca. 2 Wochen (Messungen vom 19.11.1985 und 03.12.1985) war der Boden in 30 cm Tiefe wieder wassergesättigt. (Die bis 20 cm Tiefe eingebauten Tensiometer konnten ab November 1985 bis Frühjahr 1986 wegen Frostgefahr nicht betrieben werden.) Die Wassersättigung, die sich in kurzer Zeit in 30 cm Tiefe einstellte (Messung der Wasserspannung ca. 10 cm über der Grenze zum schlecht durchlässigen Basisschutt, vgl. Abb. 8-4), ist durch die Ausbildung eines Stauhizontes an der Grenze Deckschutt/Basisschutt zu erklären. Schon eine geringe Niederschlagsmenge von nur ca. 6 mm genügt, um den Porenraum der Grobporen ($pF 1,8 - 0,6$, 6% PV), oder ca. 15 mm um den Porenraum der Gröb- und Grobporen ($pF 1,8 - -\infty$, 15% PV) von 40 - 30 cm Tiefe zu füllen. (Diese Angaben beziehen sich auf den B_{vg} -Horizont in 15-40 cm Tiefe, vgl. Bodenprofil S 4-2, Abb. 3-2).

Die dafür erforderliche Sickerwassermenge stand zu dieser Zeit zur Verfügung. Zwischen dem 19.11.1985 und dem 3.12.1985 fielen ca. 25,7 mm NB, wovon 14 mm als Schneefälle (20.-22.11.1985) erst ab dem 28.11. schmolzen und für eine kurzfristige Erhöhung des Sickerwasserstroms sorgten.

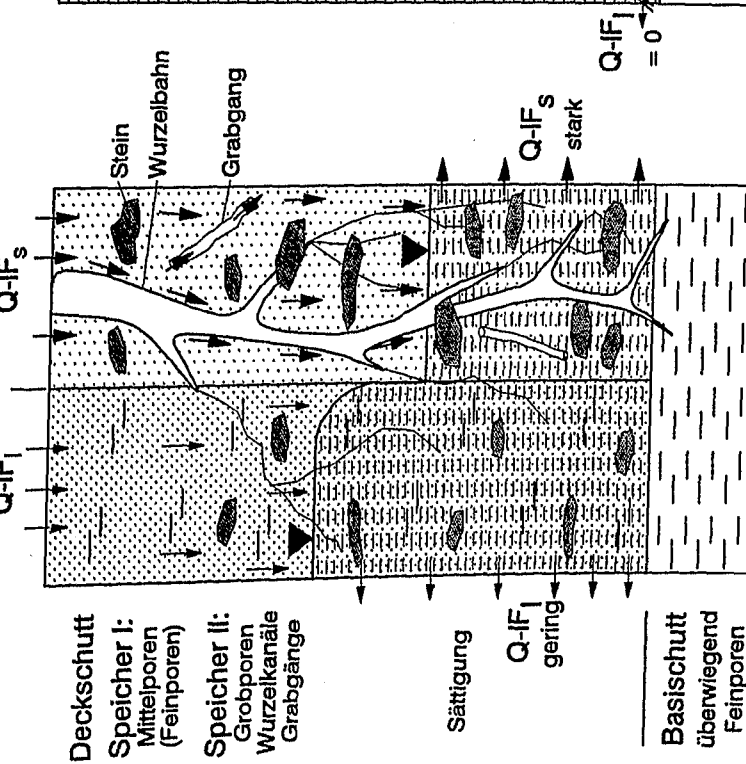
Während des folgenden Winterhalbjahres 1985/86 blieb der Deckschutt in 30 cm Tiefe wassergesättigt. Nur eine Messung am 19.02.1986 (Frostperiode mit Schneeniederschlägen) zeigte eine vorübergehend geringere Bodenfeuchte im Deckschutt. Wie im Mai 1985 begann im April 1986, trotz sehr hoher (Bestandes-)Niederschläge (vgl. Tab. 8-1), die Entwässerung des Deckschutts. Dies wurde hauptsächlich durch die einsetzende Transpiration (Blattaustrieb) bewirkt.

Basierend auf den Messungen der Interflow-Mengen und der daraus entwickelten Modellvorstellung der Interflow-Bildung (Kap. 8.2.1.3, Abb. 8-3) können den N-IF-Ereignissen vom Typ A und Typ B deutlich unterschiedliche Bodenfeuchtezustände zugeordnet werden. Dies bestätigt der Verlauf der pF-Ganglinie. Bis zum 20.05.1985 wurden Ereignisse des Typs A (bei fast vollständiger Sättigung) und schon Anfang Ju-

Winter-/Frühjahrssituation

Typ A

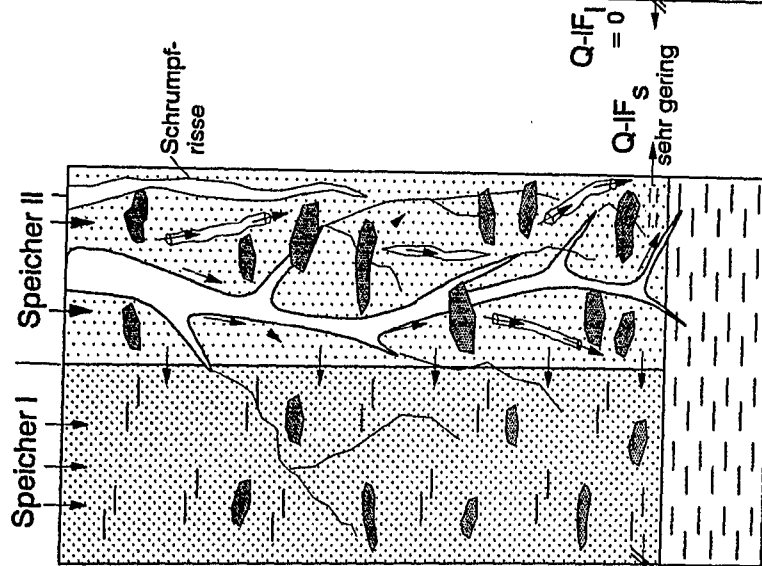
- Bodenwassergehalt $> F_k$
- Ausbildung eines StauhORIZONTS
- piston flow vorherrschend, d.h. Verdrängung älteren Bodenwassers
- Oberflächenaustausch bei vollständiger Sättigung des Deckschutts möglich
- Speicher I | Speicher II
- Interflow - Wasserbewegung langsam
- $Q-IF_1$
- $Q-IF_s$



Sommersituation

Typ B

- Bodenwassergehalt $< F_k$
- keine Ausbildung eines StauhORIZONTS
- weitgehender Verbrauch des Sickenwassers zur Auffüllung des Bodenfeuchte-defizits
- rasche Wasserbewegung $Q-IF_s$ in (geweiteten) Grobporen (z.B. Schrumpfrissen) möglich
- jedoch nur sehr geringer "Direktabfluß" des versickernden Niederschlagswassers IF_e



Übergangssituation

Typ A - B

- Bodenwassergehalt $< = F_k$
- keine Ausbildung eines StauhORIZONTS
- keine erweiterten Grobporen (Schrumpfrisse) vorhanden, kein IF_e
- vollständige Aufnahme des Sickenwassers zur Auffüllung des Bodenfeuchte-defizits bis zur nF_k
- kein Interflow

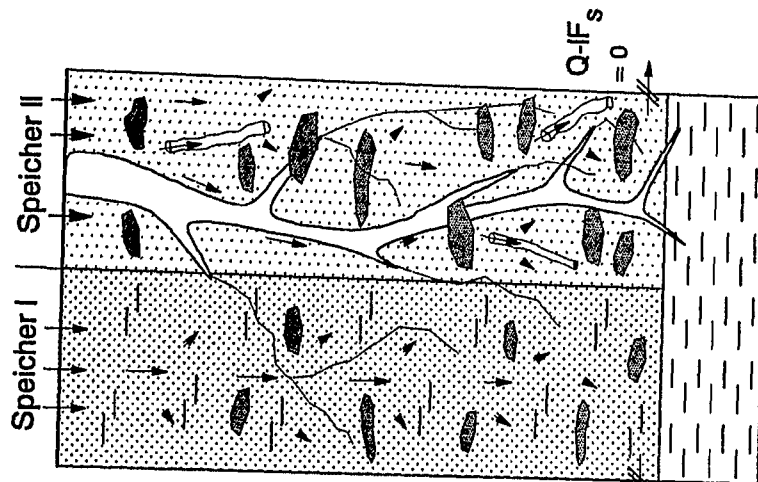


Abb. 8-3: Schema zur Erläuterung der verschiedenen Fließbewegungen des Interflow (Interflow-Typen) bei unterschiedlichen Bodenwassergehalten.

Versuchsfläche Denzenberg Wasserspannungen und Wassergehalte im Deckschutt

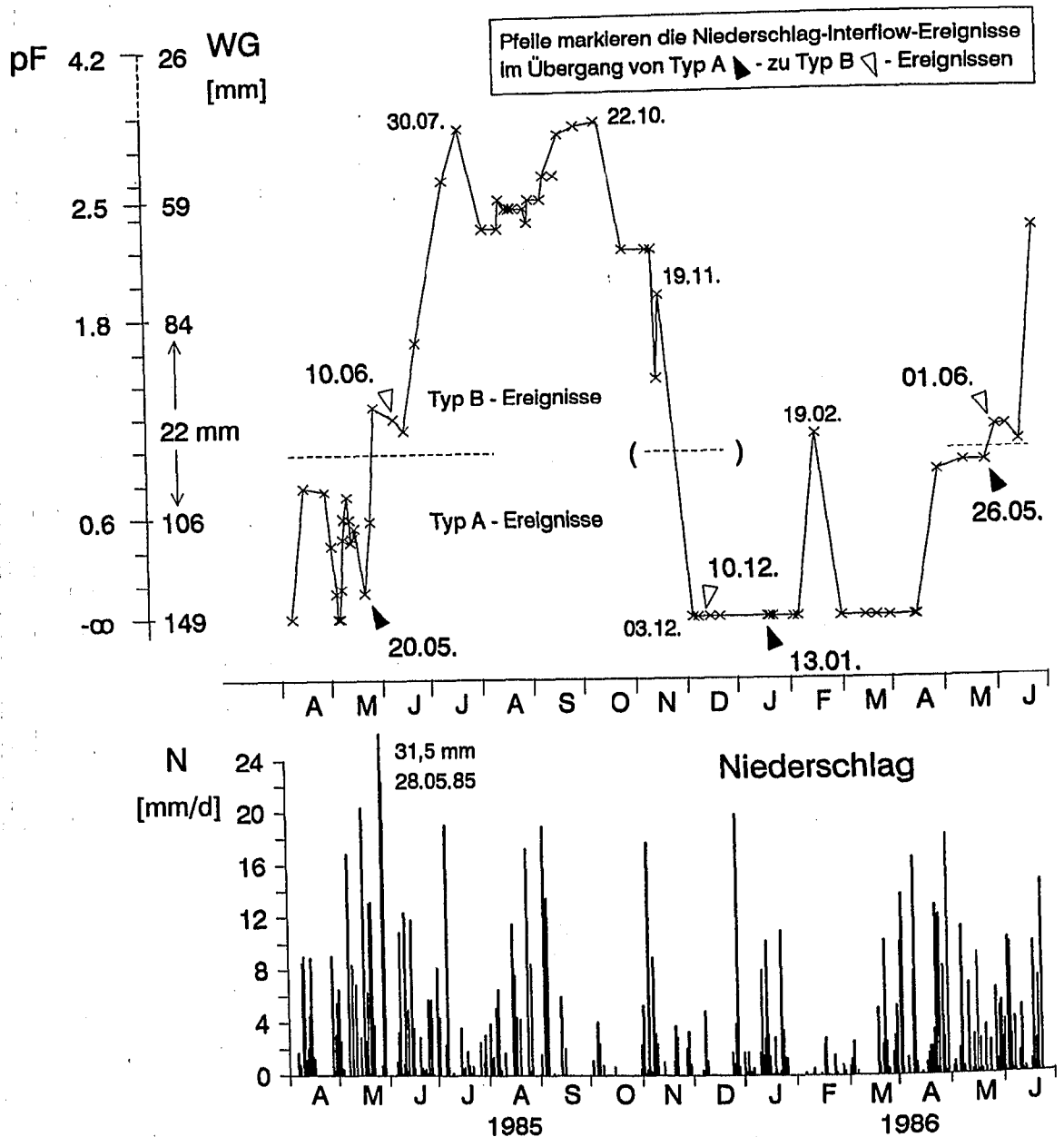


Abb. 8-4: Wasserspannungen und Wassergehalte im Deckschutt mit Markierung der im Übergang von Typ A nach Typ B beobachteten Niederschlag-Interflow-Ereignisse bzw. Hochwasserperioden (vgl. Erläuterungen im Text, Kap. 8.2.1.3, 8.2.1.4).

ni, am 10.06.1985, das erste des Typs B (deutlich geringeres IF/NB-Verhältnis, vgl. Abb. 8-2) bei pF ca. 1,2 registriert.

Nach einer kurzen Phase ohne Interflow im Juni, wurden ab 06.07.1985 in den Sommer- und Herbstmonaten N-IF-Ereignisse des Typs B bei hohen Wasserspannungen und Wassergehalten unter der Feldkapazität ($pF \geq 1,8$) gemessen.

Am 10.12.1985 wurde das nach dem Q-IF/NB-Verhältnis letzte Ereignis des Typs B und am

13.01.1986 das erste des Typs A mit wieder wesentlich höherem Q-IF/NB-Verhältnis gemessen (vgl. auch Abb. 8-2). Die trotz hohen Bodenwassergehalts sehr geringe Interflow-Menge während des Ereignisses vom 10.12.1985 ist auf den oben beschriebenen Effekt mit einem weitgehenden Verbrauch des Sickerwassers (Ausbildung eines Stauwasserkörpers) zurückzuführen.

Das NB-IF-Ereignis vom 10.12.1985 fand somit ebenso in einer Bodenfeuchte-Übergangssitua-

tion statt wie das Ereignis vom 10.06.1985, bei dem versickernder Niederschlag sowohl zur Ausbildung eines Stauwasserkörpers, zu diesem Zeitpunkt aber vor allem auch zur Transpiration, verbraucht wurde.

Die Übergangsereignisse sind nach ihrem IF/NB-Verhältnis dem Typ B zuzurechnen. Unterscheidet man aber den Abflußmechanismus bei Typ A-Ereignissen mit hoher Bodenfeuchte (Wassersättigung im Stauhorizont) und einer möglichen Verdrängung älteren Bodenwassers von dem bei Typ B-Ereignissen mit deutlichem Bodenfeuchtedefizit im Sommer und Herbst und einer ausschließlichen Wasserbewegung über Gröb- und Grobporen (Schrumpfrisse), sind diese Übergangsereignisse eher dem Typ A zuzuordnen. Genaueren Einblick in die Interflow-Bildung und die Zusammensetzung des als Interflow abfließenden Wassers geben die isotonenchemischen Untersuchungen (vgl. Kap. 8.4 und 8.5).

Das Ende der Beobachtungsperiode ist gekennzeichnet durch Ereignisse des Winter-Frühjahrs-typs A (Leerlaufen des Stauwasserkörpers bis zum 26.05.1986). Trotz der unterschiedlichen Niederschlagssituation beider Jahre (vgl. u.a. Tab 8-1) wurde diese Entleerung auch 1985 beinahe zur gleichen Zeit (zwischen dem 23. und 27.05.1985) wie 1986 registriert. Dies weist wahrscheinlich auf die dominierende Bedeutung der Transpiration hin. Wie im Vorjahr vollzog sich der Wechsel von Typ A nach Typ B auch 1986 sehr rasch um die Monatswende Mai/Juni. In der Phase der Bodenfeuchteverringering können bei Wasserspannungen um $pF = 1$ (gestrichelte Hilfslinie in Abb. 8-4) Übergangssituationen angenommen werden.

Auch im Vergleichsgebiet Josefsruh, Pegel 9 ist ein Zusammenhang zwischen der Wasserspannung und der bei P 9, überwiegend als Interflow, abfließenden Wassermenge zu erkennen (Abb. A-8-1, im Anhang).

Als Folge der stark abnehmenden Wasserspannung wurde im Januar 1985 die erste stärkere Abflußerhöhung der Beobachtungszeit registriert. Nach einer Periode mit pF -Werten zwischen ca. 0,2 und 1,2 und sehr hohen Spitzenabflüssen ließ der Interflow mit beginnender Bodenfeuchteverringering ab Ende Mai 1985 sehr rasch nach. Nur vereinzelt kam es in den trockenen Sommermonaten zu "Typ B-Ereignissen" mit vergleichsweise sehr kleinen Abflußspitzen. Auch hier wurde, wie im Gebiet Denzenberg, die Feldkapazität im Juli unterschritten. Im Zuge der raschen Wiederbe-feuchtung ab Dezember 1985 kam es wieder zu stärkeren Abflußerhöhungen. Da die Wasserspannung im Frühjahr 1986 weniger stark anstieg als im Vorjahr und sich in den Sommermonaten im Bereich der nF_k bewegte, kam es ab Juni bis einschließlich Oktober 1986 wiederholt zu stärkeren Abflußspitzen.

8.2.1.5 Beziehung zwischen Interflow-Menge von Niederschlag-Abfluß-Ereignissen und Saugspannung im Deckschutt

In Abb. 8-5 sind die Interflow-Mengen einzelner Ereignisse oder Hochwasserperioden in Beziehung zur Wasserspannung im Deckschutt gesetzt. Diese Darstellungsweise charakterisiert, neben den Ereignistypen A und B, zusätzlich die Ereignisse im Übergang zwischen Typ A und Typ B.

Das Leerlaufen des Stauwasserkörpers an der Grenze Deckschutt/Basisschutt fand in beiden Jahren etwa bis $pF = 1$ statt (s.o.), was der Drainage der Gröb- oder Sekundärporen (bis $pF = 0,6$) und einem Teil der Grobporen (bis $pF = 1,8$) entspricht. Niederschläge nach dieser Teilentwässerung des Deckschutts führten nur noch zu einem sehr geringen Interflow (nach der Abflußmenge dem Typ B zuzuordnenden, Übergangsereignisse vom 10.06.1985 und 01.06.1986, vgl. auch Abb. 8-2). Mit abnehmender Bodenfeuchte kam es zwischen dem 10.06. und dem 06.07.1985 zu keinem Interflow. Die Niederschläge wurden (bei beginnender Austrocknung und noch nicht geweiteten Grobporen, vgl. Abb. 8-3) vollständig zur Auffüllung des Bodenfeuchtedefizits verbraucht.

Bei einer Wasserspannung im Bereich der Feldkapazität wurde am 06.07.1985 wieder ein erster schwacher Interflow von insgesamt nur 11 l in der Meßanlage, bei $NB = 8,4$ mm, registriert. N-IF-Ereignisse des Typs B mit wieder größeren Q-IF/NB-Verhältnissen setzten ab dem 09.08.1985 bei $pF > 2$ ein. Hier sorgten vergleichbare 9,8 mm NB für die mehr als 6-fache IF-Menge von 68 l. Grund dafür ist eine bessere Wasserwegsamkeit im trockenen Oberboden und vermutlich auch eine höhere Niederschlagsintensität, die eine Wasseraufnahme des Bodens erschwerte. (Am 09.08.1985 fielen in einer ersten Niederschlagswelle 4,7 mm in 20 Minuten; die Niederschläge am 06.07.1985 erreichten nur maximal ca. 5 mm/h.)

Während der Sommer- und Herbstereignisse des Typs B (zwischen August und November) wird der größte Teil des versickernden Niederschlags zur Auffüllung des Bodenfeuchtedefizits verbraucht (niedrige Q-IF/NB-Verhältnisse). Ein geringer Anteil erreicht über das entleerte Sekundärgefüge (Gröb- und Grobporen, Schrumpfrisse) sehr rasch die Grenze Deckschutt/Basisschutt, noch ehe die Mittel- und Feinporen über diesem Stauhorizont bis $pF = 1,8$ wieder vollständig wassererfüllt sind. Es kann eine teilweise bessere Wasserwegsamkeit angenommen werden im Vergleich zu den Übergangszeiten (vgl. auch Q-IF/NB-Verhältnisse im Jahresgang (Abb. 8-6).

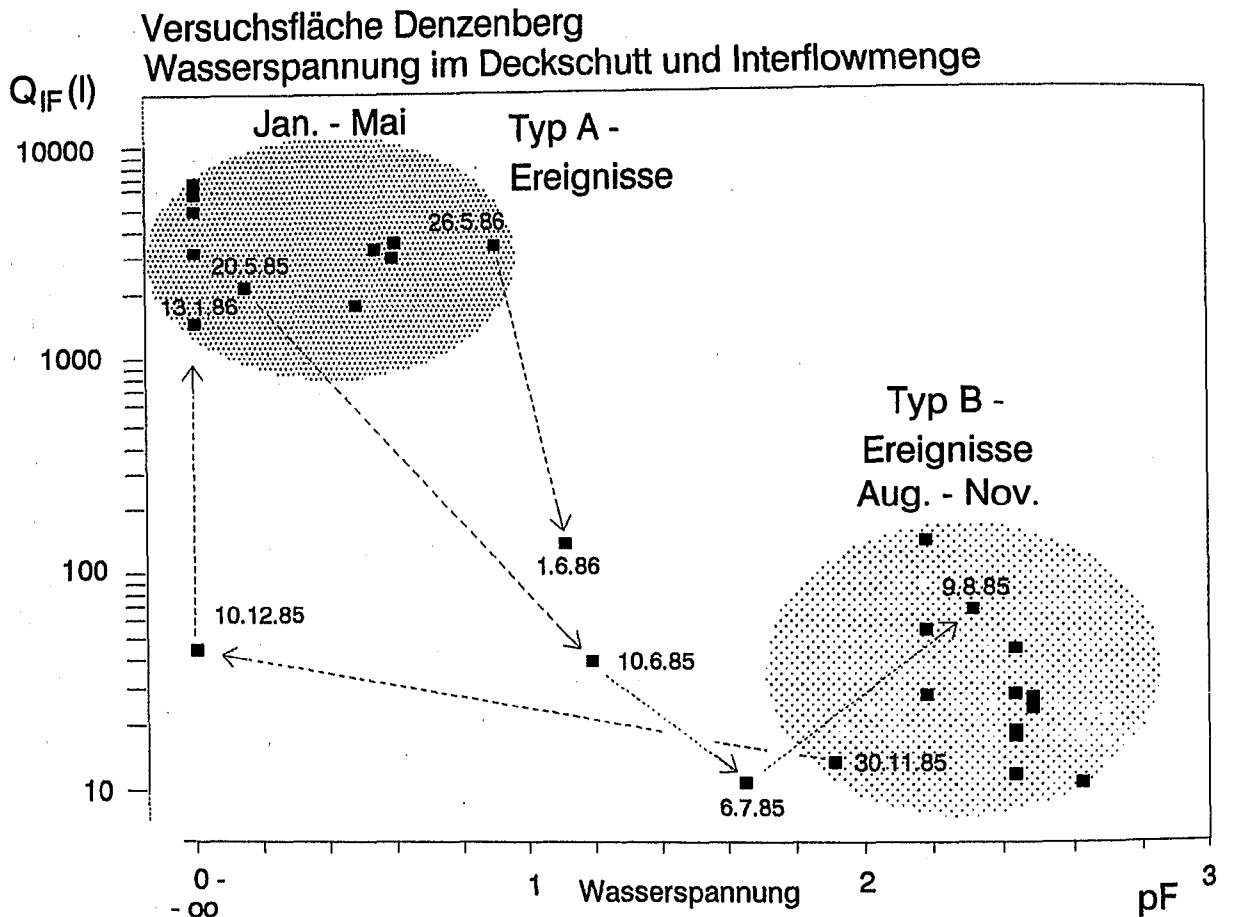


Abb. 8-5: Beziehung zwischen Interflow-Menge (Q_{IF} in l, Meßergebnis der IF-Meßstelle) und Wasserspannung im Deckschutt bei einzelnen Niederschlag-Interflow-Ereignissen oder Hochwasserperioden. Markierungen mit Datum: jeweils erstes und letztes Ereignis während der Typ A- oder Typ B-Periode bzw. Ereignisse im Übergang zwischen beiden Ereignis-Typen.

In Abb. 8-6 sind die oben im Detail vorgestellten Meßergebnisse graphisch zusammengefaßt. Dabei wurden die Verhältnisse von Interflow/Bestandesniederschlag (z-Richtung) aller erfaßten Ereignisse in Beziehung zur Wasserspannung im Deckschutt (y-Richtung) gesetzt und für den Verlauf der Meßperiode (x-Richtung) dargestellt. Die Skalierungen in z-Richtung geben, jeweils bezogen auf die NB-Höhe (mm), die mit der IF-Meßstelle ermittelten Interflow-Menge in Litern (links) und die auf die entwässerte Hangfläche von 560 m² umgerechnete Abflußhöhe in mm (rechts) wieder.

Deutlich sind die saisonal unterschiedlichen und von der Wasserspannung im Deckschutt abhängigen Ereignistypen A und B zu unterscheiden. Das IF/NB-Maximum (60%) wurde bei einem bis Mitte April 1986 dauernden Schneeschmelz- und N-Ereignis erreicht. Die Ereignisse im Übergangsbereich (zwischen $pF = 1$ und $pF = 2$) zeichnen sich durch sehr niedrige (Juli

und Dezember 1985) oder im Bereich der Typ B-Ereignisse liegende IF/NB-Verhältnisse aus.

Weiteren Einblick in die IF-Bildung geben sowohl die Ausführungen zu den hydraulischen Eigenschaften des Deckschutts (Kap. 8.3) als auch die isotopenchemischen Untersuchungen (Kap. 8.4).

8.3 Hydraulisches Verhalten des Deckschutts in Bezug auf die Interflow-Bildung

Die Wassersickerung aus dem gesättigten Bereich eines Hangbodens läßt sich nach RICHARD (1978) mit der Darcy-Gleichung berechnen. Die mit der IF-Meßstelle Denzenberg (Abb. 4-1) gemessene Interflow-Menge ist damit proportional zur Hangneigung und zur Sickerquerschnittsfläche ($A = b \cdot d$) und abhängig von der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (vgl. ausführlichere Darstellung bei FLECK, 1987).

Versuchsfläche Denzenberg

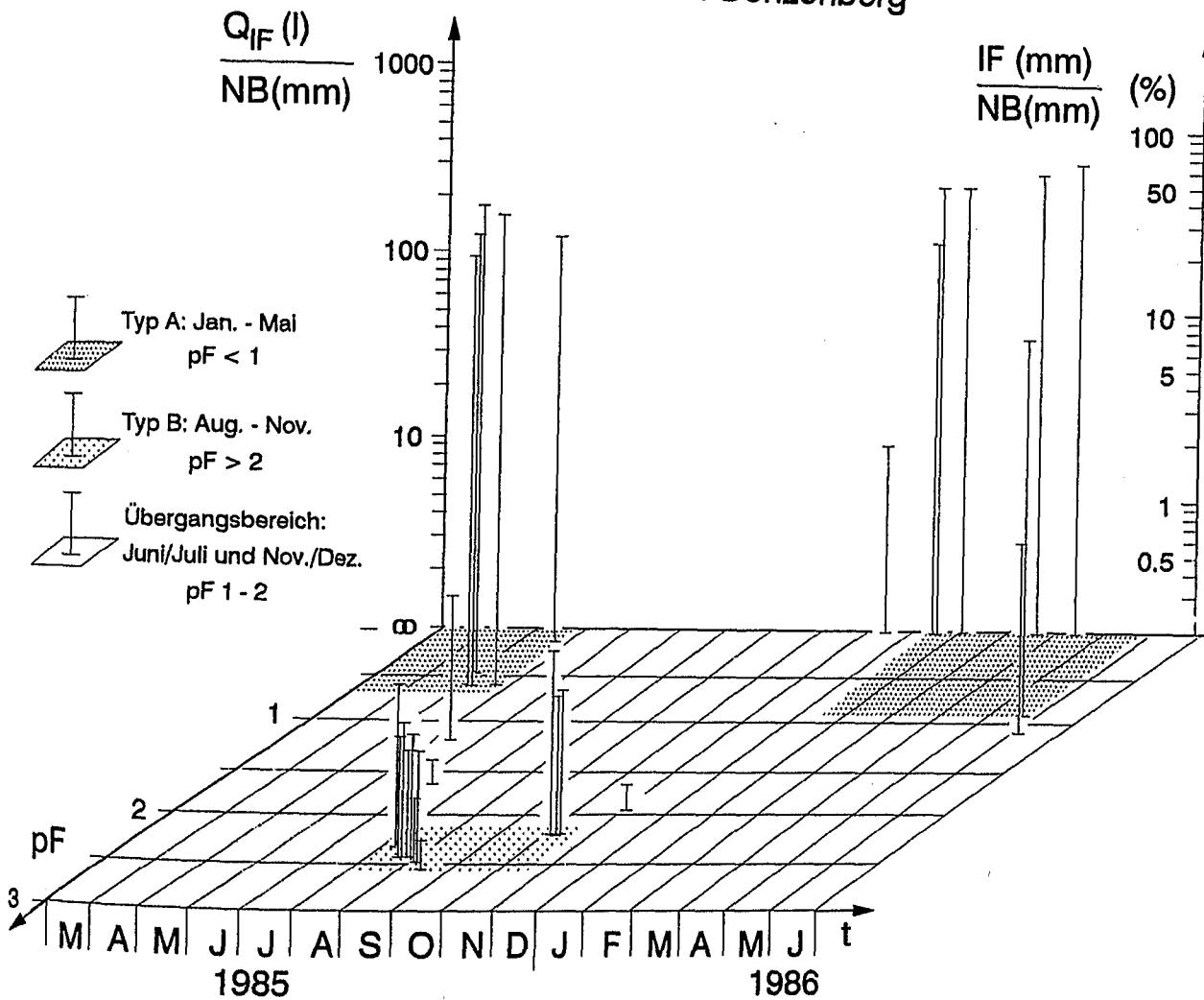


Abb. 8-6: Verhältnisse von Interflow (IF) zu Bestandesniederschlag (NB) in Beziehung zur Wasserspannung im Deckschutt bei einzelnen Niederschlag-Interflow-Ereignissen oder Hochwasserperioden. Q_{IF} (l): aufgefangene Interflow-Menge; IF (mm): Interflow-Höhe (Testfläche 560 m²).

Es gilt: $Q_{IF} = k_s \cdot i \cdot b \cdot d$

- Q_{IF} : Interflow (cm³/s)
- k_s : gesättigte hydr. Leitfähigkeit (cm/s)
- i : hydraulischer Gradient
- b : Breite des entwässerten Hangabschnitts
- d : Höhe der gesättigten Bodenschicht

Unter der Voraussetzung, daß über Gröb- und Grobporen rasch versickernder Niederschlag an der Staugrenze Deckschutt/Basisschutt einen gesättigten Bereich aufbaut (im Sinne eines schwebenden Grundwasserstockwerks), kann ein homogener Interflow-Speicher angenommen werden, dessen Leerlaufverhalten nach MAILLET (1905) beschrieben werden kann.

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

Am Beispiel der Interflow-Welle vom 07./08.05.1985 wurden durch graphische Auswertung zwei homogene Speicher mit deutlich unterschiedlichen Speichereigenschaften (Leerlaufkoeffizienten α) für die Testfläche ermittelt. Dieses Abflußverhalten wurde auch für höhere Bodenwassergehalte im Winter und Frühjahr bestätigt (Typ A-Ereignisse, vgl. Kap. 8.2 und folgende Ausführungen). Die Morphologie, z.B. unterschiedliche Hangneigungen der Testfläche, bot keine hinreichende Erklärung. FLECK vermutete deshalb folgerichtig die zwei Interflow-Speicher im Profil selbst. Aufgrund der Zweischichtigkeit des Deckschichtenaufbaus sah er den Deckschutt und Basisschutt als zwei räumlich getrennte Interflow-Speicher an.

Für das erwähnte Mai-Ereignis (vgl. auch detaillierte Auswertung in Kap. 8.5) konnten für 2

Speicher (Sp. I und Sp. II) folgende Parameter (Leerlaufkoeffizient α und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit) bestimmt bzw. errechnet werden:

$$\begin{aligned} \text{Sp. I: } \alpha &= 3,53 \text{ d}^{-1}; k_{s1} = 0,0280 \text{ cm/s} \\ \text{Sp. II: } \alpha &= 0,40 \text{ d}^{-1}; k_{s2} = 0,0025 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

Früher (an 4 Parallelproben) durchgeführte k_p -Laborbestimmungen (FLECK, 1987) ergaben folgende Mittelwerte:

$$\begin{aligned} \text{Deckschuttbasis: } k_s &= 0,00330 \text{ cm/s} \\ \text{Basisschutt: } k_s &= 0,00075 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

Der graphisch für den sich langsamer entleerenden Speicher II ($\alpha = 0,4 \text{ d}^{-1}$) ermittelte k_p -Wert entspricht etwa dem im Labor für die Basis des Deckschutts bestimmten Wert. Der nach der Q-IF-Ganglinie vorliegende Speicher I konnte bei der k_p -Laborbestimmung nicht gefunden werden.

FLECK betrachtet seine im Labor für Deck- und Basisschutt bestimmten k_p -Werte als um jeweils ca. 1 Größenordnung zu gering. Er begründete dies damit, daß eine intensive Durchwurzelung und ein hoher Skelettanteil (grobe Blöcke) bei begrenztem Probenvolumen u.U. nicht ausreichend Berücksichtigung finden kann. Da aber, zumindest im Basisschutt, keine Blöcke oder eine intensive Durchwurzelung beobachtet wurden, kann diese Fehlerquelle weitgehend ausgeschlossen werden.

Im Rahmen des gemeinsam durchgeführten Forschungsprojektes (FLEGR et al., 1989) wurden von Herrn Monn (Institut für Bodenkunde, und Standortslehre, Universität Hohenheim) detaillierte bodenkundliche und bodenphysikalische Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden u.a. an insgesamt 11 Proben aus verschiedenen Tiefen von 3 Profilen Wasserleitfähigkeitswerte bestimmt (vgl. dazu Abb. 3-2).

Die mittleren k_p -Werte des gesamten Deckschutts von 3 Profilen schwankten zwischen

$$\begin{aligned} k_s &= 0,0525 \text{ cm/s (Profil 1) und} \\ k_s &= 0,0052 \text{ cm/s (Profil 2).} \end{aligned}$$

(weitere für den Deckschutt ermittelte k_p -Werte lagen zwischen 0,005 und 0,006 cm/s).

Diese Daten geben in der Größenordnung die aus den Leerlaufkoeffizienten bestimmten k_p -Werte für die Speicher I und II wieder. Daraus wird deutlich, daß der sich langsam entleerende Interflow-Speicher auch im Deckschutt, genauer an der skelettärmeren Deckschuttbasis, zu finden ist (vgl. übereinstimmende Meßergebnisse von FLECK).

Der nach stärkeren Niederschlägen wirksame,

sich rascher entleerende Speicher I, ist dem Sekundärgefüge aus Gröbst- und Grobporen im mittleren und oberen Deckschutt zuzuordnen (s.u.).

Die für den Basisschutt im Labor bestimmten k_p -Werte schwankten zwischen 0,000343 und 0,0000149 cm/s. Diese Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeit liegen weit unter den früher ermittelten Daten. Dem Basisschutt wird deshalb keine Relevanz in Bezug auf das Interflow-Geschehen beigemessen.

Die bodenphysikalischen Daten bestätigen die aus früheren Untersuchungen und eigenen Meßergebnissen abgeleitete Modellvorstellung der Interflow-Bildung (Kap. 2.3 und 8.2). Die Wasserwegsamkeit zwischen Deckschutt und Basisschutt sowie im Basisschutt selbst ist sehr gering. Deshalb ist eine zum Interflow beitragende Wasserbewegung innerhalb des Basisschutts bzw. an dessen Basis nahezu auszuschließen. Die für den Interflow relevante Wasserbewegung findet innerhalb des Deckschutts in 2 mit unterschiedlichem Retentionsvermögen wirksamen Speichertypen statt (vgl. schematische Darstellung, Abb. 8-3).

An der Deckschuttbasis kann sich bei hoher Ausgangsbodenfeuchte in den Winter- und Frühjahrsmonaten ein Stauwasserkörper ausbilden. In diesem Bereich des Deckschichtenprofils ist der Anteil der Gröbst- und Grobporen im Vergleich zum hangenden Deckschutt deutlich kleiner, da das Sekundärporensystem von oben nach unten in seiner Ausprägung abnimmt (vgl. Porengrößenverteilung, Abb. 3-2). Der Grobporenanteil im Deckschutt sinkt durchschnittlich von ca. 30% im obersten, sehr stark durchwurzelten Bereich bis auf 5% an seiner Basis kontinuierlich ab. Hier wirkt i.w. der sich langsamer entleerende Speichertyp II (vgl. Typ A-Ereignisse, Abb. 8-3).

Der nach stärkeren Niederschlägen wirksame, sich rascher entleerende Speicher I ist dem Sekundärgefüge aus Gröbst- und Grobporen zuzuordnen. Über der Sättigungszone an der Grenze Deckschutt/Basisschutt, wo das Primärporensystem mit geringeren Wasserleitfähigkeiten dominiert, kann das nach oben hin ausgeprägtere Sekundärporensystem schnell Wasser aufnehmen und wieder abgeben. Dieser Vorgang kann bei Durchschnitts-Wassergehalten im Deckschutt zwischen der Feldkapazität und voller Sättigung stattfinden (vgl. Abb. 8-4 bis 8-6, Typ A-Ereignisse). Die hohe Wasserwegsamkeit des Sekundärgefüges wird mit verstärkt durch den hohen Skelettanteil (Stubensandsteinblöcke bis zu mehreren dm Durchmesser) und die im mittleren Deckschuttbereich besonders intensive Durchwurzelung.

Bei hoher Bodenfeuchte und N-Q-Ereignissen mit Interflow können somit zwei Porensysteme, wirken, die "einander durchdringen" (SCHEF-

FER & SCHACHTSCHABEL, 1982, S. 141), i.w. aber in verschiedenen Tiefen des Deckschuttprofils wirksam sind; ein gröberes Sekundärporensystem im mittleren und oberen Deckschutt und ein feineres Primärporensystem an der Basis des Deckschutts. Nach dem Porendurchmesser und der Wasserspannung können diese, entsprechend Tab. 8-3 eingeteilt werden.

Tab. 8-3: Porengrößenbereiche nach dem Porendurchmesser und der Wasserspannung (pF-Wert). Aus SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1982, S. 141.

Porengrößenbereich	Porendurchmesser	pF
Grobporen, weite	>50 μm	0 - 1,77
Grobporen, enge	50-10 μm	1,77 - 2,54

Das Leerlaufverhalten dieser beiden Speichersysteme läßt sich mathematisch jeweils mit einer der MAILLET-Gleichung für einen homogenen Aquifer entsprechenden Gleichung beschreiben. Sind beide Systeme wirksam, so findet eine Überlagerung statt, die graphisch durch halblogarithmische Darstellung (Zeit linear, Q logarithmisch) und Ermittlung der Leerlaufkoeffizienten α aus den Beträgen der Steigungen deutlich gemacht werden kann (vgl. Beispiele für die Auswertung, Abb. A-8-2, Anlage).

Beginnt im ausgehenden Frühjahr die Entwässerung der gesättigten Zone an der Basis des Deckschutts, so sinkt die Wasserleitfähigkeit umso stärker, je mehr Poren entleert werden. (Der leitende Querschnitt der Böden wird dadurch verkleinert, daß die Poren zunehmend mehr Luft enthalten und nur noch z.T. am Wassertransport teilnehmen können, vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1982, S. 174). Dies ist eine wesentliche Ursache für den stark abnehmenden oder ganz ausbleibenden Interflow bei abnehmendem Bodenwassergehalt im Übergang von Typ A- zu Typ B-Ereignissen (vgl. Kap. 8.2.1f. und Abb. 8-6).

Bei Wassergehalten unter der Feldkapazität, wie sie in den Sommermonaten beobachtet wurden, ist mit einer zusätzlichen Aufweitung des Sekundärgefüges durch spaltförmige Schrumpfrisse im oberen und mittleren Bereich des Deckschutts zu rechnen. Sickerwasser kann bei diesen Bedingungen zwar rasch in den Boden eindringen, der Hauptteil wird aber je nach Niederschlagsintensität mehr oder weniger zur Verringerung des Bodenfeuchtedefizits dienen. Es sind dann nur sehr geringe IF-Mengen zu erwarten, vgl. Abb. A-8-2, Anhang).

Das Leerlaufverhalten des Deckschutts bzw. seine Speichereigenschaften konnten über eine

graphische Auswertung und die Ermittlung von α -Werten an insgesamt 15 "Interflow-Einzelereignissen" während der Meßperiode untersucht werden. Die α -Werte sind in Abb. 8-7 dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde ein halblogarithmischer Maßstab gewählt.

Zum Vergleich sind Ergebnisse von Abflußseparationen am Pegel 14 dargestellt (vgl. Kap. 8-5). Auch aus der Q_{on} -Ganglinie von P 14 (Abtrennung von Q_1 mit Hilfe der Lf-Werte) konnten 2 Speichertypen abgeleitet werden, die gut mit den auf der Versuchsfläche ermittelten Daten übereinstimmen (Abb. 8-7). Dies bestätigt die Übertragbarkeit der auf der Versuchsfläche ermittelten Bodenwasser-Speichertypen auf das Gesamtgebiet.

Für diesen Zweck war die Lf-Separationsmethode, die zwischen den 2 Komponenten a) niedrig mineralisierter Zwischenabfluß (Q_{on}) und b) höher mineralisiertes Grundwasser unterscheidet, geeignet. Eine Separation in 3 Komponenten mit der Unterteilung des Interflow (Q_{on}) in weitere 2 Komponenten (vgl. Kap. 8.5f.) war für diese Fragestellung nicht relevant.

In guter Übereinstimmung mit den bis jetzt vorgestellten Ergebnissen sind auch aus den α -Werten die zwei Interflow-Typen A und B deutlich abzulesen. Alle ausgewerteten Interflow-Leerlaufkurven des Winter-Frühjahrtyps zeigen den sich langsam entleerenden Speicher II (Sättigungszone an der Basis des Deckschutts) mit α -Werten zwischen 0,4 und 1,16 d^{-1} . Die Streuung des Leerlaufkoeffizienten wird auf Ungenauigkeiten der Mengenaufzeichnung und auf vertikale Inhomogenitäten der Porengrößenverteilung zurückgeführt, die je nach Füllungsgrad des Bodenwasserspeichers (Mächtigkeit des Stauhizontes) hydraulisch wirksam werden.

Der dem Sekundärgefüge zuzuschreibende Speicher I läßt sich bei Typ A und B gut nachweisen. Die ermittelten α -Werte streuen in einem engen Bereich zwischen 2,7 und 4,4 (4,8) d^{-1} . Während der Sommer- und Herbstmonate reicht der infiltrierende Niederschlag nicht zur Bildung einer abflußwirksamen, gesättigten Zone an der Grenze Deckschutt/Basisschutt (Speicher II) aus, wohl aber zur temporären Auffüllung des Sekundärgefüges im unteren Bereich des Deckschutts. In den nassen Monaten dagegen ist dieser Speicher I zusätzlich zum Speicher II wirksam.

In den Sommer- und Herbstmonaten wurde, bei sehr geringen Interflow-Mengen, eine noch raschere Wasserwegsamkeit im Deckschutt, bzw. ein noch kurzfristigerer Bodenspeicher festgestellt, der in der graphischen Auswertung mehrfach mit α -Werten um 20 d^{-1} beschrieben

Einzugsgebiet Denzenberg

Leerlaufkoeffizienten der Interflow-Speicher

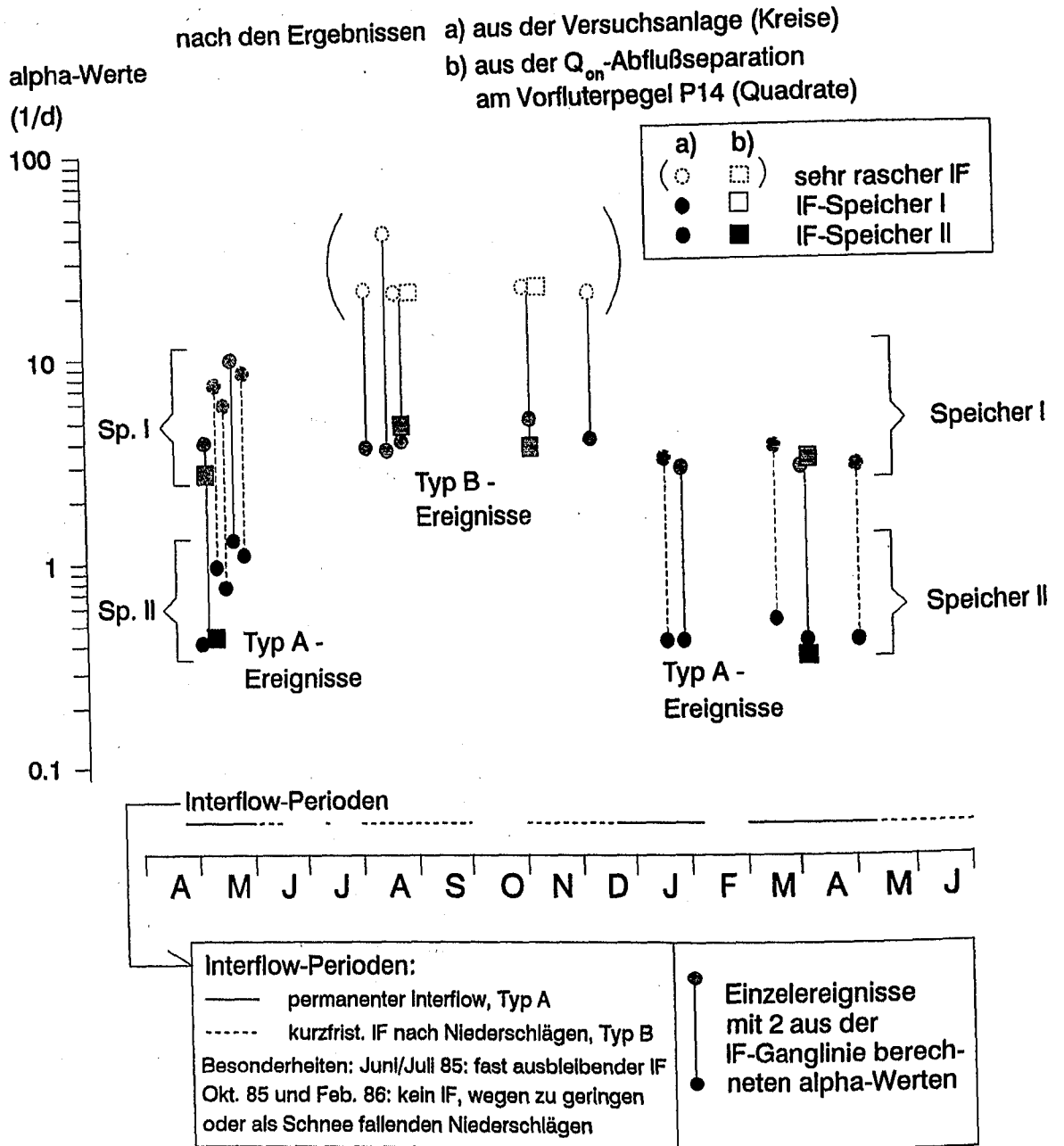


Abb. 8-7: Leerlaufkoeffizienten des Bodenwasserspeichers bzw. der Interflow-Speicher. Ermittelt aus der Interflow-Ganglinie (IF-Meßstelle, Kreise) und Abflußseparationen am Pegel 14 (Quadrate). Weitere Erläuterungen im Text und in der Graphik.

werden konnte (vgl. auch Abb. A-8-2). Dieser "Speichertyp" ist vermutlich größerem Schrumpfrissen und Grabgängen, einem nicht wassergesättigten Sekundärgefüge, zuzurechnen. Ein in einem homogenen Aquifer entsprechendes Leerlaufverhalten ist hier eher fraglich (Abb. 8-7: Markierungen der α -Werte in Klammern gesetzt). Bei einigen Ereignissen des Typs A waren die α -Werte des Speichers I nicht eindeutig zu ermitteln

(vgl. gestrichelte Darstellung).

Die Kenntnis der wirksamen Speichereigenschaften im Deckschutt ist für die mögliche Zusammensetzung des als Interflow abfließenden Wassers wichtig. Bei N-Q-Ereignissen unter (teil-)gesättigten Bodenverhältnissen ist mit einem Mischwasser aus älterem Vor-Ereignis-Bodenwasser und aktuellem Niederschlagswasser zu rechnen. Es kann eine Mobilisierung von älterem

Wasser und eine Durchmischung mit jüngerem stattfinden. In der warm-trockenen Jahreszeit dagegen entstehen Schrumpfrisse und es ist eher mit Interflow aus aktuellem Niederschlagswasser zu rechnen.

8.4 Analyse der Abflußbildung mit Interflow durch $\delta^{18}\text{O}$

Im Einzugsgebiet Denzenberg wurden im Meßzeitraum Mai 1984 bis Juli 1986 zahlreiche Sauerstoff-18-Untersuchungen vorgenommen. Von September 1984 bis Mai 1986 wurden alle Meßstellen parallel beprobt. Ganglinien der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte wurden in Kap. 5.5.1 (Abb. 5-5, Quelle Q 3) und Kap. 7 (Abb. 7-5: Niederschlag, Sickerwasser, Interflow und Abb. 7-6: Gesamtabfluß am Pegel 14) vorgestellt.

8.4.1 $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien der verschiedenen Abflußkomponenten im Überblick

Abb. 8-8 zeigt den Verlauf der mit der Abflußmenge bzw. Niederschlagshöhe gewichteten $\delta^{18}\text{O}$ -Monatsmittelwerte für den Bestandesniederschlag, Interflow und Gesamtabfluß sowie das Grundwasser und das Bodenwasser während des gesamten Untersuchungszeitraums (Darstellungen der stärker schwankenden Einzelanalysen erfolgen bei Detailbetrachtungen wie den Auswertungen von N-Q-Ereignissen (Kap. 8.5). Die ^{18}O -Gehalte im Niederschlag wurden in Kap. 7.1 beschrieben.

Im Interflow der Meßstelle Denzenberg wurden folgende $\delta^{18}\text{O}$ -Extremwerte (Monatswerte, gewichtet) bestimmt:

Maximum: $\delta^{18}\text{O} = -4,28\text{‰}$ (Oktober 1985)

Minimum: $\delta^{18}\text{O} = -13,71\text{‰}$ (Dezember 1985)

In diesen Monaten setzte sich der Interflow im wesentlichen aus aktuellem Niederschlagswasser zusammen, wie der nahezu deckungsgleiche Verlauf von Niederschlags- und Interflow-Kurve zeigt (vgl. genauere Ausführungen dazu in Kap. 8.4.2.1). Die Extremwerte in den Einzelmessungen wurden während der Sommer-/Herbst-Abflußsituation bei geringer Bodenfeuchte und Typ B-Ereignissen verzeichnet (vgl. Kap. 8.2, 8.3).

Maximum: $\delta^{18}\text{O} = -3,78\text{‰}$ (16.08.1985)

Minimum: $\delta^{18}\text{O} = -14,55\text{‰}$ (06.11.1985).

(vgl. Darstellung der Einzelereignisse in Kap.

8.5.2.3 und 8.5.2.4 sowie Abb. 8-14 und 8-15).

In den abflußreicheren Frühjahrsmonaten (Typ A-Ereignisse) weichen die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Interflow und Bestandesniederschlag teilweise recht deutlich voneinander ab. Hier wirken sich längere Verweilzeiten des Bodenwassers bei (teil-) gesättigtem Deckschutt aus (vgl. genauere Ausführungen in Kap. 8.4.2.1)

Die Kurve der $\delta^{18}\text{O}$ -Durchschnittswerte im Sickerwasser (Plattenlysimeter zwischen 0,25 und 0,90 m) beschreibt einen deutlich ausgeprägten Jahresgang. Die Minima lagen in beiden Jahren im April, 1985 bei $-11,69\text{‰}$ und 1986 bei $-11,07\text{‰}$. Die Maxima wurden im Januar 1985 und August 1985 erreicht ($-8,62\text{‰}$ und $-9,78\text{‰}$).

Als Gründe für den nicht idealen sinusförmigen Jahresgang ($\pi = 0,5a$) sind u.a. aufzuführen:

- direkte Beeinflussung durch Niederschlagswasser (vgl. Niederschlags- $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve,
- Effekte durch das bei Einbau (Einschlämmen des Quarzschluffes) verwendete Wasser ($\delta^{18}\text{O} = -12,00\text{‰}$),
- Trockenfallen flacher Sickerplatten im Sommer und Herbst, Beprobung von ausschließlich tieferem Sickerwasser.

Die Ergebnisse der einzelnen Plattenlysimeter sind dem Kap. 7.3.1.4 zu entnehmen.

Ein Vergleich der Sickerwasser- und Interflow-Kurven der 2. Jahreshälfte von 1985 zeigt, daß das in den trockenen Sommermonaten als Interflow abfließende Niederschlagswasser von den Plattenlysimetern nicht erkennbar aufgenommen wurde. Dieses Wasser fließt über (geweitete) Sekundärporen rasch ab (vgl. Typ B-Ereignisse Kap. 8.2 und 8.3). Dagegen konnte das in den Winter- und Frühjahrsmonaten bei fast oder vollständig gesättigtem Deckschutt (Typ A-Ereignisse) sich langsamer im Boden bewegendes Wasser sowohl über die IF-Meßstelle als auch mit den Plattenlysimetern beprobt werden.

Die annähernde isotopische Übereinstimmung dieser Wässer im genannten Zeitraum wird durch den nahezu deckungsgleichen Verlauf beider Kurven (Plattenlysimeter und Interflow) von Januar - April 1986, aber auch durch die nahezu gleichen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Mai 1985 deutlich. In Monaten mit hoher Bodenfeuchte (Wintermonate) kann deshalb die Markierung des Interflow auch für andere Einzugsgebiete, in denen keine direkte IF-Beprobung durchgeführt werden konnte, aus den durchschnittlichen $\delta^{18}\text{O}$ -Werten der Sickerwässer abgeleitet werden.

Mit zunehmender Austrocknung des Deckschutts (ab Juni 1985) tendiert die Interflow-Kurve wesentlich stärker in Richtung Niederschlags-

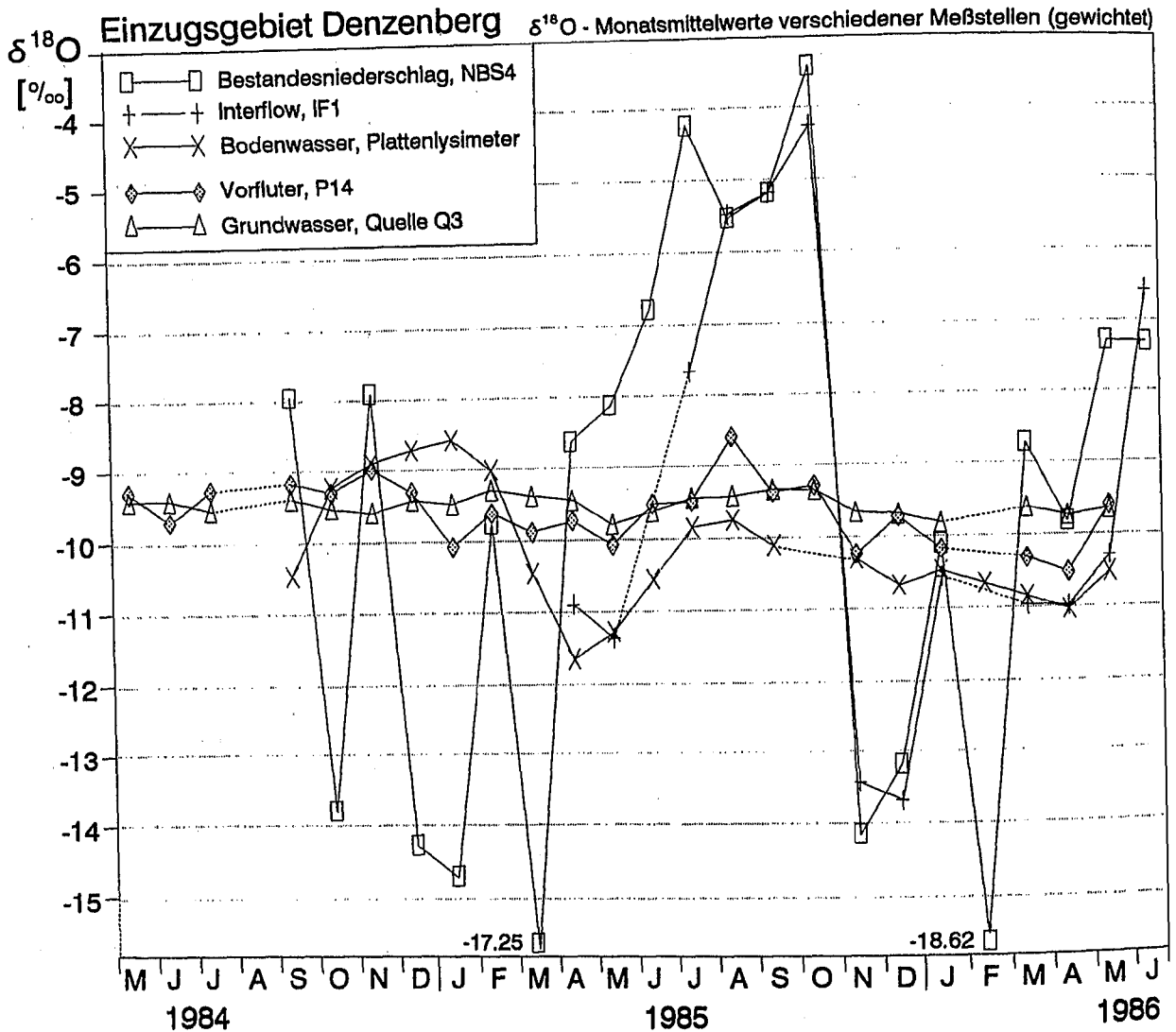


Abb. 8-8: $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Bestandesniederschlag, Interflow, Sickerwasser, Grundwasser und Gesamtabfluß auf der Versuchsfläche bzw. im Einzugsgebiet Denzenberg. Darstellung der mit der Abflußmenge bzw. Niederschlagshöhe gewichteten Monatsmittelwerte.

kurve als die Sickerwasserkurve, die, wie erwähnt, nur noch Isotopenwerte des tieferen Bodenwassers wiedergibt. (Der Interflow wird dagegen mehr von aktuellem Niederschlag beeinflusst, s.o.)

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Monatsmittelwerte des km4-Grundwassers aus der Quelle Q 3 variieren in einem sehr engen Bereich zwischen $\delta^{18}\text{O} = -9,33\text{‰}$ im Februar 1985 und $\delta^{18}\text{O} = -9,85\text{‰}$ im Januar 1986. Ein Jahresgang wird nicht erkennbar. Größere, sehr kurzfristige Abweichungen, wurden nur bei Einzelmessungen während starker, kurz dauernder Schüttungserhöhungen registriert (vgl. auch Kap. 5.5.1, Abb. 5-5 und Darstellung der Einzelmessungen von Q 3 und P 14 in Abb. A-8-3, Anhang). Die Extremwerte in Einzelproben wurden am 01.02.1985 ($\delta^{18}\text{O} = -9,14\text{‰}$) und

am 08.05.1985 ($-10,30\text{‰}$) während Hochwasserereignissen mit hoher Beteiligung von isotopisch abweichenden Abflußanteilen gemessen (vgl. Kap. 8.5.2.1 und 8.5.2.2 sowie Abb. 8-12 und 8-13).

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Grundwassers bei Trockenwetter- oder Niedrigwasserbedingungen ($n = 10$) schwankten in einem sehr engen Bereich zwischen $-9,42\text{‰}$ und $-9,56\text{‰}$, d.h. innerhalb des analytischen Fehlers ($\pm 0,1\text{‰}$). 4 Niedrigwasserproben variierten etwas stärker zwischen $-9,22\text{‰}$ und $-9,77\text{‰}$. Aus den vorliegenden Daten ergibt sich für das Grundwasser aus Q 3 ein $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwert von $-9,50\text{‰}$.

Der gegenüber der $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve des Niederschlags stark gedämpfte Jahresgang der Sauerstoff-18-Gehalte im Grundwasser weist nach dem Exponentialmodell (vgl. Kap. 7.3.1) auf eine mitt-

lere Verweilzeit des km4-Grundwassers mehr als 3 Jahren hin.

Am Pegel 14 schwankten die gewichteten $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwerte zwischen $-8,64\text{‰}$ im August 1985 und $-10,56\text{‰}$ im April 1986. Bezogen auf die kaum variierenden $\delta^{18}\text{O}$ -Monatswerte des Grundwassers (Q 3) sind bei P 14 jeweils ab den Monaten Mai bis Juli Auslenkungen nach oben zu positiveren und ab Dezember 1984 sowie Oktober 1985 Abweichungen nach unten zu negativeren $\delta^{18}\text{O}$ -Werten erkennbar (Abb. 8-8). Diese $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen weisen auf die Zumischung anderer Abflußkomponenten hin, wobei der Einfluß des Niederschlagswassers, in Abhängigkeit von saisonalen Abweichungen, unverkennbar ist. Gegenüber der Niederschlagskurve kann jedoch, jeweils in den Frühjahrsmonaten (bei hoher Bodenfeuchte), eine Verzögerung von ca. 2 bis 3 Monaten festgestellt werden. Dies verdeutlichen die Schnittpunkte der positiver werdenden Niederschlagskurve mit den Ganglinien von P 14 und Q 3. Dies weist auf den Einfluß von älterem, im Boden gespeicherten Niederschlagswassers hin, das verzögert als Interflow abfließt.

Im Herbst 1985 wurde ein solcher "time-lag" nicht erkennbar, wenn man bei der $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinie des Niederschlags nur die niederschlagsreichen Monate August- und November (55,8 mm und 66,6 mm) berücksichtigt. Die sehr viel geringeren September-, Oktober- und Dezember-Niederschläge (26,1 mm, 6,1 mm und 28,6 mm) konnten sich nur wenig auf den Gesamtabfluß auswirken (vgl. auch Abb. 7-5). Darin wird eine direkte Beeinflussung des Vorfluterabflusses durch das aktuelle Niederschlagswasser (besonders der November-Niederschläge) deutlich. Zu dieser Jahreszeit ist bei geringer Bodenfeuchte und fehlendem Stauwasserkörper an der Grenze Deckschutt/Basisschutt ein rasches Abfließen des aktuellen Niederschlagswassers als Interflow möglich (vgl. Kap. 8.5.5, Abb. 8-15). Die Zusammensetzung des Interflow wird detailliert im folgenden Kapitel (Kap. 8.4.2.1) und bei der Besprechung von Einzelereignissen (Kap. 8.5f. betrachtet.

Bei einzelnen, dicht beprobten N-Q-Ereignissen wurden teilweise sehr starke $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen im Gesamtabfluß registriert (vgl. dazu Abb. 7-6, Abb. A-8-3 im Anhang und Besprechung von Einzelereignissen, Kap. 8.5f.). Bezogen auf die Werte des Basisabflusses konnten im Februar, Mai und November 1985 sowie im März und April 1986 negative Auslenkungen gemessen werden. Im August (26.08.1985) wurden, bedingt durch "schwere" (^{18}O -reichere) Sommerniederschläge, positive und im November (08.11.1985)

negative $\delta^{18}\text{O}$ -Extremwerte von Einzelmessungen während kurzzeitigen Abflußerhöhungen gemessen ($-8,24\text{‰}$ und $-10,98\text{‰}$).

Im Niedrigwasser schwankten die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zwischen $-9,20\text{‰}$ und $-9,78\text{‰}$. Dies entspricht dem Variationsbereich des Grundwassers aus Q 3 (s.o.). Damit wird deutlich, daß in Phasen ohne nennenswerten Interflow bei P 14 im wesentlichen Grundwasser (mit einem Q 3 entsprechenden ^{18}O -Gehalt) abfließt (vgl. auch Kap. 7.4.1). Die $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwerte von Niedrigwasserproben lagen im Durchschnitt bei $-9,5\text{‰}$, einem dem Grundwasser aus Q 3 entsprechendem Wert.

8.4.2 Zusammensetzung des Interflow und Interflow-Anteil am Gesamtabfluß

8.4.2.1 Zusammensetzung des Interflow im jahreszeitlichen Verlauf - Ergebnisse der Veruchsfläche Denzenberg

In diesem Abschnitt soll die unterschiedliche Zusammensetzung des Interflow-Wassers während N-Ereignissen und im jahreszeitlichen Verlauf, auf die in Kap. 8.4.1 (Abb. 8-8) hingewiesen wurde, genauer erläutert werden. Dazu wurden in Abb. 8-9 a) die gewichteten $\delta^{18}\text{O}$ -Monatsmittelwerte von Niederschlag und Interflow (Testfläche Denzenberg) mit Markierungen der Typ A- und Typ B-Ereignisse im Jahresgang und in Abb. 8-9 b) die Einzelanalysen vom Mai 1985 dargestellt.

Das in den vorangegangenen Kapiteln mit Typ A und Typ B charakterisierte unterschiedliche Niederschlag-Interflow-Verhalten läßt sich auch aus den ^{18}O -gehalten von Niederschlag und Abfluß ablesen. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Niederschlag und Interflow verlaufen im Sommer und Herbst gleichsinnig und erreichen zu dieser Zeit ihre Maximalwerte. In den Monaten April und Mai 1985 ist eine gegenläufige Tendenz zu beobachten. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte unterscheiden sich um ca. 3‰ .

Zahlreiche IF-Proben mit gering schwankenden, aber vom Niederschlag abweichenden ^{18}O -gehalten belegen für diese Monate mit Typ A-Ereignissen eine Verdrängung bzw. Mobilisierung älteren Bodenwassers durch aktuelles Niederschlagswasser. Die Darstellung der Einzelanalysen vom Mai 1985 (Abb. 8-9 b) verdeutlicht dies. Selbst die hohen Niederschläge vom 07.05. und 17.05., deren $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zwischen ca. 3‰ und 5‰ vom Interflow abwichen, bewirkten kaum Änderungen des ^{18}O -Gehalts im Interflow.

Im der Phase des Übergangs von Typ A zu Typ B im Juni/Juli 1985 nähern sich die IF- $\delta^{18}\text{O}$ -Werte denen des Niederschlags. Dies bedeutet, daß der (insgesamt sehr geringe) IF aus einem Mischwas-

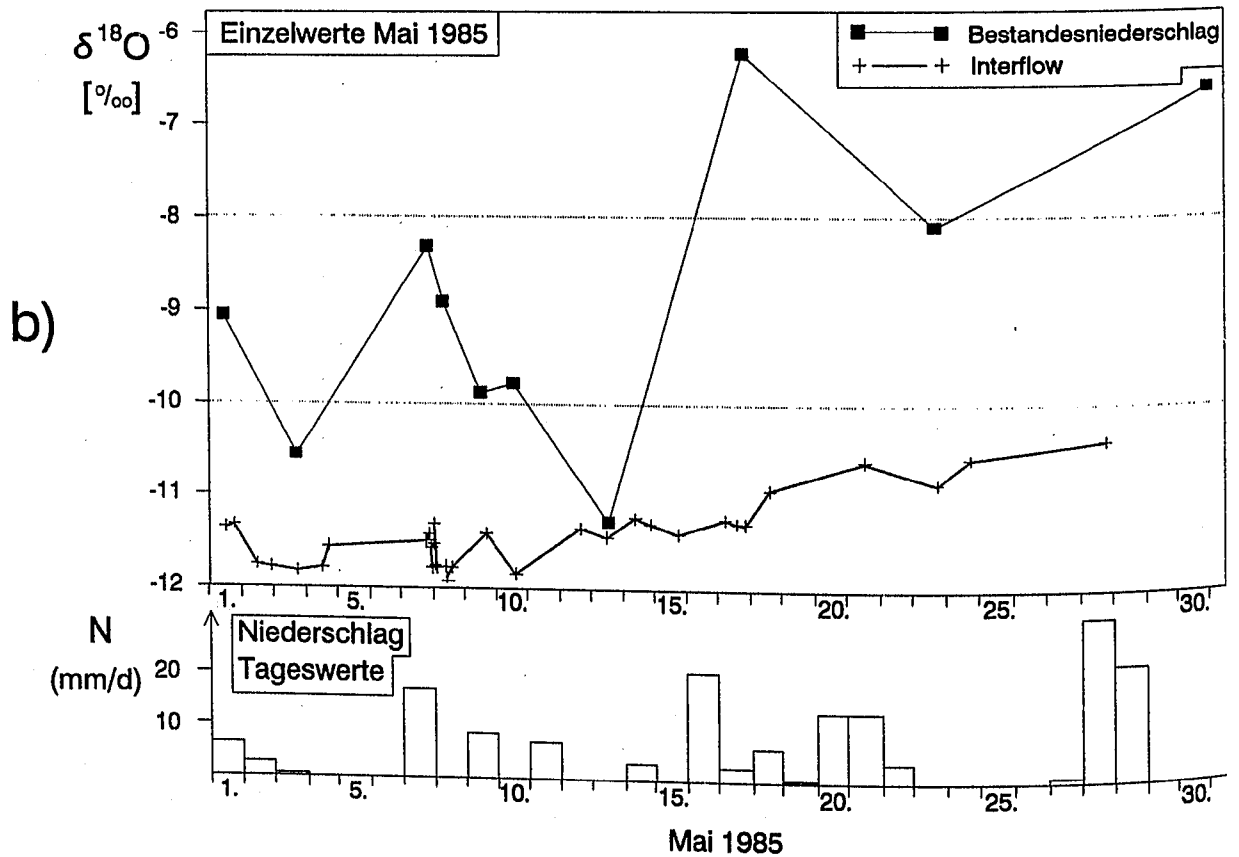
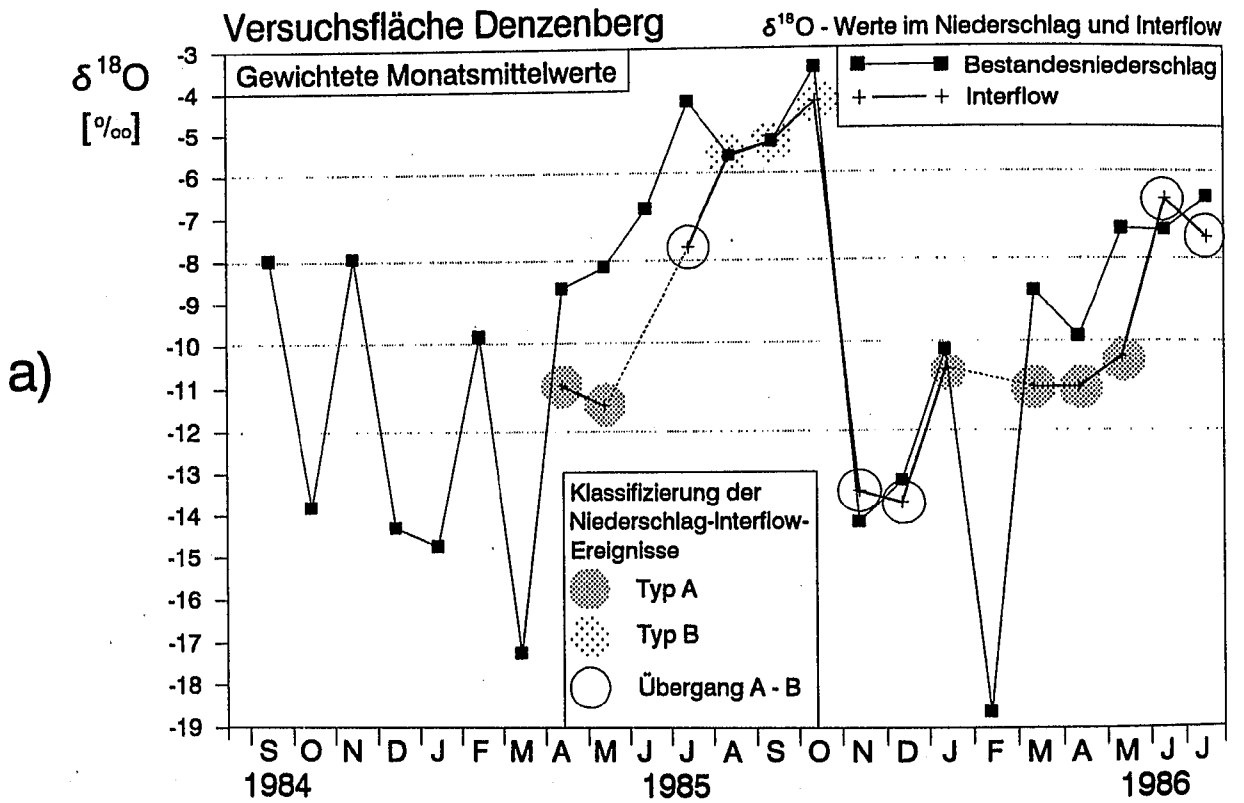


Abb. 8-9: $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Bestandesniederschlag und Interflow auf der Versuchsfläche Denzenberg: **a)** mit der Niederschlagshöhe bzw. Abflussmenge gewichtete Monatsmittelwerte im Untersuchungszeitraum September 1984 bis Juli 1986, **b)** Einzelproben vom Mai 1985 mit Tagesniederschlagshöhen.

ser von aktuellem Niederschlag und älterem Bodenwasser besteht. Bei den zu dieser Zeit herrschenden Bodenfeuchteverhältnissen wird jedoch der versickernde Niederschlag zum größten Teil oder vollständig vom Boden aufgenommen und wird deshalb nicht abflußwirksam.

In den trockenen Sommer- und Herbsmonaten, besonders im August und September, verlaufen beide Kurven nahezu deckungsgleich. Dies bedeutet, daß der IF aus aktuellem Niederschlagswasser besteht. Dies belegt, daß bei Typ B-Ereignissen eine rasch abfließende Komponente nicht über einen Verdrängungsmechanismus, sondern direkt über das z.T. durch Schrumpfung geweitete Sekundärgefuge abfließt. Auch bei geweitem Sekundärporensystem dient allerdings der überwiegende Teil des Sickerwassers zur Auffüllung des Bodenfeuchtedefizits. Deshalb fließen nur sehr geringe Interflow-Mengen ab (vgl. Abb. 8-1, Tab. 8.1).

In der Zeit zwischen November und Dezember bildet sich wieder ein Stauwasserkörper an der Grenze Deckschutt/Basisschutt. Im November und Dezember sind die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von NB denen des IF noch ähnlich. Sie zeigen jedoch schon einen verzögerten Wiederanstieg im Dezember. Im Frühjahr 1986 (März/April) herrscht eine zum Frühjahr 1985 vergleichbare Situation, wobei älteres Bodenwasser (Niederschläge der Vormonate, die einen Hangwasserspeicher ausgebildet haben) durch aktuelles Niederschlags- oder Schmelzwasser verdrängt wird.

In beiden Jahren liegen die Isotopengehalte des IF für Typ A-Ereignisse um $\delta^{18}\text{O} = -11\text{‰}$. Die Isotopenzusammensetzung dieses IF-Wassers ist das Resultat einer Mischung anderer früherer Niederschläge der Vormonate. Der gewichtete N-Mittelwert der 3 Monate Februar - April 1985 stimmt mit $\delta^{18}\text{O} = -11,5\text{‰}$ mit dem Mai-Mittelwert des IF ($\delta^{18}\text{O} = -11,4\text{‰}$) fast überein. Eine gute Übereinstimmung der N-Mittelwerte von September 1985 bis Januar 1986 ($\delta^{18}\text{O} = -11,2\text{‰}$) mit den Interflow-Werten von Januar 1986 ($-10,6\text{‰}$) bzw. März 1986 ($-11,0\text{‰}$) ist ebenfalls zu beobachten.

Die Verweildauer des Sickerwassers in der gesättigten Bodenwasserzone (Zeitraum mit Typ A-Ereignissen) an der Grenzschicht zwischen Deck- und Basisschutt läßt sich annähernd aus der Verschiebung der $\delta^{18}\text{O}$ -Minima abschätzen. Die IF-Kurve erreicht ihre Tiefpunkte im Mai 1985 und März/April 1986. Unter Einbeziehung der monatlichen N-Höhe (z.B. über die Bildung von überlappenden Mittelwerten) kann aus der (dann weniger stark schwankenden) $\delta^{18}\text{O}$ -Niederschlagskurve ein time-lag von ca. 2-3 Monaten für das IF-Wasser abgeschätzt werden. Dies bedeutet eine

ca. 2-3-monatige Verweildauer des Sickerwassers im Bodenwasserspeicher (vgl. auch Kap. 7.3.1.4).

8.4.2.2 Auswirkungen des Interflow auf den Gesamtabfluß am Pegel 14 im jahreszeitlichen Verlauf

Aus den $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien der Monatsmittelwerte ist eine in den Winter- und Frühjahrsmonaten um 2 bis 3 Monate verzögerte Auswirkung des Niederschlagswassers auf den Vorfluterabfluß abzulesen (Abb. 8-8, Kap. 8.4.2). Als Grund dafür wird eine vorübergehende Speicherung von Niederschlagswasser im Deckschutt und ein Abfluß als Interflow angenommen. Eine solche Abflußverzögerung wäre auch bei einem flachen Grundwasserleiter mit sehr geringer mittlerer Verweilzeit (Speicherkapazität) vorstellbar, der im Untersuchungsgebiet aber nicht vorhanden ist. Dies zeigt die sehr flach, ohne ausgeprägten $\delta^{18}\text{O}$ -Jahresgang verlaufende $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinie der km4-Quelle Q 3.

Von April bis Mai 1985 nahmen die $\delta^{18}\text{O}$ -Monatsmittelwerte im Interflow, im Vorfluterabfluß und im Quellwasser deutlich ab, obwohl die Niederschlagswerte während des April und Mai 1985 größer waren und eine ansteigende Tendenz aufwiesen (vgl. Abb. 8-8). Ein dominierender Anteil aktuellen Niederschlagswassers hätte sich gegenteilig auswirken müssen.

Besonders bemerkenswert ist dabei die Entwicklung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Interflow, die sich bei Versickerung und Zumischung von aktuellem Niederschlagswasser, verglichen mit den anderen Meßstellen, besonders rasch ändern müßten (vgl. auch Einzelwerte in Abb. 8-9). Dies weist auf den zu dieser Zeit wirksamen Stauwasserkörper an der Grenze Deckschutt/Basisschutt hin. Älteres (Voreignis-) Wasser wird durch nachsickernde aktuelle Niederschläge mobilisiert. Geht man von einer nicht vollständigen Verdrängung älteren Bodenwassers (piston flow model) sondern von einer (auch wirksamen) Vermischung mit aktuellem Niederschlagswasser aus, reicht die versickernde Niederschlagsmenge nicht für eine erkennbare $\delta^{18}\text{O}$ -Änderung aus.

Sowohl im Frühjahr 1985 (April und Mai) als auch im Frühjahr 1986 (März und April) wurde die Zumischung von Interflow aus älterem Bodenwasser im Gesamtabfluß bei P 14 erkennbar. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Vorfluter werden negativer und tendieren weg von den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten des Grund- oder aktuellen Niederschlagswassers hin in Richtung Interflow.

Aus der Analyse der Isotopen-Monatswerte wird die Rolle des Interflow am Gesamtabfluß während der Frühjahrsmonate deutlich. Die star-

ken Abflußerhöhungen (wie z.B. im Mai 1985) kamen nicht durch Interflow (Q_{on}) aus aktuellem Niederschlagswasser (IF_c -Komponente), sondern durch bedeutenden, aus i.w. älterem Vor-Ereignis-Wasser bestehendem Interflow (IF_{pc} -Komponente) zustande. Die Darstellung der Einzelmessungen vom Mai 1985 (vgl. Kap. 8.4.2.3, Abb. 8-10) und die Analyse des N-Q-Ereignisses vom 07.05. - 09.05.1985 (vgl. Kap. 8.5.2.2) verdeutlichen dies noch besser.

8.4.2.3 Interflow-Anteil am Gesamtabfluß beim Pegel 14 im Frühjahr 1985 und 1986

Für die interflow-reichen Monate April und Mai 1985 sowie März und April 1986 konnten über das Separationsverfahren mit $\delta^{18}O$ die Anteile des Interflow am Gesamtabfluß Q_t für ganze Monate ermittelt werden. Diese Monats-Abflußseparationen waren wegen der zahlreichen $\delta^{18}O$ -Analysen (Q 3: 47; P 14: 110; IF1: 83; NB: 23) möglich.

Wie gezeigt werden konnte, trägt in den genannten Zeiträumen i.w. Interflow aus Vor-Ereignis-Bodenwasser zum Gesamtabfluß bzw. zu dessen Erhöhung im Vorfluter bei. Interflow aus aktuellem Niederschlag spielt nur eine untergeordnete Rolle.

Die beiden als Interflow abfließenden Komponenten a) aktuelles Niederschlagswasser (IF_c) und b) Vor-Ereignis-Bodenwasser (IF_{pc}) lassen sich vereinfachend zu einer IF -Abflußkomponente (aus Oberflächen- und oberflächennahem Abfluß, Q_{on}) zusammenfassen, die mit der IF -Meßstelle erfaßt wurde (vgl. auch Modellvorstellung zur Unterscheidung von 3 Abflußkomponenten, Kap. 2).

Eine 2-Komponenten-Separation, basierend auf den monatlichen Durchschnittswerten der beiden wirksamen Abflußkomponenten Grundwasser (Q_{GW}) und Interflow (IF_c und IF_{pc}), konnte unter Einhaltung folgender weiterer Voraussetzungen durchgeführt werden. Die $\delta^{18}O$ -Ganglinien des Interflow und des Gesamtabflusses im Vorfluter (Q_t am Pegel 14) schnitten sich nicht und waren vom Grundwassers verschieden.

In Abb. 8-10 sind die $\delta^{18}O$ -Einzelwerte des Interflow, des Gesamtabflusses im Vorfluter (P 14) und des Grundwassers (Q 3) sowie Mittelwerte des Niederschlags exemplarisch für den Mai 1985 dargestellt. Um mögliche Auswirkungen der Niederschlags- $\delta^{18}O$ -Werte auf die Wässer der anderen Meßstellen erkennen zu können, wurden aus den Niederschlagsproben 4 Mittelwerte mit etwa gleichen Niederschlagshöhen gebildet.

Aus den $\delta^{18}O$ -Ganglinien der Einzelwerte lassen sich die Auswirkungen von Niederschlag und Interflow auf Quell- und Vorfluterwasser gut er-

kennen. Die ^{18}O -Gehalte im Vorfluter bewegen sich allgemein unter denen des Grundwassers (Q 3). Während Abflußerhöhungen tendieren die $\delta^{18}O$ -Werte des Gesamtabflusses zu negativeren Werten vom aktuellen Niederschlag weg in Richtung Interflow. Dies lassen 3 dicht beprobte Hochwässer (ab 02.05., 07.05. und 17.05) erkennen. Bei den Ereignissen vom 07.05. und 17.05 wird auch im Quellwasser eine Interflow-Zumischung, die in der Nähe des Quellaustritts stattfindet, deutlich (vgl. u.a. Kap. 5.5.1).

Intensive Niederschläge mit relativ hohen $\delta^{18}O$ -Werten bewirkten eine sehr kurzfristige gleichgerichtete Auslenkung der $\delta^{18}O$ -Kurve von Q_t . Dies ist an teilweise über die Grundwasser- $\delta^{18}O$ -Ganglinie reichenden Meßwerten vom 07.05., 09.05., 17.05. und 18.05. gut zu erkennen. Dabei ist von einer direkten Zumischung des aktuellen Niederschlags in den Vorfluter (Niederschlag auf das Bachbett) auszugehen, noch ehe sich der Niederschlag als Impuls auf den Boden- oder Grundwasserspeicher auszuwirken beginnt. Bei der Quellschüttung bleiben diese kurzzeitigen Auslenkungen der $\delta^{18}O$ -Kurve erwartungsgemäß aus. Mit dem Einsetzen der eigentlichen Abflußerhöhungen (vgl. Besprechung der Einzelereignisse, Kap. 8.5) zeigen negativere $\delta^{18}O$ -Werte einen zunehmenden Anteil von Interflow am Gesamtabfluß an.

Das anhand der $\delta^{18}O$ -Werte der verschiedenen Abflußkomponenten für Mai 1985 exemplarisch aufgezeigte Abflußverhalten gilt prinzipiell auch für die Monate April 1985 sowie März und April 1986. Für diese Monate konnten Abflußseparationen des Gesamtabflusses (Q_t bei P 14) in die Komponenten Grundwasser (GW) und Interflow (IF : $IF_c + IF_{pc}$) mit Hilfe der Sauerstoffisotopen durchgeführt werden (Tab. 8-4).

Tab. 8-4: Interflow-Anteile am Gesamtabfluß (IF/Q_t) im Einzugsgebiet Denzenberg im Meßzeitraum April-Mai 1985 und März-April 1986. Ergebnisse der Komponenten-Separation mit $\delta^{18}O$ -Werten im Grundwasser (GW) und Monatsmittelwerten des Interflow (IF) und Gesamtabflusses (Q_t). NB, Q_t [mm]: Höhen des Bestandesniederschlags und Gesamtabflusses.

	GW	IF	Q_t	IF/Q_t	NB	Q_t
	$\delta^{18}O$ [‰]	$\delta^{18}O$ [‰]	[‰]	[%]	[mm]	[mm]
1985						
April	-9,45	-11,06*)	-9,63	11	44,1	14,2
Mai	-9,45	-11,40	-10,11	34	117,0	68,4
1986						
März	-9,62	-11,01	-10,35	53	47,5**)	17,7
April	-9,62	-11,02	-10,56	67	105,4	55,5

*) IF - $\delta^{18}O$ -Werte ab 20.04.1985

***) inkl. 13,7 mm Schmelzwasser von Februar-Niederschlägen

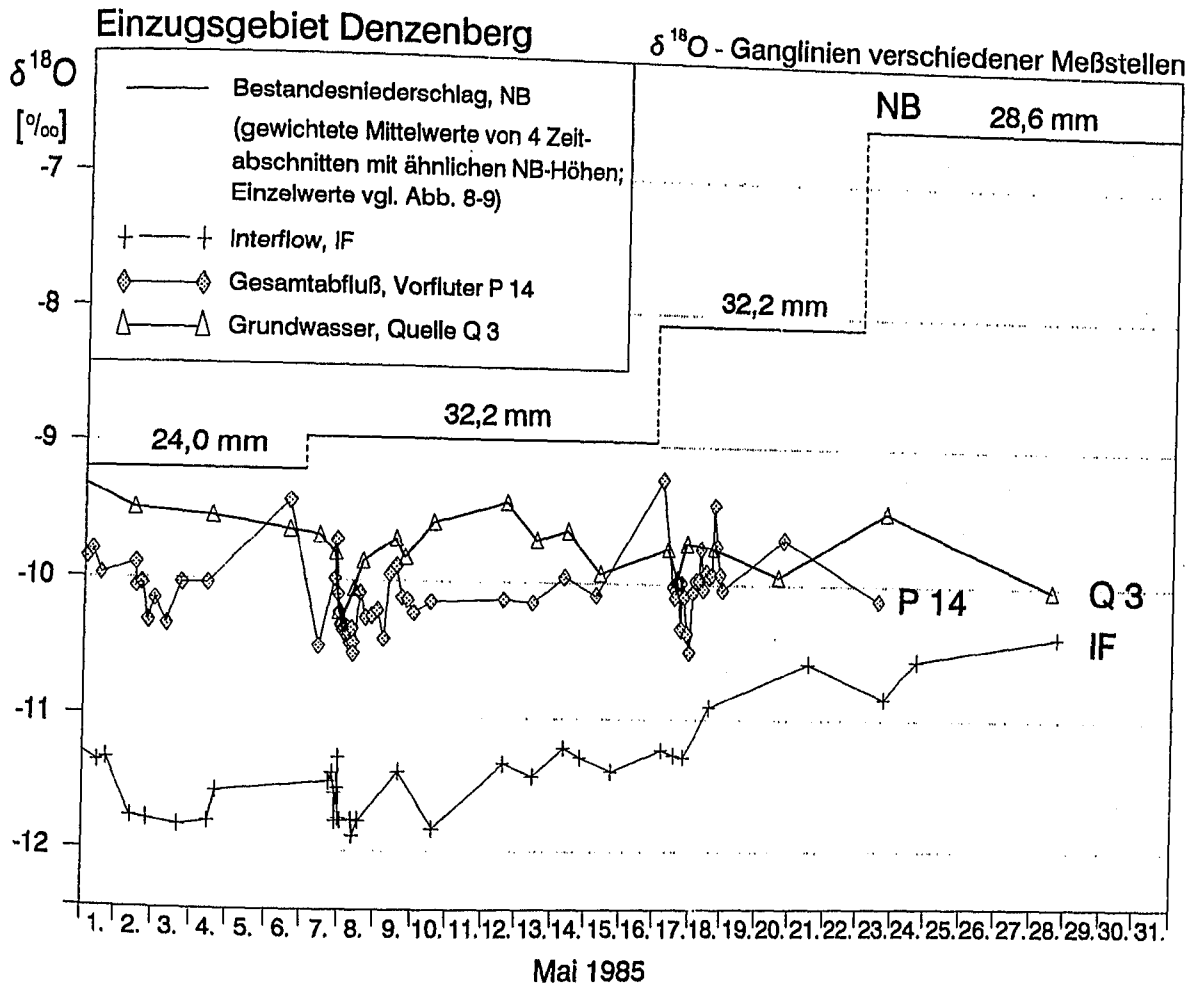


Abb. 8-10: $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Niederschlag (4 Mittelwerte), Interflow, Quellwasser und Gesamtabfluß (jeweils Einzelwerte) im Mai 1985, Einzugsgebiet Denzenberg.

Die N-Q-Situation war in den Zeiträumen April und Mai 1985 sowie März und April 1986, für die Monats-Abflußseparationen durchgeführt werden konnten, ähnlich. In den jeweils ersten Monaten fiel deutlich weniger Niederschlag (ca. 40%, bezogen auf den folgenden Monat) und die Q/NB-Verhältnisse lagen bei ca. 30%, im Mai 1985 und April 1986 dagegen im Durchschnitt 55%.

Nach der ^{18}O -Separationsmethode ergeben sich Interflow-Anteile am Gesamtabfluß (IF/Q) zwischen 11% und 67%. In beiden Jahren war der Interflow absolut, aber auch der Anteil des Interflow am Gesamtabfluß, jeweils in den feuchteren, niederschlagsreicheren zweiten Monaten, wesentlich höher. Dies wird auf eine zunehmende Mächtigkeit des Stauwasserkörpers zurückgeführt (vgl. Kap. 8.3).

Denkbar wäre auch eine Vergrößerung des unterirdischen Einzugsgebietes des für den Interflow wirksamen Bodenwasserspeichers (vgl. Kap. 8.4.3.2).

8.4.3 Interflow aus Testflächenergebnissen und Separationsberechnungen (Einzugsgebiet Denzenberg)

Die Interflow-Anteile am Gesamtabfluß wurden für die Monate April und Mai 1985 sowie März und April 1986 über zwei verschiedene Verfahren ermittelt. Über den Vergleich der Resultate dieser beiden Verfahren war es möglich, die Testflächenergebnisse für das gesamte Einzugsgebiet Denzenberg und den ganzen Beobachtungszeitraum zu übertragen (vgl. folgende Kapitel).

8.4.3.1 Direkte Interflow-Messungen und Separationsberechnungen mit Sauerstoff-18

Der mit der IF-Meßstelle direkt gemessene Interflow ist als monatliche Abflußhöhe der Tab. 8-2 (Kap. 8.2.1.2) zu entnehmen.

Unter der Voraussetzung, daß mit der IF-Meßstelle eine für das gesamte Einzugsgebiet repräsentative Interflow-Höhe ermittelt wurde, er-

geben sich z.T. unrealistisch hohe monatliche IF/Q_t-Verhältnisse (vgl. Tab. 8-2, dto.).

Für die 4 Vergleichsmonate (s.o.) sind die so berechneten IF/Q_t-Verhältnisse in Tab. 8-5, Spalte a, aufgelistet. Besonders die für März und April 1986 berechneten IF/Q_t-Verhältnisse von 101% bzw. 97% weisen darauf hin, daß die mit der IF-Meßstelle bestimmten Interflow-Mengen, bezogen auf das Gesamtgebiet, zu hoch sind. Das bedeutet, daß in Teilen des Gesamtgebietes entweder schwächerer oder gar kein Interflow stattgefunden hat.

Tab. 8-5: Interflow-Anteile am Gesamtabfluß in den Monaten April und Mai 1985 sowie März und April 1986. Ergebnisse der direkten Messungen mit der IF-Meßstelle und der Abflußseparation mit $\delta^{18}\text{O}$ im Vergleich sowie daraus errechnete Anteile des Flächenanteils mit Interflow am Gesamtgebiet.

	Interflow-Anteil am Gesamtabfluß bei P 14		Flächenanteil mit Interflow im Gesamtgebiet [%]
	-- [%]	---	
	a	b	c
1985			
April	24	11	46
Mai	66	34	52
1986			
März	101	53	52
April	97	67	<u>69</u>
			Mittel: 55%

a = direkte IF-Messung (IF-Meßstelle)
und Übertragung auf das Gesamtgebiet (mm)
b = Ergebnisse der $\delta^{18}\text{O}$ -Separationsmethode
c = Quotienten beider Bestimmungsmethoden (b/a)

Die mit der $\delta^{18}\text{O}$ -Tracermethode für die Vergleichsmonate ermittelten Interflow-Anteile am Gesamtabfluß (IF/Q_t, Spalte b, Tab. 8-5) liegen mit Werten zwischen 11% und 67% deutlich unter den Ergebnissen der IF-Meßstelle. Unter der Voraussetzung, daß die Ergebnisse der Separationsberechnung für das Gesamtgebiet und die der direkten Messung für das Versuchsgebiet Gültigkeit haben, wird die Vermutung unterstützt, daß in Teilen des Einzugsgebietes kein Interflow stattfindet.

Ein Großteil des Einzugsgebietes Denzenberg besteht aus Hangpartien mit sehr einheitlichem Boden- und Bestandescharakter. Die IF-Meßstelle wurde in einer für das Gesamtgebiet typischen Hanglage eingerichtet. Nur der obere Rand des Gesamtgebietes ist deutlich flacher, wobei die Hangneigung auf den Stubensandsteinbänken des oberen km4 auf Werte unter 3° zurückgeht. Auf den Sandsteinen der randlichen Verebnungen fehlt der Basisschutt teilweise, an den durch die Sandsteinbänke gebildeten Hangkanten sogar ganz. Dort ist auch der Deckschutt nur sehr gering-

mächtig ausgebildet (vgl. FLECK, 1987 und Kap. 3.4.1 und 3.4.3). Da zu vermuten ist, daß diese Verebnungsflächen nicht oder nur sehr unwesentlich zum Interflow beitragen, sind somit vereinfachend Gebiete mit Interflow (und ähnlichen Interflow-Höhen) von Gebieten ohne Interflow zu unterscheiden.

Der IF/Q_t-Quotient aus den beiden Bestimmungsmethoden (Tab. 8-5, Spalte a und b) erlaubt eine Abschätzung des Flächenanteils im Einzugsgebiet, in dem Interflow in der mit der Meßeinrichtung ermittelten Höhe stattfindet, (vgl. Spalte c, Tab. 8-5).

Im Mai 1985 wurde beispielsweise auf der Versuchsfläche eine IF-Höhe von 45,2 mm ermittelt. Dies würde, bezogen auf den Gesamtabfluß einem IF/Q_t-Anteil von 66% entsprechen. Die Separationsberechnung mit $\delta^{18}\text{O}$ ergab für das Gesamtgebiet einen IF-Anteil am Gesamtabfluß von 34% oder 23,3 mm. Aus dem Verhältnis beider Ergebnisse ergibt sich ein Flächenanteil mit Interflow von 52%.

Die Flächenanteile mit Interflow schwanken für die 4 Vergleichsmonate mit Ausnahme einer stärkeren Abweichung im April 1986 zwischen 46% und 52%, d.h. sie liegen im Durchschnitt bei 55% der Einzugsgebietsfläche.

Für die beiden Vergleichsmonate in 1986 haben sich etwas höhere Flächenanteile mit Interflow ergeben. Eine Vergrößerung des IF-Gebietes könnte mit höheren Niederschlägen (jeweils 3 Vormonate, 1985: 63,9 mm und 1986: 95,6 mm) und der entsprechend höheren Bodenfeuchte erklärt werden (Interflow auch in oberen, flacheren Hangpartien).

8.4.3.2 Beziehung zwischen Interflow, Bestandesniederschlag und Gesamtabfluß

Wie oben erwähnt, flossen im Einzugsgebiet Denzenberg im Durchschnitt ca. 55% der mit der IF-Meßstelle gemessenen Interflow-Höhe als Interflow ab. Mit Hilfe dieser Kenngröße konnten die direkten Interflow-Messungen für Monate, für die keine parallele Abflußseparation mit $\delta^{18}\text{O}$ (auf Monatsbasis) durchgeführt werden konnte, auf das ganze Einzugsgebiet übertragen werden. Dies betrifft i.w. die interflow-reichen Monate Dezember 1985 sowie Januar, Mai und Juni 1986. In den übrigen Monaten spielte der Interflow keine Rolle (vgl. auch Tab. 8-2, Kap. 8.2.1.2).

Die daraus für die hydrologischen Jahre 1985 und 1986 errechneten Interflow-Halbjahreswerte sind zusammen mit den Höhen des Bestandesniederschlags und des Gesamtabflusses in Tab. 8-6 zusammengestellt. Für die Halbjahre Sommer 1985 und Winter 1986 lagen vollständige IF-Meß-

Tab. 8-6: Bestandesniederschlag (NB), Interflow (IF) und Gesamtabfluß (Q_t) in den Einzugsgebieten Denzenberg (oben) und Kleiner Goldersbach (unten) sowie IF/NB-, IF/ Q_t - und Q_t /NB-Verhältnisse in den hydrologischen Jahren 1985 und 1986.

DENZENBERG		NB	IF	Q_t -P 14	IF/NB	IF/ Q_t	Q_t /NB	
		[mm]	[mm]			[%]		
Winterhalbjahr	1985	192	9	58	5	16	30	
Sommerhalbjahr	1985	314	24	147	8	16	47	
Gesamtjahr		1985	506	33	205	7	16	41
Winterhalbjahr	1986	334	61	112	18	54	34	
Sommerhalbjahr	1986	390	7	128	2	5	33	
Gesamtjahr		1986	724	68	240	9	28	33
Durchschnitt 1985/86			615	51	223	8	23	36

KLEINER GOLDERSBACH		NB	IF(P9)	Q_t (P8)	IF/NB	IF/ Q_t	Q_t /NB	
		[mm]	[mm]			[%]		
Winterhalbjahr	1985	213	22	47	10	47	22	
Sommerhalbjahr	1985	327	45	114	14	39	35	
Gesamtjahr		1985	540	67	161	12	42	30
Winterhalbjahr	1986	353	61	108	17	56	31	
Sommerhalbjahr	1986	451	22	64	5	34	14	
Gesamtjahr		1986	724	83	172	11	48	24
Durchschnitt 1985/86			632	75	167	12	45	26

reihen vor. Für die nur teilweise erfaßten Halbjahre (Winter 1985 und Sommer 1986) konnten die Summen der IF-Höhen auf der Basis der vorliegenden Bodenfeuchtemessungen und NB-Höhen für die IF-Meßstelle abgeschätzt und auf das Gesamtgebiet hochgerechnet werden. Dazu dienten die für die Monate mit IF-Messungen ermittelten Zusammenhänge zwischen der NB-Höhe und den bei unterschiedlicher Bodenfeuchte abgeflossenen IF-Mengen (Typ A - Typ B - Ereignisse und berechnete Quotienten IF/NB und IF/ Q_t , vgl. Tab. 8-1, 8-2 und Abb. 8-1 bis 8-6).

Im Abflußjahr 1986 lagen die Bestandesniederschläge um 218 mm, d.h. fast 50% höher. Die höheren Niederschläge von 1986 ließen den Interflow von 33 mm (1985) auf 68 mm (1986), d.h. um ca. 100% anwachsen. Vergleichsweise gering (35 mm Steigerung gegenüber 1985, d.h. um 17%) fiel dagegen die Erhöhung des Gesamtabflusses am Pegel 14 aus (vgl. auch Kap. 5.3). Es fällt auf, daß die um 35 mm gesteigerte Interflow-Höhe der Differenz der Gesamtabflußhöhen beider Jahre entspricht. Dies bedeutet, daß im Naßjahr 1986 der Grundwasserabfluß konstant blieb und der erhöhte Niederschlag sich auf eine Steigerung des Interflow und Erhöhungen des Boden- und Grundwasservorrats sowie der Evapotranspiration verteilte.

Die IF/NB-Faktoren haben sich im Naßjahr 1986 von 7% (Normaljahr 1985) auf 9% erhöht. Da sich der Grundwasserabfluß nicht erhöht hat (der Gesamtabfluß hat sich nur um die gesteigerte Interflow-Menge von 205 mm auf 240 mm er-

höht, vgl. Kap. 8.4.3.3), nahmen die IF/ Q_t -Anteile bei P 14 von 16% (1985) auf 28% (1986) deutlich zu.

Aus dem in den Gesamtjahren nur wenig unterschiedlichen IF/NB-Verhältnissen ist eine deutliche Pufferwirkung des Bodenwasserspeichers abzuleiten.

Aus den Abflußhöhen und -verhältnissen der hydrologischen Halbjahre lassen sich wegen ihrer klimatischen Unterschiede keine Gesetzmäßigkeiten ableiten. Der gegenüber dem Winterhalbjahr 1986 wesentlich (auch relativ zu NB und Q_t) geringere Interflow im Winterhalbjahr 1985 ist nur untergeordnet auf geringere Niederschläge zurückzuführen. Hauptursache dafür ist, daß 1985 der niederschlags- und interflow-reichste Monat erst im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai 1985: NB = 117 mm, IF = 23,3 mm) 1986 dagegen noch im Winterhalbjahr (April 1986: NB = 105,4 mm, IF = 37,2 mm) war.

Im Vergleichsgebiet Kleiner Goldersbach bewirkten die im Abflußjahr 1986 gegenüber 1985 um 184 mm höheren Bestandesniederschläge eine Erhöhung des Interflow um nur 16 mm (von 67 mm auf 83 mm). Der Gesamtabfluß bei P 8 stieg um 11 mm an. Wie im Gebiet Denzenberg fällt auch hier auf, daß die Interflow-Erhöhung etwa der Differenz der Gesamtabflußhöhen beider Jahre entspricht, der Grundwasserabfluß also etwa gleich blieb.

Die IF/NB-Verhältnisse liegen mit 12% (1985) und 11% (1986) im Durchschnitt etwas höher als

im Gebiet Denzenberg (7 und 9%). Dies ist auf die Interflow begünstigenden, tonreicheren km⁵-Hänge zurückzuführen. Wie im Gebiet Denzenberg ändern sich die IF/NB-Quotienten in beiden Jahren kaum.

Sehr viel deutlicher unterscheiden sich die Anteile des Interflow am Gesamtabfluß. Im Gebiet von P 8 liegen die IF/Q_t-Quotienten mit durchschnittlich 45% wesentlich höher als bei P 14 (23%). Auch hier waren die Interflow-Anteile am Gesamtabfluß im Naßjahr 1986 (48%) höher als 1985 (42%). Diese Beobachtungen verdeutlichen die vergleichsweise größere Bedeutung des Interflow in "Tongebieten" wie z.B. Kleiner Goldersbach (vgl. auch Kap. 5.3f, Abb. 5-4).

In beiden Vergleichsgebieten, dem "Sandgebiet" Denzenberg und dem "Tongebiet" Kleiner Goldersbach waren trotz stark erhöhter Niederschläge im Naßjahr 1986 nur relativ kleine Steigerungen der Gesamtabflußhöhe zu verzeichnen. Diese waren i.w. auf eine Erhöhung des Interflow bei konstant gebliebenem Grundwasserabfluß zurückzuführen. Die erhöhten Niederschläge dienten vor allem zur positiven Vorratsänderungen im Bodenwasser- aber auch im Grundwasserspeicher (vgl. Tab. A-5-6, Anhang). Die höheren IF/Q_t-Anteile im Einzugsgebiet Kleiner Goldersbach (P 8) macht die größere Bedeutung des Interflow in Tongebieten mit schlechter durchlässigen Deckschichten deutlich (vgl. auch Abb. 5-4, Tab. 5-19).

8.4.3.3 Konsequenzen der Interflow-Berechnungen für Grundwasserabfluß und Grundwasserneubildung

Die im Vergleich zu 1985 höheren Bestandesniederschläge von 1986 führten zu einem erhöhten Interflow mit leicht angestiegenem IF/NB-Verhältnis. Da sich Q_t i.w. nur um den gesteigerten IF erhöhte, ergaben sich für 1986 geringere Q_t/NB-Verhältnisse, Tab. 8-6, Gebiete Denzenberg, P 14, und Kleiner Goldersbach, P 8).

Dieses Interflow-Verhalten zeigt die Auswirkung des Deckschutts als Speicher mit Pufferwirkung. Die relativ geringe Steigerung der Gesamtabflußmenge kann durch höhere Verdunstungs-/Transpirationsraten und positive Vorratsänderungen (am Ende des hydrologischen Jahres 1986) im Boden und Aquifer (Kap. 5.3) erklärt werden.

Der im Vorfluter gemessene Gesamtabfluß (Q_t) setzt sich aus den Komponenten Grundwasser (GW) und Interflow (IF) zusammen. Die über δ¹⁸O bzw. die IF-Meßstelle oder die Pegelmeßstelle P 9 bestimmte IF-Komponente beinhaltet die

als Q_{on} abfließenden Teilkomponenten IF_e aus aktuellem Niederschlagswasser und IF_{pe} aus Vorereignis-Bodenwasser (vgl. Ergebnisse der 3-Komponenten-Separation, Kap. 8-5).

Der Teil des Niederschlags, der direkt auf den Vorfluter oder den vorfluternahen Talauebereich fällt und im Vorfluter abfließt, wird nicht über die IF-Beprobung erfaßt. Bei 2-Komponenten-Separationen, die nicht zwischen IF_{pe} (älteres Bodenwasser) und IF_e (aktuelles Niederschlagswasser) unterscheiden, können daraus Ungenauigkeiten entstehen.

Aus der Differenz von Q_t und IF läßt sich der Grundwasserabfluß abschätzen. Für beide Abflußjahre ergeben sich für die Gebiete Denzenberg (jeweils 172 mm) und Kleiner Goldersbach (1985: 94 mm; 1986: 90 mm) ähnliche Grundwasserabflußhöhen. Im Gebiet von P 14 wurden selbst in den unterschiedlich nassen hydrologischen Halbjahren bemerkenswert ähnliche GW-Abflußhöhen ermittelt (Tab. 8-7). Dies läßt auf einen stark verzögerten GW-Abfluß schließen, auf den auch die hohen mittleren Verweilzeiten der Quelle Q 3 (mit δ¹⁸O: ≥ 3a; Tritium-Bestimmungen ergeben über 40 Jahre, AGSTER, 1986a) hinweisen.

Tab. 8-7: Gesamtabfluß, Interflow und daraus berechneter Grundwasserabfluß in den Einzugsgebieten Denzenberg (oben) und Kleiner Goldersbach (unten). Zeitraum 1985-1986, Halbjahres- und Jahreswerte).

DENZENBERG		Q _t - IF =		GW	GW*
		[mm]			
Winterhalbjahr	1985	58	- 9	= 48	49
Sommerhalbjahr	1985	147	- 24	= 124	97
Gesamtjahr	1985	205	- 33	= 172	146
Winterhalbjahr	1986	112	- 61	= 51	64
Sommerhalbjahr	1986	128	- 7	= 121	97
Gesamtjahr	1986	240	- 68	= 172	158
KLEINER GOLDERSBACH		Q _t - IF =		GW	GW*
		[mm]			
Winterhalbjahr	1985	47	- 22	= 25	32
Sommerhalbjahr	1985	114	- 45	= 69	49
Gesamtjahr	1985	161	- 67	= 94	81
Winterhalbjahr	1986	108	- 61	= 48	48
Sommerhalbjahr	1986	64	- 22	= 42	35
Gesamtjahr	1986	172	- 83	= 90	83

GW*: Grundwasserabfluß nach graphischem Bestimmungsverfahren (vgl. Kap. 5.4.1)

Die berechneten Höhen des Grundwasserabflusses liegen bei P 14 in den Winterhalbjahren deutlich (ca. 40%) unter der Sommerhalbjahreshöhen. Dies zeigt eine gute Übereinstimmung mit den saisonalen Schüttungsschwankungen der Quelle Q 3 und dem aus der Q_t-Ganglinie erkennbaren Basisabflüssen (vgl. Kap. 8.1, Abb. 8-1). Die nach einem graphischen Separationsverfahren (vgl. Kap. 5.4.1, Tab. 5-18, A-5-7 im Anhang) bestimm-

mten Grundwasserabflüsse (GW* in Tab. 8-7) liegen im Durchschnitt beider Jahre ca. 11% unter den berechneten Werten.

Im Gebiet Kleiner Goldersbach waren die Unterschiede der berechneten halbjährlichen GW-Höhen nur 1985 wie bei P 14 ausgeprägt. Für 1986 wurden etwa gleiche GW-Höhen berechnet. Diese Beobachtung korreliert mit dem Schüttungsverhalten der km4-Quelle Q6a (Abb. 5-5, Kap. 5.5.1, vgl. auch Q_t-Ganglinie von P 8, Abb. 7-7, Kap. 7.4.1).

Die graphisch ermittelten Grundwasserabflüsse (GW* in Tab. 8-7, vgl. auch Tab. A-5-7, Anhang) liegen wie bei P 14 im Durchschnitt beider Jahre ca. 11% unter den berechneten Daten.

Es wird für beide Gebiete ersichtlich, daß der höhere Gesamtabfluß von 1986 (P 14: +35 mm; P 8: +11 mm) durch den vermehrten Interflow (P 14: +35 mm; P 8: +16 mm) und nicht durch einen höheren Grundwasserabfluß zustande kommt.

Von den 1986 im Vergleich zum Vorjahr deutlich höheren Bestandesniederschlägen (P 14: +218 mm; P 8: +184 mm) entfiel jeweils nur ein geringer Teil auf einen erhöhten Interflow (Zunahme in etwa gleichen IF/NB-Verhältnissen, s.o.). Der überwiegende Teil wurde von einer höheren Verdunstung (Transpiration) verbraucht und/oder diente einer Auffüllung des Boden- und Grundwasservorrats, die erst, zeitlich verzögert, zu einem erhöhten Grundwasserabfluß im Folgejahr führt. Dies dürfte die im Naßjahr 1986 jeweils kleineren Q_t/NB-Verhältnisse erklären (Tab. 8-6).

Die Annahme eines verzögerten Abflusses wird ebenfalls durch die mit δ¹⁸O bestimmten mittleren Grundwasserverweilzeiten von ca. 3 oder mehr Jahren (vgl. Q 3 und Q 6a1, Kap. 7-4-1, Tab. 7-3) unterstützt.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen. Im Jahresdurchschnitt höhere Niederschläge führen zu einem höheren Interflow, einer höheren Verdunstung und einer positiven Vorratsänderung der Boden- und Grundwasserspeicher. Der Grundwasserabfluß dagegen wirkt dämpfend und reagiert sehr stark verzögert.

8.5 Separation des Gesamtabflusses in drei Abflußkomponenten für verschiedene Hochwasserereignisse

8.5.1 Die Methode der 3-Komponenten-Separation

Die früher im Schönbuch durchgeführten Ganglienseparationen haben nur zwischen 2 Kompo-

nenten unterschieden:

- a) direkter Abfluß (Q_d oder Q_e) aus aktuellem Niederschlagswasser und
- b) indirekter Abfluß (Q_i oder Q_{pe}) aus Basisabfluß oder Grundwasser.

Die Methode der 3-Komponenten-Separation beruht auf der unterschiedlichen chemischen und isopenchemischen Zusammensetzung der drei Abflußkomponenten und der kombinierten Anwendung dieser beiden Markierungen. Eine der Grundvoraussetzungen für die Anwendbarkeit der Methode (vgl. auch 2-Komponenten-Separation, Kap. 2.2 und folgende Abschnitte) besteht darin, die Tracerkonzentrationen der zu unterscheidenden Komponenten - vor Beginn einer Abflußerhöhung und einer möglichen Vermischung - getrennt erfassen zu können. Die IF_e- (herkömmlich Q_d- oder Q_e-) und GW- (herkömmlich Q_i- oder Q_{pe}-) Komponenten - sind relativ problemlos über den aktuellen Niederschlag im Bestand (oder Schmelzwasser) und das Grundwasser aus Quellen oder den Basisabfluß im Vorfluter zu erfassen.

Neu hinzugekommen und schwieriger war die Beprobung der IF_{pe}-Komponente. Sie konnte über die IF-Meßstelle Denzenberg in der Regel direkt erfaßt werden.

Eine Anzahl von n Abflußkomponenten läßt sich quantitativ durch die Messung von (n - 1) unterschiedlichen und voneinander unabhängigen Tracern durch die Anwendung einer einfachen Mischungsgleichung für jeden Tracer bestimmen (vgl. auch MOSER und STICHLER, 1983; HERRMANN et al., 1984):

$$c_t Q_t = \sum_{i=1}^n c_i Q_i \quad \text{mit} \quad Q_t = \sum_{i=1}^n Q_i$$

Um die Abflußkomponenten quantitativ bestimmen zu können, müssen die folgenden Größen bekannt sein:

- c_t: Tracerkonzentration im Gesamtabfluß (Vorfluterabfluß Q_t)
- c_i: Tracerkonzentrationen in den Abflußkomponenten (GW, IF_{pe}, IF_e)
- Q_t: Gesamtabflußmenge

Je deutlicher sich die Tracerkonzentrationen voneinander unterscheiden, desto genauer sind die Ergebnisse. Setzt sich der Gesamtabfluß (Q_t) während einer Abflußerhöhung aus 2 Einzelkomponenten (2-Komponenten-Separation) zusammen, genügt ein Tracer zur Unterscheidung dieser beiden Abflußanteile. Bei 3 Abflußkomponenten (3-Komponenten-Separation) wird ein weiterer Tracer benötigt.

3-Komponenten-Separation mit 2 Tracern Graphische Lösungsmöglichkeit

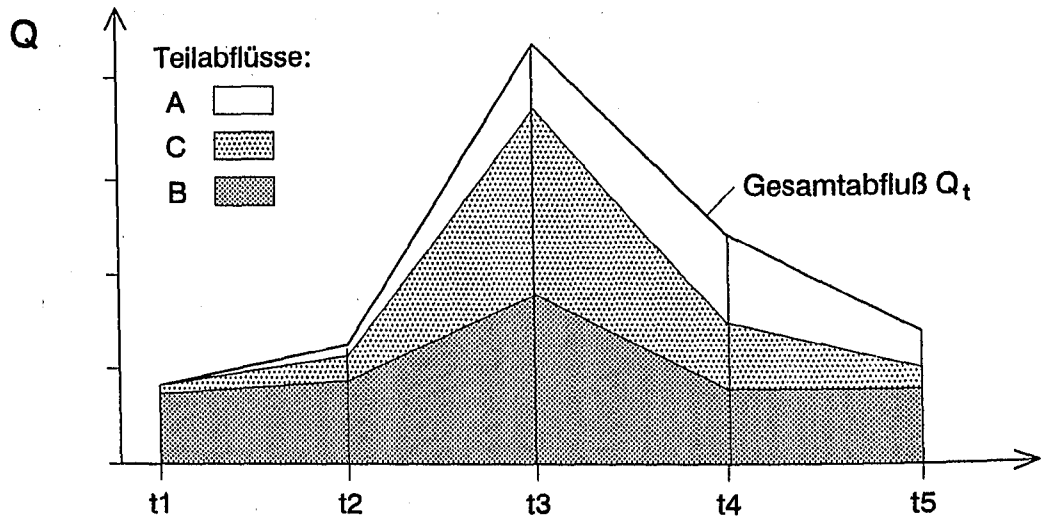
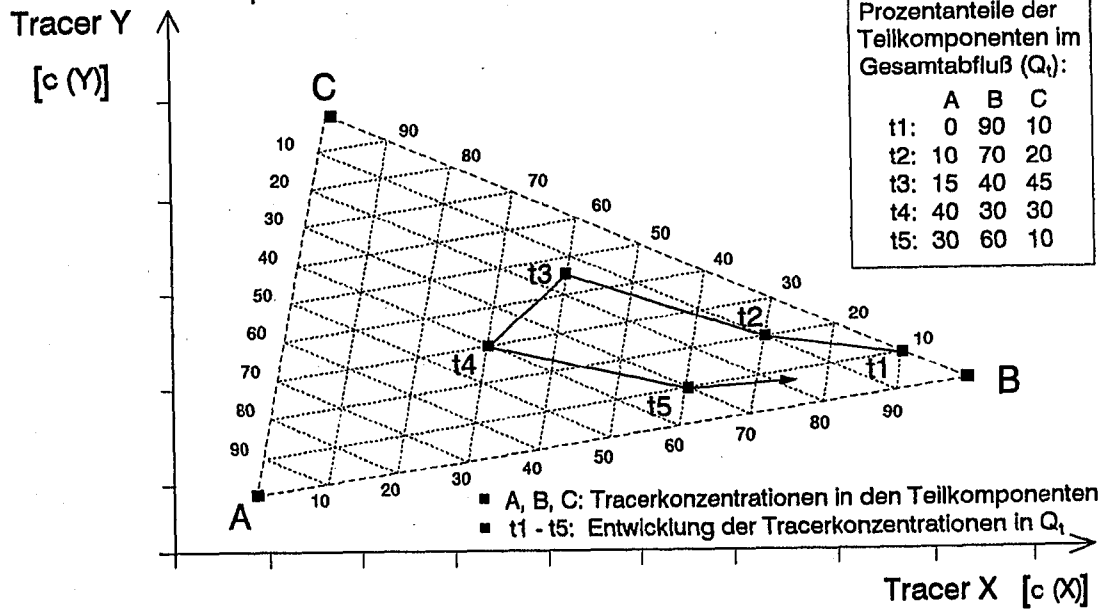


Abb. 8-11: Beispiel für das graphische Lösungsverfahren zur Trennung von 3 Komponenten im Gesamtabfluß mit Hilfe von 2 Tracern.

Es gilt dann:

Die Gesamtabflußmenge Q_t setzt sich aus den Mengen Q der 3 Teilkomponenten A, B und C zusammen:

$$Q_t = Q_A + Q_B + Q_C$$

Der Gesamtabfluß Q_t mit der Konzentration c des Tracers X wird gebildet aus der Summe der Teilabflüsse (Q_A , Q_B und Q_C) mit den zugehörigen Konzentrationen (c_A , c_B und c_C):

$$c_t(X)Q_t = c_A(X)Q_A + c_B(X)Q_B + c_C(X)Q_C$$

entsprechend gilt für den Tracer Y:

$$c_t(Y)Q_t = c_A(Y)Q_A + c_B(Y)Q_B + c_C(Y)Q_C$$

Zur quantitativen Bestimmung der 3 Abflußkomponenten A, B und C müssen ihre Tracerkonzentrationen, die Tracerkonzentration im Gesamtabfluß und die Gesamtabflußmenge bekannt sein.

Weiter gelten die folgenden Bedingungen:
Um aus dem Konzentrationsverlauf zweier Tracer die Anteile von 3 Komponenten im Gesamtabfluß (Q) abzuleiten, müssen mindestens jeweils 2 Komponenten von der dritten unterscheidbar sein. Oder: wenn 2 Komponenten die gleiche Konzentration eines Tracers aufweisen, müssen sie sich in der Konzentration eines zweiten unterscheiden.

Für die Ermittlung der prozentualen Anteile der 3 Abflußkomponenten A, B und C am Gesamtabfluß Q_t gibt es eine einfache graphische Lösungsmöglichkeit (Abb. 8-11). Trägt man die Tracerkonzentrationen $c(X)$ und $c(Y)$ der 3 Einzelkomponenten in ein Achsenkreuz (x-Richtung $c(X)$ und y-Richtung $c(Y)$) ein, bilden diese unter den oben genannten Bedingungen ein Dreieck. Unter der Voraussetzung, daß sich der Gesamtabfluß während einer Abflußerhöhung aus diesen 3 Teilkomponenten mit wechselnden Anteilen zusammensetzt, müssen sich die Tracerkonzentrationen im Gesamtabfluß innerhalb dieses Dreiecks bewegen. Wie das schematisierte Beispiel in Abb. 8-11 zeigt, lassen sich dann für verschiedene Zeitpunkte ($t_1 - t_5$) die jeweiligen Anteile von A, B und C im Gesamtabfluß Q_t ablesen. Für das Erreichen einer zufriedenstellenden Genauigkeit muß die Differenz der unterschiedlichen Tracerkonzentrationen der Teilkomponenten ausreichend groß sein (s.o.). Dies zeigt sich an nicht zu spitzen oder zu stumpfen Winkeln des "Komponenten-Konzentrationsdreiecks".

Neben dem für die Fragestellungen idealen Isotopen-Tracer ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$ -Werte) wurden chemische Parameter als zweiter Tracer ausgewählt, die für bestimmte Abflußkomponenten typische Konzentrationen aufweisen. Der Nachteil, daß einige dieser Parameter (wegen ihrer nicht konservativen Eigenschaften) nicht als ideale Tracer zu betrachten sind, wurde dabei in Kauf genommen (vgl. Kap. 2.2).

Der Chemismus des Interflow wurde durch zahlreiche Proben über die IF-Meßstelle Denzenberg, aber auch durch den Abfluß am Pegel 9 (Einzugsgebiet Kleiner Goldersbach) kontinuierlich erfaßt. Sporadische, ereignisorientierte Probenahmen aus Aufgrabungen in anderen Einzugsgebieten ergänzten die chemische Erfassung des Interflow. Die kontinuierlichen IF-Beprobungen bildeten die Grundlage dafür, chemische und isotopechemische Veränderungen auch während Hochwasserereignissen (Auswirkungen durch nachsickerndes aktuelles Niederschlagswasser) erkennen zu können. (Zur chemischen Zusammensetzung des Interflow vgl. Kap. 6.1.5)

Positive Korrelationen zwischen Quellschüttungsverlauf und Sulfatkonzentrationen, in einigen Fällen auch bei Nitrat und Kalium, die bei früheren Untersuchungen (AGSTER und EINSELE, 1986) auf die Zufuhr höher konzentrierter Wässer aus dem Oberboden zurückgeführt wurden, ließen diese Inhaltsstoffe als IF-Tracer in Betracht kommen.

Zwischen Schüttungs- oder Abflußerhöhung und der elektrischen Leitfähigkeit (Lf) besteht

aufgrund der geochemischen Situation im Schönbuch immer eine negative Korrelation. Insofern kann höher mineralisiertes Grundwasser (GW) bei Kenntnis des Lf-Wertes des Interflow vom Gesamtabfluß getrennt werden. Die Problematik, daß IF-Wasser (aus IF_e und IF_{pe}) in ausgelaugten Oberböden oft ähnliche Inhaltsstoffe wie der aktuelle Bestandesniederschlag aufweist, älteres Bodenwasser also vom aktuellen Niederschlagswasser chemisch teilweise schlecht zu unterscheiden ist, kann mit dem Tracer ^{18}O gelöst werden. Dabei muß die Voraussetzung erfüllt sein, daß die Komponenten IF_e und IF_{pe} unterschiedliche ^{18}O -Gehalte aufweisen. Dies trifft, entsprechend den $\delta^{18}\text{O}$ -Schwankungen im Niederschlag nicht für jedes N-Q-Ereignis zu.

An für bestimmte Abflußsituationen typischen N-Q-Ereignissen wird die Anwendung des 3-Komponenten-Separationsverfahrens exemplarisch und deshalb ausführlicher mit Darstellungen des graphischen Lösungsweges vorgestellt. Für Vergleichsdaten wurde darauf verzichtet.

8.5.2 Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet Denzenberg ("Sandgebiet") bei unterschiedlichen Ausgangsbedingungen

8.5.2.1 Hochwasserereignis vom 30. Januar - 05. Februar 1985

Ausgangssituation

Die Ausgangssituation dieses Schneeschmelz-Ereignisses wird durch eine die gesamte Meßperiode umfassende Darstellung der Ganglinien von Gesamtabfluß und Schüttung (P 14 und Q 3, der Lf-Werte, der Niederschlags-Tageswerte und der pF-Werte im Boden verdeutlicht (Abb. 8-1). Die Änderung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Jahresverlauf ist den Abb. 5-5, 7-7 und A-8-3 (Einzelmessungen) und Abb. 8-8 (Monatsmittelwerte) zu entnehmen.

Von Ende Dezember 1984 bis zum 12.02.1985 zeigten die Tensiometer ab Tiefen von 0,3 m keine Wasserspannung an ($pF \leq 0$) an, so daß ein Stauwasserkörper über der Grenzschicht Deckschutt/Basisschutt während dieser Zeit angenommen werden kann.

Nahezu die gesamten Januar-Niederschläge fielen als Schnee und standen beinahe vollständig als Input für dieses Hochwasserereignis zur Verfügung. Eine deutliche Erwärmung mit geringen Regenniederschlägen (3,4 mm) in der Nacht vom 31.01. bis zum 01.02. brachten die noch vorhandene Schneedecke zur vollständigen Abschmelzung. Daraus resultierte die, relativ zur Höhe des Vor-Ereignis-Abflusses, stärkste Abflußerhöhung

der gesamten Untersuchungsperiode.

Die Höhe des Input für das Ereignis aus NB- und Schmelzwasser (Meßstation NB- S 4, Testfläche Denzenberg) betrug 19 mm.

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Niederschläge in den Vormonaten September bis Dezember 1984 lagen zwischen $-7,95\text{‰}$ und $-14,3\text{‰}$ (Monatsmittelwerte, vgl. Abb. 7-5) bei NB-Höhen zwischen 23,5 mm und 62 mm. Der aus der Mischung von Schmelz- und aktuellem Niederschlagswasser berechnete $\delta^{18}\text{O}$ -Input-Wert betrug $-14,74\text{‰}$.

Die aus dem Bestandesniederschlag gebildete IF_e -Komponente war einschließlich der elektrischen Leitfähigkeit durch folgende Basiswerte charakterisiert:

IF_e -Komponente:

$L_f = 42 \mu\text{S}/\text{cm}$; $\delta^{18}\text{O} = -14,74\text{‰}$; NB = 19 mm;

(Bei Schneeschmelzeereignissen ist mit teilweise noch gefrorenen Teilflächen zu rechnen. Deshalb kann ein bestimmter Teil der als IF_e bezeichneten Komponente auch als Überlandabfluß, also nicht über Interflow, zum Vorfluter gelangen. Dies hat jedoch keinen Einfluß auf den berechneten Anteil von Niederschlags- und Schmelzwasser, IF_e , im Gesamtabfluß.)

Im Vorfluter bei P 14 hatten sich nach der unbedeutenden Schneeschmelze im Januar (Input = 4 mm) noch keine Niedrigwasserbedingungen vor Beginn der Abflußerhöhung eingestellt (s.u.). Die für die Ganglinienseparation notwendigen Parameter der Grundwasserkomponente GW konnten aus der Vor-Ereignis-Schüttung der Quelle Q 3 gewonnen werden. Dort schwankten die L_f - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte bei Niedrig-Schüttung im Dezember und Januar, unbeeinflusst durch zugemischtes Niederschlags- oder älteres Bodenwasser, nur wenig.

GW-Komponente:

$L_f = 700 \mu\text{S}/\text{cm}$; $\delta^{18}\text{O} = -9,50\text{‰}$;

Bei Bodenwassergehalten über der Feldkapazität entspricht das mit Plattenlysometern beprobte Sickerwasser im Deckschutt im Mittel dem älteren, schon vor dem Ereignis im Boden gespeicherten Wasser, das als IF_{pe} -Komponente abfließt. Dies haben detaillierte Auswertungen von Einzeldaten aber auch die Zusammenstellung von Monatswerten zeigen können (vgl. Interflow- und Sickerwasser- $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in den Monaten April (Fertigstellung der IF -Meßstelle) und Mai 1985 sowie März bis Mai 1986 Abb. 7-5, Kap. 7.3.1.4).

Durch 2 vor dem Ereignis durchgeführte Sickerwasserbeprobungen am 22.01. und 29.01. konnte die chemische Zusammensetzung des Ab-

flusses (älteres Vor-Ereignis-Bodenwasser, IF_{pe}) der noch unbeeinflusst durch die Zumischung von aktuellem Schmelzwasser war, bestimmt werden (vgl. Abb A-8-4, Anhang).

IF_{pe} -Komponente:

$L_f = 101 \mu\text{S}/\text{cm}$; $\delta^{18}\text{O} = -8,59\text{‰}$;

Der Vor-Ereignis-Abfluß am Pegel 14 lag mit 0,36 l/s sehr niedrig, jedoch über dem mittleren Abfluß der Frostperiode vom Dezember und Januar (ca. 0,25 l/s). Auch die elektrische Leitfähigkeit hatte sich mit $534 \mu\text{S}/\text{cm}$ am 30.01. nach der geringen Abflußerhöhung in der 2. Januarhälfte noch nicht wieder auf den Niedrigwasserwert (ca. 650 - 660 $\mu\text{S}/\text{cm}$) eingestellt. Der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert entsprach mit $-9,54\text{‰}$ etwa dem Grundwasserwert von Q 3. Dies hängt mit dem Einfluß eines im Vorfluter noch wirksamen Interflow mit weniger negativen $\delta^{18}\text{O}$ -Werten zusammen (vgl. Basiswert der IF_{pe} -Komponente).

Die Basisdaten der 3 Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sind in Abb. 8-12 a) in einem $L_f/\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm als Eckpunkte des Konzentrationsdreiecks (vgl. Einführung in die 3-Komponenten-Separationsmethode, Kap. 8.5.1) eingetragen.

Da sich die L_f - und $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen im Gesamtabfluß (P 14) während der Abflußerhöhung (durchgezogene Linie mit den Zeitmarkierungen 1 - 6) weitgehend im Bereich der GW- IF_{pe} -Mischungslinie bewegen, wurde zur besseren Übersicht auf eine vollständige Darstellung des mittleren Teils des Konzentrations-Dreiecks verzichtet. Zusätzlich eingetragen sind die im Quellwasser (Quelle Q 3, gestrichelte Linie a - f) und im Sickerwasser (4 Werte unter IF_{pe}) während des Ereignisses registrierten L_f - und $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen.

Hochwasserereignis

Der die Schneeschmelze beschleunigende Ereignis-Niederschlag (NB-Höhe 3,4 mm) dauerte von 31.01.1985 17.00 Uhr bis zum 01.02.85 6.00 Uhr (vgl. Abb. 8-12 c). Da die Schneedecke während des Ereignisses rasch abschmolz, kann von einem gleichmäßig wirkenden Input aus Schmelz- und Regenwasser ausgegangen werden.

Das ab 31.01.1985 um die Mittagszeit einsetzende Tauwetter war noch vor Beginn der Regenfälle durch eine allmähliche Zunahme des Gesamt-Abflusses (vgl. Q_t , Abb. 8-12 c) zu erkennen. Mit dem einsetzenden Regen verstärkte sich die Abflußerhöhung. Erst mit der zunehmenden Erwärmung am folgenden Tag (Vormittag des 01.02.1985) und der eigentlichen Schneeschmelze

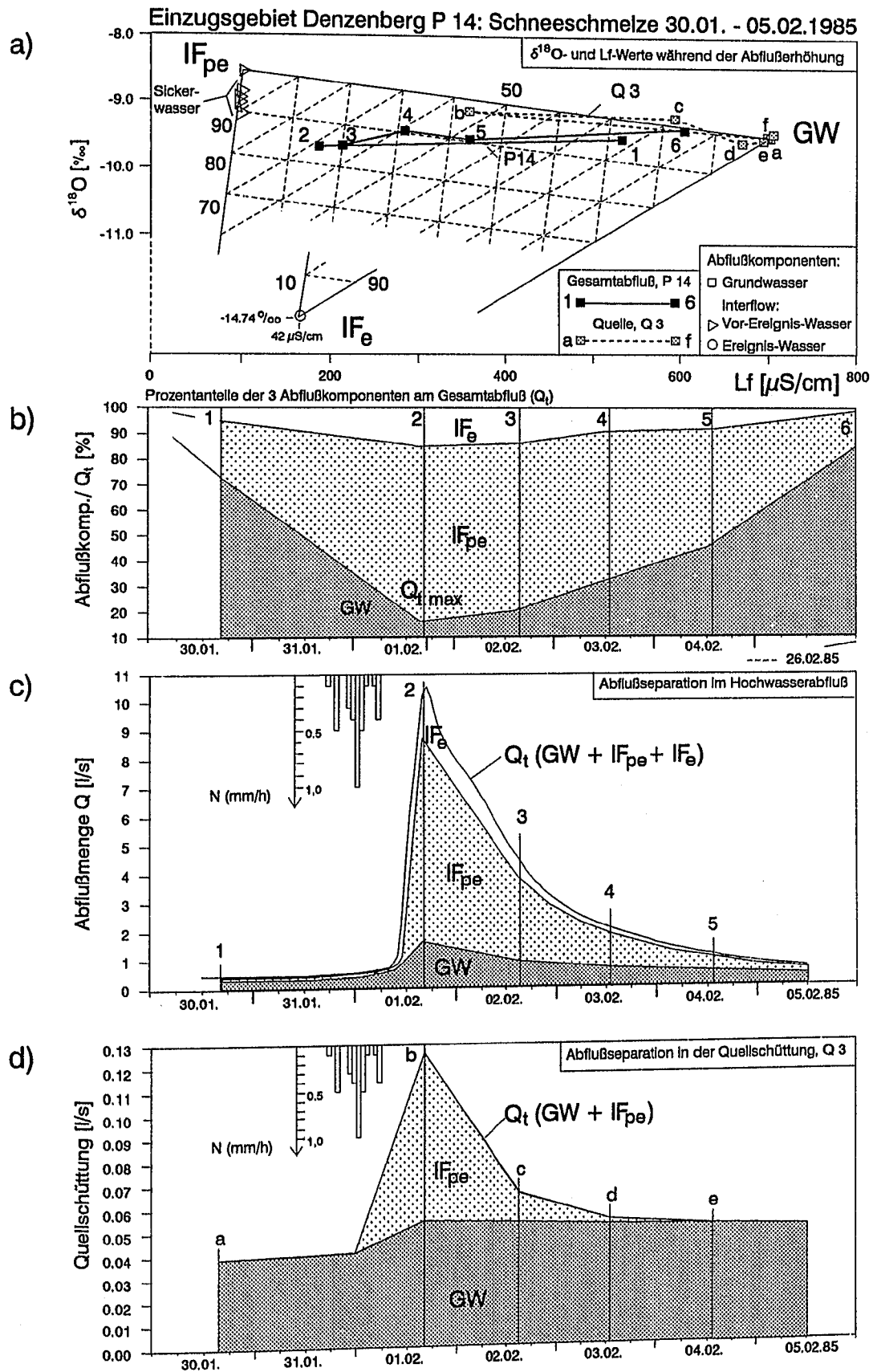


Abb. 8-12: Hochwasserereignis vom 30.01. - 05.02.1985 (Schneeschmelze) im Einzugsgebiet Denzenberg: a) $\delta^{18}\text{O}$ - und Leitfähigkeitswerte der Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sowie Änderungen während der Abflüßerhöhung, b) Prozentanteile der Abflußkomponenten am Gesamtabfluß, c) Ganglinie des Gesamtabflusses und Separation in 3 Abflußkomponenten, d) Ganglinie der Quellschüttung an Q 3 und Separation in die beteiligten Abflußkomponenten.

stieg der Gesamtabfluß sprunghaft bis zum Abflußmaximum ($Q_{\text{max}} = 10,55 \text{ l/s}$) am 01.02. um 17.00 Uhr. Der relativ langsame Rückgang der Abflußmenge erstreckte sich über mehrere Tage bis zu erneut einsetzenden Niederschlägen am 06.02.1985. Die Abflußzunahme auf das fast 30-fache der Vor-Ereignis-Menge ($0,36 \text{ l/s}$ auf $10,55 \text{ l/s}$) stellt die relativ stärkste Erhöhung während der Beobachtungszeit am Pegel 14 dar.

Die ^{18}O -Gehalte im Gesamtabfluß am Pegel 14 blieben während der Abflußerhöhung mit Werten zwischen $-9,44\text{‰}$ und $9,68\text{‰}$ nahezu unverändert (vgl. Abb. 8-12 a). Eine Tendenz zu niedrigeren $\delta^{18}\text{O}$ -Werten, die bei einer Zumischung von Schmelz- und Niederschlagswasser (IF_e -Komponente mit $\delta^{18}\text{O} = -14,72\text{‰}$) erwartet werden könnte, ist kaum erkennbar.

Nach der herkömmlichen 2-Komponenten-Separation mit $\delta^{18}\text{O}$ als Tracer, die Q_e aus Niederschlags- und Schmelzwasser (entsprechend der IF_e -Komponente) von Q_{pc} aus Grundwasser (entsprechend der GW-Komponente) trennt, wäre diese Abflußerhöhung nahezu ausschließlich auf eine Zunahme des Grundwasserabflusses zurückzuführen. Durch die Einbeziehung der Gesamtmineralisation als zweiten Tracer wird aus der starken Lf-Verringerung im Gesamtabfluß (minimal $187 \mu\text{S/cm}$, zum Zeitpunkt 2) die Wirksamkeit der 3. Abflußkomponente (IF_{pc}) aus Vor-Ereignis-Bodenwasser mit grundwasserähnlichem ^{18}O -Gehalt und einer gegenüber dem Grundwasser sehr viel niedrigeren Leitfähigkeit deutlich (vgl. Dreieck-Diagramm, Abb. 8-12 a).

Aus dem Lf/ $\delta^{18}\text{O}$ -Konzentrations-Dreieck ist folgende Entwicklung der Anteile der 3 Abflußkomponenten am Gesamtabfluß abzulesen. Vor Beginn des Ereignisses am 30.01.1985 (Zeitpunkt 1) floß hauptsächlich Grundwasser (GW-Komponente) im Vorfluter ab. Einen erheblichen Abflußanteil von insgesamt 27% (IF/Q_e) stellte der Interflow aus älterem Bodenwasser ($\text{IF}_{\text{pc}} = 22\%$) und Schmelzwasser der Januar-Schneeniederschläge ($\text{IF}_e = 5\%$; vgl. Tab. 8-8, Abb. 8-12 b).

Bis zum Zeitpunkt (2), dem Abflußmaximum (Q_{max}), nahmen beide IF-Komponenten relativ zum GW-Anteil zu (Abb. 8-12 b). Die IF_{pc} -Komponente besaß bei Q_{max} mit 69% den höchsten Abflußanteil. Nach dem Spitzenabfluß nahmen der Interflow-Anteil wieder ab, der IF_{pc} -Anteil stärker als die IF_e -Komponente (2 - 5). Dies weist auf einen zunehmenden Anteil der versickernden Frischwasserkomponente (IF_e) im Bodenwasser hin. Nach wiederholten kleineren Abflußerhöhungen wurden erst am 26.02.1985 (6) wieder Niedrigwasserbedingungen mit dominierendem GW-Anteil am Gesamtabfluß erreicht.

Tab. 8-8: Prozent-Anteile der Abflußkomponenten GW, IF_{pc} und IF_e im Gesamtabfluß bei P 14 (Einzugsgebiet Denzenberg) während der Schneeschmelze Anfang Februar 1985. Werte vom 30.01. - 26.02.1985.

Meßwert	Datum	Zeit	GW	IF_{pc} [%]	IF_e
1	30.01.85	16:40	73	22	5
2	01.02.85	16:00	16	69	15
3	02.02.85	15:10	20	66	14
4	03.02.85	13:00	32	59	9
5	04.02.85	13:30	46	46	8
6	26.02.85	14:50	85	14	1

Zum Zeitpunkt der Gesamtabflußspitze (2) erreichten alle Komponenten die höchsten Abflußmengen. Dies trifft, trotz minimalem Prozentanteil am Gesamtabfluß, auch für die GW-Komponente zu (vgl. Abb. 8-12 c). Der Grundwasserabfluß steigerte sich von $0,26 \text{ l/s}$ auf maximal $1,64 \text{ l/s}$. Die IF_{pc} -Komponente nahm sehr viel stärker zu, d.h. von $0,08 \text{ l/s}$ auf $7,05 \text{ l/s}$. Das aktuelle Schmelz- und Niederschlagswasser (IF_e) erreichte einen Anteil von maximal $1,54 \text{ l/s}$.

Die Ergebnisse der 3-Komponenten-Separationsmethode bestätigen die Modellvorstellung der Abflußbildung bei hohen Bodenwassergehalten. Durch das versickernde Schmelz- und Niederschlagswasser (IF_e -Komponente) wird älteres Bodenwasser (IF_{pc} -Komponente) im Deckschutt rasch mobilisiert. Die Abflußmenge nimmt bis Q_{max} am stärksten zu. Die IF_e -Komponente nimmt, verglichen mit IF_{pc} , nach Q_{max} langsamer ab. Dies liegt daran, daß im Laufe des Ereignisses eine zunehmende Vermischung des versickernden Schmelzwassers (IF_e) mit dem älteren Bodenwasser (IF_{pc}) erfolgte, so daß der relative Anteil von IF_e an IF_{pc} zunahm. Diese Vermischung ist durch die $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen im Bodenwasser selbst gut dokumentiert (vgl. Abb. A-8-4, Anhang und Prozentanteile der Abflußkomponenten in Abb. 8-12 b). Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte verschieben sich auf der IF_{pc} - IF_e -Mischungsgerechten in Richtung IF_e , Abb. 8-12 a). Der GW-Abfluß steigt nur kurzfristig und relativ gering an. Dies geschieht über ein geringes lokales Ansteigen des Grundwasserspiegels dort, wo Sickerwasser rasch den Grundwasserspiegel erreichen kann (gut durchlässige oder fehlende Deckschichten).

Bei halblogarithmischer Darstellung der abnehmenden IF_{pc} -Mengen ergab sich ein geradliniger Verlauf, aus dem sich ein Leerlaufkoeffizient von ca. $\alpha = 0,9 \text{ d}^{-1}$ berechnen ließ. Dieser Wert liegt im Bereich der auch für andere Ereignisse ermittelten α -Werte des Interflow-Speichers II, der bei Ereignissen des Typs A auftritt (vgl. u.a. Kap. 8.3, Abb. 8-7).

Ein sich rascher entleerender Interflow-Spei-

cher des Sekundärgefüges (Speicher I), der bei anderen Ereignissen des Typs A im folgenden Frühjahr wirksam war, konnte hier nicht ermittelt werden. Das langsam in den Boden eindringende Schmelzwasser hat das Sekundärgefüge offenbar nicht merklich genutzt.

Während der Hochwasserwelle, im Zeitraum vom 31.01. bis zum 05.02., betrug die gesamte Abflußhöhe am Pegel 14: $Q_t = 6,55$ mm. Bei einem Basisabfluß von 0,84 mm bedeutet dies eine Abflußerhöhung (im folgenden auch als Q_t+ bezeichnet) um 5,71 mm. Auf die Höhe des versickernden Niederschlags- und Schmelzwassers (Input = 19 mm) bezogen, entspricht dies einem sehr hohen Abflußquotienten ($Q_t+/Input = 30\%$). Die tatsächlich abgeflossene Menge des eingetragenen Frischwassers (IF_e -Komponente) machte dagegen nur 4% ($IF_e/Input$) aus.

Für den Zeitraum 31.01. - 05.02.1985 konnte der Gesamtabfluß wie folgt in die 3 Abflußkomponenten geteilt werden:

Gesamtabfluß:	$Q_t = 6,55$ mm (100%)
Teilkomponenten:	GW = 1,70 mm (26%)
	$IF_{pe} = 4,00$ mm (61%)
	$IF_e = 0,85$ mm (13%)

Der Mehrabfluß der GW-Komponente (GW+), der als Mindestwert einer kurzfristigen Grundwasserneubildung interpretiert werden kann, ergab 1,09 mm.

Aus der Differenz von Eintragshöhe (19 mm) und Abflußsteigerung ($Q_t+ = 5,71$ mm) ergibt sich, daß der überwiegende Teil des Niederschlags- und Schmelzwassers (ca. 13,3 mm) zu einer Erhöhung der Bodenfeuchte, eines späteren Interflows und einer Grundwasserneubildung sowie der Transpiration beitrug.

Schüttungsverhalten und Quellwasserzusammensetzung von Q 3

Bei Q 3 konnte eine Schüttungszunahme von 0,039 l/s auf 0,126 l/s (am 01.02.1985) gemessen werden. Mit Hilfe der 3-Komponenten-Separation konnten auch hier verschiedene Abflußanteile quantifiziert werden. Die Änderungen der Lf- und $\delta^{18}O$ -Werte sind im 3-Komponenten-Konzentrations-Dreieck (Abb. 8-12 a) dargestellt. Die Meßzeitpunkte a - e entsprechen etwa den mit 1 - 5 bezeichneten Zeitpunkten der Vorflutermessungen (vgl. Abb. 8-12 c).

Die $\delta^{18}O$ -Werte tendieren schwach zu weniger negativen Werten. Sie bewegen sich entlang der GW- IF_{pe} -Mischungsgeraden und variieren von $-9,51\text{‰}$ (a, Vor-Ereignis-Wert), über $-9,14\text{‰}$

(b, Schüttungsmaximum). Mit nachlassender Schüttung erreichen sie sehr rasch wieder den Ausgangswert (d - f). Gleichsinnig verhielten sich auch die nur kurzzeitig von ca. 700 $\mu S/cm$ auf 359 $\mu S/cm$ (b) und 595 $\mu S/cm$ (c) gesunkenen LF-Werte.

Die Darstellung im Dreieck-Diagramm verdeutlicht, daß als zusätzliche Abflußkomponente bei Q 3 nur älteres Bodenwasser (IF_{pe} -Komponente) wirksam war. Ausgehend von reinem Grundwasserabfluß (Zeitpunkt a, GW = 100%) erreicht die IF_{pe} -Komponente zum Zeitpunkt der Maximalschüttung (b) einen höchsten Anteil von 54%. Schon am 03.02.1985 (d) war der GW-Anteil an der nur noch leicht erhöhten Gesamtschüttung (0,054 l/s) wieder auf 95% angestiegen. Am 04.02.1985 (e) stellte die GW-Komponente wieder den gesamten, gegenüber der Ausgangsschüttung noch um ca. 30% erhöhten Quellabfluß (Tab. 8-9).

Tab. 8-9: Prozent-Anteile der Abflußkomponenten GW, und IF_{pe} in der Quellschüttung von Q 3 (Einzugsgebiet Denzenberg) während der Schneeschmelze Anfang Februar 1985. Werte vom 30.01. - 04.02.1985.

Meßwert	Datum	Zeit	GW	IF_{pe}
			---	[%]
a	30.01.85	16:30	100	0
b	01.02.85	16:10	43	54
c	02.02.85	15:00	81	19
d	03.02.85	13:00	95	3
f	04.02.85	13:40	100	0

Der für den Ereigniszeitraum 31.01. - 05.02. ermittelte Anteil der IF_{pe} -Komponente an der Quellschüttung beträgt 18% (QIF_{pe}/Q_t).

Das Zuströmen des Interflow-Wassers zum Grundwasser findet vermutlich im Bereich des Quellaustritts, kurz vor dem Ausstreichen des Stubensandstein-Aquifers bei einer am Hangfuß geringer mächtigen Deckschicht statt. Bei dort fehlendem Basisschutt kann das Hangwasser aus dem Deckschutt direkt in den Stubensandstein eindringen und zusammen mit dem km4-Grundwasser an Q 3 austreten (vgl. Kap. 2.3. Abb. 2-2 und Kap. 5.1.5).

Ergänzende Bemerkungen zum Fließpfad der IF_e -Komponente

Bei diesem Hochwasser und Schneeschmelz-Ereignissen allgemein ist davon auszugehen, daß ein gewisser Teil der mit 13% am Gesamtabfluß beteiligten IF_e -Komponente den Vorfluter nicht über Interflow sondern als Überlandabfluß auf teilweise noch gefrorenem und vereistem Boden erreicht

(partial overland flow).

Dafür spricht, daß der bei Q 3 an der Schüttungserhöhung beteiligte Interflow praktisch vollständig aus "älterem" Bodenwasser (IF_{pc} -Komponente) bestand, d.h., daß dort keine erkennbare Vermischung der IF_c - und IF_{pc} -Komponenten stattgefunden hat.

Dies belegen auch die mittleren $\delta^{18}O$ -Werte der mit den Plattenlysometern beprobten Sickerwässer, die eine (allerdings auch bedingt durch die Entnahmetechnik) nur sehr langsame Zumischung der IF_c -Komponente erkennen lassen (Abb. A-8-4).

Die $\delta^{18}O$ -Werte haben, dem Jahresgang folgend (vgl. Abb. 7-5), im Zeitraum der Abflußerhöhung von $-8,59\text{‰}$ (Vor-Ereignis-Bodenwasser, IF_{pc} -Komponente) bis $-9,19\text{‰}$ am 05.02 abgenommen. Während der Hochwasserwelle wurde eine kurzzeitig stärkere Auslenkung zu negativeren Werten beobachtet, wobei die $\delta^{18}O$ -Werte der Sickerwässer aus geringerer Tiefe (bis einschließlich 40 cm) etwas stärker nach unten abweichen.

Für den Zeitpunkt der Gesamtabflußspitze konnte daraus ein nur sehr geringer IF_c -Anteil im Bodenwasser von ca. 10% abgeschätzt werden. Im Gesamtabfluß wurden dagegen zu diesem Zeitpunkt 15% IF_c/Q_c registriert.

Wichtige Kenndaten zu den Einzelereignissen sind in Tab. A-8-4 (Anhang) zusammengestellt.

8.5.2.2 Hochwasserereignis vom 07. - 09. Mai 1985

Als Beispiel für Frühjahr-Ereignisse werden zunächst die Ergebnisse der Ganglinienseparation für das N-Q-Ereignis vom 07.05. - 09.05.1985 im Gebiet Denzenberg vorgestellt. Zum Vergleich der "Sand- und Tongebiete" werden die Hochwasserwellen am Pegel 8 und am Pegel 1 in den Kapiteln 8.5.3.1 und 8.5.4.1 vorgestellt.

Ausgangssituation

Der Mai 1985 war der niederschlags- und abflußreichste Monat der gesamten Untersuchungsperiode. Die Ganglinien von Gesamtabfluß und Schüttung (P 14 und Q 3, der Lf-Werte, der Niederschlags-Tageswerte und der pF-Werte im Boden verdeutlichen die Abflußsituation im Überblick (Abb. 8-1). Die Änderung der $\delta^{18}O$ -Werte im Jahresverlauf ist den Abb. 5-5, 7-7, A-8-3 (Einzelmessungen) und Abb. 8-8 (Monatsmittelwerte) zu entnehmen. Abb. A-8-5 (Anhang) zeigt die Niederschlagshöhen, die mittleren Tagesabflüsse am

Pegel 14 sowie die $\delta^{18}O$ -Einzeldaten von Niederschlag, Interflow, Quellwasser und Gesamtabfluß jeweils 1 Woche vor und nach dem Hochwasserereignis (Zeitraum 01.05. - 15.05.1985). Während dieser Abflußerhöhung konnten direkte IF-Messungen und -Probenahmen an der IF-Meßstelle durchgeführt werden. Es handelt sich um ein Ereignis des Typs A (vgl. z.B. Abb. 8-6).

Vor Beginn der Ereignis-Niederschläge und der eigentlichen Abflußerhöhung (07.05. um 17:00 Uhr) hatten sich nach kleineren N-Q-Ereignissen in der ersten Maiwoche noch keine Niedrigwasserbedingungen eingestellt. Der Interflow-Anteil ($IF_c + IF_{pc}$) am Gesamtabfluß (IF/Q_c) betrug am 07.05. um 10:00 noch 24% (Abb. 8-13). Die Niederschläge der vorangegangenen Tage (seit dem 30.04.1985) sind mit $\delta^{18}O = -9,55\text{‰}$ in diesem Fall noch der IF_c -Komponente zuzurechnen.

Die Höhe des als Input für das Ereignis wirkenden Bestandesniederschlags betrug im Zeitraum 07.05. 17:00 Uhr bis 08.05. 01:00 Uhr 13,4 mm (Meßstation NB- S 4, Testfläche Denzenberg). Im Freiland wurde zwischen 20:00 bis 21:00 Uhr eine maximale N-Intensität von 6,3 mm/h gemessen (vgl. Abb. 8-13 und A-8-5).

Die $\delta^{18}O$ -Werte der Niederschläge in den Vormonaten März und April lagen bei $-17,25\text{‰}$ und $-8,67\text{‰}$ (Monatsmittelwerte, vgl. Abb. 7-5) bei NB-Höhen von 27 mm und 44 mm.

Der $\delta^{18}O$ -Input aus aktuellem Niederschlagswasser betrug $-8,55\text{‰}$ (vgl. Abb. A-8-5, Anhang). Aufgrund der deutlichen Abweichungen der Ca^{2+} -Konzentrationen im Gesamtabfluß (vgl. Abb. A-8-6, Anhang) wurde die 3-Komponenten-Separation mit Ca als 2. Tracer durchgeführt.

Die aus dem aktuellen Bestandesniederschlag gebildete IF_c -Komponente war einschließlich der Ca^{2+} -Konzentration durch folgende Basiswerte charakterisiert:

IF_c -Komponente:
 $Ca^{2+} = 0,45 \text{ mg/l}; \delta^{18}O = -8,55\text{‰}; NB = 13,4 \text{ mm};$

Die Parameter der Grundwasserkomponente GW wurden aus dem nicht durch zugemischtes Niederschlags- oder älteres Bodenwasser beeinflussten Quellabfluß von Q 3 gewonnen.

GW-Komponente:
 $Ca^{2+} = 85 \text{ mg/l}; \delta^{18}O = -9,50\text{‰};$

Die Ca^{2+} - und ^{18}O -Konzentrationen im Interflow schwankten vor Beginn der Abflußerhöhung (Zeitraum 01.05. - 07.05.) nur in einem engen Bereich. Aus den $\delta^{18}O$ -Werten im Interflow war keine Beeinflussung (Vermischung) durch die

Niederschläge der ersten Maitage erkennbar (Abb. 8-9, Abb. A-8-5).

Die Abflußkomponente aus älterem Vor-Ereignis-Bodenwasser (IF_{pe}-Komponente) war durch folgende Basisdaten gekennzeichnet.

IF_{pe}-Komponente:

Ca²⁺ = 4,0 mg/l; δ¹⁸O = -11,5‰;

Der Vor-Ereignis-Abfluß am Pegel 14 lag mit 1,12 l/s, verglichen mit dem Abfluß vor Beginn des Februar-Ereignisses (0,36 l/s), deutlich höher. Auch die Ca-Konzentration hatte sich mit 65 mg/l noch nicht wieder auf den Niedrigwasserwert (ca. 80 mg/l) eingestellt. Der δ¹⁸O-Wert entsprach mit -9,48‰ etwa dem Grundwasserwert von Q 3.

Die Basisdaten der 3 Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sind in Abb. 8-13 a) in einem δ¹⁸O/Ca²⁺-Diagramm als Eckpunkte des DreieckDiagramms dargestellt.

Die Ca²⁺ und δ¹⁸O-Änderungen im Gesamtabfluß (P 14) während der Abflußerhöhung (Abb. 8-13 a) wurden durch eine Ausgleichskurve (gestrichelte Linie mit den Zeitmarkierungen 1 - 10) angenähert. Zusätzlich eingetragen sind die im Quellwasser (Quelle Q 3) während des Ereignisses registrierten Ca²⁺- und δ¹⁸O-Änderungen.

Hochwasserereignis

Der Ereignis-Niederschlag (NB-Höhe 13,4 mm) dauerte von 07.05. 17:00 Uhr bis zum 08.05. 01.00 Uhr (vgl. Abb. 8-13 c). Es wurden 2 Teilproben, am 07.05. um 20:20 Uhr und am 08.05. um 08:20 entnommen. Wegen der geringen δ¹⁸O-Abweichungen der beiden Teilproben und ihrem deutlichen Unterschied im Vergleich zu den ¹⁸O-Gehalten von Grundwasser, Interflow (IF_{pe}) und Gesamtabfluß konnte der mittlere δ¹⁸O-Wert (-8,55‰) als IF_e-Tracer verwendet werden.

Der Gesamtabfluß erhöhte sich ab 18:00 Uhr, ca. 1 h nach Niederschlagsbeginn sehr stark und erreichte um ca. 23:00 Uhr den Höchstwert mit 10,83 l/s. Die Abflußerhöhung ließ, verglichen mit dem Schneeschmelzereignis vom Februar (Kap. 8.5.2.1) sehr rasch nach. Vor dem Beginn erneuter Niederschläge wurde ein Tiefstwert von 1,95 l/s am 09.05. um 09:00 Uhr gemessen.

Die δ¹⁸O-Werte im Gesamtabfluß am Pegel 14 änderten sich von -9,48‰ (Zeitpunkt 1: 07.05., 10:00 Uhr) bis zu dem Extremwert der Ausgleichskurve, ca. 8 h nach der Gesamtabflußspitze (Zeitpunkt 8: -10,47‰, 08.05., 07:00 Uhr). Die Verringerung der Ca²⁺-Konzentrationen verlief eher parallel zum Gesamtabfluß. Die niedrigsten Werte (24 bis 26 mg/l) wurden um und bis

ca. 5 h nach Q_imax gemessen (vgl. Abb. A-8-6).

Der Verlauf der δ¹⁸O/Ca-Kurve zeigt im Dreieck-Diagramm der 3-Komponenten-Separation (Abb. 8-13 a) eine relativ schwach bis kurz vor Q_imax zunehmende IF_e-Komponente (Maximum bei Zeitpunkt 2: 32% IF_e/Q_i). (Der IF_e-Anteil von 16% vor Beginn der eigentlichen Ereignis-Niederschläge beruht darauf, daß die Niederschläge seit dem 30.04.1985 mit δ¹⁸O = -9,55‰ noch der IF_e-Komponente zugerechnet wurden.) Die IF_{pe}-Komponente nimmt dagegen stärker bis ca. 4 h nach Q_imax (Zeitpunkt 6: 53% IF_{pe}/Q_i) zu. Ein stark erhöhter Anteil älteren Bodenwassers wird auch durch die kurzfristigen Erhöhungen der NO₃²⁻ und K⁺-Konzentrationen im Gesamtabfluß bestätigt (Abb. A-8-6, Anhang). Der GW-Anteil erreicht sein Minimum 1 h nach Q_imax bei 25% GW/Q_i. Vor Beginn neu einsetzender Niederschläge wurden am 09.05. um 09:00 Uhr wieder 60% GW/Q_i ermittelt. Der Interflow aus älterem Vor-Ereignis-Bodenwasser hatte auch zu diesem Zeitpunkt noch einen Anteil von 30% IF_{pe}/Q_i.

Nach dem herkömmlichen Ansatz einer mit δ¹⁸O als Tracer durchgeführten 2-Komponenten-Separation, die Niederschlagswasser (entsprechend der IF_e-Komponente) von Grundwasser (entsprechend der GW-Komponente) trennt, wäre diese Abflußerhöhung nicht auswertbar gewesen, da die Änderungen der δ¹⁸O-Werte im Gesamtabfluß keine Vermischung mit dem Input anzeigen (Abb. A-8-5).

Die GW- und die IF_e-Komponenten erreichten zum Zeitpunkt der Abflußspitze (2), die IF_{pe}-Komponente erreichte dagegen erst mit 2-stündiger Verzögerung, die höchsten spezifischen Abflußmengen (vgl. Abb. 8-13 c). Der Grundwasserabfluß steigerte sich von 0,85 l/s auf maximal 2,82 l/s zum Zeitpunkt von Q_imax. Sehr viel stärker zugenommen hat die IF_{pe}-Komponente von 0,09 l/s auf 5,15 l/s (ca. 1 h nach Q_imax). Das aktuelle Niederschlagswasser (IF_e) war mit maximal 3,14 l/s am Gesamtabfluß beteiligt.

Tab. 8-10: Prozent-Anteile der Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e im Gesamtabfluß bei P 14 (Einzugsgebiet Denzenberg) während des N-Q-Ereignisses vom 07.05. - 09.05.1985.

Meßwert	Datum	Zeit	GW	IF _{pe} [%]	IF _e
1	07.05.85	10:05	76	8	16
2	07.05.85	21:20	33	35	32
3	07.05.85	22:50	26	45	29
4	07.05.85	23:50	25	49	26
5	08.05.85	00:50	26	52	22
6	08.05.85	02:50	26	53	21
7	08.05.85	05:50	29	53	18
8	08.05.85	07:50	35	52	13
9	08.05.85	17:00	47	43	10
10	09.05.85	09:00	60	30	10

Einzugsgebiet Denzenberg P 14: N-Q-Ereignis 07.05. - 09.05.1985

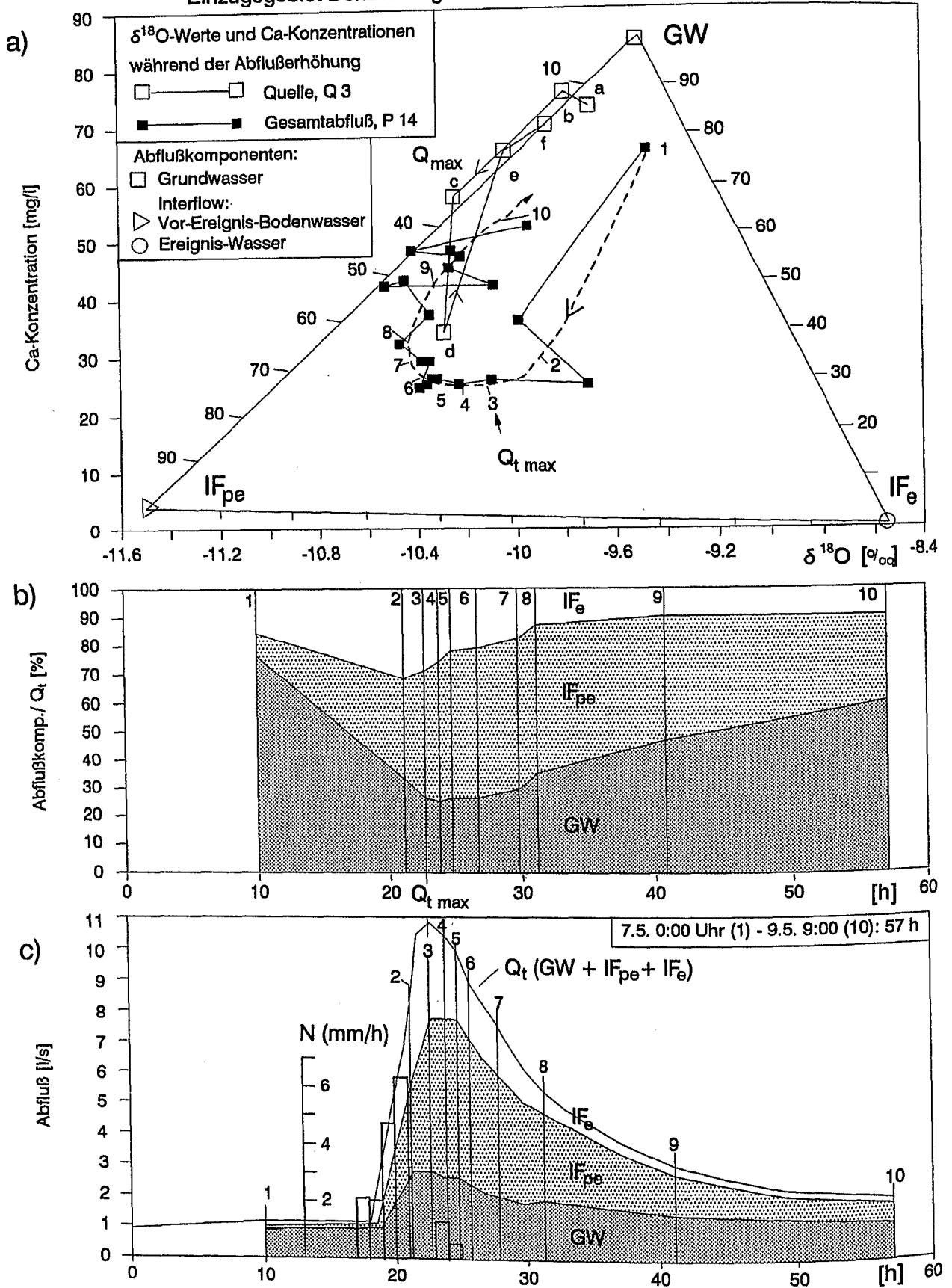


Abb. 8-13: Hochwasserereignis vom 07.05. - 09.05.1985 im Einzugsgebiet Denzenberg. a) $\delta^{18}\text{O}$ - und Ca^{2+} -Konzentrationen der Abflüßkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sowie Änderungen während der Abflüßerhöhung im Gesamtabfluß und in der Quellschüttung, b) Prozentanteile der Abflüßkomponenten am Gesamtabfluß, c) Ganglinie des Gesamtabflusses und Separation in 3 Abflüßkomponenten.

Auch hier bestätigen die Ergebnisse der 3-Komponenten-Separationsmethode die Vorstellungen über die Abflußbildung mit Interflow bei hohen Bodenwassergehalten. Durch das versickernde Niederschlagswasser (IF_e -Komponente) wird älteres Bodenwasser (IF_{pe} -Komponente) im Deckschutt rasch mobilisiert. Die IF_{pe} -Menge nimmt im Vergleich mit den anderen Abflußkomponenten am stärksten zu. Wie bei dem Februar-Ereignis nimmt die IF_e , verglichen mit IF_{pe} -Komponente, nach Q_{tmax} langsamer ab. Dies liegt an einem im Laufe des Ereignisses zunehmenden Anteil der IF_e -Komponente im gesamten Interflow.

Die hinsichtlich des Leerlaufverhaltens getrennt durchgeführten Auswertungen der mit der IF-Meßstelle direkt gemessenen und der mit der Ganglinienseparation berechneten IF-Ganglinien ergaben beinahe gleiche α -Werte. Es waren jeweils 2 Speichertypen mit α -Werten zwischen 2,8 und 3,5 d^{-1} (Speicher I) und ca. 0,4 d^{-1} (Speicher II) zu unterscheiden (Kap. 8.3, Abb. 8-7).

Während des erfaßten Ereigniszeitraums vom 07.05. 10:00 Uhr bis zum 09.05. 09:00 Uhr betrug die gesamte Abflußhöhe am Pegel 14: $Q_t = 3,6$ mm. Bei einem Basisabfluß (in Höhe des Vorereignis-Abflusses) von ca. 1,0 mm während dieses Zeitraums bedeutet dies eine Abflußerhöhung von $Q_{t+} = 2,6$ mm. Auf die Höhe des versickernden Niederschlagswassers (Input = 13,4 mm) bezogen entspricht dies einem Abflußquotienten $Q_{t+}/Input$ von ca. 0,19. Für das Februar-Ereignis wurden 0,30 ermittelt. Die tatsächlich abgeflossene Menge des eingetragenen Frischwassers (IF_e -Komponente) machte wie beim Februar-Ereignis nur 4% ($IF_e/Input$) aus.

Für den Zeitraum vom 07.05. 10:00 Uhr bis zum 09.05. 09:00 Uhr konnte der Gesamtabfluß wie folgt in die 3 Abflußkomponenten geteilt werden:

Gesamtabfluß	Q_t	=	3,60 mm (100%)
Teilkomponenten:	GW	=	1,37 mm (38%)
	IF_{pe}	=	1,63 mm (45%)
	IF_e	=	0,60 mm (17%)

Der Mehrabfluß der GW-Komponente, der als Mindestwert einer kurzfristigen Grundwasserneubildung interpretiert werden kann, ergab 0,52mm.

Aus der Differenz von Eintragshöhe (NB = 13,4 mm) und Abflußsteigerung ($Q_{t+} = 2,58$ mm) ergibt sich, daß der überwiegende Teil des Niederschlagswassers (ca. 10,8 mm) zu einer Erhöhung der Bodenfeuchte, eines späteren Interflows und einer Grundwasserneubildung sowie der Transpiration beitrug.

Schüttungsverhalten und Quellwasserzusammensetzung von Q 3

Bei Q 3 war eine Zunahme der Schüttung von 0,084 l/s auf 0,182 l/s (1/2 h nach dem Gesamtabflußmaximum am Pegel 14) zu messen. Mit Hilfe der 3-Komponenten-Separation konnten auch hier verschiedene Abflußanteile quantifiziert werden (Abb. 8-13 a). Bis zum Schüttungsmaximum bewegt sich die $Ca/\delta^{18}O$ -Ganglinie entlang der GW- IF_{pe} -Mischungsgeraden. Zum Zeitpunkt der Spitzenschüttung wurden 65% GW und 35% IF_{pe} (c) ermittelt. Nur kurzfristig, ca. 2 h später, wurde ein geringerer IF_e -Anteil von 15%, bei 47% IF_{pe} und 38% GW bestimmt (Tab. 8-11).

Tab. 8-11: Prozent-Anteile der Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e in der Quellschüttung von Q 3 (Einzugsgebiet Denzenberg) während der Schüttungserhöhung im Zeitraum 07.05. - 09.05.1985.

Meßwert	Datum	Zeit	GW	IF_{pe} [%]	IF_e
a	07.05.85	10:00	88	12	-
b	07.05.85	20:50	88	12	-
c	07.05.85	23:20	65	35	-
d	08.05.85	01:30	38	47	15
e	08.05.85	08:50	75	25	-
f	08.05.85	14:20	80	20	-

Über die gesamte Schüttungserhöhung von Q 3 wurden Mengenanteile der Einzelkomponenten von 70% GW, 27% IF_{pe} und 3% IF_e ermittelt.

8.5.2.3 Hochwasserereignis vom 26. August 1985

Das N-Q-Ereignis vom 26.08.1985 dient als typisches Beispiel für Abflußereignisse des Typs B, die bei sehr geringer Bodenfeuchte und mit geringen Gesamtabfluß- und Interflow-Höhen in den trockenen Sommer- und Herbstmonaten stattfinden.

Ausgangssituation

Die Niederschlags-Abfluß-Situation im August war durch einzelne Gewitterregen mit sehr kurzfristigen Abflußerhöhungen geprägt. Bei ausreichenden Niederschlagshöhen konnte Interflow in sehr geringen Mengen und nur sehr kurzfristig registriert werden. So wurden z.B. am 24.08.1985 bei 16,9 mm Niederschlag insgesamt 45 l (0,08 mm) Interflow mit der IF-Meßstelle aufgefangen (vgl. Abb. 8-6). Die Interflow-Bewegung findet während der Typ B-Ereignisse in geweiteten Grobporen statt, in denen nur ein minimaler Teil des aktuellen Niederschlagswassers,

der in der kurzen Zeit nicht vom Boden aufgenommen werden kann, abfließt. Dies belegen die nahezu übereinstimmenden $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von NB und IF. Eine IF_{pc} -Komponente spielt beim Abflußgeschehen, wie mit der Methode der 3-Komponenten-Separation nachgewiesen wird (s.u.), keine Rolle, da kein älteres Bodenwasser mobilisiert werden kann.

Vor Beginn des N-Q-Ereignisses herrschten Niedrigwasserbedingungen. Im Vorfluter flossen 0,39 l/s ab. Interflow war nicht mehr zu registrieren. Als Ereignisniederschlag fielen im Bestand 6,42 mm in 40 Minuten (26.08.1985: 10:15 - 10:55 Uhr). Der $\delta^{18}\text{O}$ -Input aus direkt als Interflow abfließendem aktuellem Niederschlagswasser betrug $-7,5^\circ/\text{‰}$.

Die Basisdaten der IF_{pc} -Komponente (im Boden gespeichertes Vor-Ereignis-Bodenwasser) wurden aus den letzten Vor-Ereignis-Sickerwasserproben (Juli) ermittelt, da aufgrund der hohen Wasserspannung im Deckschutt direkt vor und während des Ereignisses kein Bodenwasser gewonnen werden konnte. Nur in 90 cm Tiefe (Profil S 4-3) waren Probenahmen des Bodenwassers bei pF-Werten um 1,0 möglich (vgl. auch Abb. 7-5). (Da bei sommerlicher Trockenheit nur während N-Q-Ereignissen Interflow aus aktuellem Niederschlag abfließt, ist eine Beprobung der IF_{pc} -Komponente über den Interflow selbst nicht möglich).

Gemäß den Kriterien für eine 3-Komponenten-Separation (Kap. 8.5.1) waren die Konzentrationen von SO_4^{2-} und Ca^{2+} als Markierungen zur Trennung der 3 Abflußkomponenten IF_e , IF_{pc} und GW geeignet (Abb. 8-14, oben links). Damit wird gezeigt, daß das als Interflow abfließende Wasser (ausschließlich) aus aktuellem NB (IF_e -Komponente) besteht. Da auch die Entwicklung der Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (Abb. 8-14, oben rechts) zeigt, daß sich der Gesamtabfluß bei diesem Ereignis nur aus GW und IF_e zusammensetzt, konnten neben der 3-Komponenten-Separation mit Ca und SO_4 (graphische Lösung über das Dreieck-Diagramm) auch herkömmliche 2-Komponenten-Separationen mit $\delta^{18}\text{O}$ und Lf-Werten in Interflow (Beprobung über die IF -Meßstelle) und Grundwasser (Quelle Q 3) durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser 3 Separationsverfahren werden miteinander verglichen.

Die IF_{pc} -Komponente war durch folgende Basisdaten gekennzeichnet (vgl. auch Dreieck-Diagramme in Abb. 8-14, oben).

IF_{pc} -Komponente:
 $\text{Ca}^{2+} = 5,6 \text{ mg/l}$; $\text{SO}_4^{2-} = 19,1 \text{ mg/l}$
 $\delta^{18}\text{O} = -9,3^\circ/\text{‰}$; Lf = 84 $\mu\text{S/cm}$

(Die Daten entsprechen den Mittelwerten der Sik-

kerwasserproben aus 25 - 40 cm (Profile S 4 - 1 bis 3).

Der direkt als Interflow abfließende aktuelle Bestandesniederschlag (IF_e) wies folgende Konzentrationen auf:

IF_e -Komponente:
 $\text{Ca}^{2+} = 2,1 \text{ mg/l}$; $\text{SO}_4^{2-} = 4 \text{ mg/l}$;
 $\delta^{18}\text{O} = -7,5^\circ/\text{‰}$; Lf = 71 $\mu\text{S/cm}$; NB = 6,42 mm;

Die Parameter der Grundwasserkomponente GW basieren auf der Quellwasser-Analyse von Q 3.

GW-Komponente:
 $\text{Ca}^{2+} = 90 \text{ mg/l}$; $\text{SO}_4^{2-} = 11,3$
 $\delta^{18}\text{O} = -9,5^\circ/\text{‰}$; Lf = 720 $\mu\text{S/cm}$

Der Vor-Ereignis-Abfluß am Pegel 14 lag mit 0,39 l/s (26.08.1985) ähnlich niedrig wie vor dem Beginn des Februar-Ereignisses. Die mittlere Ca-Konzentration Vorfluter-Basisabfluß lag bei 71 mg/l. Die SO_4^{2-} -Konzentration entsprach mit 11,5 mg/l etwa dem Grundwasserwert.

Die zur Abflußseparation verwendeten Basisdaten der 3 Abflußkomponenten GW, IF_{pc} und IF_e sind in Abb. 8-14, oben, in einem Ca/ SO_4 -Diagramm als Eckpunkte des Konzentrationsdreiecks dargestellt.

Hochwasserereignis

Der Ereignis-Niederschlag am 26.08.1985 (NB-Höhe 6,42 mm) dauerte von 10:15 - 10:55 Uhr (vgl. Abb. 8-14, unten). Der Gesamtabfluß erhöhte sich erst ab 11:00 und stieg rasch innerhalb einer halben Stunde auf den Maximalwert von 4,21 l/s (11:30 Uhr) an. Schon um 13:00 Uhr, 1,5 h nach dem Peak, war der Gesamtabfluß schon wieder auf unter 1 l/s zurückgegangen. Der mit der IF -Meßstelle direkt gemessene Interflow (insgesamt 28 l, 0,05 mm) erreichte seinen Höchstwert um 11:25 Uhr.

Dieses Gewitterereignis dauerte nur ca. 7 h (10:00 - 17:00 Uhr, vgl. auch Abb. A-8-7, Anhang). Der rasche Input sowie die sehr kurzfristige Abflußspitze grenzt dieses Ereignis von den bisher vorgestellten Abflußerhöhungen, die ca. 5 Tage (Schneesmelze im Februar, Kap. 8.5.2.1) und ca. 2 Tage (Mai, Kap. 8.5.2.2) dauerten, ab.

Die Ca^{2+} - und SO_4^{2-} - (wie auch die Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -) Änderungen im Gesamtabfluß (P 14) während der Abflußerhöhung (Abb. 8-14, oben) bewegen sich entlang der GW- IF_e -Mischungsgeraden und zeigen damit deutlich, daß bei diesem Ereignis kein älteres Bodenwasser (IF_{pc} -Komponente)

Einzugsgebiet Denzenberg P 14: N-Q-Ereignis 26.08.1985

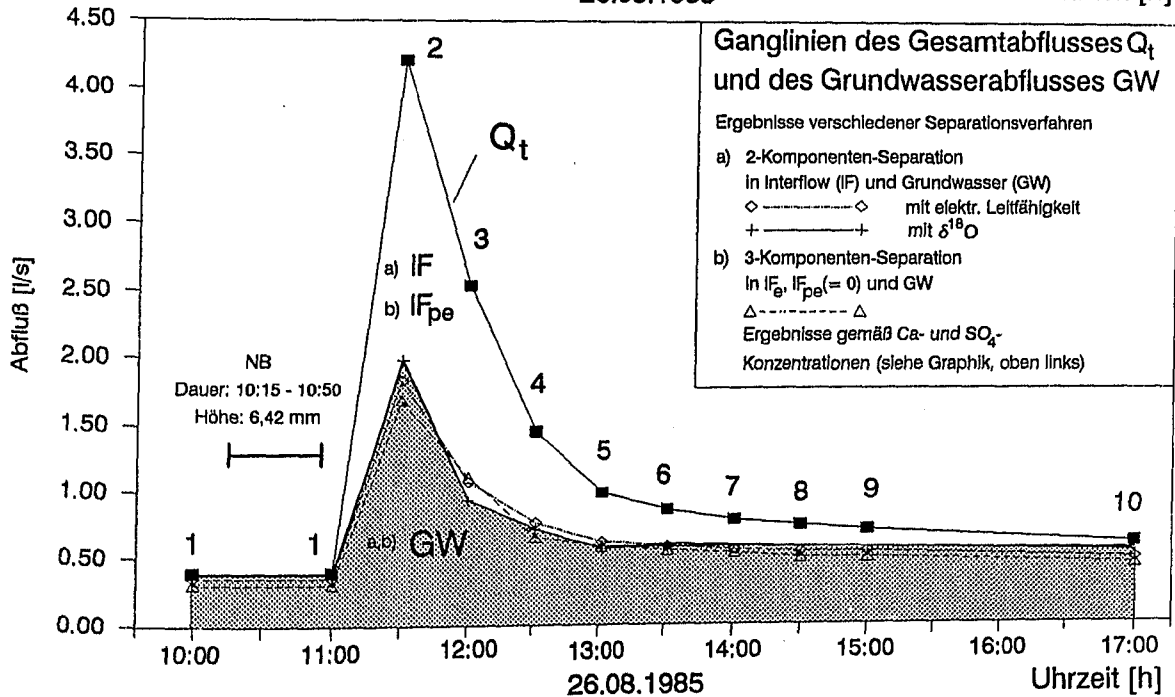
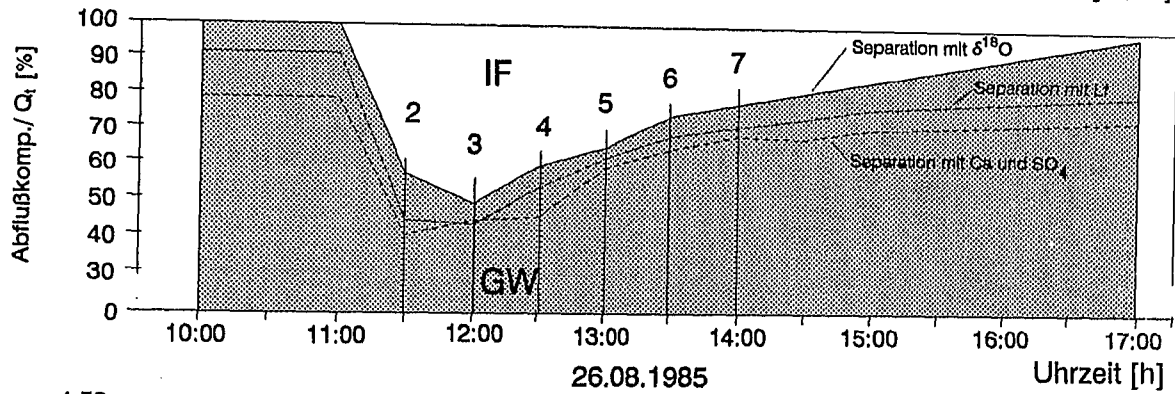
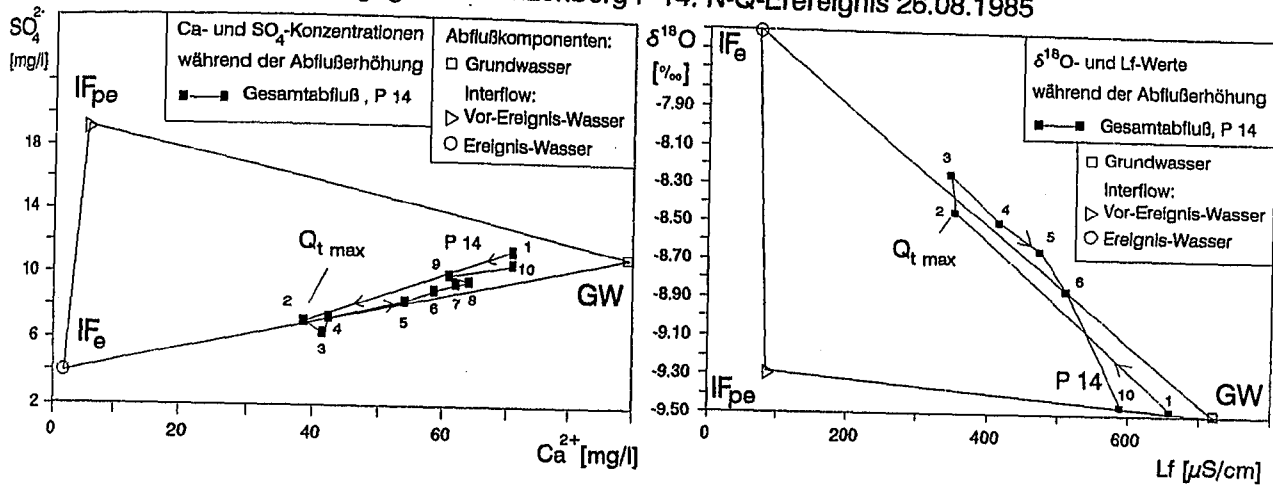


Abb. 8-14: Hochwasserereignis vom 26.08.1985 im Einzugsgebiet Denzenberg. Oben links: Ca²⁺/SO₄²⁻-Konzentrationen, oben rechts: Lf- und δ¹⁸O-Werte der Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sowie Änderungen während der Abflußerhöhung im Gesamtabfluß, Mitte: Prozentanteile der Abflußkomponenten am Gesamtabfluß nach verschiedenen Separationsmethoden, unten: Ganglinie des Gesamtabflusses und Separation in 3 Abflußkomponenten.

te) am Gesamtabfluß beteiligt war.

Dies bestätigen auch die Ganglinien anderer Inhaltsstoffe im Gesamtabfluß (Abb. A-8-7). Bei einer deutlichen IF_{pe} -Beteiligung wären SO_4^- , NO_3^- oder K-Erhöhungen zu erwarten gewesen.

Der Gesamtabfluß setzt sich somit nur aus 2 Komponenten (IF_e und GW) zusammen. Deshalb können für dieses Ereignis auch die herkömmlichen Ganglinienseparationen in 2 Komponenten eingesetzt werden, die zwischen dem als Interflow direkt abfließenden Bestandesniederschlag (IF oder im Sinne einer 3-Komponenten-Separation IF_e) und dem Grundwasser (GW) unterscheiden. Für diese Abtrennungen konnten die $\delta^{18}O$ - und Lf-Werte des Interflow (IF_e) und des Grundwassers als Tracer verwendet werden:

IF_e : $\delta^{18}O = -7,5^\circ/00$; Lf = 71 $\mu S/cm$
 GW: $\delta^{18}O = -9,5^\circ/00$; Lf = 720 $\mu S/cm$

Wie aus den Graphiken in Abb. 8-14 hervorgeht, haben die verschiedenen Separationsverfahren ähnliche Ergebnisse erbracht.

Die Daten und Separationsergebnisse der für dieses Ereignis nur kurzen Meßreihe sind in Tab. A-8-2 (Anhang) vollständig aufgelistet. In Tab. 8-12 sind die Anteile der GW- und IF-Komponente am Gesamtabfluß nach den $\delta^{18}O$ - und Lf-Trennungsv erfahren zusammengestellt.

Tab. 8-12: Prozent-Anteile der Abflußkomponenten GW und IF im Gesamtabfluß bei P 14 (Einzugsgebiet Denzenberg) während des N-Q-Ereignisses vom 26.08.1985. Ergebnisse der Separation mit $\delta^{18}O$ und der elektrischen Leitfähigkeit.

Meßwert	Zeit	$\delta^{18}O$		Lf	
		GW	IF	GW	IF
		-- [%]--	-- [%]--	-- [%]--	-- [%]--
1	10:00	99	1	91	9
1	11:00				
2	11:30	47	53	44	56
3	12:00	37	63	43	57
4	12:30	50	50	53	47
5	13:00	57	43	62	38
6	13:30	67	33	68	32
7	14:00	-	-	71	29
8	14:30	-	-	73	27
9	15:00	-	-	76	24
10	17:00	97	3	80	20

Die IF_e - und GW-Komponenten nehmen mit Beginn der Abflußerhöhung absolut zu. Die relative Zunahme der IF_e -Komponente bis zum Gesamtabflußmaximum ist stärker. Nur der mit $\delta^{18}O$ abgetrennte Interflow hat erst 0,5 h nach $Q_{t,max}$ den relativ höchsten Anteil. Die GW-Komponente erreicht Maximalabflußwerte zwischen 1,68 l/s (3-Komponenten-Separationsmethode mit $Ca-SO_4$) und 1,98 l/s ($\delta^{18}O$ -Methode). Die maximalen IF_e -Anteile liegen zwischen 56 und 63%.

Die Interflow-Anteile am Gesamtabfluß liegen bei diesem Ereignis kurzfristig sehr hoch. Verglichen mit den bisher vorgestellten Ereignissen im Februar und Mai sind jedoch die Gesamtabfluß- wie auch die IF-Höhen, bezogen auf die NB-Höhe, um eine Größenordnung niedriger (vgl. Gesamt-Interflow (IF_{ges})/NB in Tab. A-8-4, Anhang, mit weiteren wichtigen Kenndaten von ausgewählten Hochwasserereignissen). Der überwiegende Teil des Niederschlags wird vom Boden aufgenommen und steht einer erhöhten Evapotranspiration zur Verfügung. Dies verdeutlicht die auf NB bezogene Gesamtabflußhöhe (Q_t/NB) von nur 2,3% oder die auf NB bezogene Abflußerhöhung (Q_t+/NB) von 1,6%. Bei den Typ A-Ereignissen im Februar und Mai lagen die Q_t+/NB -Verhältnisse bei 34% und 27% (Q_t+/NB : 30 und 19%).

Die auf den Gesamtabfluß bezogene IF-Höhe (IF/Q_t) erreichte bei diesem Typ B-Sommer-Ereignis 40%, wohingegen sie bei den Typ A-Ereignissen zwischen 62 und 74% lag. Dabei setzte sich der Interflow im August-Ereignis nur aus IF_e , bei den übrigen Ereignissen sowohl aus IF_e und IF_{pe} zusammen (vgl. Tab. A-8-4).

Auf der IF-Versuchsfläche wurden 0,05 mm Interflow gemessen. Auf das Gesamtgebiet bezogen entspricht dies ca. 0,03 mm (55% Flächenanteil mit Interflow, Kap. 8.4.3.1). Da der Gesamtabfluß bei diesem Ereignis, bezogen auf die NB-Höhe, sehr gering war, ist auch der auf das Bachbett direkt fallende Niederschlag zusätzlich zu berücksichtigen. Bei einer Gesamtlänge des Vorfluter bis P 14 von ca. 700 m und einer durchschnittlichen Breite von 1 m bewirkt der Bestandesniederschlag eine Abflußerhöhung von 0,024 mm. Die Summe (0,054 mm) bestätigt die nach den Separationsverfahren abgetrennte IF_e -Höhe von 0,06 mm.

Der GW-Abfluß stieg von 0,38 l/s kurzfristig auf 1,98 l/s an. Der Prozentanteil der GW-Komponente am Gesamtabfluß lag mit 60% deutlich höher als bei den Vergleichsereignissen (Februar 26% und Mai 38%). Auch die $GW+/Q_t+$ -Faktoren (Steigerung des Grundwasserabflusses, bezogen auf die Abflußerhöhung) lagen mit 40% im August höher als bei den Februar und Mai-Ereignissen (19% und 20%). Die Anteile des Vorereignis-Wassers am Gesamtabfluß (GW und IF_{pe}) lagen allerdings bei den Typ A-Ereignissen deutlich höher (Februar 87%, Mai 83%). Dies weist darauf hin, daß versickerndes Niederschlagswasser bei trockenem Boden über Schrumpfrisse rascher den Grundwasserleiter erreichen und eine GW-Erhöhung bewirken kann.

Über die IF_e -Ganglinie konnten 2 Leerlaufkoeffizienten bestimmt werden, die dem Sekundärgefuge (Speicher I, $\alpha = 4,8 d^{-1}$) und den geweiteten

Grobporen (sehr rascher Interflow, $\alpha = 20 \text{ d}^{-1}$) zugeordnet werden konnten (vgl. Kap. 8.3, Abb. 8-7 sowie Beispiele für das Auswerteverfahren, Abb. A-8-2). Ein Stauwasserkörper an der Deckschuttbasis (Speicher I, $\alpha < 1 \text{ d}^{-1}$) hatte sich demnach nicht ausgebildet.

Die gesamte Abflußhöhe am Pegel 14 (Zeitraum 10:00 bis 17:00 Uhr) betrug $Q_t = 0,15 \text{ mm}$. Bei einem Vor-Ereignis-Abfluß von ca. $0,05 \text{ mm}$ bedeutet dies eine Abflußerhöhung von $Q_{t+} = 0,1 \text{ mm}$. Dies entspricht einem Abflußquotienten Q_{t+}/NB von ca. $1,6\%$. Für das Februar- und Mai-Ereignis wurden 30% und 19% ermittelt. Die tatsächlich abgeflossene Menge des eingetragenen Frischwassers (IF_e -Komponente) betrug $0,9\%$ (IF_e/NB), bei den Vergleichsereignissen dagegen jeweils 4% (Tab. A-8-4). Die Ergebnisse der $\delta^{18}\text{O}$ - und Lf-Separations-Methode lauten:

Gesamtabfluß:	$Q_t = 0,15 \text{ mm}$ (100%)
Teilkomponenten:	$\text{GW} = 0,09 \text{ mm}$ (60%)
	$\text{IF}_e = 0,06 \text{ mm}$ (40%)

Die 3-Komponenten-Separation mit Ca und SO_4 ergab gering abweichende Werte. Es wurden $\text{GW} = 0,08 \text{ mm}$ und $\text{IF}_e = 0,07 \text{ mm}$ ermittelt.

Der Mehrabfluß der GW-Komponente, der als Mindestwert einer kurzfristigen Grundwasserneubildung interpretiert werden kann, ergab nur $0,04 \text{ mm}$.

In der Quelle Q 3 ergaben die Einzelmessungen bei diesem sommerlichen Gewitter-Ereignis keine Reaktion der Schüttung oder der chemischen und isotochemischen Zusammensetzung. Die nach der Komponenten-Separation festgestellte GW-Steigerung ist vermutlich auf eine kurzfristige Erhöhung des Grundwasserspiegels im sehr vorflutnahen Bereich zurückzuführen (piston flow).

8.5.2.4 Hochwasserereignis vom 08. November 1985

Bei dem N-Q-Ereignis vom 08.11.1985 handelt es sich um eines der letzten Abflußereignisse des Typs B während der trockenen Sommer- und Herbstmonate. Auf NB bezogen flossen sehr geringe Q_t - und IF -Mengen ab. Es fand während der schon beginnenden Wiederbefeuchtung des Bodens (Abb. 8-1, Abb. 8-4) statt, so daß teilweise auch mit einer Bodenfeuchte um die nFk und einem stark eingeschränkten Interflow (vgl. "Übergangereignisse", Kap. 8.2.1.4, Abb. 8-3) gerechnet werden muß. Bei diesen Ereignissen wird die Interflow-Bewegung aus direkt abfließendem Niederschlag wegen der abnehmenden Schrumpfrisse erschwert. Das Sickerwasser wird zur Auf-

füllung des Bodenfeuchtedefizits verbraucht, und die Ausbildung eines Stauwasserkörpers mit der möglichen Verdrängung älteren Bodenwassers (IF_{pe} -Komponente) an der Deckschuttbasis beginnt.

Ausgangssituation

Nach dem sehr trockenen Oktober mit nur $6,1 \text{ mm}$ NB kam es zwischen 01. und 06.11. 1985 zu zu stärkeren Vor-Ereignis-Niederschlägen mit insgesamt 24 mm ($\delta^{18}\text{O} = -13,25\text{‰}$) im Bestand. Dies führte zu einer beginnenden Bodenfeuchtezunahme.

Auf der IF-Versuchsfläche wurden $0,25 \text{ mm}$ Interflow aus i.w. Ereigniswasser ($\text{IF}/\text{NB} = 1\%$, vgl. August Ereignis mit $0,9\%$) registriert. Wegen der Trockenheit lieferten die Plattentensiometer, ausgenommen S 4 -3 in 90 cm Tiefe (vgl. Abb. 7-5), keine Wasserproben.

Nach einer geringen Abflußerhöhung am 05.11. hatten sich vor Beginn des N-Q-Ereignisses am 08.11. wieder Niedrigwasserbedingungen mit $0,2 \text{ l/s}$ bei P 14 eingestellt. Interflow wurde nicht gemessen.

Als Ereignisniederschlag fielen im Bestand $10,7 \text{ mm}$ in einem Zeitraum von $5,5 \text{ Stunden}$ (08.11: 10:30 - 16:00 Uhr). Der $\delta^{18}\text{O}$ -Input betrug $-13,5\text{‰}$. Die Niederschlags-Intensität war mit maximal 4 mm/h gering (Gewitter-Ereignis im August $6,42 \text{ mm}$ NB in 40 Minuten).

Die Basisdaten der IF_{pe} -Komponente, des fester im Boden ($pF > 2,78$) gebundenen Vor-Ereignis-Bodenwassers, wurden über die Mittelwerte der Sickerwasserproben vor und nach dem Ereignis bestimmt.

Gemäß den Kriterien für eine 3-Komponenten-Separation (Kap. 8.5.1) konnten über die Diagramme der elektrischen Leitfähigkeit und der SO_4^{2-} -Konzentration sowie der elektrischen Leitfähigkeit und den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten Ganglinienseparationen in die Abflußkomponenten IF_e , IF_{pe} und GW durchgeführt werden (Abb. 8-15).

Damit kann u.a. gezeigt werden, daß das als Interflow abfließende Wasser nicht wie im August ausschließlich aus aktuellem NB (IF_e -Komponente) besteht, sondern zu etwa gleichen Teilen aus IF_e und IF_{pe} .

Die Abflußkomponenten waren durch folgende Basisdaten gekennzeichnet (vgl. auch Dreieck-Diagramm in Abb. 8-15, oben).

IF_{pe} -Komponente:	$\delta^{18}\text{O} = -9,3\text{‰}$; $\text{Lf} = 103 \text{ }\mu\text{S/cm}$;
	$\text{SO}_4^{2-} = 23,9 \text{ mg/l}$;

IF_e-Komponente:

$$\delta^{18}\text{O} = -13,5\text{‰}; \text{Lf} = 89 \mu\text{S}/\text{cm};$$
$$\text{SO}_4^{2-} = 4,7 \text{ mg}/\text{l}$$

GW-Komponente:

$$\delta^{18}\text{O} = -9,5\text{‰}; \text{Lf} = 720 \mu\text{S}/\text{cm};$$
$$\text{SO}_4^{2-} = 11,3 \text{ mg}/\text{l}$$

Hochwasserereignis

Nach dem Einsetzen des Ereignis-Niederschlags ab 10:30 stieg der Gesamtabfluß von 0,2 l/s ab 11:00 Uhr. Der Anstieg verlief, verglichen mit dem August-Ereignis, weniger steil. Auch das Gesamtabflußmaximum blieb mit 1,485 l/s (14:35 Uhr) sehr deutlich unter der schärfer ausgeprägten Abflußspitze des August-Ereignisses (4,21 l/s). Dies ist auf die geringere Intensität der Niederschläge zurückzuführen. Aufgrund der etwas erhöhten Bodenfeuchte war ferner eine rasche Wasserbewegung in Schrumpfrissen eingeschränkt. Die zeitliche Niederschlagsverteilung trägt ebenfalls zu einem breiten Verlauf der Abflußkurve bei (Abb. 8-15, unten). Mit ca. 24 Stunden (bis zum 09.11.1985, 10:00 Uhr, 0,37 l/s) dauerte die Abflußerhöhung deutlich länger als die des August-Ereignisses.

Mit der IF-Meßstelle konnten insgesamt 55 l Interflow (0,1 mm bezogen auf die Versuchsfläche) aufgefangen werden. Die IF-Mengen reagierten deutlich auf die wechselnden NB-Intensitäten.

Über die Sulfatkonzentrationen und die Lf- bzw. $\delta^{18}\text{O}$ -Werte war eine Separation in 3 Abflußkomponenten möglich. Die Lf-/SO₄²⁻- wie auch die Lf-/ $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen im Gesamtabfluß bei P 14 bewegen sich übereinstimmend bis 13:35 Uhr, 1 h vor Q_tmax in Richtung IF_e-Komponente (vgl. Zeitpunkt 5, Abb. 8-15, oben). Danach nahm der bis dahin geringe IF_{pe}-Abfluß auf Kosten der IF_e-Komponente stark zu.

Dies deutet auf eine im Interflow zunächst vorherrschende rasche Wasserbewegung in (geweiteten) Sekundärporen und eine mit zunehmender Dauer stattfindende Mobilisierung von älterem Bodenwasser hin.

Da die Anteile der GW-Komponente am Gesamtabfluß i.w. von der Änderung der Lf-Werte bestimmt wurden, stimmen die Ergebnisse der beiden Separationsverfahren nahezu überein. Die Anteile der IF_e- und IF_{pe}-Komponenten hängen bei den angewendeten Trennungsvorgängen i.w. von den Änderungen der SO₄²⁻-Konzentrationen und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte ab. Die Abweichungen blieben insgesamt gering. Es fällt auf, daß die mit Lf- $\delta^{18}\text{O}$ abgetrennte IF_e-Komponente sehr rasch auf Null zurückging (Zeitpunkt 14). Die Daten und Ergeb-

nisse der 3-Komponenten-Separationen sind in Tab. A-8-3 (Anhang) vollständig aufgelistet.

Wie aus den Graphiken in Abb. 8-15 hervorgeht, hängt auch diese Abflußerhöhung ganz entscheidend von der Interflow-Beteiligung ab. Die IF_e-Komponente erreichte mit 39% (IF_e/Q_t) um den Zeitpunkt von Q_tmax den höchsten Abflußanteil (Ergebnisse der Lf - $\delta^{18}\text{O}$ -Separation). Die IF_{pe}-Komponente hatte mit 30% (IF_{pe}/Q_t) erst ca. 5 h nach Q_tmax den relativen Höchstwert erreicht. Der Grundwasseranteil ging zum Zeitpunkt von Q_tmax auf minimale 47% (GW/Q_t) zurück. Zu diesem Zeitpunkt betrug der gesamte Interflow 53% (IFges./Q_t).

Der ganz überwiegende Teil des Niederschlags wird vom Boden aufgenommen (Typ B-Ereignis). Dies verdeutlicht die auf NB bezogene Gesamtabflußhöhe von nur 4% oder die auf NB bezogene Abflußerhöhung (Q_t+ / NB) von 3%. Bei den Typ A-Ereignissen im Februar und Mai lagen die Q_t/NB-Verhältnisse bei 34% und 27% (Q_t+ / NB: 30 und 19%).

Die auf den Gesamtabfluß bezogene IF-Höhe (IFges./Q_t) erreichte 43% (vgl. August-Ereignis: 40%; Typ A-Ereignisse: 62 und 74%). Dabei setzte sich der Interflow bei diesem Ereignis, wieder anders als im August (damals ausschließlich IF_e), zu etwa gleichen Teilen aus IF_e (22%) und IF_{pe} (20%) zusammen (vgl. Tab. A-8-4).

Der GW-Abfluß stieg von ca. 0,2 l/s kurzfristig auf 0,72 l/s an. Der Prozentanteil der GW-Komponente am Gesamtabfluß lag mit 58% ähnlich hoch wie bei dem August-Ereignis und deutlich höher als bei den Vergleichsereignissen (Februar 26% und Mai 38%). Die Anteile des Vorereignis-Wassers am Gesamtabfluß (GW mit IF_{pe}) reichten mit 78% in den Bereich der Typ A-Ereignisse (Februar 87%, Mai 83%). Im August wurden nur 60% bestimmt.

Über die Interflow-Ganglinie (IF_e und IF_{pe}) konnten 2 Leerlaufkoeffizienten bestimmt werden (Speicher I: $\alpha = 3,19 \text{ d}^{-1}$ und sehr rascher Interflow: $\alpha = 12,9 \text{ d}^{-1}$, vgl. Kap. 8.3, Abb. 8-7 sowie Beispiele für das Auswerteverfahren, Abb. A-8-2). Über die Direktmessung ergaben sich ähnliche Werte (Speicher I: $\alpha = 3,48 \text{ d}^{-1}$ und sehr rascher Interflow: $\alpha = 20 \text{ d}^{-1}$). Ein Stauwasserkörper an der Deckschuttbasis (Speicher I, $\alpha < 1 \text{ d}^{-1}$) konnte über die graphische Auswertung nicht nachgewiesen werden.

Die gesamte Abflußhöhe während des Ereignisses (08.11. - 09.11.1985, 24 h) am Pegel 14 betrug Q_t = 0,40 mm. Bei einem Basisabfluß von ca. 0,09 mm bedeutet dies eine Abflußerhöhung von Q_t+ = 0,31 mm. Dies entspricht einem Abflußquotienten Q_t+ / NB von ca. 3% (August-Ereignis: 1,6%). Für das Februar- und Mai-Ereignis

Einzugsgebiet Denzenberg P 14: N-Q-Ereignis 08.11. - 09.11.1985

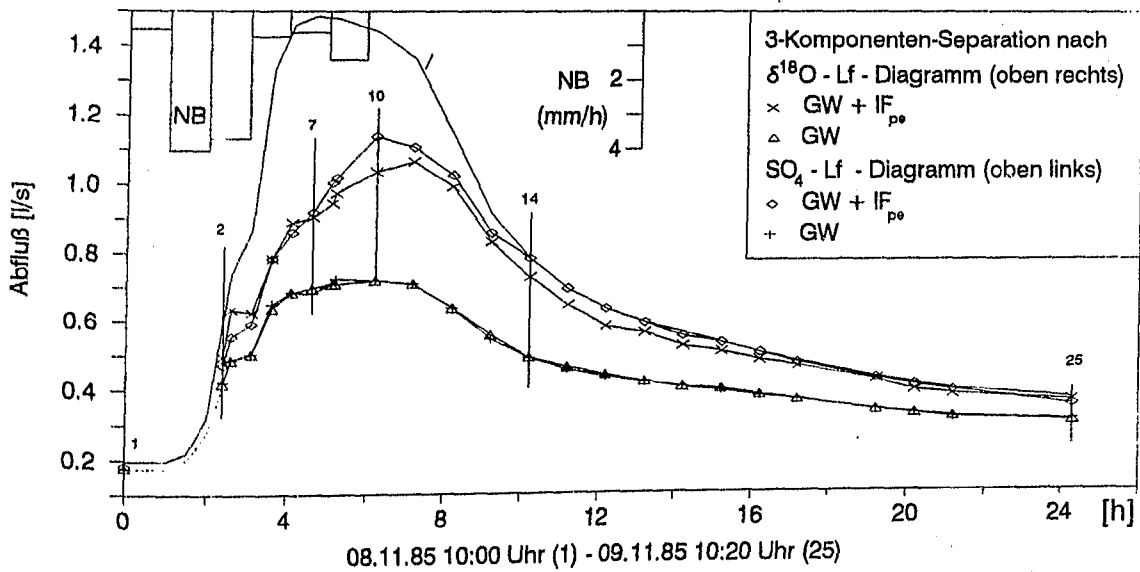
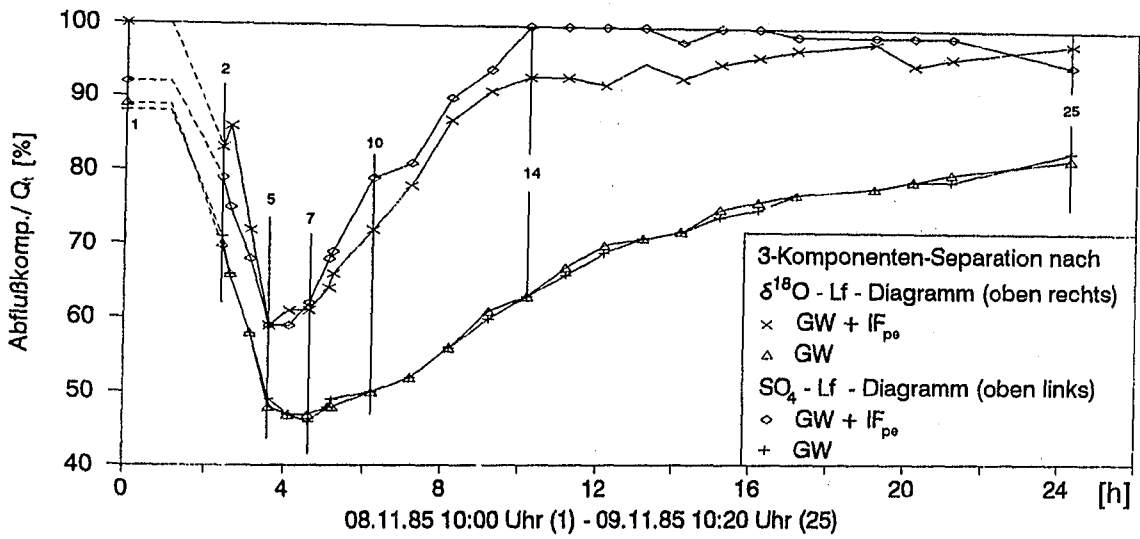
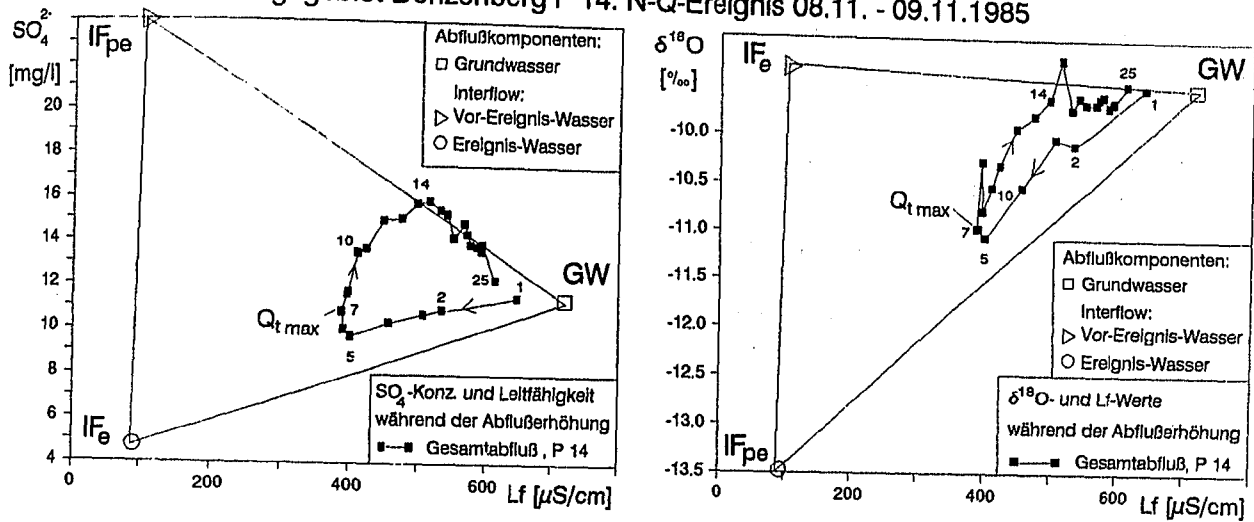


Abb. 8-15: Hochwasserereignis vom 08.11.1985 im Einzugsgebiet Denzenberg. **Oben links:** SO_4^{2-} -Konzentrationen und Lf-Werte, **oben rechts:** $\delta^{18}O$ -Werte und Lf-Werte der Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sowie Änderungen während der Abflußerhöhung im Gesamtabfluß, **Mitte:** Prozentanteile der Abflußkomponenten am Gesamtabfluß nach beiden Separationsmethoden, **unten:** Ganglinie des Gesamtabflusses und Separation in 3 Abflußkomponenten.

wurden 30% und 19% ermittelt. Die tatsächlich abgeflossene Menge des eingetragenen Frischwassers (IF_e -Komponente) betrug 0,8% (IF_e/NB), bei den Vergleichsereignissen im August 0,9%, bei den Typ A-Ereignissen dagegen jeweils 4% (Tab. A-8-4). Für das Gesamt ereignis wurden ermittelt:

Gesamtabfluß:	Q_t	=	0,40 mm (100%)
Teilkomponenten:	GW	=	0,23 mm (58%)
	IF_{pe}	=	0,08 mm (20%)
	IF_e	=	0,09 mm (22%)

Für diese Ergebnisse wurden Lf - $\delta^{18}O$ als Tracer zur Separation verwendet.

Der Mehrabfluß der GW-Komponente (GW+), der als Mindestwert einer kurzfristigen Grundwasserneubildung interpretiert werden kann, ergab mit 0,22 mm einen deutlich höheren Wert als im August (0,04 mm).

Die Quelle Q 3 reagierte auf das Niederschlagsereignis mit einer geringen Schüttungserhöhung um 10% und einer Lf-Verringerung um ca. 50 $\mu S/cm$. Daraus ist eine IF-Zumischung von ca. 8% an der Gesamtschüttung abzuleiten.

8.5.2.5 Hochwasserereignis vom 05. - 11. März 1986

Dieses Hochwasserereignis fand unter ähnlichen Ausgangsvoraussetzungen statt wie die Schneeschmelze im Februar 1985 (Kap. 8.5.2.1). Verschiedene Kenngrößen beider Ereignisse (Abflußerhöhung und der Ganglinienseparation) sind sehr ähnlich (vgl. auch Zusammenstellung charakteristischer Kenndaten der N-Q-Ereignisse im Einzugsgebiet Denzenberg, Tab. A-8-4, Anhang).

Das Hochwasserereignis wurde, wie das Februarereignis im Vorjahr, durch ein Tauwetter ausgelöst. Geringe Regenfälle unterstützten das relativ zum Februar-Ereignis 1985 langsamere (bis zum 20.03.) Abtauen der Schnee-Niederschläge vom Februar. Das langsame Abschmelzen führte zu einer mehrgipfligen Abflußkurve mit Maxima jeweils um die Mittagszeit. Die mittlere Wasserspannung variierte in den Vormonaten um oder nur wenig über $pF = 0$, so daß von einer Wassersättigung an der Deckschuttbasis und einem Typ A-Ereignis ausgegangen werden kann. Den Input für die Abflußerhöhung stellten 20,7 mm Niederschlag (13,7 mm Schneefälle vom Februar und 7,0 mm, über 4 Tage verteilte Regenfälle) mit folgenden Mittelwerten:

IF_e -Komponente:
Lf = 114 $\mu S/cm$; $\delta^{18}O = -16,02\text{‰}$; NB = 20,7 mm;

Die Lf- und $\delta^{18}O$ -Werte der GW-Komponente aus Q 3 entsprachen denen des Vorjahres.

GW-Komponente:
Lf = 700 $\mu S/cm$; $\delta^{18}O = -9,50\text{‰}$;

Der Vor-Ereignis-Interflow war sehr gering. Während des Ereignisses nahm der Interflow deutlich zu. Aus mehreren Proben mit nahezu unveränderten (Schwankungsbreite -10,74 bis -10,81 ‰) und vom Input (s.o) gut zu unterscheidenden $\delta^{18}O$ -Werten konnte die Markierung der IF_{pe} -Komponente ermittelt werden.

IF_{pe} -Komponente:
Lf = 74 $\mu S/cm$; $\delta^{18}O = -10,78\text{‰}$;

Die $\delta^{18}O$ -Werte der mit den Plattenlysimetern beprobten Sickerwässer schwankten nur wenig um den mittleren Interflow-Wert (Tab. 8-13).

Tab. 8-13: $\delta^{18}O$ - und Lf-Werte im Sickerwasser- und Interflow. Hochwasserereignis im Einzugsgebiet Denzenberg, 05. - 11.03.1986.

Sickerwasser-Proben vom 06.03.1986:

	Tiefe	$\delta^{18}O$ (‰)	el. Leitf. ($\mu S/cm$)
Profil 1	40 cm	-10,55	74
	60 cm	-10,46	121
Profil 2	25 cm	-10,57	71
	40 cm	-10,91	70
Profil 3	60 cm	-10,82	117
	40 cm	-10,94	71
	60 cm	-10,76	91
	90 cm	-10,76	105
Mittelwert			
Interflow		-10,78	74

Die geringen Unterschiede zwischen Interflow- und Sickerwasserdaten belegen erneut, daß bei hoher Bodenfeuchte ($pF < nF_k$, Typ A-Ereignis) i.w. älteres, schon vor dem Ereignis im Boden gespeichertes Wasser (IF_{pe} -Komponente) abfließt. Eine Vermischung mit IF_e findet nur langsam statt.

Hochwasserereignis

Das Tau- und Regenwetter (N-Intensität $< 0,5$ mm/h) setzte ab dem 05.03. ein und der Gesamt abfluß Q_t stieg ab dem 06.03. an. Im Vergleich mit dem Februar-Ereignis 1985 blieben die Maximalabflüsse (3 Spitzen am 06., 07. und 09.03.) niedriger. Der Spitzenabfluß am 07.03. erreichte $Q_{max} = 3,22$ l/s. Die Abflußzunahme Q_t+ von 0,38 auf 3,22 betrug nur das ca. 8-fache (bei dem Februar-Ereignis 1985 dagegen das 30-fache). Zu berücksichtigen ist dabei, daß der Gesamt abfluß

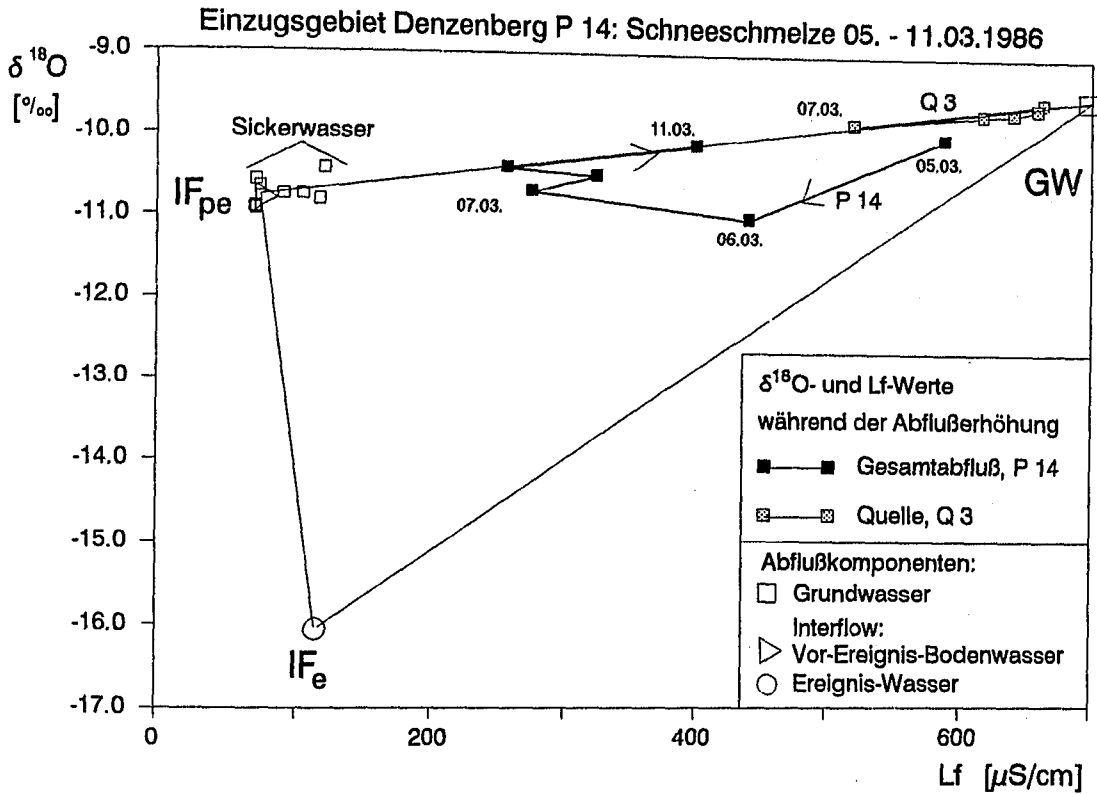


Abb. 8-16: Hochwasserereignis vom 05. - 11.03.1986 im Einzugsgebiet Denzenberg. $\delta^{18}\text{O}$ - und Lf-Werte der Abflusskomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sowie Änderungen während der Abflusserhöhung im Gesamtabfluß, Quellwasser (Q 3) und Bodenwasser.

infolge des langsamen Abschmelzens der restlichen Schneedecke über den 11.03. hinaus leicht erhöht war.

Mit den Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten konnte eine 3-Komponenten-Separation vorgenommen werden (Abb. 8-16). Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Gesamtabfluß bei P 14 gingen bis auf $-10,69\text{‰}$, die Lf-Werte bis auf $275 \mu\text{S/cm}$ zurück. Ähnlich wie bei dem Februar-Ereignis bewegten sich die Lf/ $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Dreieck-Diagramm im Bereich der GW - IF_{pe}-Mischungsgerechten. Nur am Beginn der Abflusserhöhung (06.03.) erreichte die IF_e-Komponente einen erheblichen Anteil von 18% am Gesamtabfluß (Tab. 8-14). Dies ist vermutlich auf gebietsweise stattfindenden Überlandabfluß auf noch gefrorenem und teilweise vereistem Boden zurückzuführen. Mit zunehmendem Tauwetter konnte das Schmelzwasser in den Boden eindringen und Vor-Ereignis-Bodenwasser (IF_{pe}) verdrängen. Die IF_{pe}-Komponente stieg bis maximal 63% (zur Zeit von $Q_{t,max}$) an. (Beim Februar-Ereignis betrug der höchste Anteil 69%.) Noch am 11.03. (bei $Q_t = 1 \text{ l/s}$) betrug der IF_{pe}-Anteil 48%.

Die GW-Komponente hatte um den Zeitpunkt von $Q_{t,max}$ mit 32% den geringsten Anteil am Gesamtabfluß. Bei einer etwa wieder dem Vor-Ereignis-Abfluß entsprechenden Menge setzte sich

der Gesamtabfluß am 11.03. zu etwa gleichen Teilen aus GW und IF_{pe} zusammen. Der hohe Anteil an IF_{pe} wird auch durch eine Zunahme der SO_4^{2-} - und NO_3^- -Konzentrationen im Gesamtabfluß unterstrichen.

Tab. 8-14: Prozent-Anteile der Abflusskomponenten GW, IF_{pe} und IF_e im Gesamtabfluß bei P 14 (Einzugsgebiet Denzenberg) während der Schneeschmelze vom 05.03. - 11.03.1985.

Datum	GW	IF _{pe}	IF _e	
	[%]			
05.03.86	82	13	5	
06.03.86	58	24	18	
07.03.86	32	63	5	$Q_{t,max}$
08.03.86	32	56	4	
09.03.86	43	54	3	
11.03.86	52	48	0	

Für den Zeitraum 05.03. - 11.03.1986 konnte der Gesamtabfluß wie folgt in die 3 Abflusskomponenten geteilt werden:

gesamtabfluß:	$Q_t = 3,93 \text{ mm}$ (100%)
Teilkomponenten:	GW = 1,45 mm (37%)
	IF _{pe} = 2,28 mm (58%)
	IF _e = 0,20 mm (5%)

Bis zum 11.03. wurde eine Abflußerhöhung von $Q_t+ = 2,87$ mm berechnet. Das im Vergleich zum Februar-Ereignis niedrigere Q_t+ /Input-Verhältnis von 14% (Februar 30%) ist auf die nur unvollständige Schneeschmelze zurückzuführen. Es liegt trotzdem in dem für Typ A-Ereignisse charakteristischen Bereich (Werte > 10 , vgl. Tab. A-8-4). Die tatsächlich abgeflossene Menge des Inputs machte auch deshalb nur 1% (IF_c /Input) aus.

Wie im Februar 1985 liegt der Anteil der IF_{pe} -Komponente am Gesamtabfluß um 60% und damit deutlich über den IF_{pe}/Q_t -Verhältnissen der anderen Ereignisse. Während des Mai-Ereignisses lag der IF_{pe} -Anteil zwar mit 45% niedriger, wurde aber durch 17% IF_c auf einen für die Typ A-Ereignisse typischen $IF_{ges.}/Q_t$ -Anteil von über 60% angehoben. Die genauen Anteile betragen im Februar 74%, im Mai 62% und im März 63% wobei die IF_{pe} -Komponente dominierend war. Typ A-Ereignisse hatten niedrigere Interflow-Anteile um 40% mit relativ höheren IF_c -Anteilen (vgl. Tab. A-8-4).

Der Mehrabfluß der GW-Komponente (GW+), der als Mindestwert einer kurzfristigen Grundwasserneubildung interpretiert werden kann, ergab mit 0,58 mm einen ähnlichen Betrag wie bei dem Mai-Ereignis.

Schüttungsverhalten und Quellwasserzusammensetzung von Q 3

Bei Q 3 nahm die Schüttung von 0,039 l/s auf 0,067 l/s zu. Mit Hilfe der 3-Komponenten-Separation konnten auch hier verschiedene Abflußanteile quantifiziert werden (Tab. 8-15).

Tab. 8-15: Prozent-Anteile der Abflußkomponenten GW, und IF_{pe} in der Quellschüttung von Q 3 (Einzugsgebiet Denzenberg) während der Schneeschmelze vom 05.03. - 11.03.1986.

Datum	GW -- [%]	IF_{pe} --
05.03.86	100	0
06.03.86	95	5
07.03.86	70	30
08.03.86	86	14
09.03.86	90	10
11.03.86	93	7

Die Änderungen der Lf- und $\delta^{18}O$ -Werte bewegen sich im Dreieck-Diagramm entlang der GW- IF_{pe} -Mischungsgeraden. Eine IF_c -Komponente war bei der Schüttungserhöhung nicht beteiligt (Abb. 8-16).

Ausgehend von reinem Grundwasserabfluß am 05.03.1986 (GW = 100%) erreichte die IF_{pe} -Komponente zum Zeitpunkt der Maximalschüt-

tung einen Höchstwert von 30% (zum Vergleich: im Februar 1985 bei doppelt so hoher Gesamtschüttung 54%). Nach der Abflußspitze stieg der GW-Anteil wieder rasch an.

Der für den Ereigniszeitraum 05.03. - 11.03. ermittelte Anteil der IF_{pe} -Komponente an der Quellschüttung beträgt 14% (QIF_{pe}/Q_t). Im Februar 1985 wurden 18% berechnet.

8.5.2.6 Hochwasserereignis vom 03. - 07. April 1986

Dieses N-Q-Ereignis stellt die stärkste Abflußerhöhung der hier vorgestellten Hochwasserwellen im Einzugsgebiet Denzenberg dar. Die Schneeschmelze Anfang März (vgl. Kap. 8.5.2.5) und stärkere Niederschläge am Ende dieses Monats hatten zu einer sehr hohen Ausgangsbodenfeuchte und zu einem permanenten Vor-Ereignis-Interflow geführt.

Am 03.04. fielen im Zeitraum 02:45 bis 10:40 Uhr insgesamt 11 mm und zwischen 11:00 und 20:00 Uhr 9,1 mm Niederschlag im Bestand (NB-Summe = 20,1 mm). Die $\delta^{18}O$ -Werte lagen bei $-8,85^\circ/\text{‰}$ und $-12,35^\circ/\text{‰}$. Sie variierten damit um den mittleren $\delta^{18}O$ -Gehalt der GW-Komponente und waren damit nur getrennt für 2 Zeitabschnitte (nicht als Mittelwert) als Markierung für Separationsberechnungen einzusetzen (Abb. A-8-8, Anhang).

Der Gesamtabfluß stieg von 1,66 l/s ab ca. 03:00 Uhr sehr rasch an und erreichte nach der ersten Niederschlagswelle ein kleines Zwischenmaximum (1. $Q_{t,max}$) um 10:00 Uhr (12,8 l/s). Um 20:00 Uhr wurde der Spitzenwert (2. $Q_{t,max}$) mit 25,55 l/s gemessen. Der Gesamtabfluß war am 07.04. gegen 17:00 Uhr wieder auf den Ausgangswert zurückgegangen (vgl. Tab. A-8-5, Anhang). Insgesamt flossen in 5 Tagen 12,43 mm bei P 14 ab. Die abflußbegünstigenden Bedingungen (hohe Bodenfeuchte und Niederschläge) werden durch das relativ höchsten Q_t /NB-Verhältnis des Meßzeitraums (62%) ausgedrückt. Für die anderen Typ A-Ereignisse wurden 34, 27 und 19% bestimmt (Tab. A-8-4, Anhang).

Die $\delta^{18}O$ -Werte des mit der Meßeinrichtung beprobten Interflow variierten während der gesamten Abflußerhöhung nur sehr wenig zwischen $-11,04$ und $-11,34^\circ/\text{‰}$. Die $\delta^{18}O$ - und Lf-Mittelwerte betragen $-11,2^\circ/\text{‰}$ und $64 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Die bis zur ersten Abflußspitze (ausgelöst durch den ersten Teil-Niederschlag mit $-8,85^\circ/\text{‰}$) schwach zu negativeren Werten tendierenden $\delta^{18}O$ -Änderungen (Mobilisierung von isotopisch leichterem Sickerwasser) sowie die nur sehr geringen Konzentrationsänderungen von SO_4 und

NO₃ zeigen eindeutig, daß ganz überwiegend älteres Vor-Ereignis-Bodenwasser (IF_{pe}) als Interflow abfloß. Der Anteil des aktuellen Niederschlagswassers (IF_e) im Gesamt-Interflow machte während der gesamten Abflußerhöhung nur ca. 10 - 15% (IF_e/IF_{ges.}) aus. Diese Angaben basieren auf einer mit Hilfe der Änderung (Verringerung) der SO₄-Konzentrationen im Interflow durchgeführten 2-Komponenten-Separation (Vermischung mit frischem Niederschlagswasser, vgl. Abb. A-8-8, Anhang).

Die δ¹⁸O-Werte im Gesamtabfluß bei P 14 ändern sich mit zunehmendem Gesamtabfluß in etwa geradlinig in Richtung Interflow und bei der Abnahme in Richtung Ausgangswert. Auch damit wird der dominierende Einfluß der IF_{pe}-Komponente bestätigt.

Die Ganglinien-Separation konnte aus oben genannten Gründen zunächst in die Komponenten Grundwasser (GW aus Q 3 mit 700 µS/cm und -9,5‰) und den Gesamt-Interflow (IF_{pe} und IF_e mit 64 µS/cm und -11,2‰) unterteilt werden. Der Anteil des IF_e-Komponente wurde im Gesamt-Interflow ermittelt (s.o.).

Vor dem Einsetzen der Niederschläge betrug der Interflow-Anteil noch 21% (IF_{ges.}/Q_t). Zum Zeitpunkt des Zwischenmaximums (1. Q_{t,max}), nach der ersten Niederschlagswelle, wurden ca. 58%, während und einige Stunden nach Q_{t,max} sogar 74% IF_{ges.}/Q_t bestimmt (vgl. Tab. A-8-5, Anhang). (Die kurzfristig höchsten IF/Q_t-Anteile lagen im Februar und Mai 1985 bei 81 und 77%.) Der Anteil der GW-Komponente ging entsprechend auf minimal 26% zurück.

Für dieses Ereignis wurde der auf NB bezogen höchste Interflow-Anteil (IF_{ges.}/NB = 38%) bestimmt. Die anderen Typ A-Ereignisse blieben mit 26%, 17% und 12% deutlich darunter.

Für den Zeitraum 03.04. - 07.04.1986 konnte der Gesamtabfluß wie folgt in die 3 Abflußkomponenten geteilt werden:

Gesamtabfluß	Q _t	= 12,43 mm (100%)
Teilkomponenten:	GW	= 4,72 mm (38%)
	IF _{pe}	= 6,59 mm (53%)
	IF _e	= 1,12 mm (9%)

Bei einem Basisabfluß von 3,74 mm wurde bis zum 07.04. eine Abflußerhöhung von Q_{t+} = 8,69 mm berechnet. Das Q_{t+}/NB-Verhältnis liegt aufgrund der abflußbegünstigenden Bedingungen deutlich höher als bei den anderen Typ A-Ereignissen. Die tatsächlich abgeflossene Menge des NB (IF_e/NB) erreichte, ähnlich wie im Februar und Mai 1985, ca. 6%.

Der Anteil des gesamten Interflow am Gesamtabfluß lag mit 62% gleich hoch wie im Mai 1985

und März 1986. Die IF_e-Anteile sind aufgrund der hohen Ausgangs-Bodenfeuchte sehr gering (9%) und ähnlich niedrig wie bei den Ereignissen im Februar 1985 und März 1986 (13 und 5%).

Mit der sich aus der Separationsberechnung ergebenden Interflow-Ganglinie (Summe: IF_e und IF_{pe}) konnten die für Typ A-Ereignisse charakteristischen Leerlaufkoeffizienten für 2 Speichersysteme bestimmt werden (Speicher I: α = 2,85 d⁻¹; Speicher II: 0,35 d⁻¹). Auch die Auswertungen der direkten Interflow-Messung ergaben sehr ähnliche Werte: Speicher I: α = 2,71 d⁻¹; Speicher II: 0,40 d⁻¹ (vgl. Kap. 8.3, Abb. 8-7 sowie Beispiele für das Auswerteverfahren, Abb. A-8-2).

Der Mehrabfluß der GW-Komponente (GW+), der als Mindestwert einer kurzfristigen Grundwasserneubildung interpretiert werden kann, ergab mit 1,63 mm den höchsten für ein Ereignis ermittelten Wert.

Schüttungsverhalten und Quellwasserzusammensetzung von Q 3

Bei Q 3 konnte eine Schüttungszunahme von ca. 0,06 l/s auf 0,14 l/s abgeschätzt werden. Die Schüttung direkt vor Beginn der Erhöhung sowie die Schüttungsspitze konnten nicht exakt erfaßt werden.

Über die Änderungen der Lf- und δ¹⁸O-Werte ließ sich ein maximaler IF-Anteil von 41% (IF_{ges.}/Q_t) bestimmen. Im Durchschnitt machte der Interflow ca. 15% an der Gesamtschüttung aus (vgl. Ereignisses im Februar 1985 und März 1986).

Der für Ereigniszeitraum 03.04. - 07.04. ermittelte IF_{ges.}-Anteil an der Quellschüttung beträgt 15%.

8.5.3 Vergleich "Sandgebiet - Tongebiet"

Das Einzugsgebiet Kleiner Goldersbach, Pegel 8, wird als "Tongebiet" mit dem "Sandgebiet", Einzugsgebiet Denzenberg, Pegel 14, verglichen.

Das hauptsächlich von km5-Lias-Löß (zusammen 78%) und weniger von Stubensandstein bestimmte Einzugsgebiet Kleiner Goldersbach besitzt insgesamt schlechter durchlässige Deckschichten als das km4-Gebiet Denzenberg. Dies führt zu allgemein höheren Q_{on}-Anteilen am Gesamtabfluß. Bestätigt haben dies sowohl die auf graphischem Wege durchgeführten Ganglinienseparationen (vgl. Tab. 5-19, Abb. 5-4) wie auch die Abschätzungen der Interflow-Menge über den bei P 9 erfaßten Deckschichtenabfluß (Kap. 8.4.3.3).

Im folgenden soll dieses unterschiedliche Abflußverhalten am Beispiel ausgewählter Einzelereignisse verdeutlicht werden. Charakteristische Kennwerte der N-Q-Ereignisse sind in Tab. A-8-10 (Anhang) zusammengestellt.

8.5.3.1 Hochwasserereignis vom 07.- 09. Mai 1985

Ausgangssituation

Der Mai 1985 war der niederschlags- und abflußreichste Monat der gesamten Untersuchungsperiode. Die Ganglinien von Gesamtabfluß, Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten am Pegel P 8 (Abb. 7-7), der Schüttung (mit Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten) von flachen und tiefen Quellen in diesem Einzugsgebiet (Abb. 5-5, 5-6 und A-5-1 und A-5-2), der Bodenfeuchte und des km5-Deckschichtenabflusses am Pegel 9 (Abb. A-8-1) sowie die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Niederschlag, Sickerwässern und Interflow auf der Testfläche S 1, Schlagbaumlinde, geben einen Überblick der Abflußsituation.

Die aus dem aktuellen Bestandesniederschlag (Testfläche S 1, Schlagbaumlinde) gebildete IF_e -Komponente war durch folgende Basiswerte charakterisiert:

IF_e -Komponente:
 $\delta^{18}\text{O} = -7,75\text{‰}$; Lf = 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$; NB = 14,1 mm;

Die Daten der Grundwasserkomponente GW wurden als Mittelwert von mehreren Vor-Ereignis-Proben bei Niederschüttung aus den tiefen km4-Quellen Q6a und Q6a1 sowie der (zu dieser Zeit schüttenden) Lias-Quelle Q 31 gewonnen.

GW-Komponente:
Lf = 583 $\mu\text{S}/\text{cm}$; $\delta^{18}\text{O} = -9,64\text{‰}$;

Die Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Konzentrationen des Vor-Ereignis-Interflow konnten aus den flachen Quellen Q 6b und Q 6b1, die den Deckschichtenabfluß von Lößlehm-, km5- und km4-Flächen erfassen, bestimmt werden.

IF_{pe} -Komponente:
 $\delta^{18}\text{O} = -10,31\text{‰}$; Lf = 95 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Wie im Einzugsgebiet Denzenberg (Abb. A-8-5) zeigte der Interflow vor und während des Ereignisses keine wesentlichen Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Schwankungen, d.h. keine direkte Beeinflussung durch aktuelle Niederschläge (vgl. auch Abb. 8-17).

Der Vor-Ereignis-Abfluß war mit 1,07 l/s bei

P 8, verglichen mit dem wesentlich kleineren Einzugsgebiet von P 14 (1,12 l/s) sehr gering. Dies liegt an dem bei P 8 durchgängig deutlich niedrigeren Grundwasseranteil am Gesamtabfluß (vgl. Ganglinien des Gesamtabflusses, Abb. 7-6, 7-7 und Abflußanteile in Tab. 5-19, A-5-7, Anhang).

Die Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Basisdaten der 3 Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sind in Abb. 8-17 a) in einem Dreieck-Diagramm dargestellt. Wie bei P 14 war auch bei P 8 vor Beginn des Ereignis-Niederschlags noch ein Interflow-Anteil im Gesamtabfluß festzustellen. Der $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalt entsprach etwa dem mittleren Grundwasserwert, die elektrische Leitfähigkeit lag dagegen deutlich niedriger.

Neben den von 1 bis 27 durchnummerierten Proben des Gesamtabflusses (vgl. auch Tab. A-8-6, Anhang) wurden auch die Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen im Deckschichtenabfluß dargestellt. In den 4 von Q 6b1 vorliegenden Proben blieben die Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte mit Schwankungsbreiten von 89 bis 94 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und von - 10,52 bis - 10,40 ‰ auch während der deutlichen Schüttungserhöhung nahezu unverändert.

Dies zeigt einen vom aktuellem Niederschlag mobilisierten Deckschichtenabfluß aus Vor-Ereignis-Wasser an, wie er auch im Einzugsgebiet von P 14 gemessen wurde.

Hochwasserereignis

Der Ereignis-Niederschlag (Bestandesniederschlag) war mit 14,1 mm etwas höher als im Gebiet P 14 (13,4 mm). Die Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte lagen dagegen deutlich über den Daten des Vergleichsgebietes (vgl. Tab. A-8-10, Anhang).

Der Gesamtabfluß erhöhte sich ab ca. 18:30 und erreichte um ca. 23:30 Uhr den Höchstwert. Die auf den Vor-Ereignis-Abfluß bezogene Abflußspitze ($Q_{pe}/Q_{max} = 128$) war um ein Vielfaches höher als bei P 14 ($Q_{pe}/Q_{max} = 10$). Dies ist mit auf den deutlich höheren IF-Anteil am Gesamtabfluß zurückzuführen (s.u.).

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Gesamtabfluß am Pegel 8 änderten sich von -9,61 ‰ (Abb. 8-17, Probe 1: 07.05., 13:40 Uhr) zunächst zu höheren Werten in Richtung IF_e -Komponente. Ab Probe Nr. 6 (0,5 h vor Q_{max}) wird mit niedrigeren $\delta^{18}\text{O}$ -Werten und wenig variierenden Lf-Werten der zunehmende Anteil der IF_{pe} -Komponente erkennbar.

Im Gebiet P 8 steigerte sich der IF_e -Anteil bis maximal 46%, bei P 14 dagegen nur auf 29% (vgl. Abb. 8-13 und Abb. 8-17 sowie Tab. A-8-6). Dieser höhere Anteil des direkt (sehr oberflächennah oder als Überlandabfluß) abfließenden

Einzugsgebiet Kleiner Goldersbach P 8: N-Q-Ereignis 07. - 09.05.1985

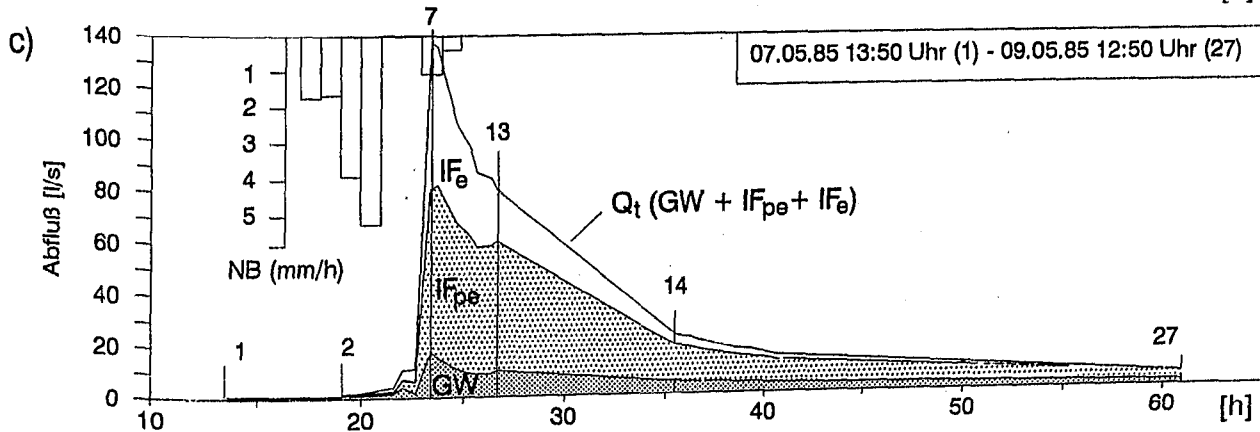
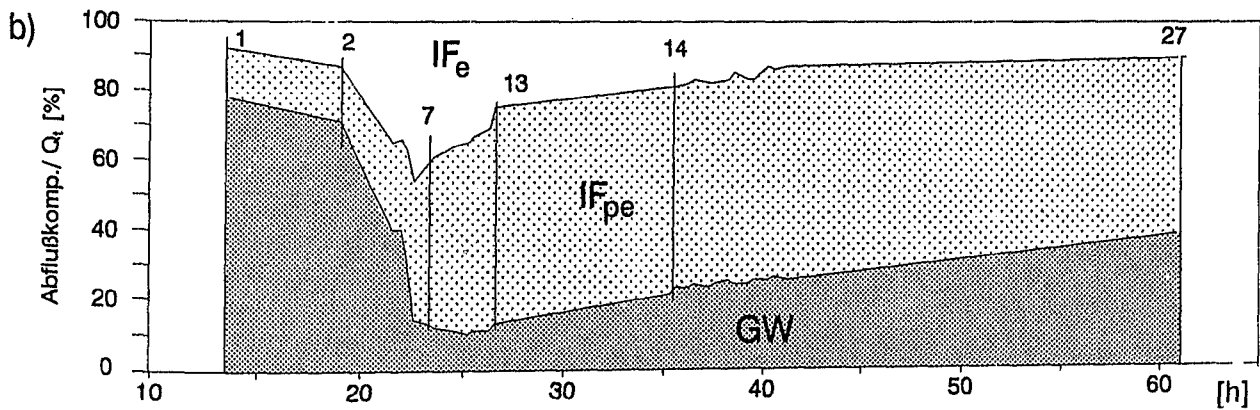
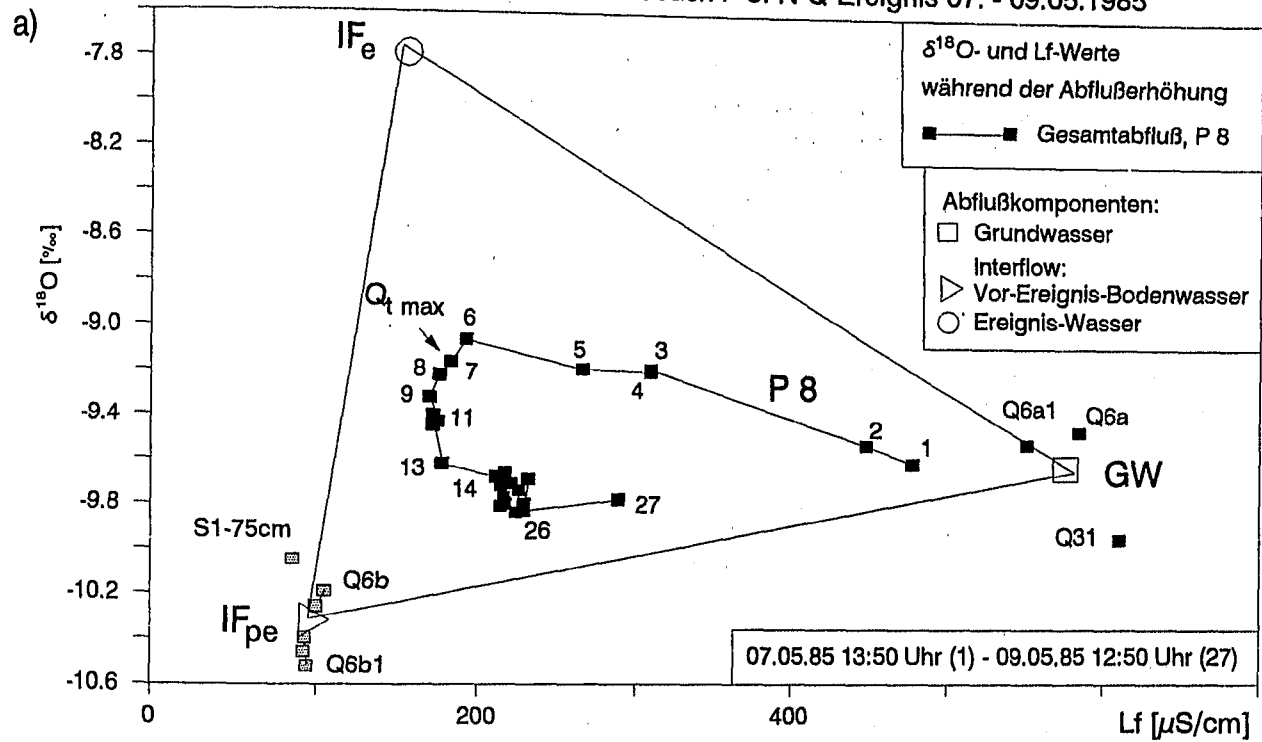


Abb. 8-17: Hochwasserereignis vom 07.05. - 09.05.1985 im Einzugsgebiet Kleiner Goldersbach. a) Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Abflußkomponenten GW , IF_{pe} und IF_e sowie Änderungen während der Abflüßerhöhung im Gesamtabfluß und den Deckschichtenquellen, b) Prozentanteile der Abflußkomponenten am Gesamtabfluß, c) Ganglinie des Gesamtabflusses und Separation in 3 Abflußkomponenten.

Niederschlagswassers ist auf die schlechter durchlässigen Deckschichten zurückzuführen.

Die IF_{pe} -Komponente erreichte ihr relatives Maximum erst nach dem Gesamtabflußmaximum. (Insgesamt wurde ein Anteil von 57% bestimmt.) Auch hier bestätigen die Ergebnisse der 3-Komponenten-Separationsmethode, daß versickerndes Niederschlagswasser (IF_e -Komponente) älteres Bodenwasser (IF_{pe} -Komponente) im Deckschutt verdrängt und mobilisiert.

Der GW-Anteil erreicht sein Minimum ca. 2 h nach Q_t max bei nur 10% GW/Q_t (bei P 14 ging der GW-Anteil, entsprechend dem gesamten Abflußverhalten, nur auf minimal 25% GW/Q_t zurück).

Im Zeitraum des Hochwasserereignisses vom 07.05. 14:00 Uhr bis zum 09.05. 13:00 Uhr betrug die gesamte Abflußhöhe (ähnlich wie im Gebiet P 14) am Pegel 8: $Q_t = 3,7$ mm.

Der Gesamtabfluß konnte wie folgt in die 3 Abflußkomponenten geteilt werden:

Gesamtabfluß:	$q_t = 3,70$ mm (100%)
Teilkomponenten:	GW = 0,56 mm (15%)
	$IF_{pe} = 2,11$ mm (57%)
	$IF_e = 1,04$ mm (28%)

Die GW-Komponente lag bei P 8 mit 15% deutlich niedriger als bei P 14 (38%). Der insgesamt höhere IF/Q_t -Anteil von 85% (P 14: 62%) war auf höhere Anteile beider IF-Komponenten zurückzuführen. Das IF_e/IF_{pe} -Verhältnis war bei P 8 höher als bei P 14. Es wurden 49% gegenüber 37% ermittelt.

Die Ergebnisse der Ganglinienseparation dieser Abflußerhöhung weisen einige grundlegende Unterschiede zu denen des Einzugsgebietes Denzenberg, P 14, auf. Besonders hervorzuheben ist, daß trotz ähnlicher Niederschlagshöhen (NB: 13,4 mm bei P 14 und 14,1 mm bei P 8) und Gesamtabflußhöhen (3,6 mm bei P 14 und 3,7 mm bei P 8) ein sehr viel geringerer GW-Anteil (15 gegenüber 38%) und dafür höhere Interflow-Anteile am Gesamtabfluß ermittelt wurden (weitere Kenndaten sind in Tab. A-8-10 zusammengestellt).

8.5.3.2 Hochwasserereignis vom 04. - 11. März 1986

Durch eine deutliche Erwärmung und leichte Regenfälle ausgelöst schmolz die im Februar gefallene Schneedecke. Dies führte zu einer mehrere Tage dauernden Abflußerhöhung im Gebiet Kleiner Goldersbach (P 8), die sich auch nach dem 11.03.1986 in Form von kleineren Tagesabfluß-

spitzen um die Mittagszeit noch mehrere Tage fortsetzte. Ähnliche Rahmenbedingungen wurden bereits für das zeitgleich stattfindende N-Q-Ereignis im Gebiet Denzenberg (P 14) beschrieben (Kap. 8.5.2.6). Charakteristische Kenndaten sind in Tab. A-8-10 (Anhang) zusammengestellt.

Den Input für die Abflußerhöhung bildeten ca. 16 mm NB (12 mm aus der Schneeschmelze und 4 mm Regenfälle) mit folgenden Kennwerten:

IF_e -Komponente:

$L_f = 73 \mu S/cm$; $\delta^{18}O = -18,34^\circ/\text{‰}$; NB = 16 mm;

Die L_f - und $\delta^{18}O$ -Werte der GW-Komponente konnten aus dem Quellwasser von Q 6a und Q 6a1 ermittelt werden.

GW-Komponente:

$L_f = 692 \mu S/cm$; $\delta^{18}O = -9,21^\circ/\text{‰}$;

Die Lias-Quelle Q 31 schüttete nicht. Grundwasser aus dem Lias trug deshalb nicht zum Abfluß bei, da der Füllungsgrad des Aquifers zu dieser Zeit noch zu gering war (Überlaufquelle).

Die L_f - und $\delta^{18}O$ -Kennwerte des Vor-Ereignis-Bodenwassers wurden aus Mittelwerten von 5 Sickerwasserproben und 2 Proben Interflow-Proben aus Aufgrabungen bestimmt.

IF_{pe} -Komponente:

$L_f = 86 \mu S/cm$; $\delta^{18}O = -9,86^\circ/\text{‰}$;

In den Interflow-Proben aus Aufgrabungen und Hangeinschnitten konnte mit Werten um $-11,2^\circ/\text{‰}$ am 06./07.03.1986 eine langsam beginnende Vermischung mit Schmelzwasser erkannt werden.

Hochwasserereignis

Der Gesamtabfluß Q_t stieg ab dem 05.03.1986 mit dem einsetzenden Tau- und Regenwetter zunächst leicht, ab dem 06.03 dann stärker an. Der Maximalabfluß wurde am 07.03. mit 26,88 l/s erreicht. Ausgehend von dem Basisabfluß am 04.03. (0,525 l/s) bedeutet dies eine Abflußzunahme auf das 51-fache. Im Sandgebiet P 14 ist der Abfluß dagegen vergleichsweise viel geringer auf das ca. 8-fache angestiegen.

Die Änderung der $\delta^{18}O$ -Werte im Gesamtabfluß fiel, bezogen auf den Vor-Ereignis-Wert, wesentlich stärker als bei P 14 aus (P 14: $-10,0$ bis $-11,01$; P 8: $-9,06$ bis $-11,11^\circ/\text{‰}$). Auch die L_f -Werte fielen bei P 8 stärker (bis $170 \mu S/cm$) als bei P 14 (bis $275 \mu S/cm$). Dies weist auf den im Tongebiet P 8 höheren IF-Anteil im Gesamtabfluß hin.

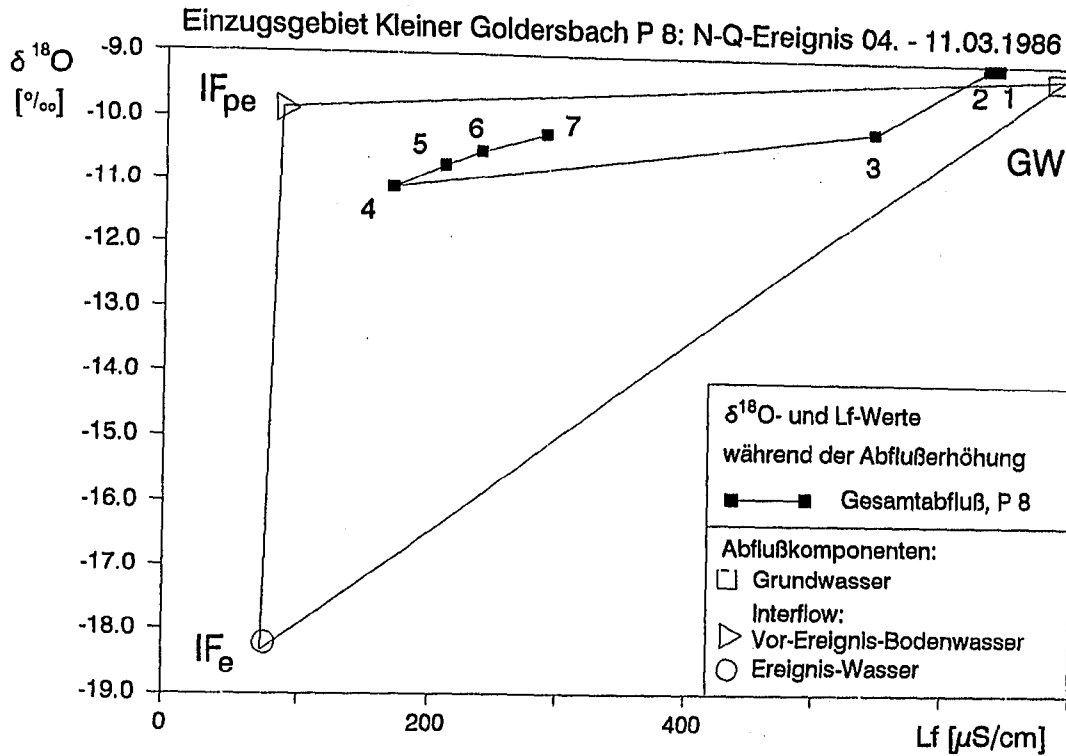


Abb. 8-18: Hochwasserereignis vom 04. - 11.03.1986 im Einzugsgebiet Kleiner Goldersbach. $\delta^{18}\text{O}$ - und Lf-Werte der Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sowie Änderungen während der Abflußerhöhung im Gesamtabfluß.

Mit den Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten konnte eine 3-Komponenten-Separation vorgenommen werden (vgl. Abb. 8-18, Tab. A-8-7, Anhang). Ähnlich wie bei den Schneeschmelz-Ereignissen im Gebiet P 14 (vgl. Abb. 8-12 und A-8-8) bewegten sich die Lf/ $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Bereich der GW - IF_{pe} -Mischungsgerechten des Dreieck-Diagramms.

Der IF_e/Q_t -Anteil stieg auf maximal 15% (P 14: 18%) an. Wie bei P 14 fielen auch hier die Maxima von Q_t und IF_e zeitlich (am 07.03.) zusammen. Auf noch gefrorenem, vereisten Boden fand gebietsweise Überlandabfluß statt.

Mit zunehmendem Tauwetter konnte das Schmelzwasser in den Boden eindringen und Vor-Ereignis-Bodenwasser (IF_{pe}) verdrängen. Die IF_{pe} -Komponente hatte mit 71% (P 14: 63%) zum Zeitpunkt von $Q_{t,max}$ den höchsten Anteil am Gesamtabfluß. Am 11.03. (bei $Q_t = 5,54$ l/s) betrug der IF_{pe} -Anteil noch 60% (P 14: 48%).

Der niedrigste GW/Q_t -Anteil wurde um den Zeitpunkt von $Q_{t,max}$ mit 14% bestimmt. Bei P 14 wurden zu diesem Zeitpunkt als minimaler GW -Anteil 32% bestimmt, was den im Sandgebiet P 14 durchgängig höheren GW/Q_t -Anteil bestätigt.

Für den Zeitraum 04.03. - 11.03.1986 konnte der Gesamtabfluß wie folgt in die 3 Abflußkomponenten geteilt werden:

Gesamtabfluß:	$Q_t = 5,39$ mm (100%)
Teilkomponenten:	$\text{GW} = 1,24$ mm (23%)
	$\text{IF}_{pe} = 3,56$ mm (66%)
	$\text{IF}_e = 0,59$ mm (11%)

Im Vergleich zu P 14 wurde bei P 8, trotz geringerem Input, ein höherer Gesamtabfluß gemessen (P 14: 3,93 mm). Ferner lagen auch bei dieser Abflußerhöhung die IF_e - und IF_{pe}/Q_t -Anteile im Tongebiet P 8 deutlich höher als bei P 14. Die $\text{IF}_{ges.}/Q_t$ -Anteile erreichten bei P 14 63% und bei P 8 77% (vgl. Tab A-8-10). Bei dem bzgl. der Abflußerhöhung stärkeren N-Q-Ereignis im Mai 1985 wurde ein noch höherer $\text{IF}_{ges.}/Q_t$ - bzw. ein niedrigerer GW/Q_t -Anteil bestimmt.

Der Mehrabfluß der GW -Komponente ($\text{GW}+$), der als Mindestwert einer kurzfristigen Grundwasserneubildung interpretiert werden kann, ergab mit 0,95 mm einen relativ hohen Betrag.

8.5.3.3 Hochwasserereignis vom 03. - 07. April 1986

Die Schneeschmelze und starke Niederschläge im März (vgl. Kap. 8.5.3.2) führten vor Beginn dieses N-Q-Ereignisses zu einer sehr hohen Boden-

feuchte und einem permanenten Interflow (Registrierung an der IF-Meßstelle Denzenberg). Diese Ausgangsbedingungen begünstigten eine sehr starke Abflußerhöhung.

Im Zeitraum 02.04 (21:00 Uhr) bis zum 03.04. (20:00 Uhr) fielen 29,1 mm Bestandesniederschlag.

Die Kenndaten für die Ganglinien-Separation betragen:

IF_e-Komponente:

L_f = 185 μS/cm; δ¹⁸O = -10,63‰;

NB = 29,1 mm;

GW-Komponente:

L_f = 692 μS/cm; δ¹⁸O = -9,21‰;

IF_{pe}-Komponente:

L_f = 92 μS/cm; δ¹⁸O = -9,81‰;

Der Gesamtabfluß stieg von 1,18 l/s am 03.04. um 05:00 Uhr rasch an und erreichte um 19:00 Uhr den Spitzenwert (Q_{tmax}) von 313,8 l/s. Der Gesamtabfluß war am 07.04. auf 7,8 l/s zurückgegangen.

Insgesamt flossen in 5 Tagen 18,9 mm bei P 8 ab (P 14: 12,43 mm). Die abflußbegünstigenden Bedingungen (hohe Bodenfeuchte und Niederschläge) werden durch das extreme Q_t/NB-Verhältnis von 65% (P 14: 62%) ausgedrückt. Für die Ereignisse im Mai 1985 und März 1986 ergaben sich 26 und 34%. Die Kenndaten des Ereignisses sind im Vergleich mit den Ergebnissen bei P 14 der Tab. A-8-10, Anhang, zu entnehmen.

Die L_f- und δ¹⁸O-Werte (vgl. Tab. A-8-8) schwankten während der gesamten Abflußerhöhung nur wenig und blieben auf einem sehr niedrigen Niveau, was einen hohen, kaum variierenden IF-Anteil anzeigte. Die einzelnen Meßwerte schwankten in der Zeit vom 03.04. 12:00 Uhr bis zum 05.04. 15:00 Uhr zwischen 178 und 217 μS/cm und -9,79 und 10,11‰. Am 07.04 war die Leitfähigkeit nur gering auf 274 μS/cm angestiegen (Tab. A-8-8 im Anhang). Gemäß der Auswertung der nur wenig streuenden L_f/δ¹⁸O-Werte in der 3-Komponenten-Darstellung (Dreieck-Diagramm) ergaben sich folgende Mittelwerte für die verschiedenen Anteile der Abflußkomponenten. (Einzelwerte der Abflußanteile werden in diesem Fall wegen der geringen Streuung nicht angegeben.)

Für den Zeitraum 03. - 07.04.1986 konnte der Gesamtabfluß wie folgt in die 3 Abflußkomponenten geteilt werden. Dabei lag der IF_{ges}/Q_t-Anteil mit 88% (P 14: 62%) höher als bei der Schneeschmelze im März 1986 (77%) aber ähnlich hoch wie während des Mai-Ereignisses 1985 (85%).

Gesamtabfluß:	Q _t	= 18,90 mm (100%)
Teilkomponenten:	GW	= 2,27 mm (12%)
	IF _{pe}	= 11,72 mm (62%)
	IF _e	= 4,91 mm (26%)

Bei einem im Vergleich zu P 14 wesentlich niedrigerem Basisabfluß von 0,46 mm (P 14: 3,74 mm) wurde bis zum 07.04. eine Abflußerhöhung von Q_{t+} = 18,44 mm (P 14: 8,69 mm) berechnet. Das Q_{t+}/NB-Verhältnis liegt aufgrund der abflußbegünstigenden Ausgangsbedingungen sowohl bei P 14 als auch bei P 8 deutlich höher als bei den anderen Typ A-Ereignissen. Im Tongebiet P 8 bei 65%, im Sandgebiet P 14 bei 42%.

Auch die abgeflossene Menge des NB lag in diesem Fall mit IF_e/Input(NB) = 17% deutlich über den bisher ermittelten Anteilen (< 10%).

Der Mehrabfluß der GW-Komponente (GW+), der als Mindestwert einer kurzfristigen Grundwasserneubildung interpretiert werden kann, ergab mit 1,81 mm einen relativ hohen Wert.

8.5.4 3-Komponenten-Separationen im Großen Goldersbach ("Mischgebiet") und Vergleich mit Teileinzugsgebieten

8.5.4.1 Hochwasserereignis vom 07. - 09. Mai 1985

Nach geringen Abflußerhöhungen Ende April und Anfang Mai war der Gesamtabfluß bei P 1 wieder sehr stark zurückgegangen (Abb. 5-2).

Die Bestandesniederschlagshöhe (NB = 13,82 mm) wurde für das Gesamtgebiet aus 3 Testflächenergebnissen gemittelt. Die höchste N-Intensität wurde zwischen 20 und 21 Uhr gemessen (Abb. 8-19). Die δ¹⁸O-Werte der IF_e-Komponente wurden aus 4 Niederschlags-Teilproben (Fichten-Testfläche S 1 und Buchen-Testfläche S 4, gewichteter Mittelwert) berechnet, die lediglich eine Schwankungsbreite von 0,6‰ aufwiesen.

Die L_f- und δ¹⁸O-Werte der zu unterscheidenden Abflußkomponenten betragen

IF _e :	δ ¹⁸ O = -8,1‰;	L _f = 85 μS/cm
IF _{pe} :	δ ¹⁸ O = -10,8‰;	L _f = 88 μS/cm
GW:	δ ¹⁸ O = -9,4‰;	L _f = 730 μS/cm

und boten wiederum die Möglichkeit einer 3-Komponenten-Separation (vgl. Abb. 8-19, Tab A-8-9, Anhang). Zur Ermittlung der Parameter der IF_{pe}-Komponente wurden die vom aktuellen Niederschlag unbeeinflussten IF-Vor-Ereignisproben aus dem Gebiet Denzenberg und Kleiner Goldersbach sowie die während des Ereignisses kaum

Einzugsgebiet Großer Goldersbach P 1: N-Q-Ereignis 07.- 09.05.85

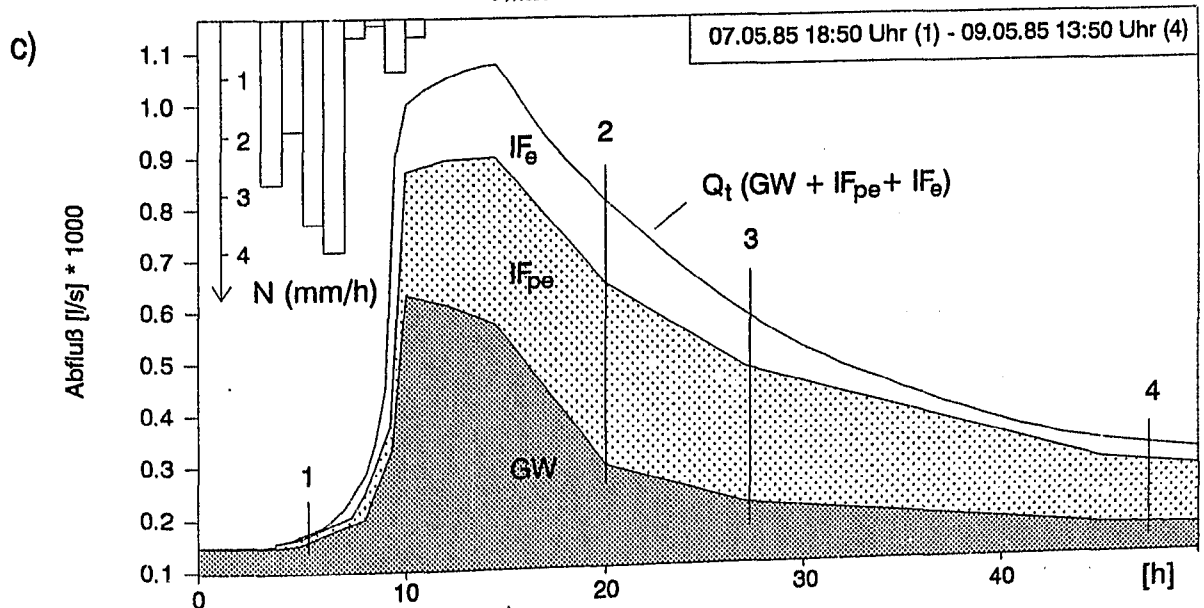
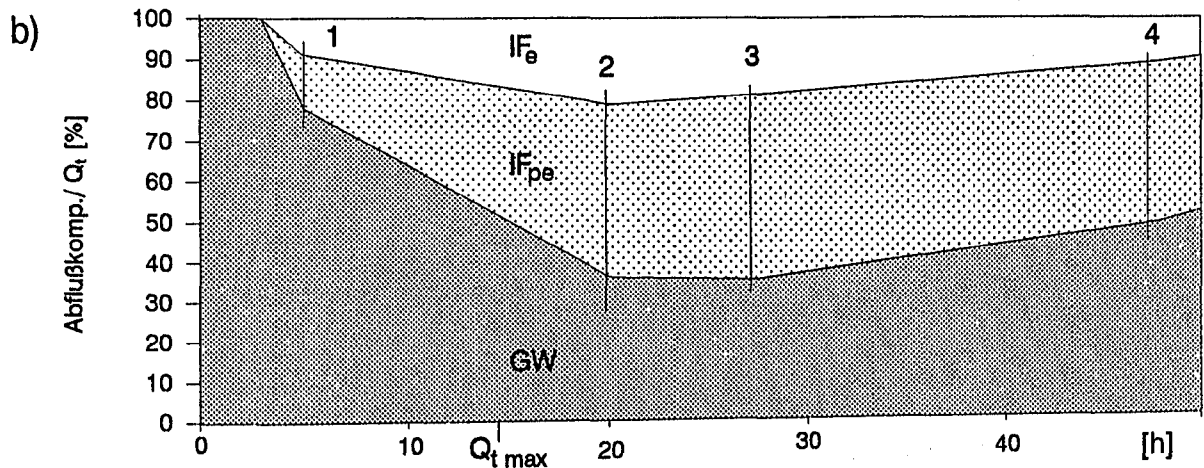
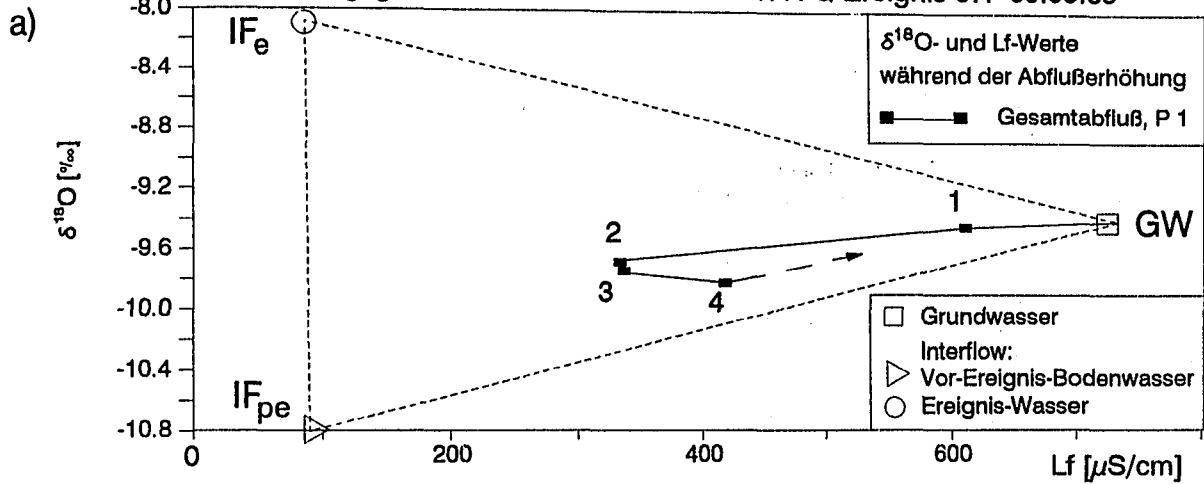


Abb. 8-19: Hochwasserereignis vom 07.05. - 09.05.1985 im Einzugsgebiet Großer Goldersbach, Pegel 1 Bebenhausen. a) Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sowie Änderungen während der Abflußerhöhung im Gesamtabfluß, b) Prozentanteile der Abflußkomponenten am Gesamtabfluß, c) Ganglinie des Gesamtabflusses und Separation in 3 Abflußkomponenten.

variierenden $Lf/\delta^{18}O$ -Werte der sehr flachen Quellen Q 6b, Q 6b1 herangezogen (vgl. Kap. 8.5.3.1). Zur Ermittlung der GW-Parameter dienten die Niedrigwasserwerte bei P 1 vom März und April 1985.

In diesem, verglichen mit P 14 und P 8 insgesamt wesentlich flacheren und um ein Vielfaches größeren Einzugsgebiet kam es zu einer Abflußerhöhung mit einem $Q_{t,max}/Q_{t,pe}$ -Verhältnis von 7,3. Dies entspricht etwa dem von P 14 ($Q_{t,max}/Q_{t,pe} = 10$). Der Spitzenabfluß (1045 l/s, 04:30 Uhr) wurde ca. 7 Stunden nach der höchsten N-Intensität, und damit ca. 4 h später als in den kleineren Einzugsgebieten, erreicht.

Wie die Ergebnisse der 3-Komponenten-Separation zeigen, ist auch bei P 1 weniger der direkt als IF_e abfließende NB als vielmehr der durch ihn ausgelöste IF_{pe} sowie der erhöhte Grundwasserabfluß am Hochwasserabfluß beteiligt (vgl. Abb. 8-19 und Tab. A-8-9, Anhang).

Die 3-Komponenten-Separation ergab 2 Stunden nach N-Beginn IF_e - und IF_{pe}/Q_t -Anteile von 9% und 13% (vgl. Zeitpunkt 1 in Abb. 8-19 und Tab. A-8-9). Wie bei P 14 und P 8 erreichten beide IF -Anteile erst nach $Q_{t,max}$ ihr Maximum, wobei IF_{pe} , ähnlich wie bei P 14, stärker anwuchs. Für IF_e konnten maximal 21% (zum Zeitpunkt 2, ca. 6 h nach $Q_{t,max}$) und für IF_{pe} maximal 46% (Zeitpunkt 3, ca. 12 h nach $Q_{t,max}$) bestimmt werden. Der GW-Anteil ging auf minimal 35 - 36% (Zeitpunkt 2 und 3) zurück.

Die größte IF_{pe} -Menge floß ca. 4-6 Stunden nach, die größte GW-Menge ca. 4 Stunden vor $Q_{t,max}$ ab. Die rasche Zu- und Abnahme der GW-Komponente ist auf einen kurzfristigen, lokalen Anstieg des GW-Spiegels, besonders auf den sandigen, gut durchlässigen Verebnungsflächen zurückzuführen. Die im Vorfluter gemessene maximale IF_e -Menge fällt mit $Q_{t,max}$ zusammen. Vor dem Beginn erneuter Niederschläge am 09.05. war der GW-Abfluß wieder nahezu auf den Vorereigniswert abgesunken, wohingegen IF_{pe} noch mit 40% an Q_t beteiligt war.

Die Anzahl der Meßwerte ist, verglichen mit den bei P 8 und P 14 erhobenen Daten, geringer. Der Lf - und $\delta^{18}O$ -Kurvenverlauf wie auch die daraus abgeleiteten prozentualen Anteile der Abflußkomponenten am Gesamtabfluß (Abb. 8-19 b) zeigen, daß zwischen den mit 1 und 2 bezeichneten Zeitpunkten, also der Zeit des Abflußmaximums ($Q_{t,max}$), keine höheren IF_e -Anteile zu erwarten sind. Auch der Konzentrationsverlauf der Hauptionen bestätigt die Ergebnisse der hier mit Lf - und $\delta^{18}O$ durchgeführten 3-Komponenten-Separation in der Weise, daß erst zwischen den mit 2 und 3 markierten Zeitpunkten die größten IF_e - bzw. IF_{pe} -Anteile am Gesamtabfluß vorliegen.

Mit Ausnahme der Kalium-Konzentration, die im Gesamtabfluß von ca 2,3 mg/l bis auf 10 mg/l sehr stark zunahm (und im gesamten Mai sehr hoch lag, vermutlich K-Auswaschung) und der NO_3 -Konzentration, die sich nur wenig änderte (da sich die Zumischung von NO_3 -reicherem NB und NO_3 -ärmerem IF überlagerte), nahmen die Konzentrationen der übrigen chemischen Parameter im Laufe der Abflußerhöhung ab und erreichten allgemein zwischen ca. 6 und 12 Stunden nach $Q_{t,max}$ ihre niedrigsten Werte.

Auch für diese Hochwasserwelle würde eine herkömmliche Abflusstrennung in 2 Komponenten wegen der kaum schwankenden $\delta^{18}O$ -Werte im Gesamtabfluß einen zu hohen GW-Anteil vortäuschen.

Der Gesamtabfluß konnte nach dem Ergebnis der 3-Komponenten-Separation mit der $Lf/\delta^{18}O$ -Methode wie folgt in die 3 Abflußkomponenten geteilt werden.

Gesamtabfluß:	Q_t	=	2,49 mm	(100%)
Teilkomponenten:	GW	=	1,14 mm	(46%)
	IF_{pe}	=	0,95 mm	(38%)
	IF_e	=	0,40 mm	(16%)

Zur Zeit von $Q_{t,max}$ verteilten sich die Anteile auf 54% GW; 29% IF_{pe} und 17% IF_e .

Der Gesamtabfluß (Q_t) am Pegel 1 war bei etwa gleicher NB-Höhe mit 2,49 mm deutlich niedriger als bei P 14 und P 8 (vgl. Tab. A-8-10, Anhang). Die maximale Abflußsteigerung ($Q_{t,max}/Q_{t,pe}$) lag mit dem Faktor 7 im Bereich von P 14 (10) und sehr stark unter dem für P 8 (128) ermittelten Wert.

Es wurde ein höherer GW/ Q_t -Anteil (46%) und insgesamt niedrigere $IF_{ges.}/Q_t$ -Anteile (54%) ermittelt als bei P 14 (38% und 62%). Bei P 8 hatte der Interflow einen wesentlich größeren Anteil von 85%.

Die für die Teilgebiete P 14 (Sandgebiet) und P 8 (Tongebiet) ermittelten Kenngrößen für den Verlauf des Hochwasserereignisses lassen sich, entsprechend der Verteilung der Deckschichtenanteile, nicht auf das übergreifende Mischgebiet P 1 hochrechnen. Daraus wird deutlich, daß nicht die u.a. aus dem geologischen Untergrund abgeleiteten Deckschichtenausbildungen allein abflußbestimmend sind (vgl. Korrelation des Q_{on} -Abflusses und der Anteile des Sandsteinkeupers, Abb. 5-4). Eine wesentliche Rolle kommt zusätzlich der Hangneigung zu, die bei P 14 und P 8 ähnlich (Anteil der flachen bis mittelsteilen Hänge mit Neigungen zwischen 3 und 15°: 54% bei P 14 und 50% bei P 8), bei P 1 jedoch insgesamt deutlich flacher (43%) ausgebildet ist (vgl. EINSELE et al., 1986b).

8.5.4.2 Hochwasserereignis vom 05. - 11. März 1986

Die für die Teileinzugsgebiete P 14 und P 8 in den Kapiteln 8.5.2.6 und 8.5.3.2 beschriebenen Rahmenbedingungen dieses Hochwasserereignisses gelten auch für das übergreifende Goldersbachgebiet am Pegel 1.

Den Input für die Abflußerhöhung bildeten ca. 17,9 mm Bestandesniederschlag (Schneeschnmelze von Februar-Niederschlägen: 13,4 mm und 4,5 mm Regenfälle, Hochrechnung der Versuchsflächenenergie) mit folgenden Kennwerten:

IF_e-Komponente:

Lf = 94 μS/cm; δ¹⁸O = -17,18‰; NB = 17,9 mm;

Die Lf- und δ¹⁸O-Werte der GW-Komponente wurden aus 4 Vor-Ereignis-Niedrigwasserproben ermittelt.

GW-Komponente:

Lf = 914 μS/cm; δ¹⁸O = -9,55‰;

Die Lf- und δ¹⁸O-Kennwerte des Vor-Ereignis-Bodenwassers wurden aus den Teilgebietsproben von P 14 und P 8 gemittelt.

IF_{pe}-Komponente:

Lf = 80 μS/cm; δ¹⁸O = -10,32‰;

Hochwasserereignis

Wie in den kleineren Teilgebieten stieg der Gesamtabfluß ab dem 05.03.1986 mit dem einsetzenden Tau- und Regenwetter zunächst leicht, ab dem 06.03 dann stärker an. Der Spitzenabfluß wurde am 07.03. mit 463 l/s erreicht. Ausgehend von dem Basisabfluß (50 l/s am 01.03.) bedeutet dies eine Abflußzunahme auf das ca. 9-fache, ähnlich wie im Sandgebiet P 14 (ca. 8-fache Erhöhung), deutlich geringer als im Tongebiet P 8 (51-fache Erhöhung). Am 11.03. war Q_t wieder auf 148 l/s zurückgegangen. Eine vergleichende Darstellung von Kenndaten der 3 Einzugsgebiete ist der Tab. A-8-10 im Anhang zu entnehmen.

Die maximale Abweichung der ¹⁸O-Gehalte im Gesamtabfluß (auf -10,66‰) fiel deutlich geringer aus als im Tongebiet P 8. Bezogen auf den Grundwasserwert (GW) lag sie auch unter der Variation im Vorfluter bei P 14. Auch die Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit fiel bei P 1 relativ zum Grundwasserwert geringer aus (P 8: 692 auf 170 μS/cm; P 14: 700 auf 275; P 1: 914 auf 425, Angaben in μS/cm). Dies weist auf niedrigere IF-Anteile am Gesamtabfluß bei P 1 hin.

Mit den Lf- und δ¹⁸O-Werten konnte eine 3-Komponenten-Separation vorgenommen werden. Die Ergebnisse sind in Abb. 8-20 sowie der Tab. A-8-10 (Anhang) zusammengefaßt. Ähnlich wie bei den Schneeschmelz-Ereignissen in den Teilgebieten P 14 und P 8 bewegten sich die Lf/δ¹⁸O-Werte im Dreieck-Diagramm nahe der GW - IF_{pe}-Mischungsgeraden.

Die IF_e-Komponente erreichte am 07. und 08.03. maximal nur 8% am Gesamtabfluß. In den Teilgebieten hatte die Input-Komponente höhere Maxima von 15% (P 8) und 18% (P 14). Dies ist vermutlich auf einen höheren Anteil von Überlandabfluß auf noch gefrorenem, vereistem Boden in den kleineren, steileren Teilgebieten zurückzuführen.

Das Schmelzwasser konnte mit zunehmendem Tauwetter in den Boden eindringen und Vor-Ereignis-Bodenwasser (IF_{pe}) verdrängen. Die IF_{pe}-Komponente erreichte mit 49% und 51% am 07.03. und 08.03. die höchsten Anteile am Gesamtabfluß. In den steileren kleineren Teilgebieten wurden höhere maximale IF_{pe}/Q_t-Anteile ermittelt (P 8: 71%; P 14: 63%). Am 11.03. betrug der IF_{pe}/Q_t-Anteil ähnlich wie bei P 14 noch 46% (P 8: 60%; P 14: 48%).

Als Folge des insgesamt geringeren IF-Anteils ging die GW-Komponente auf nur 43% und 41% (07. und 08.03.) zurück. In den Teilgebieten sank GW, um den Zeitpunkt von Q_{t,max}, auf 14% (P 8) und 32% (P 14).

Für den Zeitraum 05.03. - 11.03.1986 konnte der Gesamtabfluß wie folgt in die 3 Abflußkomponenten geteilt werden:

Gesamtabfluß:	Q _t	= 3,91 (100%)
Teilkomponenten:	GW	= 1,88 (48%)
	IF _{pe}	= 1,76 (45%)
	IF _e	= 0,27 (7%)

Die Höhe des Gesamtabflusses bei P 1 entspricht etwa der bei P 14. Im Tongebiet P 8 dagegen lag Q_t mit 5,39 mm deutlich höher.

Trotz höherem Input lag der Anteil des Gesamt-Interflow im "Mischgebiet" P 1 niedriger als im "Sandgebiet" P 14, wobei IF_{pe} etwa gleich, IF_e dagegen niedriger lag (P 1: IF_{ges}/Q_t 52%; P 14: IF_{ges}/Q_t = 63%; P 8: IF_{ges}/Q_t = 77%, vgl. Tab A-8-10).

Auch während des stärkeren Mai-Ereignisses 1985 wurden im Tongebiet P 8 die höchsten, im kleineren steilen Sandgebiet P 14 die mittleren und im großen, insgesamt flacheren Einzugsgebiet P 1 die niedrigsten Gesamt-IF-Anteile bestimmt.

Offenbar wurde die Zusammensetzung des Gesamtabflusses bei diesen beiden Ereignissen durch die Morphologie entscheidend mitbestimmt.

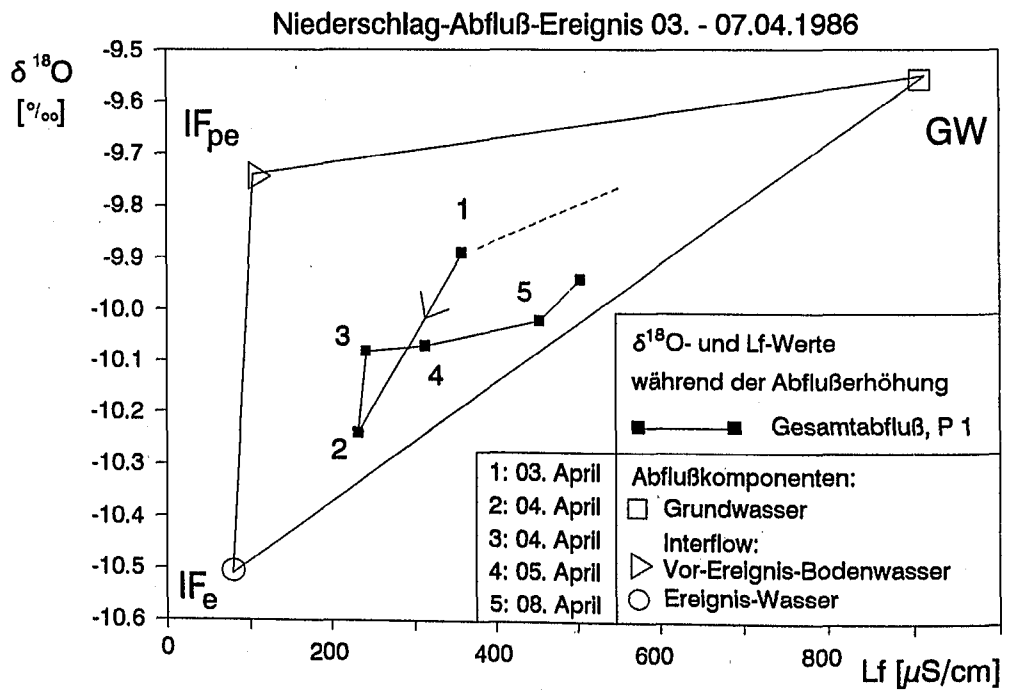
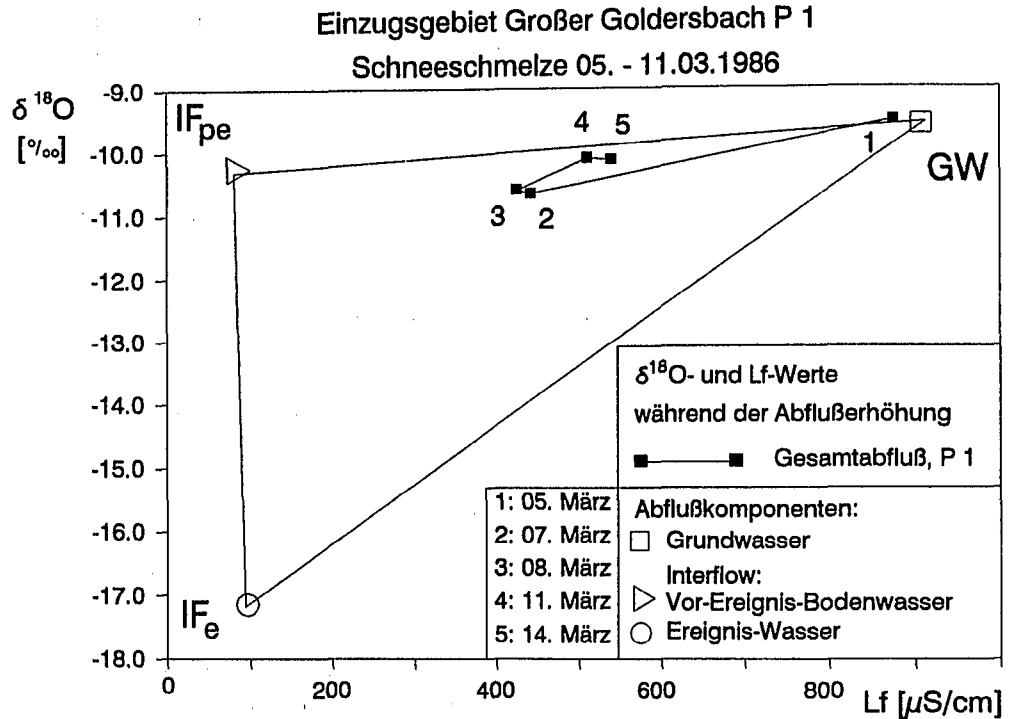


Abb. 8-20; Hochwasserereignisse vom 05.03. - 11.03.1986 (Schneeschnmelze, Graphik oben) und vom 03. - 07.-04.1986 (unten) im Einzugsgebiet Großer Goldersbach, Pegel 1 Bebenhausen. Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sowie Änderungen während der Abflüßerhöhung im Gesamtabfluß.

Die kurzfristige Grundwasserneubildung (GW+) lag bei 1,19 mm.

8.5.4.3 Hochwasserereignis vom 03. - 07. April 1986

Aus einer hohen Ausgangsbodenfeuchte infolge der vorausgegangenen Schneeschnmelze und hoher Niederschläge resultierte eine der stärkeren Ab-

flußerhöhungen der Beobachtungsperiode (vgl. Kap. 8.5.3.2).

Die Kenndaten für die Ganglinien-Separation betragen:

IF_e-Komponente:

Lf = 104 μS/cm; δ¹⁸O = -9,47‰; NB = 25,5 mm;

GW-Komponente:

Lf = 914 μS/cm; δ¹⁸O = -9,55‰;

IF_{pe}-Komponente:

Lf = 79 μS/cm; δ¹⁸O = -10,51‰;

Der Gesamtabfluß stieg von 148 l/s am 03.04. um 05:30 Uhr rasch an und erreichte um 21:30 Uhr, 2,5 h später als bei P 8, den Spitzenwert (Q_{max}) von 4660 l/s. Der Gesamtabfluß war am 08.04. auf 205 l/s zurückgegangen.

Insgesamt flossen in 5 Tagen, verglichen mit dem Abfluß in den Teilgebieten P 8 (18,9 mm) und P 14 (12,4 mm) nur 8,8 mm bei P 1 ab. Wegen der abflußbegünstigenden Bedingungen (hohe Bodenfeuchte und Niederschläge) liegt der Q/NB-Faktor (= 34%) zwar höher als bei anderen Ereignissen an dieser Meßstelle, jedoch infolge der geringen Gesamtabflußhöhe deutlich unter den Werten der Teilgebiete (P 14: 62%; P 8: 65%). Für die Ereignisse im Mai 1985 und März 1986 waren die Unterschiede weniger stark ausgeprägt (vgl. Tab. A-8-10, Anhang).

Die Lf- und δ¹⁸O-Werte erreichten Minima von 232 μS/cm und -10,24‰. Die Daten sind der Abb. 8-20 und der Tab. A-8-10, Anhang, zu entnehmen.

Für den Zeitraum 03.04. - 08.04.1986 konnte der Gesamtabfluß wie folgt in die 3 Abflußkomponenten geteilt werden:

Gesamtabfluß	Q _t	=	8,8 mm (100%)
Teilkomponenten:	GW	=	2,3 mm (26%)
	IF _{pe}	=	2,8 mm (32%)
	IF _e	=	3,7 mm (42%)

Der Anteil des gesamten Interflow am Gesamtabfluß lag mit 74% viel höher als bei der Schneeschmelze im März 1986 und dem Hochwasserereignis im Mai 1985 (52 und 54%). Der IF_{ges}/Q_t-Faktor nimmt hier im "Mischgebiet" P 1 die zunächst auch für andere Ereignisse erwartete Mittelstellung zwischen den "Ton- und Sandgebieten" P 8 und P 14 ein (P 8: 88%; P 14: 62%).

Möglicherweise wird bei sehr starken N-Q-Ereignissen wie im April 1986 die Zusammensetzung des Gesamtabflusses mehr durch die Ausbil-

dung der Deckschichten beeinflusst, wohingegen bei schwächeren Abflußerhöhungen auch der Morphologie eine tragende Rolle zugeschrieben werden muß, s.o.)

Der hier festgestellte hohe IF_e-Anteil kann nicht interpretiert werden. Infolge der vergleichsweise geringen Unterschiede der Lf- und δ¹⁸O-Werte der beiden IF-Komponenten (vgl. z.B. die wesentlich größeren δ¹⁸-Unterschiede dieser Komponenten bei der Schneeschmelze Anfang März 1986, Abb. 8-20 oben) sowie der relativ geringen Änderungen dieser Parameter im Gesamtabfluß können die Ergebnisse nicht die erwünschte Genauigkeit erreichen. Im Zeitraum um den Spitzenabfluß (zwischen den Proben 1 und 2, vgl. Abb. 8-20, unten) sind höhere IF_{pe}-Anteile denkbar.

8.5.5 Abflußverhalten und 3-Komponenten-Separationen im Großen Goldersbach und Kirnbach bei extremen Hochwassersituationen

Das N-Q-Ereignis vom 17. - 18.05.1985 ist bzgl. seiner N-Intensität und -menge sowie der daraus resultierenden Gesamtabfluß(Q_t)-Menge das stärkste der untersuchten Hochwasserwellen. Wegen der ungleichen von W nach E stark zunehmenden N-Höhen war davon besonders der östliche Schönbuch mit dem Kirnbachgebiet und Teile des Einzugsgebiets Großer Goldersbach betroffen.

Am den Stationen N 2, N 4 und N 5, vgl. Meßstellennetz, Abb. 4-2) wurden am 17.05.1985 zwischen 2 und 9 Uhr N-Höhen von 43,4, 52,4 und 50,9 mm registriert. Bei der ganz im Westen des Schönbuchs gelegenen Station N 6 wurden nur 8,9 mm aufgezeichnet. Die Hauptmenge des Niederschlags fiel in den ersten 3 Stunden (zwischen 2 und 5 Uhr) mit einer maximalen Intensität von 27 mm/h.

Infolge der hohen N-Intensitäten stimmten die Höhen von Freiland- und Bestandesniederschlag nahezu überein (I_K etwa = 0). Auf der Fichtenversuchsfläche Schlagbaumlinde S 1 wurden NB = 52 mm gemessen. Der im östlichen Schönbuch zu beobachtende Oberflächenabfluß war auf eine vollständige Sättigung des Deckschutts zurückzuführen (vgl. Abb. 5-2), da die maximale N-Intensität nicht die minimale Infiltrationsrate der Böden (bei voller Wassersättigung des Bodens = minimale Infiltrationsrate gemäß DIN 4047) überstieg. Sie liegt nach den Untersuchungen mit künstlicher Beregnung (Schwarz, 1986) zwischen 58 und 79 mm/h.

8.5.5.1 Hochwasserereignis vom 17. - 18. Mai 1985 im Einzugsgebiet Großer Goldersbach (Pegel 1)

Ausgangssituation

Vor dem N-Q-Ereignis am 17./18. Mai 1985, erreichten die Abflußspitzen im Mai maximal ca. 1 m³/s. Zwei weitere sehr starke Hochwasserereignisse mit Spitzenabflüssen zwischen ca. 6 m³/s (21./22.05.) und 10 m³/s (29./30.05.: Spitzenwert der Untersuchungsperiode) folgten im Mai (vgl. Hochwasser vom 7./8.05.1985, Kap. 8.5.4.1 sowie Abb. 5-2).

Bis zu diesem Ereignis waren nur ca. 20% des gesamten Monatsniederschlags (NB S 1: 181 mm; NB S 4: 117 mm) gefallen. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Vor-Ereignis-Niederschläge schwankten zwischen $-6,23$ und $-11,28$ ‰ und entsprachen im Mittel (NB S 1 und NB S 4: $-9,25$ ‰) etwa dem Basisabfluß- bzw. Grundwasserwert im Frühjahr ($-9,4$ ‰).

In den letzten 5 Tagen vor dem Ereignis waren nur ca. 3 mm Niederschlag gefallen, so daß sich der Basisabfluß am Pegel 1 vor Beginn des Ereignisses bei relativ niedrigen 155 l/s eingestellt hatte.

Hochwasserereignis

Die für das Gesamtgebiet gemittelte NB-Höhe des Ereignis-Niederschlags betrug 27 mm. Der Gesamtabfluß (Q_t) am Pegel 1 sprach mit ca. 0,5 h Verzögerung auf den Niederschlagsbeginn (02:00 Uhr) an, und erreichte um 06:30 Uhr den Spitzenwert von 8250 l/s (Abb. 8-21 c). Dabei führte die hohe N-Intensität von über 20 mm/h (zwischen 03:00 und 04:00 Uhr) zu einer sehr raschen Abflußsteigerung. Zwischen maximaler N-Intensität und Spitzenabfluß trat ein "time-lag" von ca. 2,5 Stunden auf.

Für die Kenndaten der Grundwasserkomponente (GW) wurden die Meßwerte des Niedrigwasserabflusses bei P 1 vom März und April 1985 herangezogen. Die Daten von IF_e , dem aktuellen Niederschlagswasser, stammen von der Versuchsfläche S 1, Schlagbaumlinde. Die Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der flachen Deckschichten-Quellen Q 6b und Q 6b1 änderten sich während dieses Ereignisses trotz starker Schüttungserhöhungen nur in einem engen Bereich. Aus den vom aktuellen Sickerwasser unbeeinflussten Proben dieser Meßstellen wurden die Daten für das Vor-Ereignis-Bodenwasser, die IF_{pe} -Komponente, gewonnen.

Die Ganglinienseparation wurde mit folgenden Kennwerten durchgeführt:

IF_e -Komponente:

Lf = 99 $\mu\text{S}/\text{cm}$; $\delta^{18}\text{O} = -8,74$ ‰;

GW-Komponente:

Lf = 730 $\mu\text{S}/\text{cm}$; $\delta^{18}\text{O} = -9,40$ ‰;

IF_{pe} -Komponente:

Lf = 105 $\mu\text{S}/\text{cm}$; $\delta^{18}\text{O} = -9,94$ ‰;

Wie aus der Darstellung der Lf/ $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (Abb. 8-21 a): Dreieck-Diagramm) hervorgeht, war eine 3-Komponenten-Separation mit der "Lf - $\delta^{18}\text{O}$ -Methode" durchführbar. Die bei P 1 gemessenen Lf/ $\delta^{18}\text{O}$ -Werte bewegten sich innerhalb des Komponentendreiecks GW - IF_e - IF_{pe} .

Während des Ereignisses konnten an mehreren Stellen im Einzugsgebiet oberflächennahe Wasseraustritte und sturzbachähnliche Überlandabflüsse (Q_{on}) beprobt werden. Ihre Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte bewegten sich im Bereich der Mischungsgeraden zwischen der IF_e -Komponente aus aktuellem Niederschlag und der IF_{pe} -Komponente aus Vor-Ereignis-Bodenwasser, wie es in den Deckschichtenquellen Q 6b und Q 6b1 beprobt wurde (vgl. auch Q_{on} -Konzentrationen im Kirnbachgebiet, Abb. A-8-13). Mit nachlassendem Niederschlag gewann älteres Bodenwasser größeren Anteil an Q_{on} und die Tracerdaten tendierten in Richtung IF_{pe} .

Für den flacheren Kurvenabschnitt von Q_{on} ($\text{IF}_e + \text{IF}_{pe}$) am 18.05. konnte mit $\alpha = 0,35 \text{ d}^{-1}$ ein Leerlaufkoeffizient des Bodenwasserspeichers ermittelt werden, der die vorangegangenen Berechnungen für den IF-Speichertyp II bestätigt (Kap. 8.3).

Die hohe Ausgangs-Bodenfeuchte im Deckschutt sowie die hohe N-Intensität führte zu einem rasch einsetzenden Überlandabfluß (bei einer vollständigen Sättigung des Deckschutts, s.o.) aus hauptsächlich aktuellem Niederschlagswasser.

Deshalb erreichte die IF_e -Komponente sehr hohe Anteile an Q_t (Zeitpunkte 1 und 2, $\text{IF}_e/Q_t = 65$ und 73%, vgl. Abb. 8-21 und Tab. A-8-12 im Anhang).

Stark vereinfachend sind für dieses Ereignis zwei Mechanismen für den Oberflächen- bzw. oberflächennahen Abfluß maßgeblich.

1.) Die gegenüber dem nachsickernden Niederschlag zu geringe Durchsickerrate zum tonreichen Basisschutt führt (bei hoher Ausgangsbodenfeuchte und vollständig gesättigtem Deckschutt) zu Überlandabfluß aus weitgehend aktuellem Niederschlagswasser (IF_e). Nach $Q_{t,max}$, spätestens seit dem Zeitpunkt 2 (09:00 Uhr, vgl. Abb. 8-21 a) und b) nimmt der Anteil dieser Komponente an Q_{on} und damit an Q_t deutlich ab.

2.) Durch den "piston flow"-Mechanismus wird

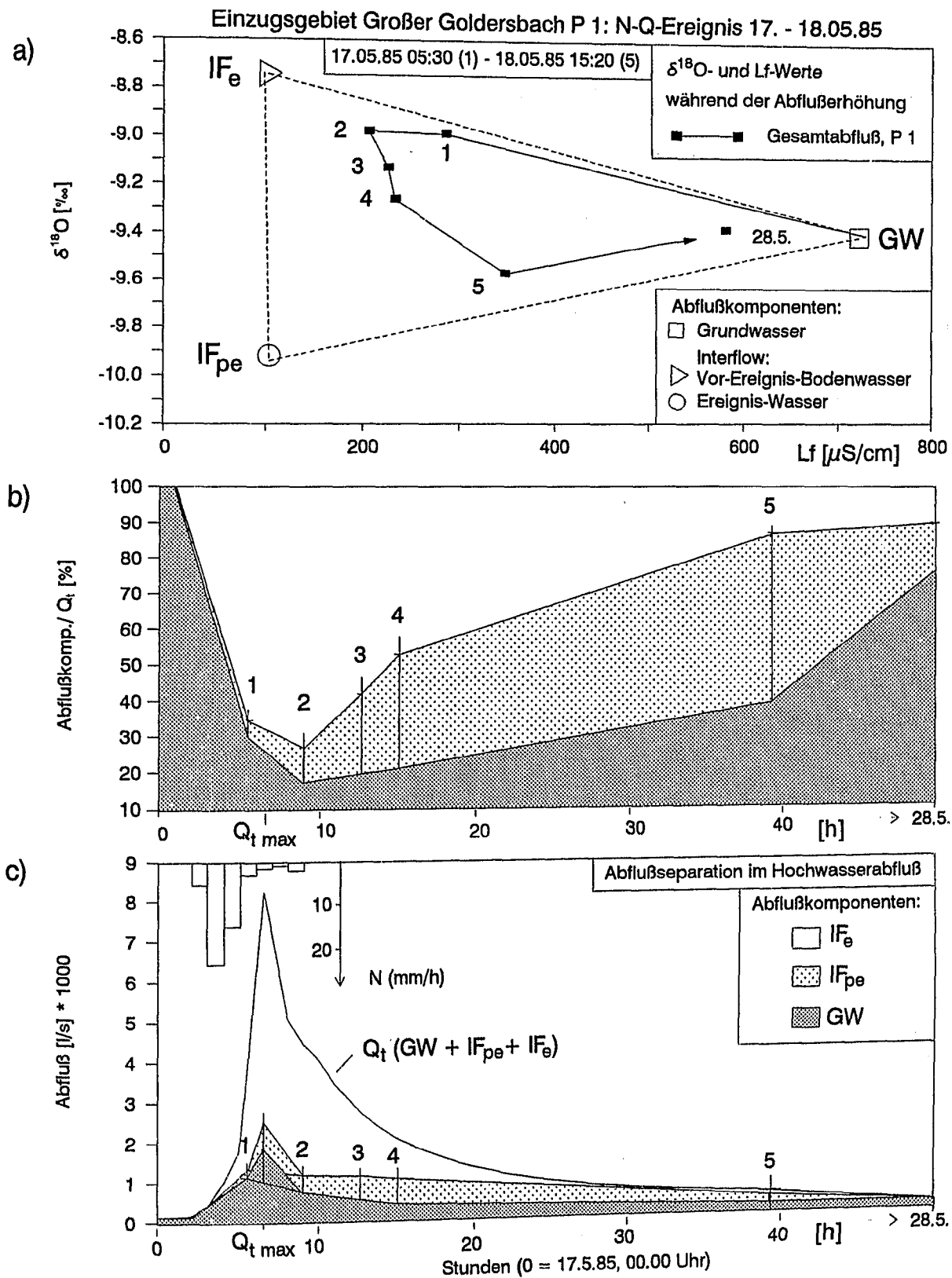


Abb. 8-21: Hochwasserereignis vom 17.05. - 18.05.1985 im Einzugsgebiet Großer Goldersbach, Pegel 1 Bebenhausen. a) Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sowie Änderungen während der Abflüßerhöhung im Gesamtabfluß, b) Prozentanteile der Abflußkomponenten am Gesamtabfluß, c) Ganglinie des Gesamtabflusses und Separation in 3 Abflußkomponenten.

Vor-Ereignis-Bodenwasser im Deckschutt mobilisiert. Diese IF_{pe} -Komponente hat im Vergleich zu IF_e zunächst nur einen geringen Anteil an Q_t , nimmt aber im Laufe der gesamten Abflüßerhöhung (gesichert ab dem Zeitpunkt 2, 2,5 Stunden nach Q_t max bis zum Zeitpunkt 5, Ende der Hochwasserwelle vor dem Einsetzen neuer Niederschläge) prozentual am Gesamtabflüß zu (Abb. 8-21 b, Tab. A-8-12, Anhang).

Der höchste IF_e/Q_t -Anteil wurde ca. 2,5 h nach Q_t max (17.05. 09:00 Uhr) ermittelt. Zur Zeit des Spitzenabflusses flossen ca. 5700 l/s aktueller Niederschlag an P 1 ab.

Das deutliche Ansteigen der GW-Komponente von 155 l/s auf ca. 1900 l/s zur Zeit des Spitzenabflusses ist auf den Effekt eines kurzfristigen lokalen Anstiegs des Grundwasserspiegels und einen piston flow-Mechanismus zurückzuführen.

Für den Zeitraum der Hochwasserwelle (17. - 18.05.1985) konnte der Gesamtabflüß Q_t wie folgt in 3 Abflüßkomponenten geteilt werden:

Gesamtabflüß	Q_t	=	7,5 mm (100%)
Teilkomponenten:	GW	=	2,1 mm (28%)
	IF_{pe}	=	1,3 mm (17%)
	IF_e	=	4,1 mm (55%)

Die Gesamtabflüßhöhe am Pegel 1 betrug im Zeitraum 17./18.05. $Q_t = 7,5$ mm. Dies entspricht einer durchschnittlichen Tages-Abflüßhöhe von 3,75 mm/d, was die stärkste der hier vorgestellten Abflüßerhöhungen bei P 1 darstellt (vgl. N-Q-Ereignis 03. - 07.04.1986: $Q_t/d = 1,76$ mm/d). Bezogen auf den Basisabflüß (0,7 mm) betrug die Abflüßerhöhung insgesamt $Q_t+ = 6,8$ mm.

Bei einer mittleren NB-Höhe von 27 mm (Gesamtgebiet) flossen ca. 25% des Niederschlags als zusätzlicher Abflüß während des Ereignisses ab (Q_t+/NB). Für das April-Ereignis 1986 wurde ein ähnlich hoher Wert von 28% ermittelt.

Diese hohen Q_t+/NB -Verhältnisse weisen auf N-Q-Ereignisse mit hoher N-Menge und -Intensität bei sehr hoher Ausgangsbodenfeuchte hin. (Noch höhere Q_t+/NB -Verhältnisse wurden für die kleineren Einzugsgebiete Denzenberg P 14 und Kleiner Goldersbach P 8 bestimmt, April 1986, 43 und 63%, vgl. Tab.A-8-10).

Der Anteil des Interflow ($IF_e + IF_{pe}$) am Gesamtabflüß ($IF_{ges}/Q_t = 72%$) liegt in dem für Typ A-Ereignisse typischen Bereich. Bei 3 weiteren N-Q-Ereignissen wurden bei P 1 54% (Mai 1985), 52% (März 1986) und 74% (April 1986) bestimmt. In den kleineren Gebieten schwankten die IF_{ges}/Q_t -Verhältnisse zwischen 62 und 88% (vgl. Tab. A-8-4 und A-8-10).

Die im Gesamtabflüß gemessenen Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe nahmen, bezogen

auf die Ausgangswerte bei Niedrigwasser, während der Abflüßerhöhung in der Regel ab. Dies ist auf die Zumischung des allgemein geringer mineralisierten Interflow zurückzuführen (vgl. Lf-ganglinie in Abb. 8-21 a).

Nur Kalium und Nitrat, welche im Interflow höher konzentriert als im Grundwasser vorliegen, nahmen während der Abflüßerhöhung zu.

Wie bei der 3-Komponentenseparation mit der Lf- $\delta^{18}O$ -Methode kommt auch hier ein anfangs starker Niederschlagsanteil (IF_e), der zunehmend durch höhere IF_{pe} -Zumischung abgelöst wird, zum Ausdruck.

8.5.5.2 Hochwasserereignis vom 17. - 18. Mai 1985 im Einzugsgebiet Kirnbach (Pegel 5/1)

Das N-Q-Ereignis am 17./18. Mai 1985 war, anders als bei P 1 (s.o.), die stärkste Abflüßerhöhung im Kirnbachgebiet während der Untersuchungsperiode. Auch hier war ein kleineres Ereignis am 07./08. Mai vorausgegangen.

Die $\delta^{18}O$ -Werte der Vor-Ereignis-Niederschläge lagen im Mittel bei $-9,17\text{‰}$ (Bestandesniederschlag NB S 2). Vor Beginn des Ereignisses betrug der Basisabflüß am Pegel 5/1 ca. 50 l/s.

Der Gesamtabflüß (Q_t) am Pegel 5/1 sprach mit weniger als 0,5 h Verzögerung auf den Niederschlagsbeginn um 03:00 Uhr an, und erreichte um 05:20 Uhr, ca. 1 h früher als bei P 1, den Spitzenwert von 9860 l/s (Bei P 1 flossen maximal 8250 l/s ab). Die Hauptmenge des Niederschlags (insgesamt 50,9 mm) fiel in den ersten beiden Stunden mit maximal 25,4 mm/h.

Dies führte zu einer sehr raschen Abflüßsteigerung. Zwischen maximaler N-Intensität und Spitzenabflüß bestand ein "time-lag" von weniger als 1 Stunde (bei P 1 ca. 2,5 h).

Für die Abflüßkomponenten-Separation wurden folgende Kennwerte herangezogen (vgl. Tab. A-8-12, Anhang). Dabei wurden für die Grundwasserkomponente (GW) die Durchschnittswerte des Niedrigwasserabflusses verwendet (vgl. Abb. 7-9). Die Daten von IF_e , dem aktuellen Niederschlagswasser, stammen von der Versuchsfläche S 2, Bärloch. Die Lf- und $\delta^{18}O$ -Werte der IF_{pe} -Komponente wurden aus dem einheitlich zusammengesetzten Vor-Ereignis-Bodenwasser (30 - 60 cm Tiefe) ermittelt.

IF_e -Komponente:	
Lf = 50 $\mu\text{S/cm}$;	$\delta^{18}O = -8,28\text{‰}$;
GW-Komponente:	
Lf = 610 $\mu\text{S/cm}$;	$\delta^{18}O = -9,30\text{‰}$;
IF_{pe} -Komponente:	
Lf = 68 $\mu\text{S/cm}$;	$\delta^{18}O = -11,03\text{‰}$;

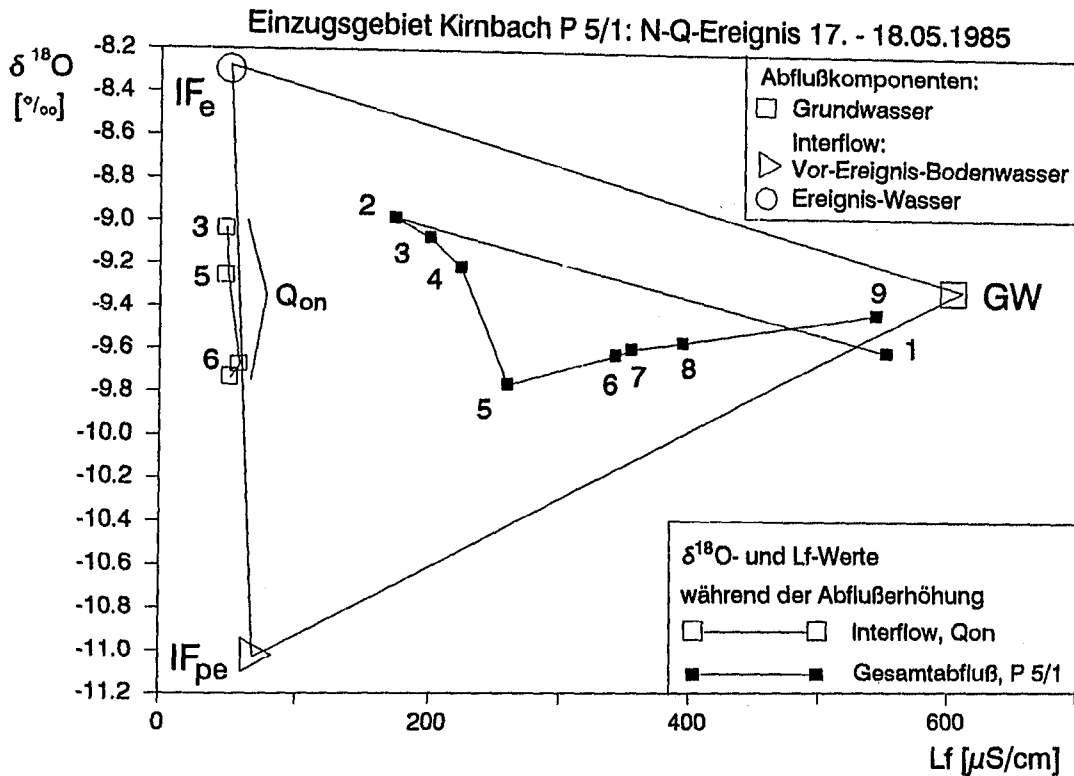


Abb. 8-22: Hochwasserereignis vom 17.05. - 18.05.1985 im Einzugsgebiet Kirnbach, Pegel 5/1. Lf- und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sowie Änderungen während der Abflußerhöhung im Gesamtabfluß.

Wie aus der Darstellung der LF/ $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (Abb. 8-22) hervorgeht, war auch hier eine 3-Komponenten-Separation mit der "LF - $\delta^{18}\text{O}$ -Methode" durchführbar.

Die während des Ereignisses aus Aufgrabungen gewonnenen Proben des Oberflächen- und oberflächennahen Abflusses Q_{on} wiesen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zwischen $-9,03\text{‰}$ und $-9,84\text{‰}$ auf. Dies weist auf ein Mischwasser der IF_e - und IF_{pe} -Komponenten hin (vgl. Abb. 8-22). Im Laufe der Abflußerhöhung tendierten die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte dabei in Richtung IF_{pe} -Komponente. Dies ist auf den zunächst größeren Einfluß des aktuellen Niederschlags (hohe N-Intensität mit Oberflächenabfluß) und einen dann mit dem Eindringen des Sickerwassers einsetzenden Mechanismus mit einer Mobilisierung und Verdrängung älteren Bodenwassers zurückzuführen (vgl. Erläuterungen des N-Q-Ereignisses am Pegel 1, Kap. 8.5.5.1).

Wie im Einzugsgebiet von P 1 führten die Ausgangsbedingungen (hohe Bodenfeuchte im Deckschutt) sowie die hohe N-Intensität zu einem sehr hohen Anteil aktuellen Niederschlagswassers als Folge eines Überlandabflusses.

Die maximalen IF_e/Q_t -Anteile erreichten 61 und 55% (Zeitpunkte 2 und 3, Abb. 8-22, Tab. A-8-12, Anhang).

Der höchste IF_e/Q_t -Anteil wurde ungefähr zum Zeitpunkt von Q_t max bestimmt. Zur Zeit des Spitzenabflusses flossen mindestens 6000 l/s (61%) aktueller Niederschlag an P 5/1 ab.

Für den Zeitraum der Hochwasserwelle (17. - 18.05.1985) konnte der Gesamtabfluß Q_t wie folgt in 3 Abflußkomponenten geteilt werden:

Gesamtabfluß:	$Q_t = 21,9 \text{ mm}$ (100%)
Teilkomponenten:	GW = 5,5 mm (25%)
	$\text{IF}_{pe} = 4,2 \text{ mm}$ (19%)
	$\text{IF}_e = 12,3 \text{ mm}$ (56%)

Ein Vergleich mit den Ergebnissen von P 1 zeigt sehr ähnliche Prozentanteile der 3 Abflußkomponenten (vgl. auch Tab. A-8-12).

Die für die gesamte Abflußerhöhung bestimmten $(\text{IF}_e + \text{IF}_{pe})/Q_t$ -Anteile erreichten bei P 5/1 75% und bei P 1 72%. Ein ähnlich hoher Wert (74%) wurde für das April 1986-Ereignis bei P 1 ermittelt, wobei in diesem Fall ein höherer IF_{pe} -Anteil vorlag. (Ähnlich hohe $\text{IF}_{ges.}/Q_t$ -Faktoren (zwischen 62 und 88%) wurden für die Ereignisse in den kleineren Einzugsgebieten ermittelt.)

Für dieses niederschlagsreichste Ereignis der Untersuchungsperiode wurden die höchsten IF_e/Q_t -

Q_t -Anteile bestimmt. Sie lagen bei 56% (P 5/1) und 55%.

Die GW/Q_t -Anteile um 25% stellen offenbar einen Minimalwert für sehr starke Abflußerhöhungen dar.

Ein Vergleich der für das N-Q-Ereignis vom 17. - 18.05.1985 ermittelten Kenndaten beider großen Einzugsgebiete (Tab. 8-16) zeigt zunächst für das Kirnbachgebiet (P 5/1) wesentlich höhere Niederschläge (P 5/1: 50,9 mm; P 1: 27 mm) und Abflusssmengen (Gesamtabfluß P 5/1: 21,9 mm; P 1: 7,5 mm) als im Gebiet Großer Goldersbach (P 1). Die auf den Basisabfluß bezogene Abflußerhöhung (Q_t+) beträgt ca. 20,9 mm bei P 5/1 und ca. 6,8 mm bei P 1. Aus diesen Daten zeigt sich jedoch, daß das Q_t + / NB-Verhältnis bei P 5/1 mit 41% wesentlich größer ist als bei P 1 (25%).

Die im Vergleich zu P 1 bei P 5/1 höheren Q_t + / NB-Verhältnisse sind einerseits auf die höhere N-Intensität und andererseits auf abflußbegünstigende Faktoren (wie tonreichere Deckschichten und größere Reliefunterschiede), die den Interflow und den Grundwasserabfluß in gleichem Verhältnis ansteigen lassen, zurückzuführen. Auch die nach einem graphischen Verfahren bestimmten Q_g - und Q_{on} -Höhen für die Abflußjahre 1985 und 1986 (vgl. Kap. 5.4.1) ergaben für das Kirnbachgebiet jeweils höhere, auf die Niederschlagshöhe bezogene, Q_g -, Q_{on} - und Q_t -Abflüsse (vgl. Abb. 5-3 und 5-4).

Tab. 8-16: Charakteristische Kenndaten des Niederschlag-Abfluß-Ereignisses vom 17.-18.05.1985 für die Einzugsgebiete Großer Goldersbach (P 1) und Kirnbach (P 5/1).

		P 1	P 5/1
NB-Höhe	(mm)	27,0	50,9
Basisabfluß	(l/s)	155	50
$Q_{t,max}$	(l/s)	8250	9862
Komponenten-Separation			
Q_t	(%)	100	100
GW	(%)	28	25
IF_{pe}	(%)	17	19
IF_e	(%)	55	56
Q_t	(mm)	7,5	21,9
GW	(mm)	2,1	5,5
IF_{pe}	(mm)	1,3	4,2
IF_e	(mm)	4,1	12,3
Q_t+	(mm)	6,8	20,9
Q_t+ /NB	(%)	25	41
$IF_{ges.}/Q_t$	(%)	72	75

8.6. Separation des Stoffaustrages in die Abflußkomponenten Interflow und Grundwasser

In Kap. 6.3 wurden die Stoffausträge in den untersuchten 6 Teilgebieten als Gesamtaustrag im Vorfluterabfluß angegeben und diskutiert. Zur Berechnung dienten gebietsspezifische Fracht-Abfluß-Beziehungen sowie die Abflußganglinien. Detaillierte Untersuchungen zum Abflußverhalten des Interflow mit einer quantitativen Interflow-Abtrennung vom Gesamtabfluß boten die Voraussetzung für eine Stofffrachtseparation mit einer gesonderten Betrachtung des Interflow.

Im folgenden werden die Ergebnisse für das überwiegend mit Laubwald bestandene, sandreichere und interflow-ärmere Gebiet Denzenberg (Pegel 14) sowie das überwiegend mit Nadelwald bestandene, ton- und interflow-reichere Gebiet Kleiner Goldersbach (Pegel 8) vergleichend dargestellt.

Im Gebiet Denzenberg flossen 1985 insgesamt 33 mm als Interflow ($Q_{on} = IF_e + IF_{pe}$) ab, was einem Anteil am Gesamtabfluß von 16% entspricht. 1986 stieg der Interflow auf 68 mm (IF/Q_t : 28%). Deutlich höhere IF/Q_t -Anteile wurden für das Gebiet P 8 ermittelt, 1985: $IF = 67$ mm oder IF/Q_t : 42% und 1986: $IF = 83$ mm oder IF/Q_t : 48% (vgl. Tab. 8-7, Kap. 8.4.3.3 sowie Tab. 8-17, nachfolgend). Die Stoff-Konzentrationen des Interflow konnten im Gebiet Denzenberg über die dort installierte Meßeinrichtung hinreichend genau für beide Untersuchungsjahre getrennt ermittelt werden. Für das Gebiet P 8 wurden Mittelwerte des zweijährigen Meßzeitraums angewendet.

Die mittleren Lösungsinhalte im Interflow, die berechneten Stoffausträge in $kg/ha \cdot a$ sowie deren Anteile am Gesamtaustrag über die Vorfluter sind der Tab. 8-17 zu entnehmen. Eine Graphik (Abb. 8-23) veranschaulicht die Ergebnisse.

Im Interflow des Gebietes von P 14 lagen die Stoffkonzentrationen im Naßjahr 1986 allgemein unter denen des Vorjahres. Nur Mg und Cl waren 1986 geringfügig höher konzentriert. Der höhere Interflow hat jedoch im allgemeinen zu insgesamt höheren Stofffrachten mit dem Interflow im Naßjahr 1986 geführt. Nur der Nitrataustrag über den Interflow blieb wenig unter dem des Vorjahres wobei der Gesamtaustrag am Pegel 14 leicht von 1,4 auf 1,6 $kg/ha \cdot a$ anstieg (Tab. 8-17).

Die überwiegend geogenen Inhaltsstoffe Ca, Mg und HCO_3 werden zu über 90% durch das Grundwasser abgeführt. Bei den aus dem atmosphärischen Eintrag stammenden Ionen NO_3 und SO_4 , aber auch bei K sind die Anteile des Stoffaustrags mit dem Interflow dagegen deutlich höher.

Tab. 8-17: Jährliche mittlere Konzentrationen im Interflow, Stoffausträge im Interflow und Gesamt-abfluß sowie Anteile der Stoffausträge mit dem Interflow am Gesamtstoffaustrag.

Einzugsgebiet Denzenberg Pegel 14

1985: $Q_t = 205$ mm; IF = 33 mm; IF/ $Q_t = 16\%$
 1986: $Q_t = 240$ mm; IF = 68 mm; IF/ $Q_t = 28\%$

		IF (mg/l)	IF (kg/ha·a)	$Q_t - P 14$ (kg/ha·a)	IF/ Q_t (%)
Q	1985				16
Q	1986				28
K ⁺	1985	2,05	0,68	2,5	27
K ⁺	1986	1,65	1,12	2,9	39
Na ⁺	1985	1,94	0,64	6,3	10
Na ⁺	1986	1,42	0,97	7,1	14
Ca ²⁺	1985	6,34	2,09	86,5	2
Ca ²⁺	1986	5,62	3,82	99,6	4
Mg ²⁺	1985	4,43	1,46	51,4	3
Mg ²⁺	1986	4,73	3,22	58,4	6
Cl ⁻	1985	2,41	0,80	8,1	10
Cl ⁻	1986	2,68	1,82	9,2	20
NO ₃ ⁻ -N	1985	0,86	0,28	1,4	20
NO ₃ ⁻ -N	1986	0,38	0,26	1,6	16
SO ₄ ²⁻ -S	1985	6,10	2,01	10,6	19
SO ₄ ²⁻ -S	1986	5,51	3,74	12,4	30
HCO ₃ ⁻	1985	26,04	8,59	500	2
HCO ₃ ⁻	1986	12,36	8,40	576	1

Einzugsgebiet Kleiner Goldersbach Pegel 8

1985: $Q_t = 161$ mm; IF = 67 mm; IF/ $Q_t = 42\%$
 1986: $Q_t = 172$ mm; IF = 83 mm; IF/ $Q_t = 48\%$

		IF (mg/l)	IF (kg/ha·a)	$Q_t - P 8$ (kg/ha·a)	IF/ Q_t (%)
Q	1985				42
Q	1986				48
K ⁺	1985	1,9	1,27	3,2	40
K ⁺	1986	1,9	1,58	3,4	46
Na ⁺	1985	1,6	1,07	10,1	11
Na ⁺	1986	1,6	1,33	10,3	13
Ca ²⁺	1985	19,7	13,20	59,0	22
Ca ²⁺	1986	19,7	16,35	67,4	24
Mg ²⁺	1985	3,6	2,41	22,0	11
Mg ²⁺	1986	3,6	2,99	24,2	12
Cl ⁻	1985	2,71	1,82	5,3	34
Cl ⁻	1986	2,71	2,25	5,8	39
NO ₃ ⁻ -N	1985	1,26	0,85	1,2	71
NO ₃ ⁻ -N	1986	1,26	1,05	1,3	81
SO ₄ ²⁻ -S	1985	10,20	6,83	15,1	45
SO ₄ ²⁻ -S	1986	10,20	8,47	16,6	51
HCO ₃ ⁻	1985	48,4	32,43	233	14
HCO ₃ ⁻	1986	48,4	40,17	261	15

Bei SO₄ liegen die Anteile mit 19 und 30% im Bereich des IF/ Q_t -Mengenverhältnisses (16 und 28%, vgl. Tab 8-17 oben). Der K-Austrag über den Interflow ist dagegen mit 27% und 39% überproportional hoch. Insgesamt ist die K-Bilanz im Gebiet Denzenberg jedoch positiv (kleinerer Austrag mit dem Vorfluter als Eintrag mit dem Freilandniederschlag, vgl. Kap. 6.4).

Die im Vergleich zum Sandgebiet "Denzenberg" höheren IF/ Q_t -Anteile im "Tongebiet" Kleiner Goldersbach führen allgemein zu deutlich größeren Stoffausträgen über den Interflow (Abb. 8-23). Die Anteile des Stoffaustrags mit dem Interflow am Gesamtstoffaustrag werden jedoch entscheidend von unterschiedlichen Stoff-Konzentrationen im Interflow und Grundwasser geprägt (vgl. dazu auch mittlere Stoffkonzentrationen im Gesamtabfluß an den Pegelmeßstellen und in den Quellwässern, Abb. 6-1 und Abb. 6-3).

So sind die im Vergleich zum Gebiet Denzenberg auffallend höheren Ca- und HCO₃-Anteile der IF-Fracht an dem Gesamtaustrag auch auf die deutlich höheren Konzentrationen des Interflow in teilweise Lößlehm- und km5-Böden zurückzuführen. Bei Mg, das im Interflow beider Gebiete ähnlich hoch konzentriert ist, ist dagegen der höhere IF/ Q_t -Anteil für das größere Verhältnis der entsprechenden Stofffrachten entscheidend.

Die im Gebiet Kleiner Goldersbach sehr viel höheren NO₃- und SO₄-Frachtanteile des Interflow sind an den höheren Nadelwaldanteil (mit größeren Einträgen) sowie an den höheren IF-Anteil am Gesamtabfluß in diesem Tongebiet geknüpft. Bei etwa gleichen K-Konzentrationen im Interflow folgen die K-Austräge von 40% IF/ Q_t (1985) und 46% IF/ Q_t (1986) etwa der Abflußverteilung (Abflußmenge IF/ $Q_t = 42$ und 48%). Sulfat liegt etwas darüber (45 und 51%). Der Anteil der NO₃-Fracht im Interflow übersteigt dagegen die Abflußverteilung bei weitem. Hier sind, wie in geringerem Maße auch bei SO₄, Ausschwemmungsvorgänge erkennbar.

Bei Na liegen die Stofffracht-Verhältnisse (IF/ Q_t) in beiden Gebieten zwischen 10 und 14%. Trotz geringfügig niedrigerer Konzentrationen im Interflow wären wegen der höheren IF-Menge im Gebiet von P 8 auch höhere Anteile der Na-Stofffracht im Interflow zu erwarten. Wegen des stärkeren Einflusses eines geogenen Lösungsaustrages im Gebiet von P 8 (höhere Na-Konzentrationen im Grundwasser führen zu einer Erhöhung der Stofffracht in Q_g) bleiben die Prozentanteile jedoch niedrig.

Die Verhältnisse der Cl-Stofffrachten von Interflow und Grundwasser korrelieren in beiden Gebieten mit den Abflußanteilen, sind aber ein-

Interflowanteil am Gesamtstoffaustrag

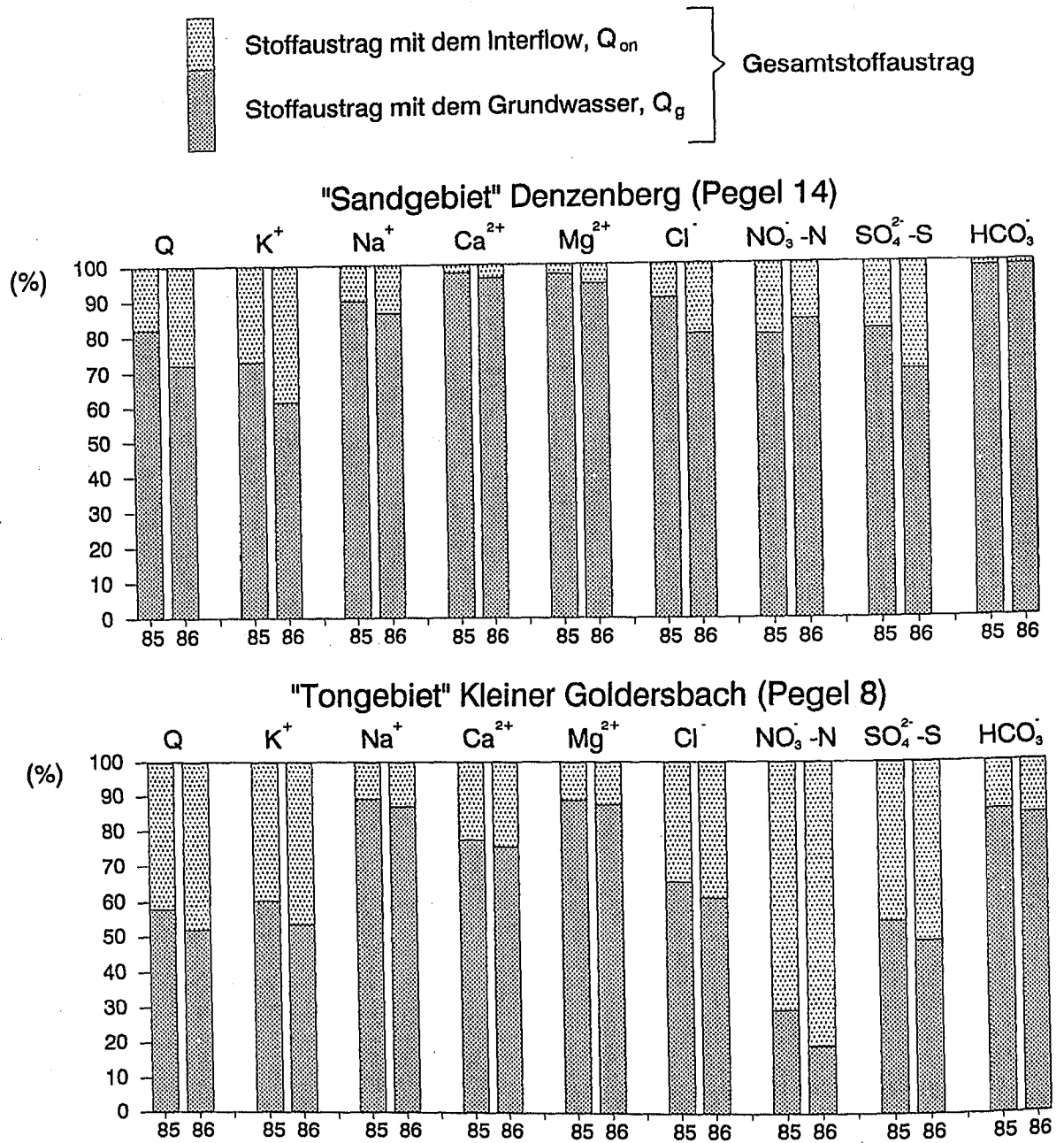


Abb. 8-23: Prozentanteile der Stoffausträge über die Abflußkomponenten Interflow ($Q_{on} = IF_o + IF_{pe}$) und Grundwasserabfluß (Q_g) in den Einzugsgebieten Denzenberg (P 14) und Kleiner Goldersbach (P 8).

heitlich niedriger. Dies hängt mit einer zunehmenden Cl-Anreicherung im Sickerwasser (erhöhte Cl-Werte im Grundwasser) und dem direkten,

raschen Abfluß (ohne Anreicherungseffekte) über Interflow zusammen.

8.7 Schlußfolgerungen und Prognosen aus den Ergebnissen der Ganglinien-Separationen

8.7.1 Typkurven für Ganglinien-Separationen von Hochwasserereignissen

Bei den Auswertungen verschiedener Hochwasserabfluß-Ganglinien konnten grundsätzlich Winter/Frühjahr-Ereignisse von denen im Sommer/Herbst unterschieden werden. Voneinander abweichende Reaktionen auf Niederschläge (Q_t /NB-Anteile) sowie verschieden hohe Anteile der 3 Abflußkomponenten Grundwasser (GW), Interflow aus älterem Bodenwasser (IF_{pe}) und Interflow aus aktuellem Niederschlagswasser (IF_e) am Gesamtabfluß (Q_t) erlaubten eine Abgrenzung in Typ A- und Typ B-Ereignisse.

Darüberhinaus konnten markante Unterschiede in der Abflußbildung und -zusammensetzung zwischen Einzugsgebieten mit sandigeren (vorwiegend über anstehendem Stubensandstein im westlichen Schönbuch) und tonigeren Deckschichten (überwiegend Knollenmergelhänge und teilweise über anstehendem Lias) festgestellt werden.

In Abb. 8-24 sind generalisierte Typkurven von Hochwasserganglinien aus Sand- und Tongebieten für die verschiedenen Ereignistypen gegenübergestellt. Unter der Q_t -Ganglinie sind jeweils die Kurven der 3 Abflußkomponenten dargestellt. Die mittleren Q_t /NB-Verhältnisse und die durchschnittlichen Prozentanteile der Abflußkomponenten sind den Balkendiagrammen zu entnehmen. Ausgewertet wurde das Abflußverhalten kleinerer und steilerer Teileinzugsgebiete (meist $\leq 1 \text{ km}^2$), da größere Gebiete allgemein keinen einheitlichen Deckschichtenaufbau aufweisen.

Das unterschiedliche Abflußverhalten der Ereignistypen ist an die jahreszeitlichen Änderungen der Bodenfeuchte geknüpft. Bei Wassergehalten, die der Feldkapazität entsprechen, d.h. bei aufgefülltem Bodenwasserdefizit, kommt es zu Typ A-Ereignissen mit kräftigen Abflußerhöhungen und hohen Anteilen von Interflow. Bei einem Gesamt-Interflow von 63% in Sand- und 81% in Tongebieten überwiegt der IF_{pe} -Anteil, der aus älterem (pre event-) Bodenwasser besteht und durch frisches Sickerwasser (aus IF_e) mobilisiert wird.

Die vergleichsweise höheren IF -Anteile in Tongebieten, die auch zu höherem Q_t führen, beruhen auf einer geringeren Durchlässigkeit der Basis des IF -führenden Deckschutts. Die Verhältnisse der Spitzenabflüsse von IF_{pe} und Q_t liegen in Tongebieten deutlich höher als in Sandgebieten.

	Sandgebiete	Tongebiete
$IF_{pe} \text{ max}/Q_t \text{ max}$	52%	60%
$IF_e \text{ max}/Q_t \text{ max}$	11%	19%

Die IF_{pe} -Maxima werden allgemein erst nach, die Höchstwerte der anderen Abflußkomponenten etwa zeitgleich mit $Q_t \text{ max}$ erreicht. Zu den höchsten IF_{pe}/Q_t -Anteilen kommt es in der Regel erst einige Stunden nach $Q_t \text{ max}$, wohingegen der höchste IF_e -Anteil $Q_t \text{ max}$ wenig vorauseilt.

Die GW-Komponente nimmt in Sandgebieten insgesamt etwas stärker zu als in Tongebieten.

Im Falle von (gegenüber dem Wassergehalt der Feldkapazität) vorherrschendem Bodenwasserdefizit kommt es in den trockeneren und wärmeren Monaten, auch bei den häufig kurzen aber intensiven sommerlichen Starkregen, meist nur zu geringen Abflußerhöhungen (Typ B-Ereignisse). Niederschlagswasser wird entweder vollständig vom Boden aufgenommen oder fließt zu einem nur sehr geringen Teil (Q_t /NB ca. 3 - 4%) in erweiterten Grobporen als IF_e ab.

In Tongebieten ist der IF/Q_t -Anteil deutlich höher als in Sandgebieten. Schrumpfrisse im tonreicheren Oberboden begünstigen hier einen raschen Interflow, der, bezogen auf den Niederschlag, zu früheren Q_t -Maxima als in Sandgebieten führt. Die $IF_e \text{ max}/Q_t \text{ max}$ -Werte liegen in Tongebieten um 65%, in Sandgebieten um 53%.

Die IF_{pe} -Komponente spielt bei Typ B-Ereignissen keine Rolle. Erst bei zunehmender Bodenfeuchte im Spätherbst beginnt wieder ein Teilabfluß aus älterem Bodenwasser.

In Abb. 8-25 und 8-26 sind typische Abflußzusammensetzungen und die Teilabflüsse (vgl. Beispiele in mm Abflußhöhe) für 2 Teileinzugsgebiete im Oberlauf des Goldersbaches (Sandgebiet P 14 und Tongebiet P 8) und das Einzugsgebiet von P 1, für Typ A- und Typ B-Ereignisse dargestellt (vgl. Erläuterungen im Text oben).

Die Abflußzusammensetzung im großen Einzugsgebiet von P 1, in dem tonige und sandige Deckschichten vorkommen (Mischgebiet), kann nicht aus den kleineren Teilgebieten hochgerechnet werden.

Das langsamere Ansprechen der Abflußerhöhung und das flachere Fallen hängen mit der Größe des Einzugsgebietes zusammen. Die von Mittelwerten der Teilgebiete abweichenden niedrigeren Q_t /NB-Verhältnisse (30% bei Typ A und ca. 2% bei Typ B-Ereignissen) und unterschiedliche Prozent-Anteile der Abfluß-Teilkomponenten hingegen sind auf das Zusammenwirken anderer abflußbestimmender Faktoren zurückzuführen (vgl. Kap. 8.7.2).

Bei Winter/Frühjahr-Ereignissen liegt der IF/Q_t -Anteil mit insgesamt 54% aufgrund des sehr viel flacheren Einzugsgebietes niedriger. Daraus folgt auch die geringere Q_t -Höhe bei einem mit

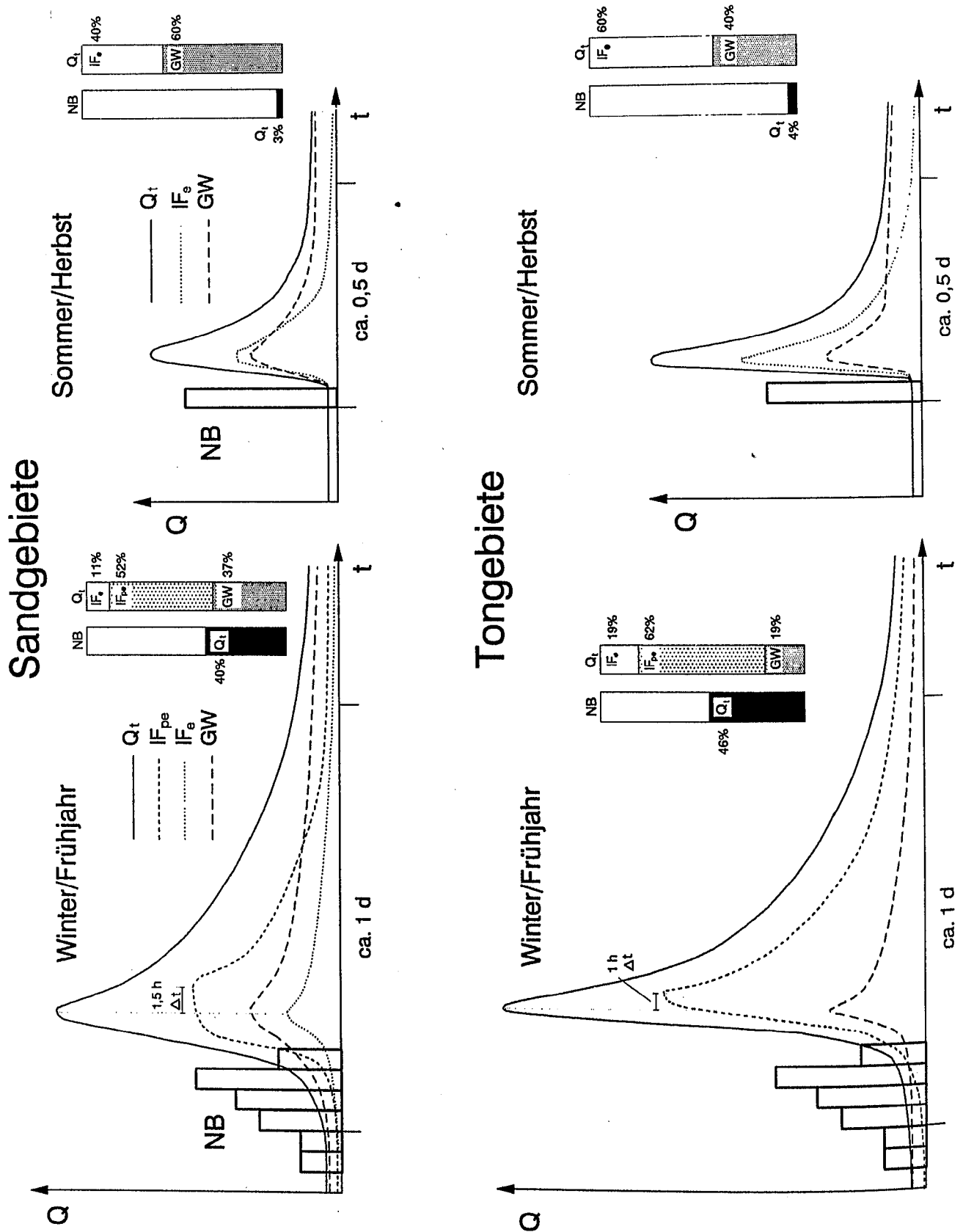
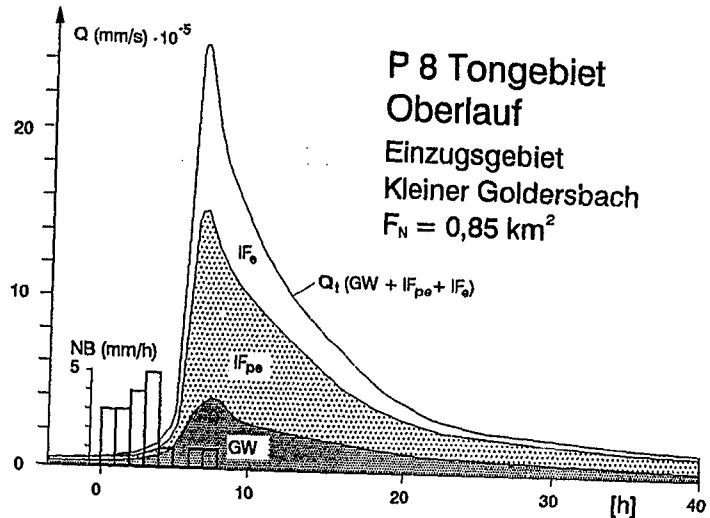
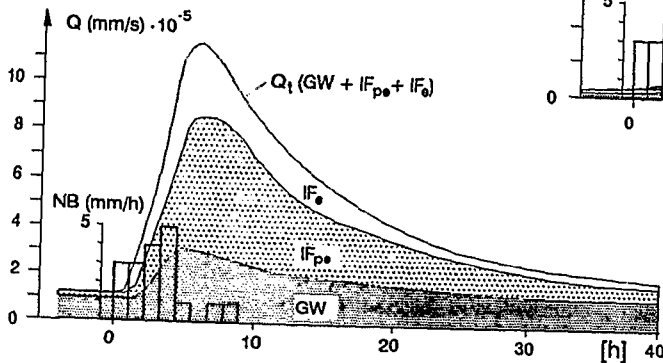


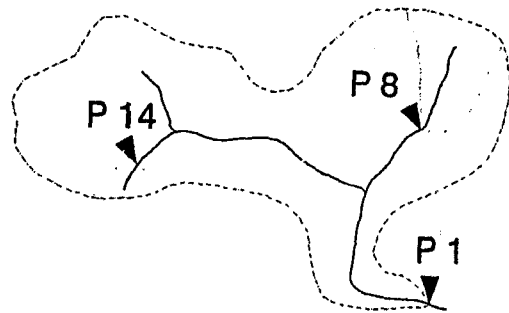
Abb. 8-24: Typkurven für die Ganglinien von Gesamtabfluß (Q_t) und den Teilabflüssen IF_e , IF_{pe} und GW sowie mittlere Q_t/NB -Verhältnisse und Anteile der Abflußkomponenten am Gesamtabfluß in Sand- und Tongebieten für Typ A- und Typ B-Ereignisse.

Winter/Frühjahr Typ A-Ereignisse

**P 14 Sandgebiet
Oberlauf
Einzugsgebiet
Denzenberg
 $F_N = 0,185 \text{ km}^2$**



**P 8 Tongebiet
Oberlauf
Einzugsgebiet
Kleiner Goldersbach
 $F_N = 0,85 \text{ km}^2$**

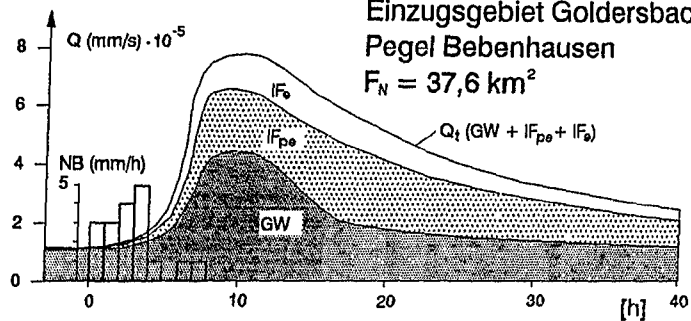


Beispiel:

Mittlere Abfluszzusammensetzung
typischer N-Q-Ereignisse in
Monaten ohne oder mit geringem
Bodenwasserdefizit

NB: 18 mm

	Q_t	IF_e	IF_{pe}	GW
		[mm]		
P 14	7,2	0,8	3,7	2,7
P 8	8,3	1,6	5,1	1,6
P 1	5,4	0,6	2,3	2,5



**P 1 Mischgebiet
Unterlauf
Einzugsgebiet Goldersbach
Pegel Bebenhausen
 $F_N = 37,6 \text{ km}^2$**

Abb. 8-25: Typische Abfluszzusammensetzung bei Winter/Frühjahr-Ereignissen (Typ A) in den kleineren Teileinzugsgebieten P 14 und P 8 mit einheitlichem Deckschichten-Aufbau und dem größeren Mischgebiet P 1.

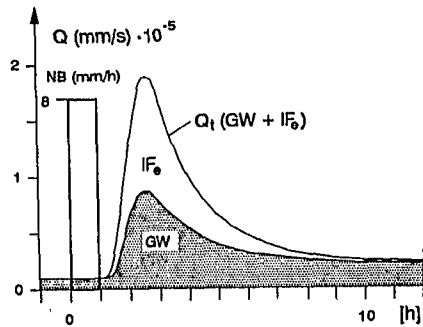
den Teilgebieten vergleichbar hohen GW-Abfluß.
Bei Sommer/Herbst-Ereignissen ist bei auch hier fehlendem IF_{pe} der IF_e/Q_t -Anteil mit 38% nur wenig niedriger als im Sandgebiet P 14. Vermutlich wirkt sich die geringere Hangneigungen bei den im Sommer besser durchlässigen Deckschichten weniger interflow-dämpfend aus.

8.7.2 Interflowhöhen in Abhängigkeit von verschiedenen abflußbestimmenden Faktoren

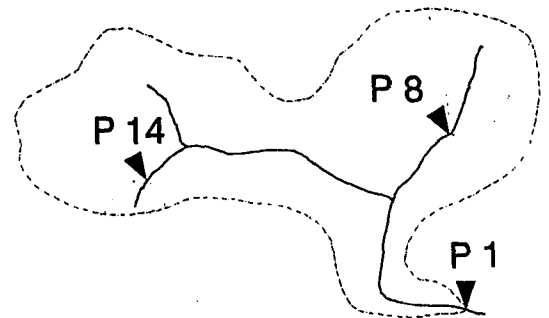
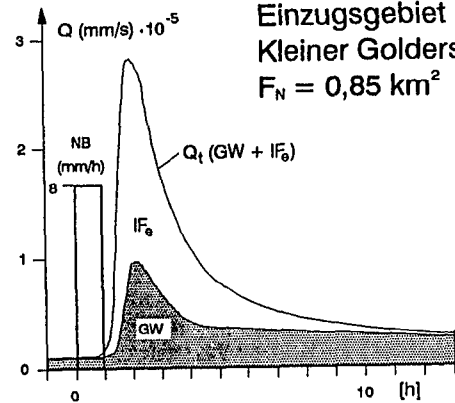
Zwischen der Höhe des Interflow (IF) bzw. des Oberflächen- und oberflächennahen Abflusses (Q_{on}) und verschiedenen abflußbestimmenden Faktoren konnten Zusammenhänge hergestellt werden, die in vereinfachter Form generell auch auf andere Gebiete übertragbar sind.

Sommer/Herbst Typ B-Ereignisse

P 14 Sandgebiet
Oberlauf
Einzugsgebiet
Denzenberg
 $F_N = 0,185 \text{ km}^2$



P 8 Tongebiet
Oberlauf
Einzugsgebiet
Kleiner Goldersbach
 $F_N = 0,85 \text{ km}^2$



Beispiel:
Mittlere Abfluszzusammensetzung
typischer N-Q-Ereignisse in Monaten
mit deutlichem Bodenwasserdefizit
(wie sommerliche Gewitterregen)

NB: 8 mm

	Q_t	IF_e	GW
	[mm]		
P 14	0,24	0,10	0,14
P 8	0,30	0,18	0,12
P 1	0,19	0,07	0,12

P 1 Mischgebiet
Unterlauf

Einzugsgebiet Goldersbach
Pegel Bebenhausen
 $F_N = 37,6 \text{ km}^2$

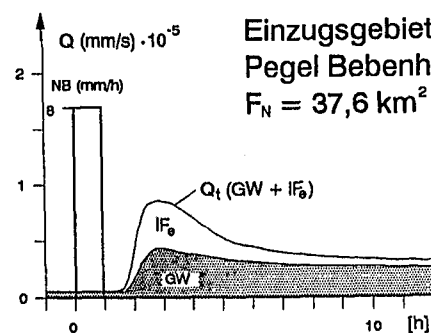


Abb. 8-26: Typische Abfluszzusammensetzung bei Sommer/Herbst-Ereignissen (Typ B) in den kleineren Teileinzugsgebieten P 14 und P 8 mit einheitlichem Deckschichten-Aufbau und dem größeren Mischgebiet P 1.

Die Ergebnisse (teilweise handelt es sich um plausible Prognosen, die aus den vorliegenden Daten abgeschätzt wurden) basieren auf Ganglienseparationen der vorliegenden Arbeit sowie auf Auswertungen von seit 1979 durchgeführten langjährigen Messungen im Rahmen des Schönbuchprojektes (EINSELE, 1986) und beziehen sich jeweils auf ganze Abflußjahre. Deshalb sind die IF-Anteile am Gesamtabfluß (Q_{on}/Q_t), verglichen mit kurzen Abschnitten einzelner Hoch-

wasserwellen wie sie in Kap. 8.7.1 dargestellt wurden, insgesamt in der Regel kleiner.

Die folgenden graphischen Darstellungen bieten die Möglichkeit, aus häufig vorliegenden oder leicht zugänglichen Daten, d.h. ohne großen Untersuchungsaufwand, die jährliche Interflowhöhe in Abhängigkeit von verschiedenen abflußregulierenden Faktoren für vergleichbare Waldgebiete außerhalb des Schönbuchs abzuschätzen bzw. zu prognostizieren.

So können z.B. die jährliche Niederschlagshöhen im Freiland (NF-Höhe) oder Gesamtabflußhöhen (Q_t) zahlreicher Einzugsgebiete von den Wasserwirtschaftsverwaltungen erhoben werden. Die Ausbildung der Deckschichten kann vereinfachend aus dem geologischen Untergrund (Ausgangssubstrat der Bodenbildung) abgeleitet und somit aus geologischen Karten entnommen werden. Topographische Karten können zur Ermittlung von mittleren Hangneigungen bzw. der Reliefenergie m/km^2 dienen. Die Bestandesart und -verteilung kann bei den zuständigen Forstverwaltungen erfragt werden.

Vergleichbare Gebiete sind in erster Linie Waldgebiete der Keuper-Lias-Bergländer des süd-deutschen Schichtstufenlandes, wovon das Untersuchungsgebiet einen kleinen Ausschnitt bildet (vgl. Abb. 1-1). Eine weitere Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieser generalisierten Niederschlag-Abflußmodelle, insbesondere für die Prognosen des Interflow-Verhaltens, ist das Vorhandensein von gegliederten periglazialen Deckschichten, wie sie auch in anderen deutschen Mittelgebirgslandschaften weit verbreitet sind.

Prinzipiell besteht eine Abhängigkeit zwischen der Niederschlagshöhe und dem Gesamtabfluß. In Waldgebieten kann nur der durch die Kroneninterzeption in Laub- und Nadelwäldern unterschiedlich stark reduzierte Niederschlag, der Bestandesniederschlag (NB), abflußwirksam werden. Deshalb sei folgende Graphik (Abb. 8-27) vorangestellt, mit der die jährliche NB-Höhe für unterschiedlich bewaldete Einzugsgebiete bei bekannter NF-Höhe bestimmt werden kann.

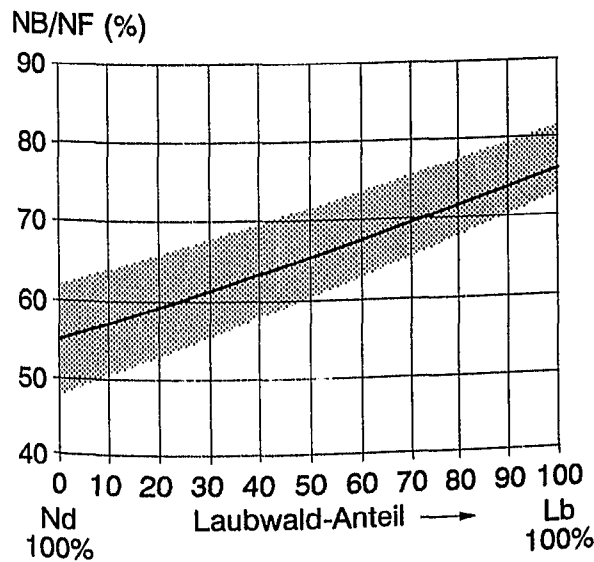


Abb. 8-27: Verhältnis von Bestandes- zu Freilandniederschlag (NB/NF) bei bekanntem Laub(Lb)- und Nadelwald(Nd)-Anteil im Einzugsgebiet. (Punktraster: Streubreite der Einzelwerte.)

Beispiel: In einem Einzugsgebiet mit $Lb = 50\%$ beträgt das mittlere NB/NF-Verhältnis ca. 65%, d.h. die NB-Höhe ca. 490 mm/a bei einem NF von 750 mm/a. Vom langjährigen Mittel abweichende NF-Höhen führen in nassen Jahren zu leicht erhöhten, in trockenen Jahren zu etwas niedrigeren NB/NF-Verhältnissen (markiert durch die mit einem Raster unterlegte Bandbreite).

Die, im Vergleich zu Lb-Gebieten, geringeren NB-Höhen in Nd-Gebieten führen zu niedrigeren Abflüssen. Dieser Zusammenhang besteht generell für den Gesamt- (Q_t) und den Grundwasserabfluß (Q_g) bzw. die jährliche GW-Neubildung (Abb. 8-28 und 8-29).

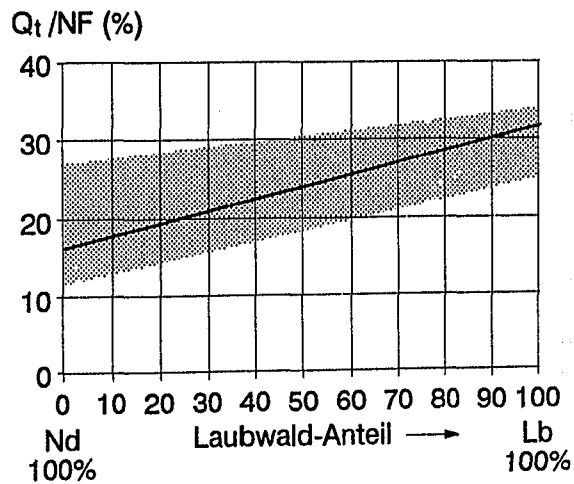


Abb. 8-28: Verhältnis von Gesamtabfluß zu Freilandniederschlag (Q_t/NF) bei bekanntem Laub(Lb)- und Nadelwald(Nd)-Anteil im Einzugsgebiet. (Punktraster: Streubreite der Einzelwerte.)

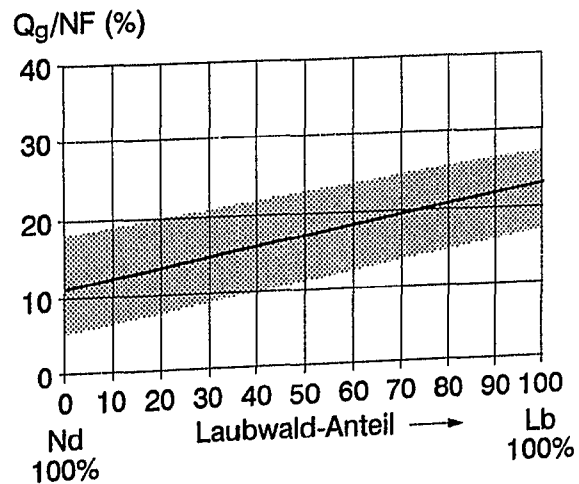


Abb. 8-29: Verhältnis von Grundwasserabfluß (Grundwasserneubildung) zu Freilandniederschlag (Q_g/NF) bei bekanntem Laub(Lb)- und Nadelwald(Nd)-Anteil im Einzugsgebiet. (Punktraster: Streubreite der Einzelwerte.)

Beispiel: In einem Gebiet mit $L_b = 80\%$ beträgt das Q_t/NF -Verhältnis im Mittel ca. 20%. Bei $NF = 750$ mm wird der Gesamtabfluß demnach bei ca. 150 mm/a liegen (Abb. 8-28). Die Grundwasserneubildung kann für diesen Fall mit durchschnittlich 98 mm/a ($Q_g/NF = 13\%$) angegeben werden (Abb. 8-29).

In nassen Jahren, verschieben sich die auf NF bezogenen Abflußfaktoren in den oberen Bereich der dargestellten Bandbreite (höherer NB bewirkt allgemein eine höhere Bodenfeuchte und reduziert damit die Pufferwirkung des Bodens).

Für den getrennt betrachteten Interflow (Q_{on} , Oberflächen- und oberflächennaher Abfluß) besteht kein vergleichbar einfacher Zusammenhang zwischen Bestandesverteilung und auf NF bezogene Q_{on} -Höhe. Neben der oben dargestellten Wirksamkeit der Abflußfaktoren Vegetation und Klima sind die Art (und Mächtigkeit) der Deckschichten, die Hangneigung und die Hanglänge und Größe des Einzugsgebietes als abflußbestimmende Faktoren mit zu berücksichtigen.

Einzugsgebiete, die sich durch mehr sandig oder mehr tonig ausgebildete Deckschichten voneinander unterscheiden, weisen spezielle Beziehungen zwischen NB -Höhe (Funktion von Vegetation und Klima) und Q_{on}/Q_t -Verhältnis auf.

Bei bekannter NF -Höhe und Bestandesverteilung kann aus Abb. 8-27 die NB -Höhe, aus Abb. 8-28 die Q_t -Höhe und aus Abb. 8-30, je nach Ausbildung der Deckschichten, die Q_{on} -Höhe abgeleitet werden.

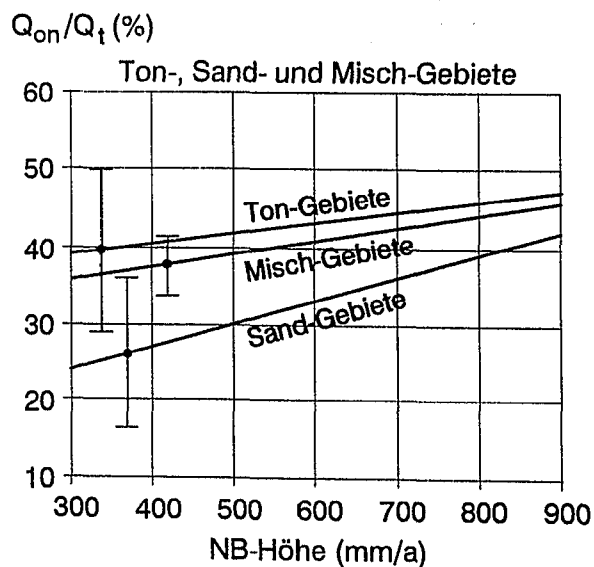


Abb. 8-30: Beziehung zwischen NB -Höhe und dem Q_{on}/Q_t -Verhältnis in Ton-, Sand und Mischgebieten. (Balken: Streubreite der Einzelwerte.)

In Tongebieten liegen die Q_{on}/Q_t -Anteile am

höchsten, Gebiete mit überwiegend sandigen Deckschichten weisen niedrigere Interflow-Anteile am Gesamtabfluß auf. Mit zunehmender NB -Höhe in nassen Abflußjahren steigen diese Abflußfaktoren in allen Gebieten an, wobei die Tongebiete die geringste Steigung aufweisen. Dies liegt an den in Tongebieten bei geringer NB -Höhe vergleichsweise hohen Q_{on} -Anteilen, die durch eine raschere Ausbildung einer Sättigungszone über dem Stauhorizont zwischen Deck- und Basischutt zustande kommen.

Beispiel: Die Q_{on}/Q_t -Verhältnisse bei einer NB -Höhe von 500 mm betragen in Tongebieten ca. 40% und in Sandgebieten ca. 30%. Bei angenommen gleichen Gesamtabflußhöhen von ca. 180 mm/a (Gebiete mit ausgeglichener Bestandesverteilung bei $NF = 750$ mm/a, Abb. 8-28) entspricht dies Interflowhöhen von ca. 74 und ca. 54 mm/a.

Die im Schönbuch und in anderen deutschen Mittelgebirgen weit verbreiteten, meist 2-gliedrigen Schuttdecken (Deckschutt über tonigerem Basischutt) weisen im allgemeinen ähnliche Mächtigkeiten auf. Insbesondere die Mächtigkeit des besser wasserleitenden Deckschutts ist durch die spätpleistozäne Auftautiefe häufig auf ca. 0,4 - 0,6 m begrenzt.

Mächtiger Schuttdecken werden prinzipiell eine größere Wassermenge speichern und damit ein länger anhaltendes Leerlaufen des Bodenwasserspeichers bewirken. Insgesamt ist, bei höherer Pufferwirkung des Bodens und geringerer Grundwasserneubildung, mit höheren Q_{on}/Q_g -Verhältnissen zu rechnen als in Gebieten mit geringer mächtigen Deckschichten.

In Einzugsgebieten mit größeren Reliefunterschieden wird Niederschlagswasser prinzipiell rascher über den Vorfluter abgeleitet und somit der Verdunstung entzogen als in flacheren Gebieten. Eine Beziehung zwischen Gesamtabfluß und Reliefenergie (RE : Quotient aus maximaler Höhendifferenz und zugehöriger Gebietsgröße, m/km^2) konnte (auch bei Korrektur der NB -Höhe durch Bildung von Q_t/NB -Faktoren und getrennter Betrachtung von Sand- und Tongebieten) nicht gefunden werden.

Zwischen der Interflowhöhe (auf die NB -Höhe bezogene Interflow-Anteile am Gesamtabfluß, $(Q_{on}/Q_t)/NB$) und der Reliefenergie bestehen dagegen Abhängigkeiten, die getrennt für Gebiete mit überwiegend tonigen oder sandigen Deckschichten in Abb. 8-31 dargestellt sind.

In Gebieten, in denen sich über weite Bereiche der Talflanken Keupermergel (km^3 und km^5) erstrecken, nehmen die Q_{on}/Q_t -Anteile mit zuneh-

mender Reliefenergie tendenziell eindeutig zu. In Gebieten mit vorwiegend Sandsteinkeuper ist dieser Trend nur teilweise vorhanden (a). Besonders in Gebieten mit hoher RE (Stufe 4 - 6) streuen die Q_{on}/Q_t -Verhältnisse stärker und bleiben z.T. auf dem niedrigen Niveau flacherer Einzugsgebiete (b). Dies liegt offensichtlich an den Auswirkungen teilweise hoher Infiltrationskapazitäten der sandigen Deckschichten, die den Einfluß zunehmender RE zurückdrängen und auch in steilen Gebieten hohe GW-Neubildungsraten zulassen.

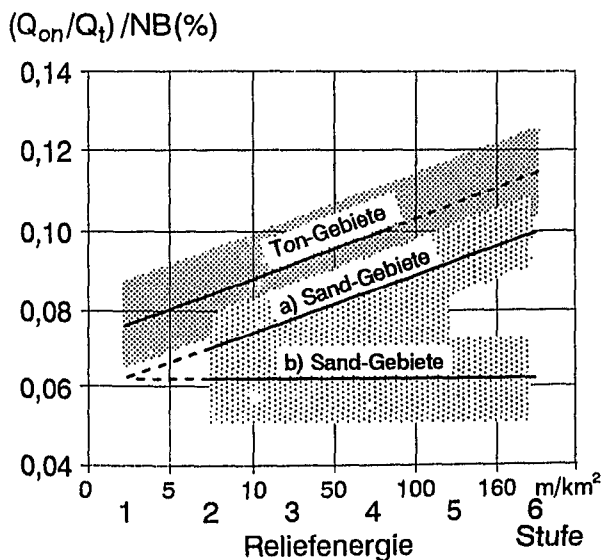


Abb. 8-31: Beziehung zwischen Reliefenergie und Interflow-Anteil am Gesamtabfluß (Q_{on}/Q_t , bezogen auf NB) in Ton- und Sandgebieten. (Punktraster: Streubreite der Einzelwerte.)

Die Größe und Form eines Einzugsgebietes sowie die abflußwirksame Hanglänge kann das Interflowverhalten prinzipiell beeinflussen. Die Daten aus dem Schönbuch lassen keine eindeutige Aussage zu der erwarteten Tendenz abnehmender Q_{on}/Q_t -Anteile mit zunehmender Einzugsgebietsgröße zu. Dies liegt darin begründet, daß kleinere Gebiete häufig auch steiler sind und aufgrund höherer Reliefenergie größere Interflow-Anteile aufweisen. Einzugsgebiete über 10 km^2 , die nach Art ihrer Deckschichten oft auch als Mischgebiete

anzusehen sind, zeigen annähernd gleiche mittlere $(Q_{on}/Q_t)/NB$ -Faktoren um 0,08% (Überlagerung verschiedener Abflußfaktoren).

Bei Einzelereignissen zeigt sich jedoch ein in kleinen Gebieten rascheres Ansprechen von Interflow mit kurzfristig relativ höheren Q_{on}/Q_t -Anteilen. Dies kann über den Quotienten Interflow-Maximum/Gesamt-Interflow, bezogen auf die NB-Höhe, $((Q_{on,max}/Q_{on,ges})/NB)$ ausgedrückt werden.

Abb. 8-32 zeigt diesen Zusammenhang für typische mittlere Hochwasserereignisse im Winter/Frühjahr. Die "Interflow-Quotienten" sind in Tongebieten höher als in Sandgebieten und gleichen sich mit zunehmender Gebietsgröße (meist einhergehend mit zunehmend ausgeglicheneren Sand-/Ton-Verhältnissen) einander an.

Dieser Trend mit ähnlichen Steigungen zeigt sich bei unterschiedlichen N-Q-Ereignissen, wobei die Höhe der IF-Quotienten stark variiert.

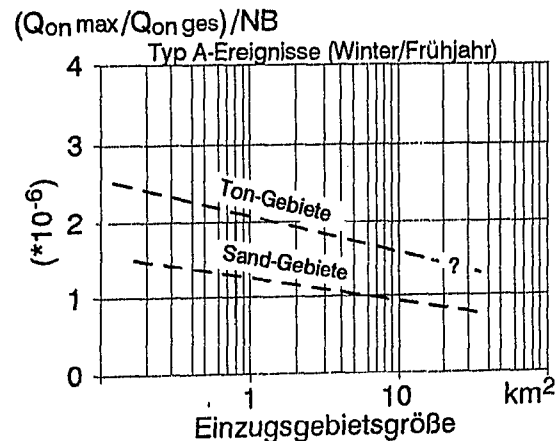


Abb. 8-32: Beziehung zwischen der Interflowstärke (kurzfristiges Interflow-Maximum/Gesamt-Interflow, $Q_{on,max}/Q_{on,ges}$, bezogen auf NB) in Ton- bzw. Sandgebieten und der Größe der Einzugsgebiete für typische N-Q-Ereignisse im Winter und Frühjahr.

Bei der Schneeschmelze, die meist mit einem über mehrere Tage verteilten (langsameren) Input verbunden ist, wird der Interflow deutlich gedämpft. Die IF-Quotienten liegen im Mittel um eine Größenordnung niedriger als bei N-Q-Ereignissen.

9. Zusammenfassung

Anknüpfend an die Ergebnisse des Forschungsvorhabens "Schönbuchprojekt" (EINSELE, 1986) wurden in dem zwischen Tübingen und Stuttgart gelegenen Keuper-Lias-Waldgebiet Schönbuch 1985 und 1986 Untersuchungen zum Wasser- und Stoffhaushalt und speziell zur Abflußbildung mit Interflow durchgeführt.

Ein besonderer Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf einer räumlichen, zeitlichen, qualitativen und quantitativen Erfassung des Interflow, der bei der vorherrschenden Deckschichtenausbildung (höher durchlässiger Deckschutt über schlechter durchlässigem Basisschutt) für die Abflußbildung (besonders Hochwasser-, Grundwasserneubildung) eine wichtige Rolle spielt.

Als rasche, nicht über den Grundwasserleiter abfließende Abfluß-Teilkomponente ist der Interflow als Teilfluß beim Stoffaustausch von wesentlicher Bedeutung.

Die Niederschlagshöhe im Freiland (NF) lag 1985 mit durchschnittlich 725 mm leicht unter, 1986 dagegen mit 1021 mm sehr stark über dem langjährigen Mittelwert von 752 mm. Der früher festgestellte Trend einer von West nach Ost zunehmenden Niederschlags-Verteilung konnte bestätigt werden. An den Meßstationen der Versuchsflächen wichen die jährlichen NF-Höhen maximal 6% vom Mittelwert des Gesamtgebietes ab.

Die für das Gebiet Großer Goldersbach, Pegel 1 Bebenhausen, das mit einem Laubwald/Nadelwald-Verhältnis (Lb/Nd) von 40/60 das gesamte Schönbuchgebiet repräsentiert, schwankten die ermittelten Verdunstungshöhen für das Normaljahr 1985 nur wenig zwischen 581 und 622 mm/a (80 - 85% der NF-Höhe). Für das Naßjahr 1986 variierten die ermittelten Verdunstungsraten stärker und lagen mit 681 - 775 mm/a, bezogen auf die NF-Höhe mit 68 - 77% von NF, niedriger.

1985 fand eine geringe Abnahme, 1986 dagegen eine sehr starke Zunahme (im Gebiet P 1: +120 mm) der Boden- und Grundwasser-Speichervorräte statt. Die Gebietsabflüsse waren jedoch im Naßjahr 1986 nur wenig (bei P 1 um 11 mm auf $Q_t = 172$ mm/a) erhöht.

Die Abflußhöhen korrelieren mit der Lb/Nd-Verteilung, d.h. mit der Höhe des Bestandesniederschlags (NB) in den Einzugsgebieten. Der Zusammenhang besteht in normal nassen Jahren für den Gesamtabfluß (Q_g), mit Grundwasser(Q_g)- und Oberflächen- bzw. oberflächennahem Abfluß (Q_{on} , Interflow), im Naßjahr 1986 nur für Q_g , da die Q_{on} -Höhen teilweise relativ wenig zugenom-

men hatten (stark erhöhte Bodenwasserreserven am Ende des Bilanzjahres).

Aus Regressionsgeraden wurden mittlere Q_g -Höhen von 80 mm/a für reine Nd- und 170 mm/a für reine Lb-Gebiete bestimmt. Die Q_{on} -Höhen lagen bei 40 - 50 mm/a in reinen Stubensandstein (km4)- bzw. bei ca. 90 mm/a in Knollenmergel (km5)-Lias-Gebieten (Unterscheidung von Sand- und Tongebieten). Die Gesamtabflußhöhen variierten in den Einzugsgebieten zwischen 92 und 212 mm (1985) bzw. zwischen 172 und 240 mm (1986).

Die ^{18}O -Gehalte im Gesamtabfluß werden durch die am Abfluß beteiligten Komponenten reguliert. Ohne die kurzfristigen Änderungen bei N-Q-Ereignissen entsprechen die $\delta^{18}O$ -Ganglinien des Basisabflusses etwa denen des Grundwassers. Sie geben ein stark gedämpftes Abbild der sinusförmigen $\delta^{18}O$ -Input-Kurve des Niederschlags bzw. des Sickerwassers wieder.

Die mit dem Exponentialmodell (EM) bestimmten mittleren Verweilzeiten (MVZ) der Sickerwässer im Deckschutt schwanken je nach Wasserwegsamkeit in der Regel zwischen ca. 0,3 a auf "Sandstandorten" und 0,6 a auf "Tonstandorten". Für den rascher abfließenden Interflow haben sich MVZ von ca. 2 Monaten (IF-Meßstelle Denzenberg) ergeben. Tiefere Sickerwässer weisen höhere MVZ zwischen 0,8 a (Sandgebiete) und über 1 bis ≥ 3 a (Tongebiete) auf. Meist über 3 a liegen die MVZ der Quellwässer.

Aufgrund der Zumischung von Interflow sind die MVZ im Vorfluterabfluß oft geringer (2 bis 3 a). Betroffen davon sind besonders das Tongebiet P 8 sowie die steileren abflußreicheren Gebiete P 14 (Sandgebiet) und P 5/1 (Mischgebiet). Im Tongebiet P 8 ist aus den $\delta^{18}O$ - und Lf-Verläufen eine im Vergleich zu den Sandgebieten deutlich höhere und länger anhaltende, niedrig mineralisierte Q_{on} -Zumischung zu erkennen.

Aus dem Schüttungsverhalten und den Änderungen der Leitfähigkeits- und $\delta^{18}O$ -Werte von Quellen konnten sowohl für den Stubensandstein- als auch für den Lias-Aquifer 2 Speichertypen mit unterschiedlichem Retentionsvermögen abgeleitet werden.

Die Auswertung von Interflow-Leerlaufkurven ergab auch im Deckschutt 2 wirksame Speichersysteme mit unterschiedlichem Retentionsvermögen: Speicher I mit α -Werten zwischen ca. 2,7 und 4,4 d⁻¹ und Speicher II mit α -Werten zwischen ca. 0,4 und 1,2 d⁻¹.

Im Labor bestimmte k_a -Werte des Deckschutts ergaben Werte von ca. 0,053 - 0,005 cm/s. Sie stimmen mit denen aus den α -Werten berechneten

Wasserleitfähigkeiten beider Speichersysteme gut überein.

Die Bestimmung der *Grundwasser-(GW)-Neubildung* erfolgte u.a. über ein graphisches, mit Hilfe der TWL durchgeführtes, Verfahren zur Trennung des Gesamtabflusses (Q_t) in Grundwasserabfluß (Q_g) und Oberflächen- bzw. oberflächennahen Abfluß (Q_{on}). Es lieferte die zuverlässigsten Ergebnisse für unterschiedliche Einzugsgebiete und Abflußjahre.

Die beste Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Q_t -Höhen wurde mit einer Modellrechnung in Anlehnung an das UHLIG-Verfahren (SAUTER, 1993) erzielt, bei dem in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe und der nutzbaren Feldkapazität, die GW-Neubildung auf Tagesbasis berechnet wird.

Im Abflußjahr 1985 schwankten die GW-Neubildungsraten zwischen 55 mm/a in einem reinen Nadelwald- (P 17, km4) und 129 mm/a in einem Laubwaldgebiet (P 14, 81% Laubwald). Für das Gebiet Großer Goldersbach P 1 (60% Nadelwald) wurden 102 mm/a bestimmt.

In den km4-Teileinzugsgebieten lagen die auf Q_t bezogenen GW-Neubildungshöhen zwischen 60 und 63%, in den km5-Lias-Teilgebieten dagegen nur zwischen 47 - 52%.

Die hohen Niederschläge von 1986 führten, bei im Vergleich zum Vorjahr sehr ähnlichen Q_g/Q_t -Verhältnissen, zu allgemein deutlich erhöhten Grundwasservorräten am Ende des Bilanzjahres.

Mit ^{18}O -Messungen konnte über die Bestimmung von mittleren Verweilzeiten und Sickerraten die GW-Neubildung ermittelt werden. Es ergaben sich überwiegend sehr gute Übereinstimmungen mit den graphisch bestimmten mittleren GW-Neubildungshöhen einer mehrjährigen Meßreihe von 1979-82 und den Werten für 1985. Beispielsweise wurden für das Gebiet Kleiner Goldersbach (P 8) 81 mm (mehrjähriger Mittelwert 84 mm) und für das Gebiet Denzenberg (P 14) 133 mm (122 mm) ermittelt.

Interflow in nennenswerter Höhe wurde in einer speziell eingerichteten Meßstelle im Sandgebiet Denzenberg nur im Winterhalbjahr registriert (monatlich 11 bis 53% der NB-Höhe). Im Tongebiet P 9 wurde ein prinzipiell ähnliches Verhalten festgestellt.

Bei der Auswertung von 28 einzelnen N-Q-Ereignissen oder Hochwasserperioden an der IF-Meßstelle konnten "Typ A"-Ereignisse im Winter/Frühjahr mit hohen IF/NB-Verhältnissen von "Typ B"-Ereignisse ab Juni bis Dezember mit sehr niedrigen IF/NB-Verhältnissen unterschieden werden.

Die verschiedenen Ereignistypen sind eng an die jahreszeitlichen Änderungen der Bodenfeuchte und die Ausbildung und Wirksamkeit eines Stauhorizontes (über der Grenze zwischen Deck- und Basisschutt) bei Bodenwassergehalten über der Feldkapazität gekoppelt.

Bei Typ A-Ereignissen sind 2 Speichertypen mit unterschiedlichem Retentionsvermögen wirksam: ein feineres Primärporensystem an der Basis des Deckschutts (enge Grobporen, Speicher II) und ein gröberes, eher im mittleren Deckschutt ausgeprägtes Sekundärporensystem (weite Grobporen, Speicher I). Bei Typ B-Ereignissen ist nur Speicher I wirksam.

Bei Typ B-Ereignissen besteht der Interflow i.w. aus aktuellem Niederschlags(event)-Wasser (IF_e). Bei Typ A-Ereignissen aus Vor-Ereignis (pre-event)-Bodenwasser (IF_{pe}).

Mit einer speziellen Methode der *Gangliniensseparation* (Dreieckdiagramme), bei der $\delta^{18}O$ - und Lf-Werte (teilweise auch Ca- und SO_4 -Konzentrationen) als Markierung unterschiedlicher Abflußkomponenten parallel verwendet werden, konnte der Gesamtabfluß im Vorfluter (Q_t) in die Komponenten Grundwasser (GW), älteres Bodenwasser (IF_{pe}) und aktuelles Niederschlagswasser (IF_e) getrennt werden.

Im "Sandgebiet" Denzenberg betragen die Interflow-Anteile am Gesamtabfluß (IF/Q_t) bei den Typ A-Ereignissen zwischen 62 und 74% und die IF_e/Q_t -Anteile 5 - 17%. Typ B-Ereignisse wiesen IF/Q_t -Verhältnisse von nur 40 - 42% mit überwiegenden IF_e -Anteilen auf.

Im Tongebiet Kleiner Goldersbach P 8 lagen die IF/Q_t -Anteile bei Typ A-Ereignissen mit 77 - 88% deutlich höher als im Sandgebiet. Auch hier dominiert der Interflow aus älterem Bodenwasser. Die IF_e/Q_t -Anteile lagen mit 11 - 28% etwas höher.

Im übergreifenden Einzugsgebiet Großer Goldersbach P 1 (Mischgebiet) wurden mit 52% - 74% insgesamt geringere IF/Q_t -Anteile bestimmt. Dies zeigt, daß die Ergebnisse der kleineren, steileren Einzugsgebiete nicht auf das Sand-Ton-Mischgebiet hochgerechnet werden können.

In den beiden übergreifenden Einzugsgebieten Großer Goldersbach (P 1) und Kirnbach (P 5/1) wurden bei unterschiedlichen NB-Höhen sehr ähnliche prozentuale Anteile der 3 Abflußkomponenten ermittelt. Ein extrem starkes N-Q-Ereignis vom 17.05.1985 ergab die Anteile GW: 25 und 28%, IF_{pe} : 17 und 19% sowie IF_e : 55 und 56%. Die abflußbegünstigenden Bedingungen im Gebiet P 5/1 führen zu höheren NB/ Q_t -Verhältnissen bei gleichmäßigem Anwachsen der Abflußkomponenten.

Bei einer Q_i -Höhe von 205 - 240 mm/a flossen 33 - 68 mm/a (16 - 28%) als Interflow ab. Der erhöhte Niederschlag von 1986 bewirkte i.w. eine Steigerung des Interflow.

Die *Konzentrationen* im Freiland(NF)- und Bestandesniederschlag (NB) liegen für alle Inhaltsstoffe im Bereich der vorausgegangenen Meßperiode (1979-82) und sind im Vergleich zu anderen Untersuchungsgebieten relativ niedrig.

Die schon früher beschriebenen Unterschiede und Konzentrationserhöhungen im NB von Fichten- und Buchenbeständen und die Konzentrationszunahmen im Sickerwasser werden bestätigt.

Die chemische Zusammensetzung des Interflow liegt in Abhängigkeit von seiner MVZ und dem Grad der Vermischung mit älterem Bodenwasser eher im Bereich des NB oder (in gut durchlässigen Bodenprofilen) mehr im Bereich des höher mineralisierten flachen Sickerwassers im Deckschutt.

Sickerwässer mit längerer Verweilzeit aus schlechter durchlässigen Bodenbereichen sind durch Transpirations-Konzentration und Lösungsverwitterung häufig schon relativ hoch mineralisiert (SO_4 -Gehalte bis 147 mg/l und NO_3 -Gehalte bis 140 mg/l in Nd-Gebieten).

Besonders in den Winter- und Frühjahrsmonaten, in denen Interflow mengenmäßig eine Rolle spielt, kann es bei Abflußerhöhungen zu erhöhten Konzentrationen von SO_4 , NO_3 und K im Gesamtabfluß kommen.

1985 ist die jährliche Stickstoff-*Deposition* in Nadelwaldgebieten im Vergleich zu 1979-82 angestiegen, in Laubwaldgebieten dagegen etwa gleich geblieben. Unabhängig von der Bestandesart ist die SO_4 -Deposition im östlichen Schönbuch deutlich zurückgegangen, im westlichen Schönbuch dagegen angestiegen. Insgesamt ist die Belastung aus atmosphärischem Eintrag im Westteil des Schönbuchs größer und nimmt weiter zu.

In allen Gebieten bestimmen die überwiegend geogenen Elemente Ca, Mg und HCO_3 gewichtsmäßig den *Stoffaustrag*. In Gebieten mit Lias-Anteilen kommt SO_4 aus der Oxidation von Pyrit-Schwefel hinzu. In den "Tongebieten" P 6 und P 8 sind die Gesamtstoffausträge geringer als in "Sandgebieten", weil der insgesamt niedriger mineralisierte Interflow dort höhere Anteile am Gesamtabfluß Q_i aufweist.

Der SO_4 -, NO_3 - und Protonenaustrag ist in Nd-Gebieten generell höher.

In den km⁴-Vergleichsgebieten P 17 (Nd) und P 14 (Lb) bewirkten die im niederschlagsreichen Jahr 1986 bei P 17 relativ höheren Interflow-Anteile im Gesamtabfluß eine SO_4 -Austragssteigerung von 11,1 kg/ha·a gegenüber einem gesteigerten Eintrag von 9,4 kg/ha·a. Bei P 14 verblieben 1,8 kg/ha·a des um 4,0 kg/ha·a erhöhten SO_4 -Eintrags im Einzugsgebiet.

Bei Stickstoff war der relative Austragszuwachs im Gebiet P 17 noch deutlicher.

Je nach Zusammensetzung der Deckschichten und den Interflow-Anteilen am Gesamtabfluß wurden die überwiegend geogenen Inhaltsstoffe Ca, Mg und HCO_3 zu 76 - 98% durch das Grundwasser abgeführt. Bei den aus dem atmosphärischen Eintrag stammenden Ionen NO_3 und SO_4 , aber auch bei K lagen die Frachtanteile des Grundwassers dagegen deutlich niedriger. Über den Interflow wurden 16 - 81% des NO_3 , 19 - 51% des SO_4 und 27 - 46% des K ausgetragen.

Bilanzuntersuchungen haben ergeben, daß der K-Gebietseintrag insgesamt der Deposition im Freiland entspricht. In den km⁴-Gebieten P 14 und P 17 wurden höhere Austräge als Einträge festgestellt, d.h., daß die Pflanzen auf eine Nährstoff-Nachlieferung aus der Silikatverwitterung angewiesen sind.

Unter Einbeziehung des eingetragenen organischen Stickstoffs (30% des Gesamt-N-Eintrags nach ULRICH, 1979), kann der N-Bedarf der Pflanzen ganz aus dem atmosphärischen Eintrag gedeckt werden. Besonders in Nd-Gebieten kommt es zu N-Überschüssen und -Anreicherungen im Bodenwasser, die bei hohem Interflow (1986) teilweise wieder ausgeschwemmt werden.

Auch der Schwefelbedarf kann aus der Niederschlagsdeposition gedeckt werden. Der SO_4 -S-Überschuß wurde in Gebieten ohne geogenes Sulfat mit 2,5 - 3 kg/ha·a im Lb-Gebiet P 14 und 8 kg/ha·a im Nd-Gebiet P 17 quantifiziert. Diese westlichen Gebiete des Schönbuchs sind zusätzlich von höheren Schadstoffeinträgen (neben SO_4 -S auch H^+ , und NO_3 -N) betroffen als die östlichen Teilgebiete, in denen eine S-Bilanzierung wegen geogener Sulfat-Anteile erschwert ist. Auch dort ist eine, wenn auch geringere, SO_4 -Speicherung anzunehmen.

Eindeutige, längerfristige Trends im NO_3 - und SO_4 -Gehalt der Grundwässer sind nicht erkennbar. Auswaschungseffekte aus der Bodenzone im niederschlagsreichen Jahr 1986 haben, im Vergleich zu jüngeren Messungen von 1989, nur vorübergehend zu höheren SO_4 -Werten geführt.

Literaturverzeichnis

- AGSTER, G. (1983): Wasserhaushalt und Stoffumsatz in den bewaldeten Keuper-Lias-Gebieten des Schönbuchs bei Tübingen. Diss. Geowiss. Fakultät, 192 S., Univ. Tübingen.
- AGSTER, G. (1986a): Wasser- und Grundwasserhaushalt der Einzugsgebiete des Schönbuchs in Abhängigkeit von Waldbestand und Untergrund. S. 85-112. In: EINSELE, G., Hrsg. (1986) l.c.
- AGSTER, G. (1986b): Ein- und Austrag sowie Umsatz gelöster Stoffe in den Einzugsgebieten des Schönbuchs. S. 343 - 356. In: EINSELE, G. Hrsg. (1986) l.c.
- AGSTER, G. und EINSELE, G. (1986): Geogene und atmogene Einflüsse auf die Beschaffenheit der Grund- und Bachwässer im Schönbuch. S. 325-342. In: EINSELE, G., Hrsg. (1986) l.c.
- ATKINSON, T. C. (1978): Techniques for measuring Subsurface flow on hillslopes. Chapter 4. In: Hillslope Hydrology, 389 S., John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto.
- BALEK, J., MOLDAN, B., PACES, T. and SKOREPA, J. (1978): Hydrological and geochemical mass balance in small forested and agricultural basins. Proc. Symp. Baden, Sept. 1978, IAHS Publ. 125: 50-58.
- BEHRENS, H., BERGMANN, H., MOSER, H., RAUERT, W., STICHLER, W., AMBACH, W., EISNER, H., und PESSL, K. (1971): Study of the discharge of alpine glaciers by means of environmental isotopes and dye tracers. Z. Gletscherkd. Glazialgeol., 7(1-2): 79-102.
- BEHRENS, H., MOSER, H., OERTER, H., RAUERT, W. und STICHLER, W. (1979): Models for the runoff from glaciated catchment area using measurements of environmental isotope contents. In: Isotope hydrology 1978. IAEA, Vienna, 829-846.
- BENECKE, P. (1978): Der Wasserumsatz eines Buchen- und eines Fichtenwaldökosystems im Hochsolling (Methoden und Ergebnisse). Aus dem Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen. 225 S., 60 Abb., 42 Tab.; Göttingen.
- BIBUS, E. (1986): Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für Bodenprofil, Standort und junge Reliefentwicklung im Schönbuch bei Tübingen. S. 27-57. In: EINSELE, G., Hrsg. (1986) l.c.
- BLAVOUX, B. (1978): Étude de cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse de doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- BLUME, H.-P., MÜNNICH, K.-O. und ZIMMERMANN, U. (1966): Das Verhalten des Wassers in einer Löß-Parabraunerde unter Laubwald. Z. Pflanzenern., Düngung und Bodenkunde 112, S. 156-168.
- BONELL, M., HENDRIKS, M. R., IMESON, A. C. and HAZELHOFF, L. (1984): The generation of storm runoff in a forested clayey drainage basin in Luxembourg. J. Hydrology 71: 53-77.
- BOTTOMLEY, D.J., CRAIG, D. and JOHNSTON, L.M. (1984): Neutralization of acid runoff by groundwater discharge to stream in Canadian precambrian shield watersheds. J. Hydrol., 75:1-26.
- BOTTOMLEY, D.J., CRAIG, D. and JOHNSTON, L.M. (1986): Oxygen-18 studies of snowmelt runoff in a small precambrian shield watershed: Implications for streamwater acidification in acid-sensitive terrain. J. Hydrol., 88: 213-234.
- BÜCKING, W. und KREBS, A. (1986): Interzeption und Bestandesniederschläge von Buche und Fichte im Schönbuch. In: EINSELE, G. (Hrsg., 1986), S. 113 - 131. In: EINSELE, G. (Hrsg., 1986) l.c.
- BÜCKING, W., EVERS, F.H. und KREBS, A. (1986): Stoffdepositionen in Fichten- und Buchenbeständen des Schönbuchs und ihre Auswirkungen auf Boden und Sickerwasser verschiedener Standorte. S. 271 - 324. In: EINSELE, G. (Hrsg., 1986) l.c.
- BÜCKING, W. (1987): Streuanlieferung und Rückführung einiger Makroelemente mit der Streu in Buchen- und Fichtenwald-Ökosystemen des Schönbuchs. In: Mitteilungen des Vereins für forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, Heft 33, S. 62 - 69, 3 Abb., 3 Tab..
- BRECHTEL, H.M., LEHNHARDT, F. (1982): Einfluß der Grundwasserabsenkung auf Waldstandorten. - DVWK-Fortbildung. 4. Fortbildungslehrgang Grundwasser. Ermittlung des nutzbaren Grundwasserdargebots. 11. bis 14. Oktober 1982 in Darmstadt.
- CALLES, U. M. (1985): Deep groundwater contribution to a small stream. Nord. Hydrol., 16(1): 45-54.
- CROUZET, E., HUBERT, P., OLIVE, PH. and SIWERTZ, E. (1970): Le tritium dans les mesures d'hydrologie de surface. Détermination expérimentale du coefficient de ruissellement. J. Hydrol., 11: 217-229.
- DIN 4047, Bl. 3 (1971): Landwirtschaftlicher Wasserbau, Begriffe, Boden.
- DIN 4049-3 (1994-10): Hydrologie.
- DINCER, T., PAYNE, B. R., FLORKOWINSKI, T., MARTINEC, J. und TONIGIORGI, E. (1970): Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18. Water Res. Research, Vo. 6, No.1: 110-124, 3 Tab., Washington D.C., USA.

- DVWK-REGELN ZUR WASSERWIRTSCHAFT H.122 (1984): Ermittlung der Stoffdeposition in Waldökosysteme - DVWK-Fachausschuß "Wald und Wasser", Bonn, 1984.
- EDEN, D., PRÖSL, K.-H. and STICHLER, W. (1982): A comparison of different methods of hydrograph analysis and estimation of storage capacities in an alpine drainage area. Hydrological research basins and their use in water resources planning. Proc. Intern. Symp. 21.-23. Sept. 1982. Bern/Schweiz.
- EDEN, D. & PRÖSL, K.-H. (1985): Die Bedeutung der ungesättigten Zone im nordalpinen Raum. Z. dt. geol. Ges., S. 331-340, 7 Abb., 1 Tab..
- EHMANN, M. (1989): Auswirkungen atmogener Stoffeinträge auf Boden- und Grundwasser sowie Stoffbilanzierungen in drei bewaldeten Einzugsgebieten im Oberen Buntsandstein (Nordschwarzwald). - Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, R.C.2, 142 S.; Tübingen.
- EINSELE, G., BOZORZAD-ARBAB, D.; HEITEL, H., KLOCK, M., SEILER, K.-P. (1969): Hydrogeologische Untersuchungen in der Buntsandsteinzone des südlichen Saarlandes. - Geol. Mitt., 9, S. 1-74, Aachen.
- EINSELE, G. (1970): Ober- und unterirdischer Abfluß im saarländischen Buntsandstein. Z. Dtsch. Geol. Gesellschaft., Sonderheft Hydrogeol. Hydrochemie, S. 43-67, Hannover.
- EINSELE, G. (1985) Ein- und Austrag gelöster und partikulärer Stoffe im Naturpark Schönbuch bei Tübingen im Vergleich zu Waldgebieten in U.S.A. Symposium "Wald und Wasser", Grafenau, Sept. 1984: 469 - 480, Naturpark-Verwaltung Bayrischer Wald.
- EINSELE, G. und H.D. SCHULZ (1973): Über den Grundwasserhaushalt im norddeutschen Flachland. Teil 1: Grundwasserneubildung bewaldeter und waldfreier Sanderflächen Schleswig-Holsteins. Bes. Mitt. Dtsch. Gewässerkundl. Jb. 36: 1-72, 23 Abb., 16 Tab., Kiel.
- EINSELE, G. (Hrsg., 1986): Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbuch - Wasser- und Stoffhaushalt, Bio-, Geo- und Forstwirtschaftliche Studien in Südwestdeutschland. 636 Seiten, zahlreiche Abbildungen und Tabellen, Verlag Chemie, Weinheim.
- EINSELE, G., AGSTER, G., BÜCKING, W. und EVERS, F.H. (1986a): Zur Problematik der Trennung "externer" und "interner" Stoffflüsse sowie der Lösungsverwitterung im Schönbuch. S.357 - 367. In: EINSELE, G. (Hrsg., 1986) l.c.
- EINSELE, G., AGSTER, G. und ELGNER, M. (1986b): Niederschlag-Bodenwasser-Abflußbeziehungen bei Hochwasserereignissen im Keuper-Lias-Bergland des Schönbuchs. S. 209-234. In: EINSELE, G., Hrsg. (1986) l.c.
- EINSELE, E., AGSTER, G., BÜCKING, W., EVERS, F.H., (1986c): Zur Problematik der Trennung "externer" und "interner" Stoffflüsse sowie der Lösungsverwitterung im Schönbuch. In: EINSELE, G., Hrsg. (1986) l.c.
- EINSELE, G. u. AGSTER, G. (1986): Überblick zur Geologie und Morphologie des Schönbuchs. In: EINSELE, G. (Hrsg., 1986), S. 1 - 13. In: EINSELE, G., Hrsg. (1986) l.c.
- ELGNER, M., KÖRNER, J., BIBUS, E. und EINSELE, G. (1986): Beispiele für Deckschuttkartierungen im Schönbuch. S. 59-66. In: EINSELE, G., Hrsg. (1986) l.c.
- ELLENBERG, H., MAYER, R. u. SCHAUERMANN, J. (Hrsg., 1986): Ökosystemforschung - Ergebnisse des Sollingprojektes 1966 - 1986. 507 Seiten, 233 Abbildungen, 145 Tabellen, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- ENGELHARDT, W. von u. E. SCHLICHTING (1980) Geowissenschaftliche Aspekte der Ökosystemforschung. Denkschrift einer Arbeitsgruppe der Deutschen Forschungsgemeinschaft (unpubliziert).
- FISCHER, M. und REHFUESS, K.E. (1988): Schwefelvorräte und -bindungsformen süddeutscher Waldböden in Abhängigkeit von der atmogenen Schwefeldeposition. Schlußbericht zum BMFT-Projekt 03 7332 4.
- FLECK, W. (1986): Bodenwasserbilanz, Streuverdunstung und Wasserverbrauch von Buche und Fichte auf Standorten und in Einzugsgebieten des Schönbuchs. S. 133-160. In: EINSELE, G., Hrsg. (1986) l.c.
- FLECK, W. (1987): Einfluß des Bodenaufbaus und des Waldbestandes auf Verdunstung und Abflußbildung im Naturpark Schönbuch bei Tübingen. Diss. 111 Seiten, zahlreiche Abbildungen und Tabellen, Univ. Tübingen.
- FLEGR, M., KÖRNER, J. und MONN, L. (1989): Schwefel-, Stickstoff- und Schwermetall - Umsatz zwischen Ökosystemkomponenten und - Verteilung auf Ökosystemkompartimente sowie deren (in-) direkte Auswirkung auf Organismen. Abschließender Forschungsbericht des BMFT-Forschungsprojekts Saurer Regen/ Waldsterben (Nr. 03 7346), Stuttgart/Tübingen 1989.
- FLEGR, M. & MONN, L. (1990): Boden- und Gewässerversauerung in gering immissionsbelasteten bewaldeten Einzugsgebieten im Naturpark Schönbuch. VDI-Berichte Nr. 837, 1990.
- FLEGR, M. (in Vorbereitung): Hydrogeologische und -chemische Untersuchungen zum Wasser- und Stoffhaushalt bewaldeter Einzugsgebiete im Vorland der Schwäbischen Alb unter besonderer Berücksichtigung des Schwefels. Diss. Inst. Geol. Paläont. Univ. Tübingen; Tübingen.
- FLÜGEL, W. A. (1979): Untersuchungen zum Problem des Interflow. Messungen der Bodenfeuchte, der Hangwasserbewegung, der Grundwassererneuerung und des Abflußverhaltens der Elsenz im Versuchsgebiet Hollmuth/Kleiner Odenwald. Heidelb. Geogr. Arbeiten, H. 56, Geogr. Inst. der Univ. Heidelberg.

- FLÜGEL, W. A. (1981): Grundwassererneuerung durch Interflow in Abhängigkeit von Bodenfeuchte und Niederschlag. Beiträge zur Hydrogeologie, Sonderheft 2: 13-35, Freiburg.
- FLÜGEL, W. A., und SCHWARZ, O. (1983): Oberflächenabfluß und Interflow auf einem Braunerde-Pelosol-Standort im Schönbuch; Ergebnisse eines Beregnungsversuchs. Allg. Forst- und Jagdzeitung 154. Jg. 3: 59-64.
- FRITZ, P., CHERRY, J.A., WEYER, K.U. & SKLASH, M. (1976): Storm runoff analyses using environmental isotopes and major ions. - Interpretation of Environmental Isotopes and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology. - Proc. Adv. Group Meeting organ. by IAEA, 27. - 31. January 1975, S. 111-130, 2 Tab., Wien.
- FÜHRER, H.-W. et al. (1988): Ergebnisse von neuen Depositionsmessungen in der Bundesrepublik Deutschland und im benachbarten Ausland. Mitteilungen des DVWK, Heft 14, 122 Seiten, zahlreiche Abbildungen und Tabellen, Bonn.
- GRIEND, A. A., VAN DE und ARWERT, J. A. (1983): The mechanism of runoff generation from an alpine glacier during a storm traced by oxygen $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. J. Hydrol., 62: 263-278.
- HAUDE, W. (1954): Zur praktischen Bestimmung der aktuellen und potentiellen Evaporation und Evapotranspiration. - Mitt. d. Deutschen Wetterdienstes 1, H. 8, S. 1 - 22, Bad Kissingen.
- HEINZELMANN, K. (1935): Tektonische Untersuchungen im Vorland der mittleren Schwäbischen Alb. - Mitt. Min.-Geol. Inst. T.H. Nr. 24, 71 S., 13 Abb., 1 Taf., Stuttgart.
- HERRMANN, A. und STICHLER, W. (1980): Groundwater - runoff relationships. Catena, 7: 251-263.
- HERRMANN, A. und STICHLER, W. (1983): Trennung von Abflußkomponenten mit Tracern bei der Betrachtung kurzfristiger Wasserbilanzen. - 15. DVWK-Fortbildungslehrgang Hydrogeologie Braunschweig, Okt. 1983.
- HEWLETT, J.D. & A.R. HIBBERT (1967): Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: Sopper, W.E. & H.W. Lull (Hrsg.): International Symposium on forest hydrology, Pennsylvania State Univ. 1965, S. 275-290, Pergamon Press, Oxford.
- HÖLTING, B. (1980): Hydrogeologie, Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. - 340 S., Stuttgart.
- HOLZWARTH, W. (1980): Wasserhaushalt und Stoffumsatz kleiner Einzugsgebiete im Keuper und Jura bei Reutlingen-Tübingen. - Diss., 201 S., 47 Abb., 22 Tab., Tübingen.
- HOOPER, R. P., und SHOEMAKER, C. A. (1986): A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. Water Resour. Res., 22 (10): 1444-1454.
- HYDROGEOLOGISCHER ATLAS der BRD im Auftrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter Gesamtleitung von Reiner Keller. 1) Karten und Erläuterungen (1978) 2) Textband (1979)
- IVANOV, A. T. (1948): Determination of the subsurface component of streamflow by use of the hydrochemical method. Transactions of the Laboratory of Hydrogeological Problems of Acad. Sci. USSR, 3: 243-246.
- KENNEDY, V.C., KENDALL, C., ZELLWEGER, G.W., WYERMANN, T.A. and AVANZINO, R.J. (1986): Determinations of the components of stormflow using water chemistry and environmental isotopes, Mattole River basin, California. J. Hydrol., 84: 107-140.
- KIRKBY, M.J. (1978): Hillslope Hydrology, 389 S., John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto.
- KÖRNER, J. (1983): Trennung verschiedener Abflußkomponenten mit Sauerstoff-18 und elektrischer Leitfähigkeit im Einzugsgebiet des Kirnbachs, Schönbuch. Diplomarbeit (Teil I) Geol. Inst. Universität Tübingen.
- KÖRNER, J., AGSTER, G., EINSELE, G. und STICHLER, W. (1986): Trennung verschiedener Abflußkomponenten mit Sauerstoff-18, Deuterium und elektrischer Leitfähigkeit in Teileinzugsgebieten des Schönbuchs. S. 181-208. In: EINSELE, G., Hrsg. (1986) l.c.
- KREBS, A. (1979): Grundwasserhaushalt und Vergleich zwischen Stoffeintrag und -austrag im Eyachtal (Buntsandstein - Schwarzwald). - Diss., 113 S., 26 Abb., 13 Tab., Tübingen.
- LADEFOGED, K. (1963): Transpiration of forest trees in closed stands. Physiol. Plant. 16, S. 378-414.
- MAILLET, E. (1905): Mécanique et physique du globe. Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. 218 S. Paris (A. Herman).
- MALOSZEWSKI, P. & ZUBER, A. (1982) Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers. 1. Models and their applicability. J. Hydrol. (57), 207 - 201.
- MALOSZEWSKI, P., RAUERT, W., STICHLER, W. and HERRMANN, A. (1983): Application of flow models in an Alpine catchment area using tritium and deuterium data. J. Hydrol., 66: 319-330. und DGM 28 [27].
- MARTINEC, J., Siegenthaler, U., OESCHGER, H. und TONGIORGI, E. (1974): New insights into the runoff mechanism by environmental isotopes. In: Isotope techniques in groundwater hydrology 1974. IAEA, Vienna, 1:129-149.
- MIYAKE, J. and TSUBOTA, H. (1963): estimation of the direct contribution of meteoric water to river waters by means of fall-out radiocaesium and radiostrontium. Proc. Symp. Radioisotopes in Hydrology, IAEA, Vienna, 425-431.

- MOSER, H. & RAUERT, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie. - Lehrbuch der Hydrogeologie, 8, 400 S., 227 Abb., 32 Tab., Berlin, Stuttgart (Borntraeger).
- MOSER, H. und STICHLER, W. (1983): Snow pack and glacier studies. In: Guidebook on nuclear techniques in hydrology. Technical report series No. 91. IAEA, Vienna 1983.
- MOSLEY, M. P. (1979): Streamflow generation in a forested watershed, New Zealand. *Water Resour. Res.*, 15(4): 795-806.
- MÜLLER, S. und LANGBEIN, W.-D. (1986): Die Bodenlandschaften und Böden des Schönbuschdes. S. 15-26. In: EINSELE, G., Hrsg. (1986) l.c.
- NEWBURY, R. W.; CHERRY, J.A. and COX, R.A. (1969): Groundwater-streamflow systems in Wilson Creek experimental watershed, Manitoba. *Can. J. Earth Sci.*, 6: 613-623.
- PINDER, G. F. and JONES, J. F. (1969): Determination of the groundwater component of peak discharge from the chemistry of total runoff. *Water Resour. Res.*, 5: 438-445.
- PISEK, A. u. TRANQUILLINI, W. (1951): Transpiration und Wasserhaushalt der Fichte bei zunehmender Luft- und Bodentrockenheit. *Phys. Plant.* 4: 1-27.
- RENGER, M., STREBEL, O. & GIESEL, W. (1974): Beurteilung bodenkundlicher, kulturtechnischer und hydrologischer Fragen mit Hilfe von klimatischer Wasserbilanz und bodenphysikalischen Kennwerten, 4. Bericht: Grundwasserneubildung. - *Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung* 15, S. 353 - 366, 3 Abb., 3 Tab., Berlin und Hamburg.
- RENGER, M. u. STREBEL, O. (1980a): Jährliche Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodennutzung und Bodeneigenschaften. *Wasser und Boden*, 32: 362 - 366.
- RICHARD, F. (1978): "Bodenphysik". Vorlesung über physikalische Eigenschaften des Bodens. ETH Zürich.
- RICHTER, W. & LILLICH, W. (1975): Abriss der Hydrogeologie. - 281 S., Stuttgart.
- RODHE, A. (1987): The origin of streamwater traced by oxygen-18. Uppsala University, Departement of Physical Geography, Division of Hydrology, Report Series A No 41, 260 pp., Appendix 73 pp., Uppsala.
- SAUTER, M. (1992): Quantification and forecasting of regional Groundwater flow and transport in a karst aquifer (Gallusquelle, Malm, SW. Germany). - TGA, C13, 1992, (Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, R.C.13, 150 S.; Tübingen.
- SAXENA, R. K. (1987): Oxygen-18 fractionation in nature and estimation of groundwater recharge. Uppsala Univ., Dept Phys. Geogr., Div. Hydrol., Report Series A 40, 152 pp.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1982): Lehrbuch der Bodenkunde. - Enke Verlag Stuttgart.
- SCHLICHTING, E. u. BLUME, H.-P. (1966): Bodenkundliches Praktikum 209 S. Parey, Hamburg, Berlin.
- SCHMIDT-WITTE, H. (1985): Feststoffaustrag und holozäne Erosion in den bewaldeten Keuper-Lias-Gebieten des Schönbusch bei Tübingen. Diss., 121 Seiten, 19 Abb., 18 Tab., Univ. Tübingen.
- SCHROEDER, H. (1970): Untersuchungen an Lysimetern mit Waldbestockung. In: *Mitteilungen des Arbeitskreises "Wald und Wasser"*, Essen.
- SCHROEDER, M. (1973): Die wägbare Lysimeteranlage Senne. Schriftenreihe d. Landesanstalt für Gewässerkunde und Gewässerschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Heft 34, 41 S., 39 Abb., 3 Tab.
- SCHWARZ, O. (1983): Berechnungsversuche zur Bestimmung des Direktabflusses, der Versickerung und der Bodenwasserspeicherung. *Forstw. Cbl.*, Jg. 102, H. 5, S. 292-294.
- SCHWARZ, O. (1986): Zum Abflußverhalten von Waldböden bei künstlicher Beregnung. S. 161 - 179. In: EINSELE, G., Hrsg. (1986) l.c.
- SEEGER, TH. (1990): Abfluß- und Stofffrachtseparation im Buntsandstein des Nordschwarzwaldes. - *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, R.C.6*, 154 S.; Tübingen.
- SKLASH, M.G., FARVOLDEN, R.N. & FRITZ, P. (1976): A conceptual model of watershed response to rainfall, developed through the use of oxygen-18 as a natural tracer. - *Can. J. Earth Sci.*, Vol. 13, S. 271-283, 8 Fig., 2 Tab., Amsterdam.
- SKLASH, M. G. and FARVOLDEN, R. N. (1979): The role of groundwater in storm runoff. *J. Hydrol.*, 43: 45-65.
- SKLASH, M.G., STEWART, M.K. and PEARCHE, A.J. (1986): Storm runoff generation in humid headwater catchments, 2. A case study of hillslope and low-order stream response. *Water Resour. Res.*, 22(8): 1273 - 1282.
- STICHLER, W. und HERRMANN, A. (1978): Verwendung von Sauerstoff-18-Messungen für hydrologische Bilanzierungen. *Deutsche Gewässerkd. Mitt.* 22, H. 1: 9-13, 7 Abb., Koblenz.
- STICHLER, W. und HERRMANN, A. (1982): Surface and subsurface runoff modeling using environmental isotopes. In: SINGH, V.P. (Ed.), *Rainfall-runoff relationship*, Littleton Col., USA (1982) - Proc. of the Int. Symp. on rainfall-runoff modeling, Mississippi State Univ., May 1984, p. 245-260.

- STICHLER, W., MOSER, H. & SCHRÖDER, M. (1984): Measurements of seepage velocity in a sand lysimeter by means of ^{18}O -content. Recent Investigations in the Zone of Aeration. Proceedings of the Int. Symp. Munich, October 1984, 191 - 204.
- STICHLER, W. und HERRMANN, A. (1985): Application of environmental isotope techniques in water balance studies of small basins- IAHS Publ. no. 148 (1985), p. 93-112, Wallingford, UK (IAHS Press) - Proc. of the IAHS workshop on new approaches in water balance coputatuons at IUGG Hamburg, Aug. 1983.
- TAGUTSCHI, Y. (1982): Effects of urbanization on samll rivers. Beiträge zur Hydrologie, 3: 203-218.
- TEUTSCH, G. (1988): Grundwassermodelle im Karst: Praktische Ansätze am Beispiel zweier Einzugsgebiete im Tiefen und Seichten Malmkarst der Schwäbischen Alb. - Diss., 205 Seiten, Univ. Tübingen.
- UHLIG, S. (1954): Berechnung der Verdunstung aus klimatologischen Daten. - Mitt. d. Deutschen Wetterdienstes 1, S. 1 - 24, Bad Kissingen.
- ULRICH, B., MAYER, R. u. KHANNA, P.K. (1979): Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. Schriftenr. Forstl. Fak. Univ. Göttingen und Niedersächs. Forstl. Versuchsanstalt, Bd. 58, 291 Seiten, 32 Abbildungen, 51 Tabellen, Frankfurt.
- ULRICH, B. (1983): Interaction of forest canopies with atmospheric constituents. In: ULRICH, B. & J. PAN-KRATH (Hrsg.): Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht.
- VILLINGER, E. (1969): Karsthydrologische Untersuchungen auf der Reutlinger Alb (Schwäbischer Jura). - Jh. Geol. Landesamt Baden-Württ. 11, S. 201-227, 22 Abb., Freiburg i. Br.
- VISOCKY, A. P (1970): Estimating the ground-water contribution to storm runoff by the electrical conductance method. Groundwater, 8(2): 5 - 10.
- WUNDT, W. (1953): Gewässerkunde. - 320 S., 183 Abb.; Berlin (Springer).
- WUNDT, W. (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. In: GRAHMANN, R.: Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung. Forsch. Dtsch. Landeskd. 104: 47-54, Remagen.
- ZEKSTER, I. S. (1963): Role of artesian water in feeding large rivers as exemplified by the middle and lower reaches of the Neman River. Soviet Hydrol., 4: 94-98.

Anhang - Abbildungen

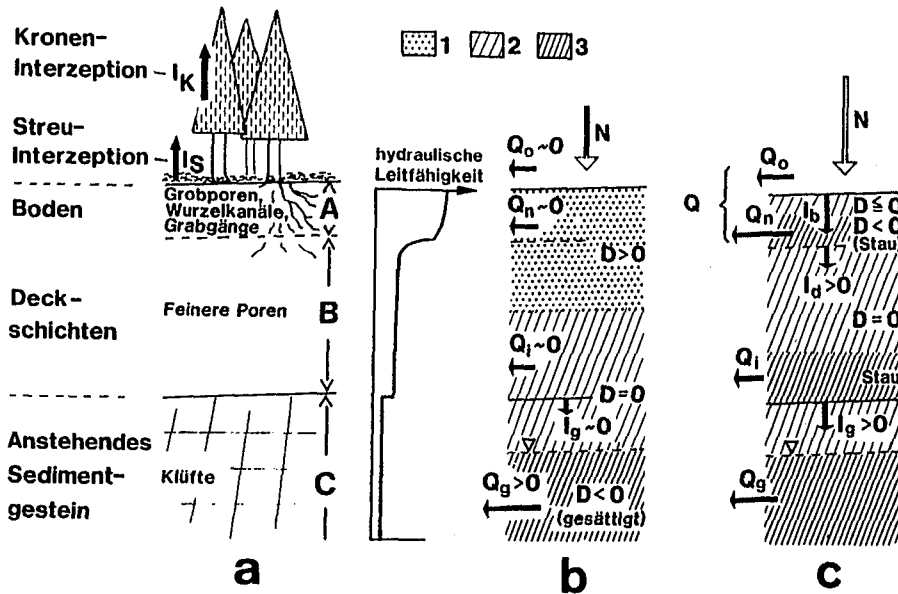


Abb. A-2-1: Stark vereinfachtes Schema zur Erläuterung (a) der mehrschichtigen "Bodenprofile" im Schönbuch sowie (b und c) der vertikalen und lateralen Fließbewegungen Q in den Schichten A, B und C, die durch ein Niederschlagsereignis N bei (b) niedrigem oder (c) höherem Ausgangswassergehalt ausgelöst werden.

- 1 = Bodenwasserdefizit $D > 0$; 2 = Bodenwassergehalt entspricht der Feldkapazität ($D = 0$);
- 3 = Bodenzone wassergesättigt ($D < 0$).

Aus EINSELE et al., 1986b.

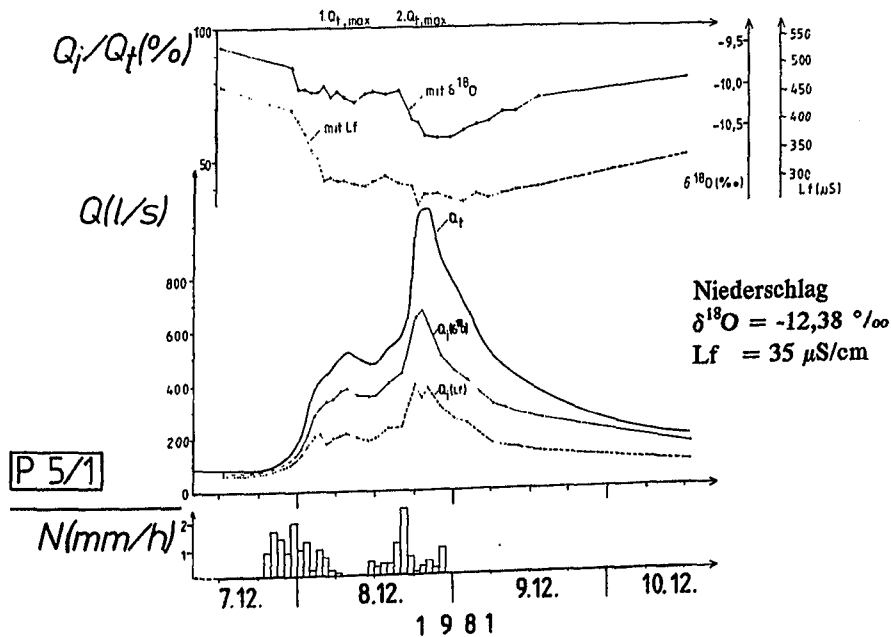


Abb. A-2-2: Niederschlag-Abfluss-Ereignis "G", Vorfluter-Pegel 5/1. Unten: Niederschlag (N), Gesamtabfluss (Q_T), mit der Lf- und der $\delta^{18}O$ -Methode berechneter indirekter Abfluss (Q_i). Oben: Änderung der Lf- und $\delta^{18}O$ -Werte mit Anteilen des indirekten Abflusses am Gesamtabfluss (Q_i/Q_T). Aus KÖRNER et al. (1986).

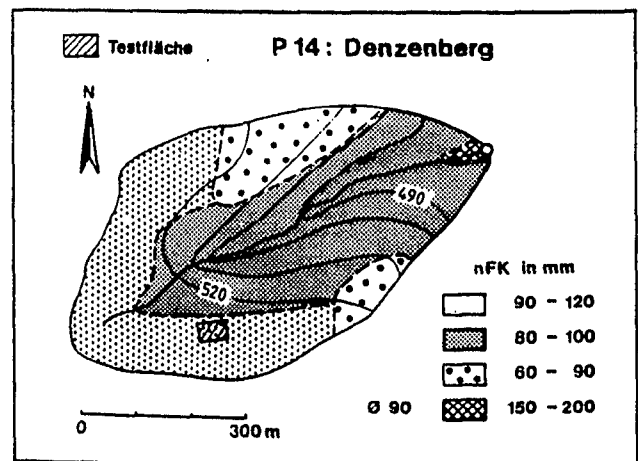
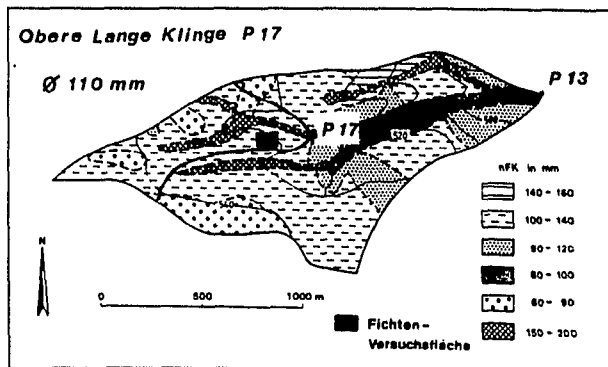
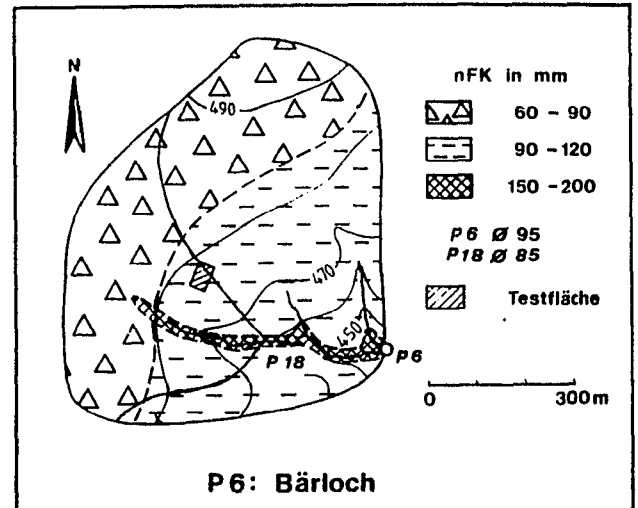
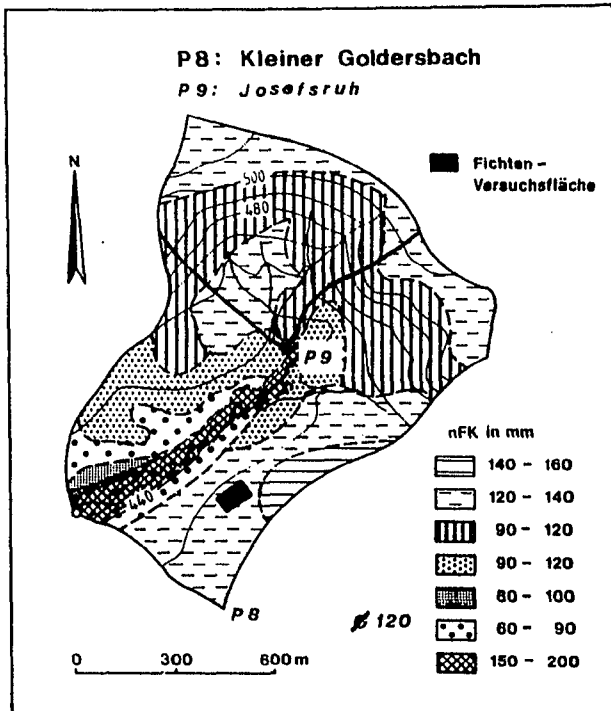


Abb. A-3-1: Verteilung der nutzbaren Feldkapazitäten und Lage der Versuchsflächen in den Einzugsgebieten P 14: Denzenberg; P 6: Bärloch mit P 18: Oberes Bärloch (oben) und P 8: Kleiner Goldersbach (Oberlauf) mit P 9: Josefsruh sowie P 17: Obere Lange Klinge (unten).
 Nach Vorlagen aus FLECK (1987), verändert.

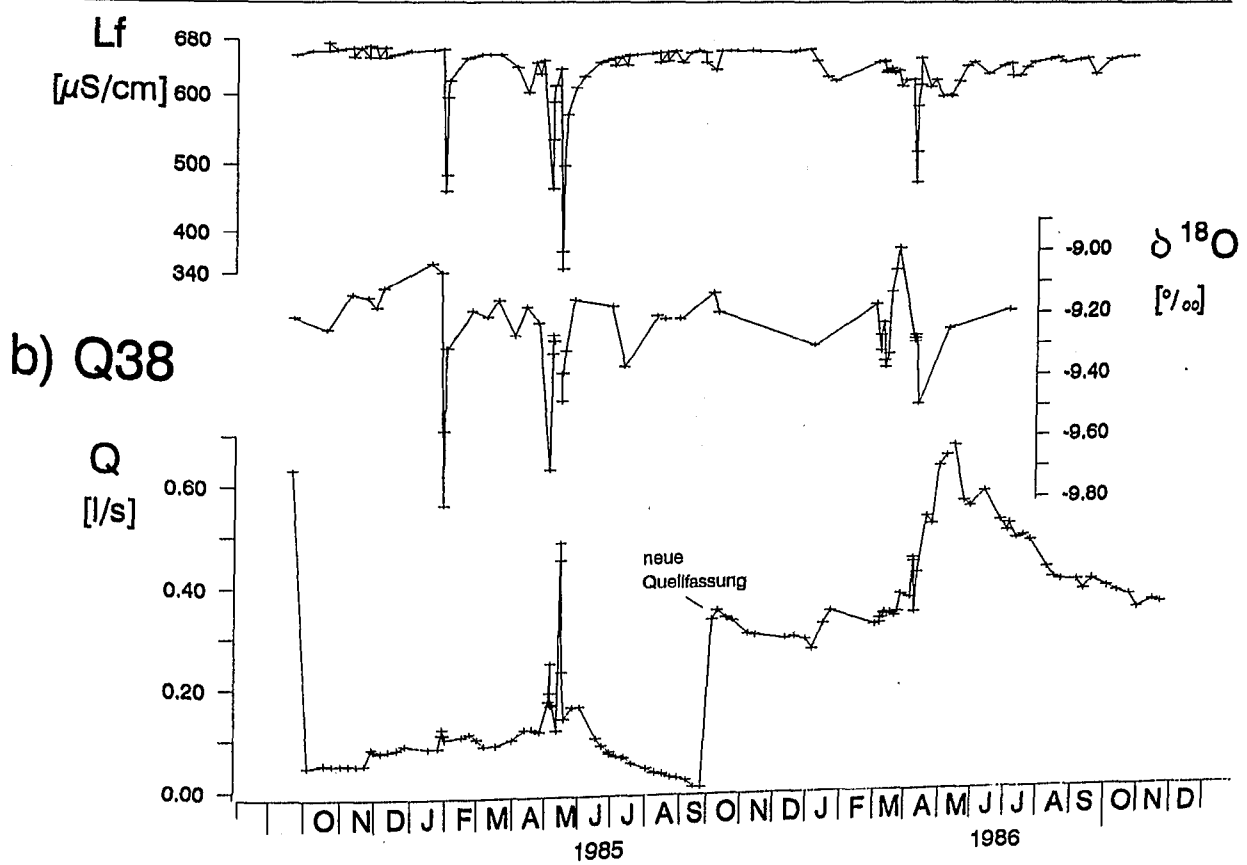
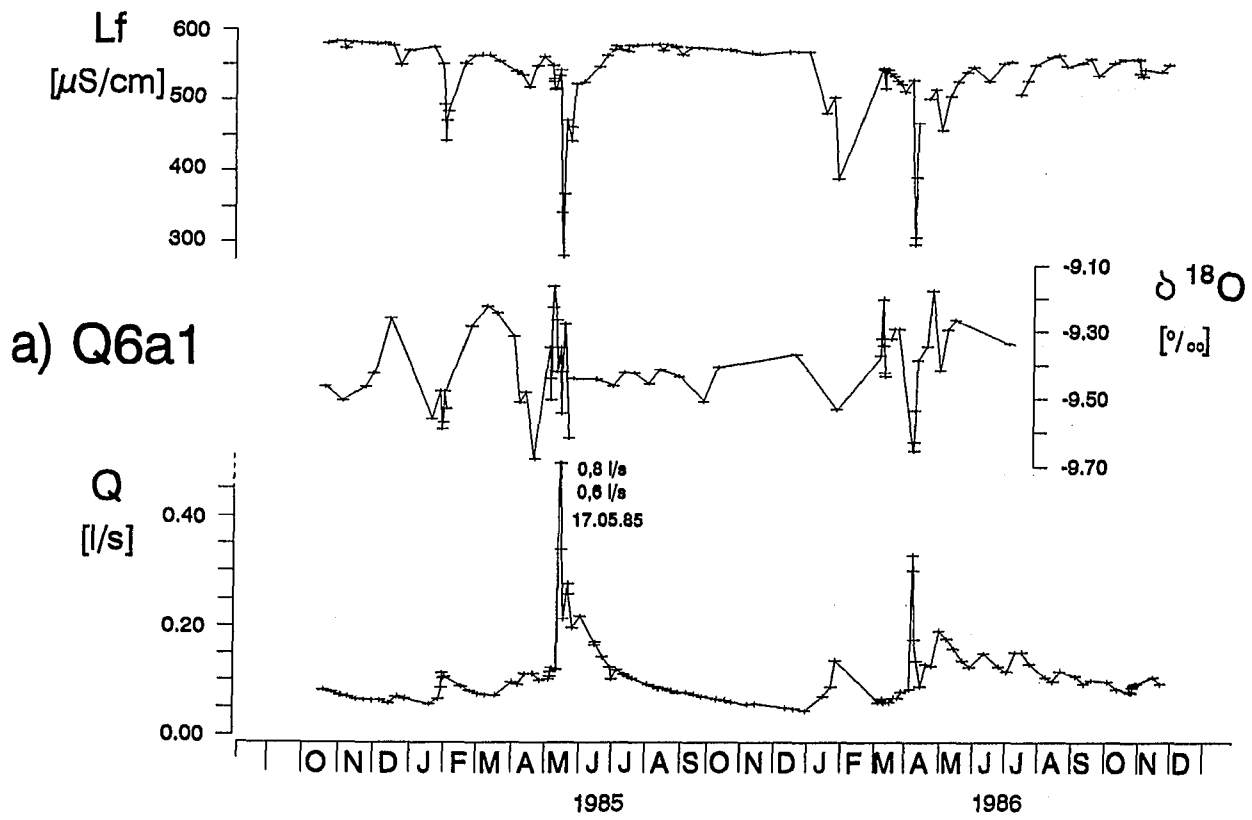


Abb. A-5-1: Ganglinien der Schüttung (Q), der elektrischen Leitfähigkeit (Lf) und des ^{18}O -Gehalts ($\delta^{18}\text{O}$) der Stubensandstein-Quellen a) Q 6a1 und b) Q 38.

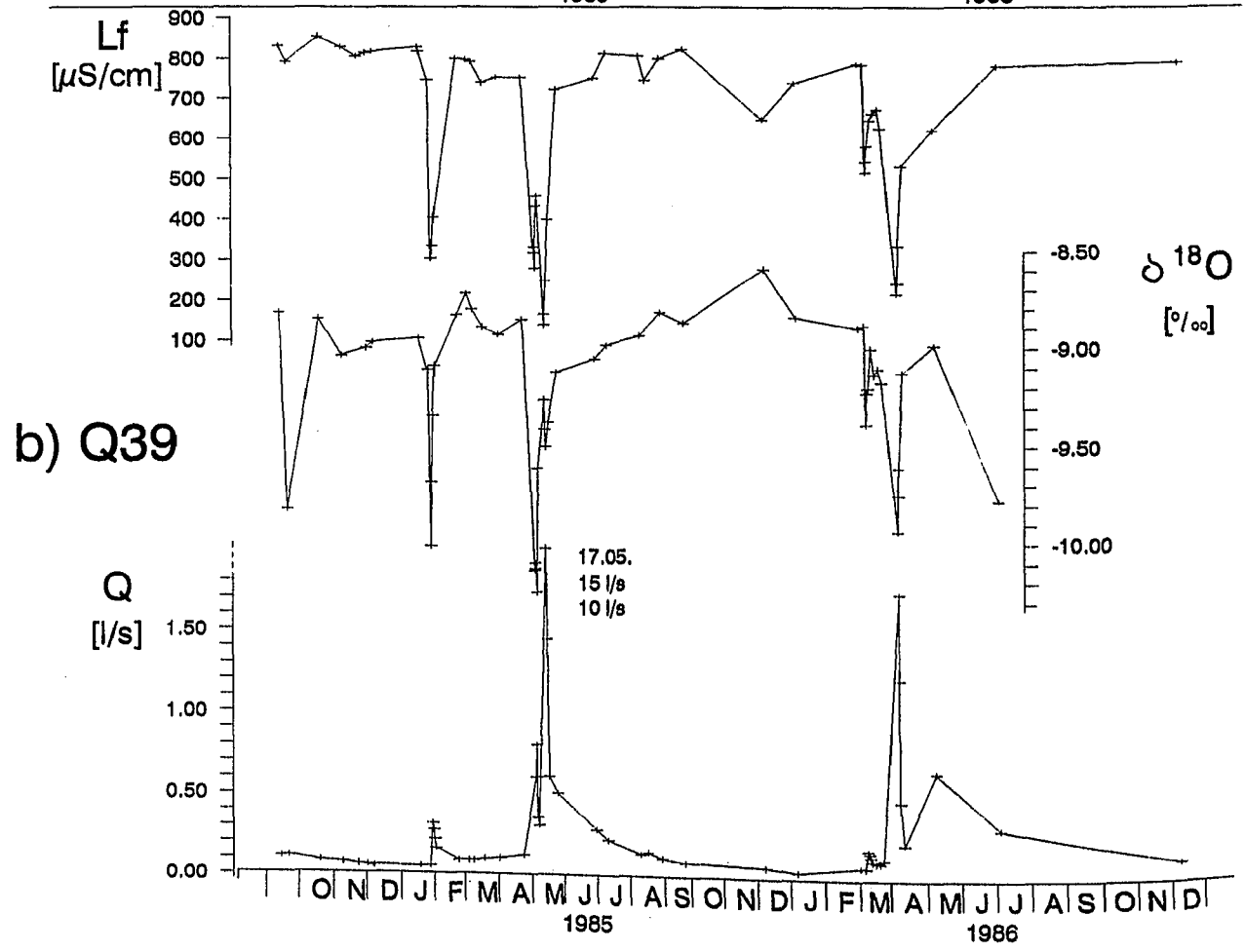
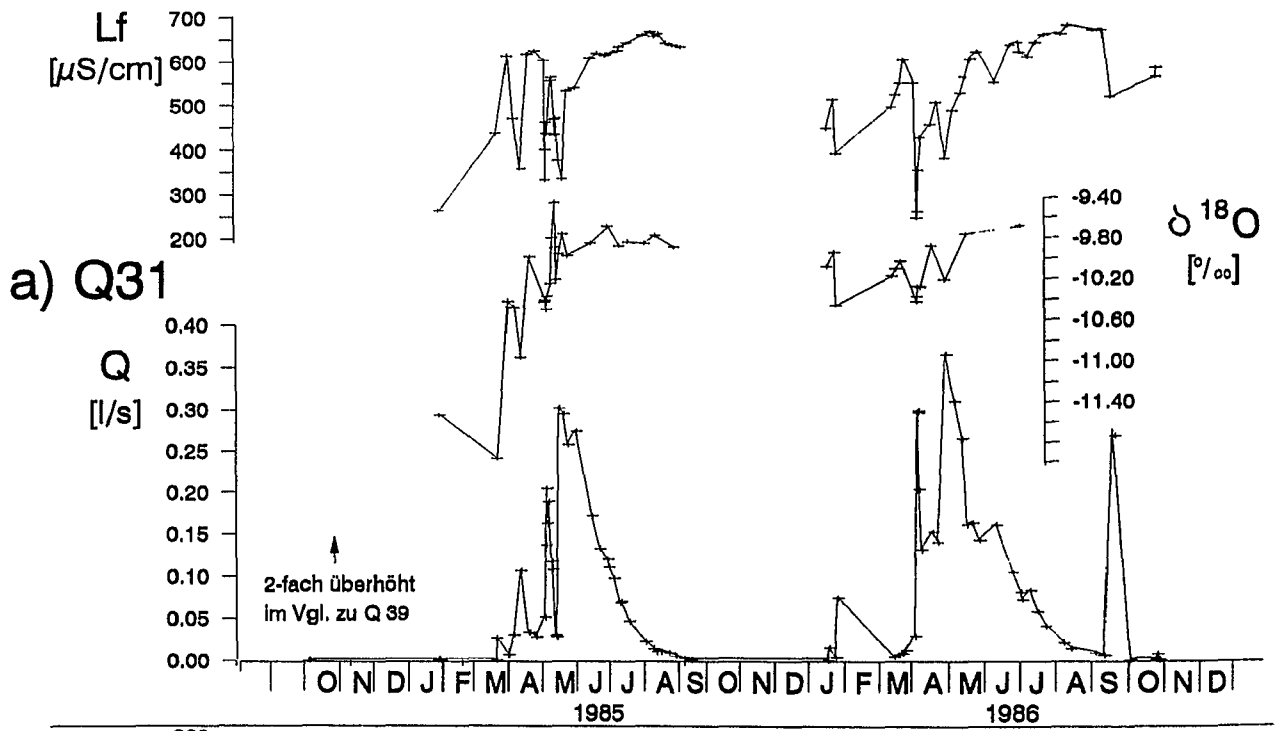


Abb. A-5-2: Ganglinien der Schüttung (Q), der elektrischen Leitfähigkeit (Lf) und des ^{18}O -Gehalts ($\delta^{18}\text{O}$) der Lias-Quelle a) Q 31 und der Stubensandstein-Quelle b) q 39.

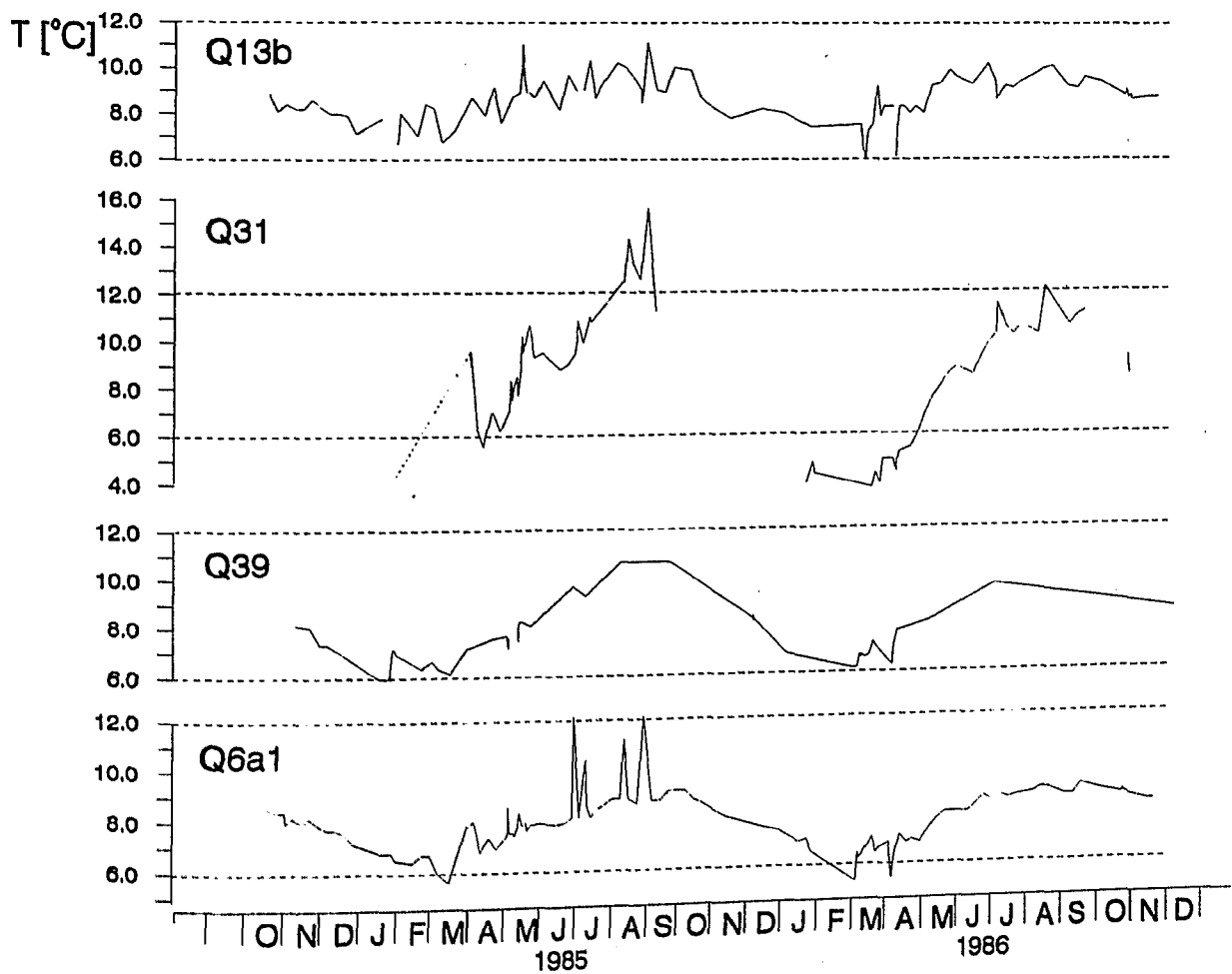
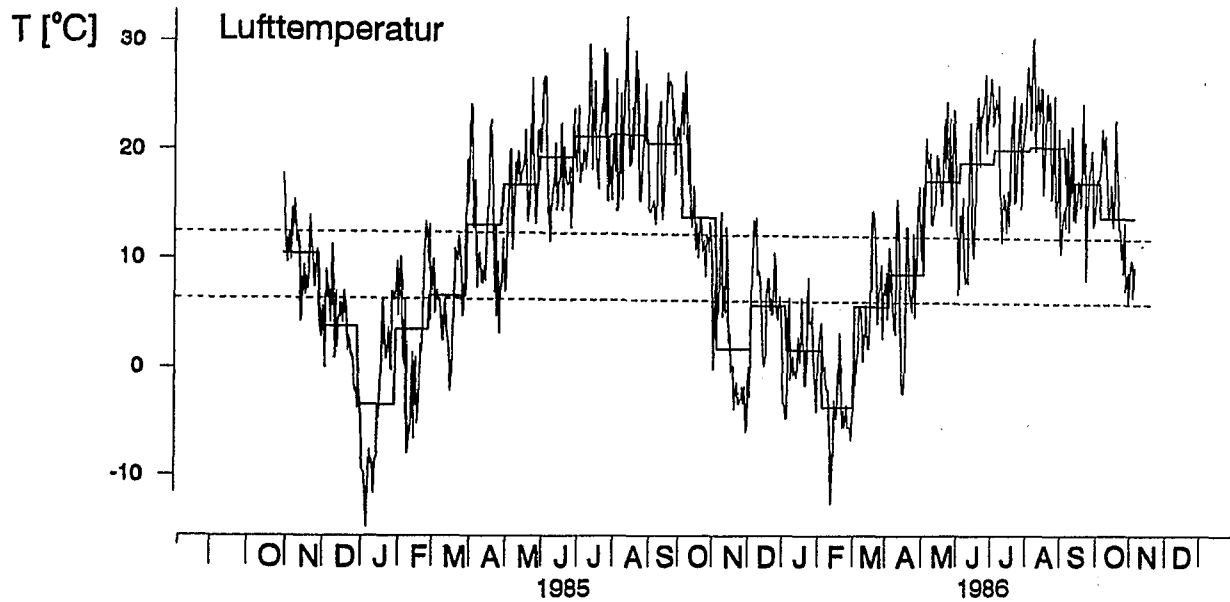


Abb. A-5-3: Ganglinien der Lufttemperatur (°C, 14 Uhr) und der Wassertemperaturen der Lias-Quellen Q 13b und Q 31 sowie der Stubensandstein-Quellen Q 39 und Q 6a1.

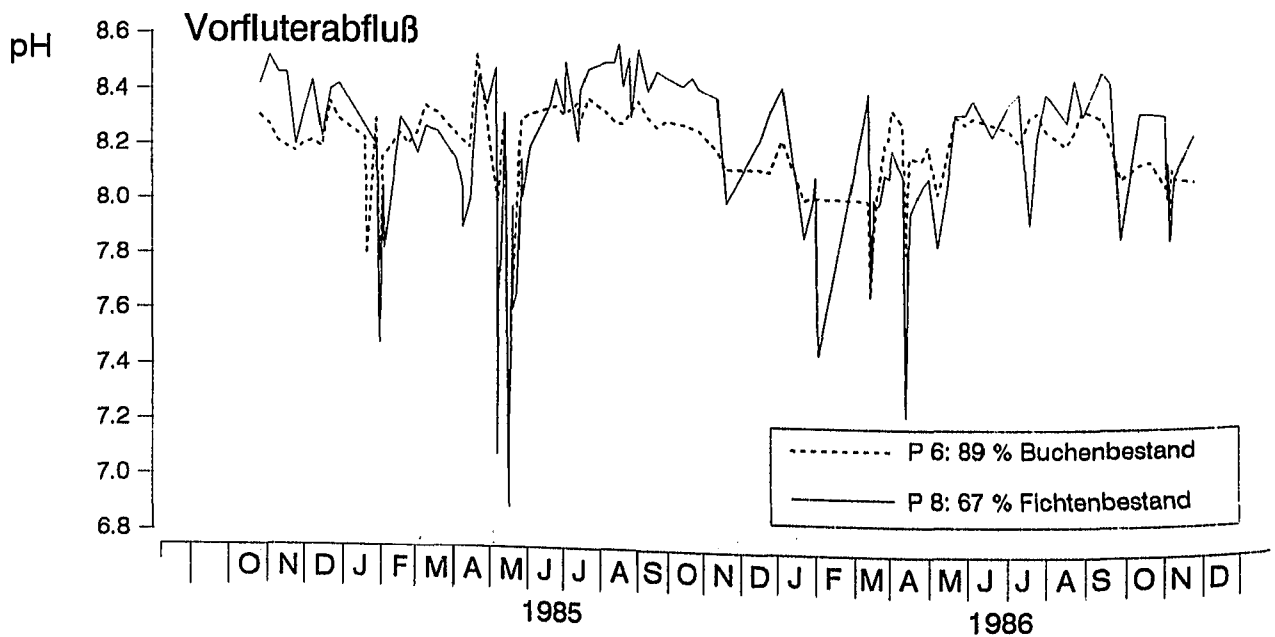
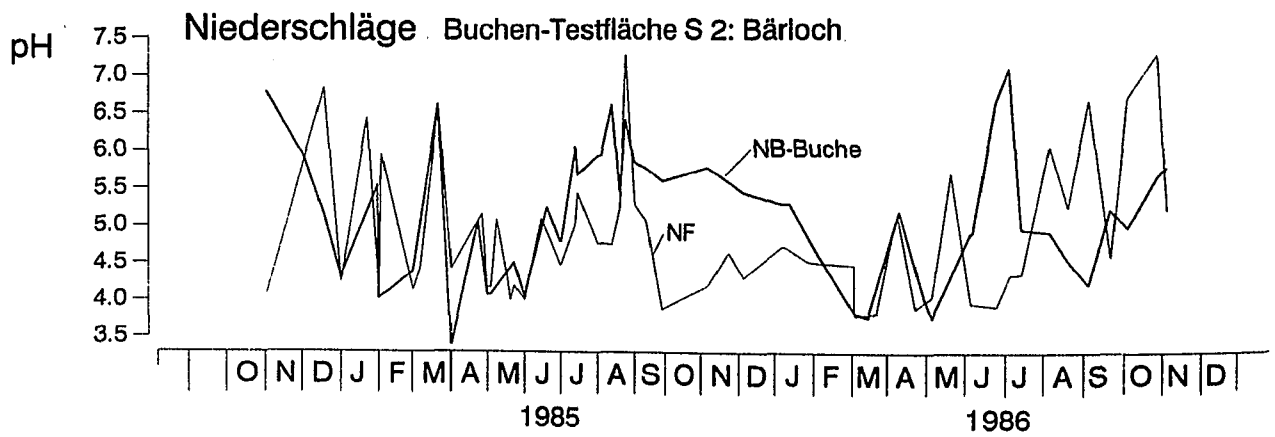
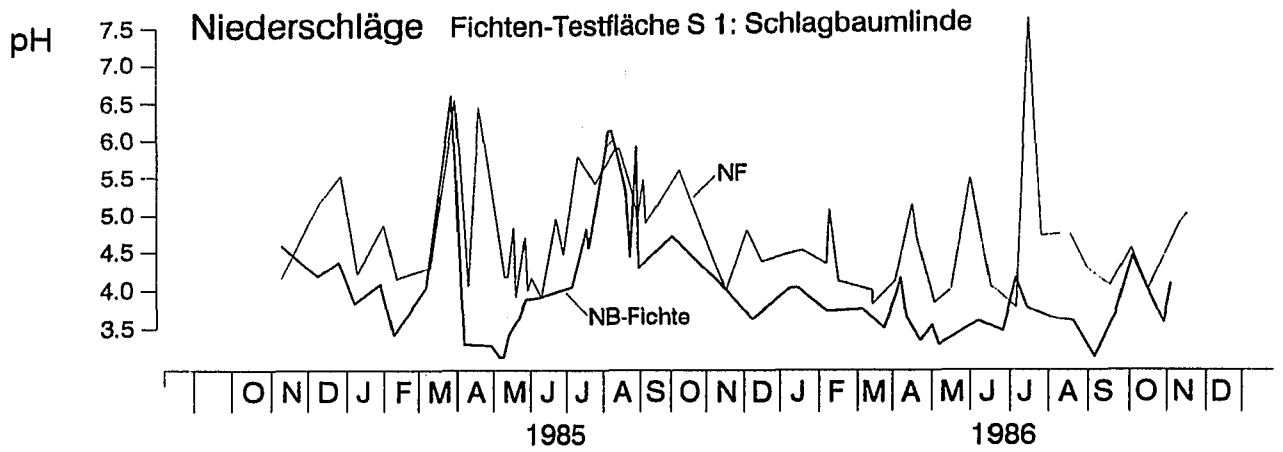


Abb. A-6-1: Variationen der pH-Werte im Freiland- und Bestandesniederschlag der Fichtentestfläche S 1 (Schlagbaumlinde) und der Buchentestfläche S 2 (Bärloch) sowie an den Pegelmeßstellen P 8 (Kleiner Goldersbach für S 1) und P 6 (Bärloch).

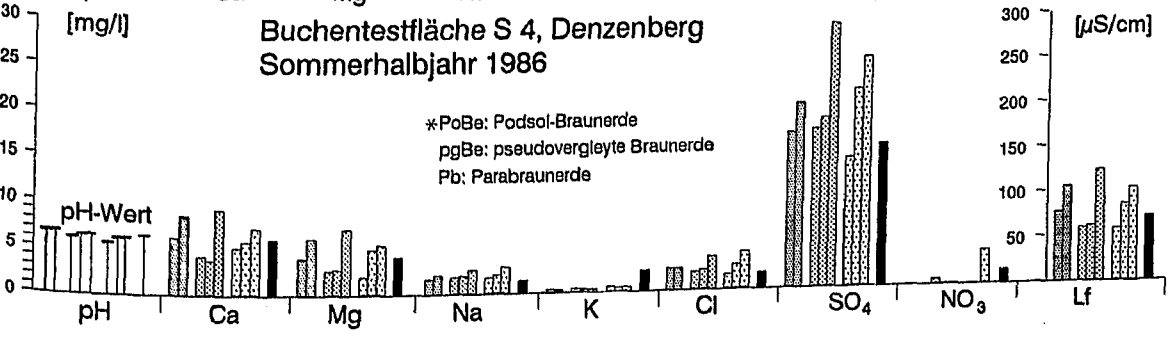
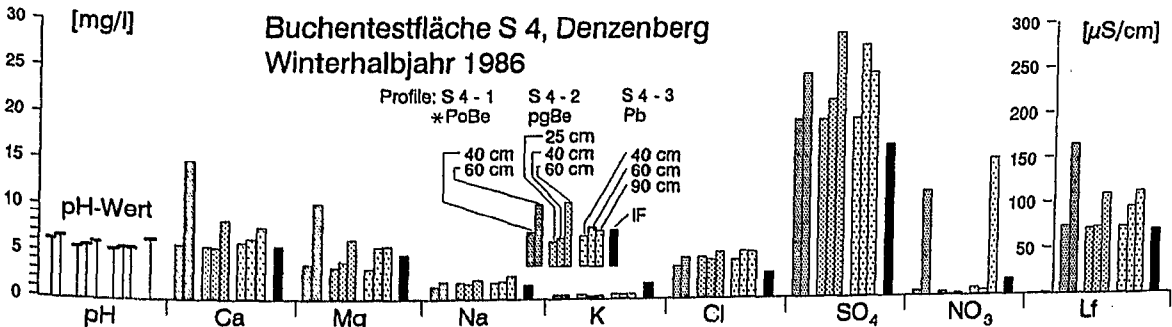
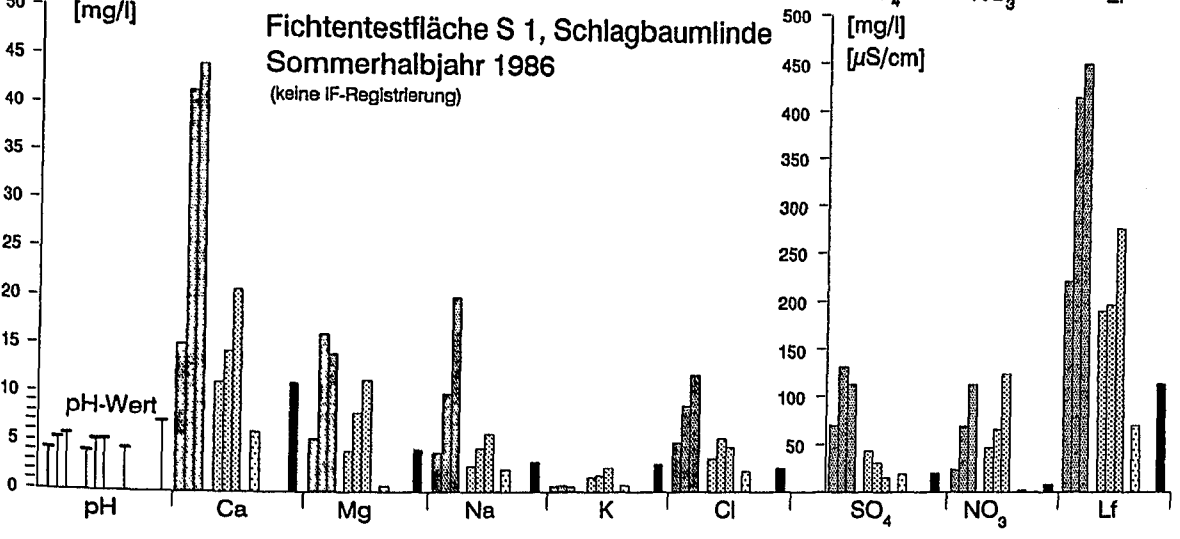
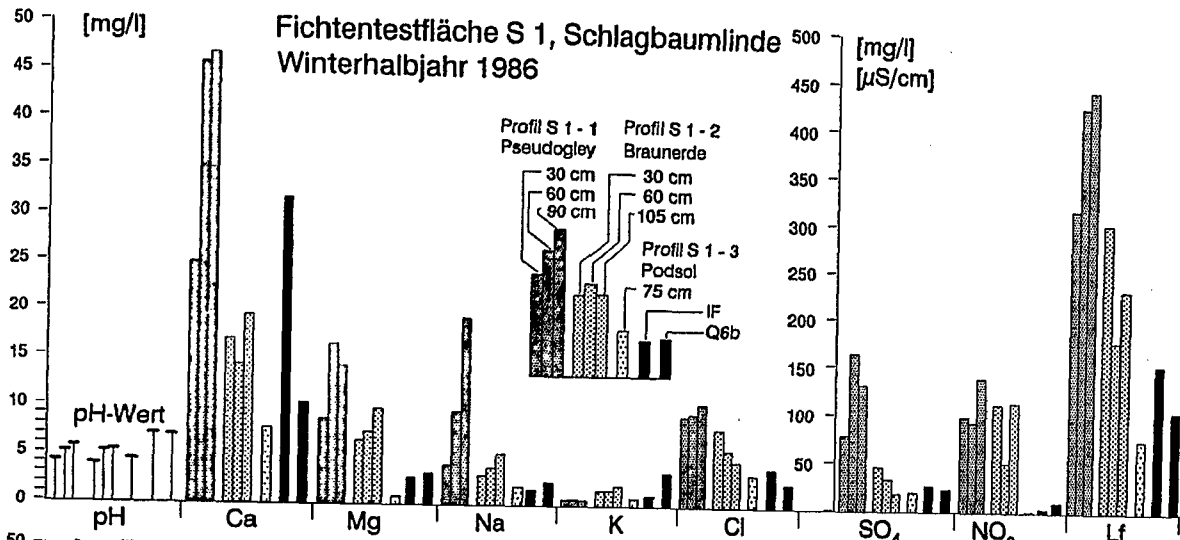


Abb. A-6-2: Mittlere, mit der Wassermenge gewichtete Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe im Sickerwasser und Interflow für das Winter- und Sommerhalbjahr 1986 auf der km⁵-/km⁴-Fichtentestfläche S 1 (Schlagbaumlinde) oben und auf der km⁴-Buchentestfläche S 4 (Denzenberg) unten.

Buchentestfläche S 2, Bärloch

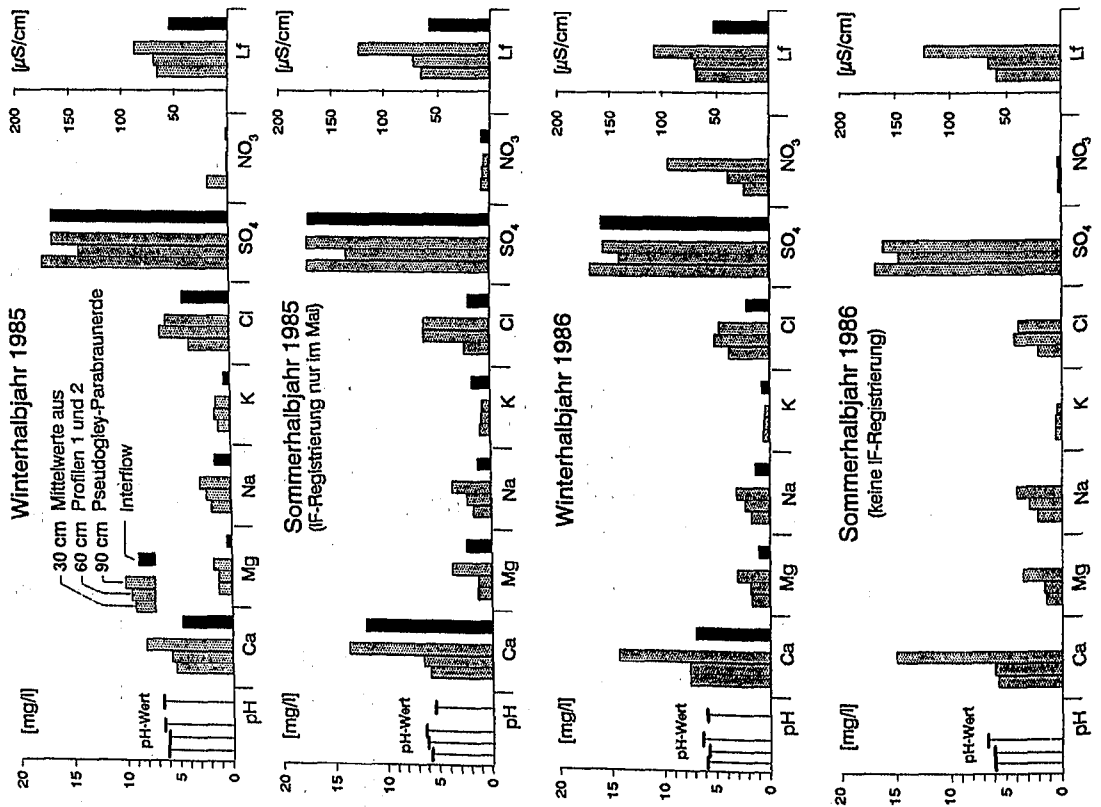


Abb. A-6-3

Fichtentestfläche S 3, Obere Lange Klinge

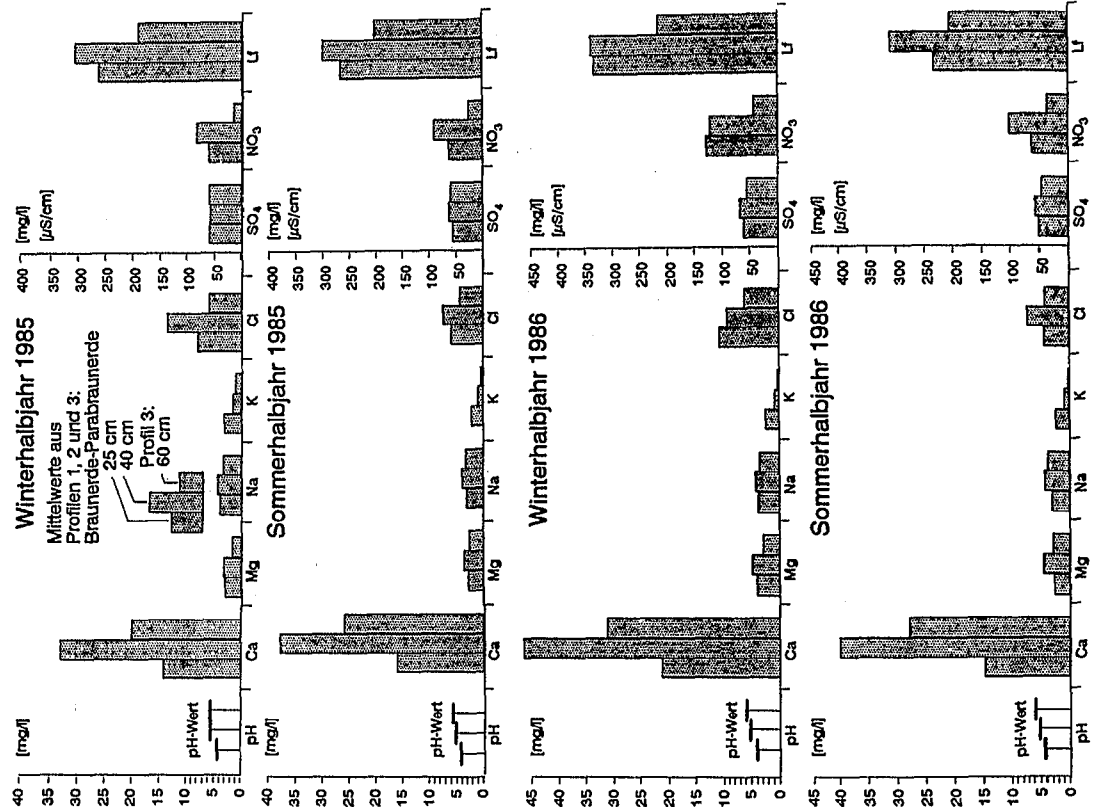


Abb. A-6-4

Abb. A-6-3: Mittlere, mit der Wassermenge gewichtete Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe im Sickerwasser und Interflow für die Winter- und Sommerhalbjahre 1985 und 1986 auf der Lias-Buchentestfläche S 2 (Bärloch).

Abb. A-6-4: Mittlere, mit der Wassermenge gewichtete Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe im Sickerwasser für die Winter- und Sommerhalbjahre 1985 und 1986 auf der km⁴-Fichtentestfläche S 3 (Obere Lange Klinge).

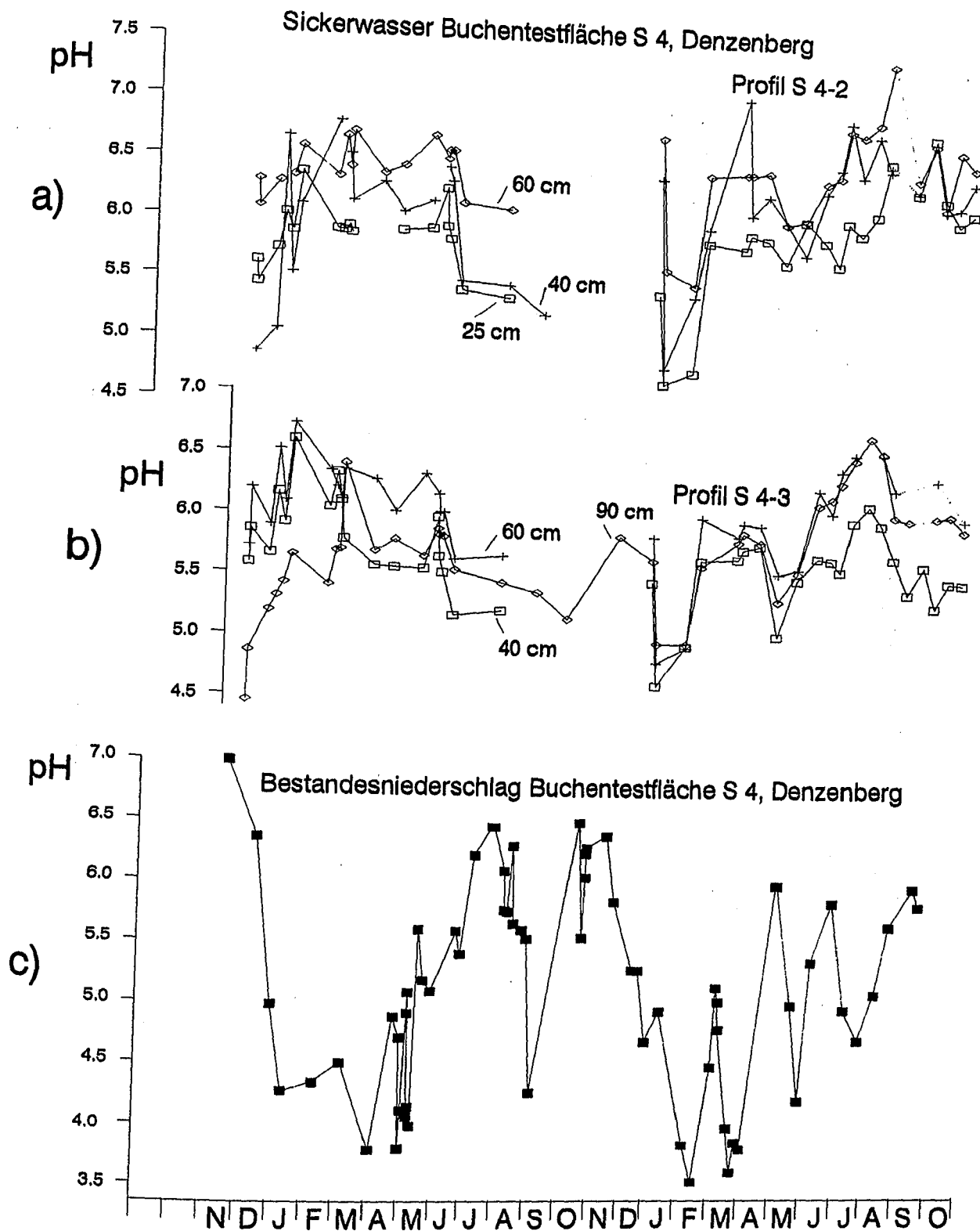


Abb. A-6-5: pH-Werte im Sickerwasser der Profile a) S 4-2 in 25 cm, 40 cm und 60 cm Tiefe und b) S 4-3 in 40 cm, 60 cm und 90 cm, im Vergleich zu den pH-Werten des c) Bestandesniederschlags. Einzelmessungen von der Buchentestfläche S 4, Denzenberg.

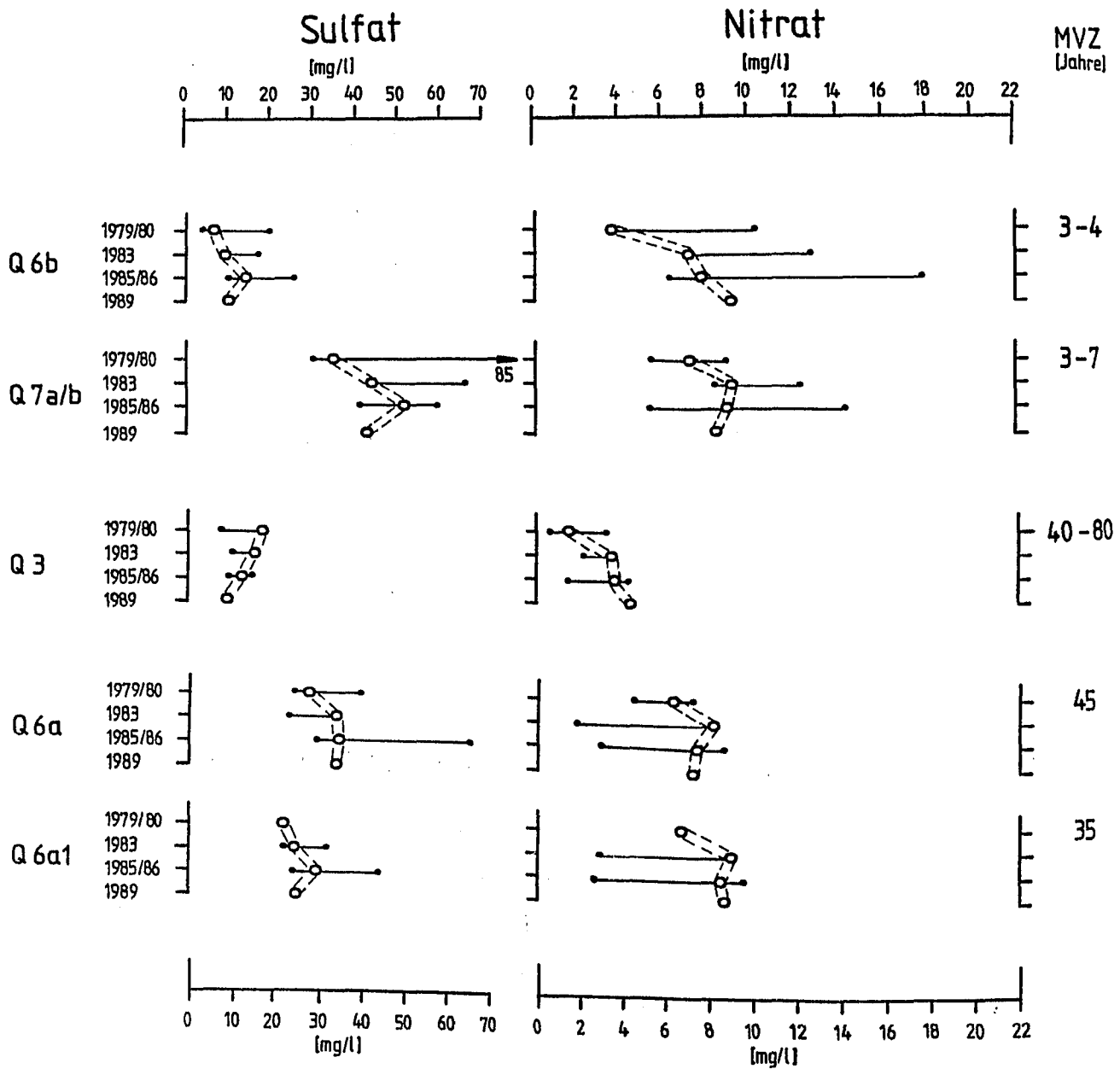


Abb. A-6-6: Langjähriger Vergleich der Sulfat- und Nitratkonzentrationen Niedrigwasserabfluß (Sommer/Herbst) von ausgewählten Stubensandstein-Quellen. Daten für 1979 - 83 und MVZ aus AGSTER und EINSELE (1986) und für 1989 aus FLEGR und MONN (1990). o = Niedrigwasserkonzentrationen; — : Schwankungsbreite; MVZ : Mittlere Grundwasserverweilzeit aus Tritium-Untersuchungen.

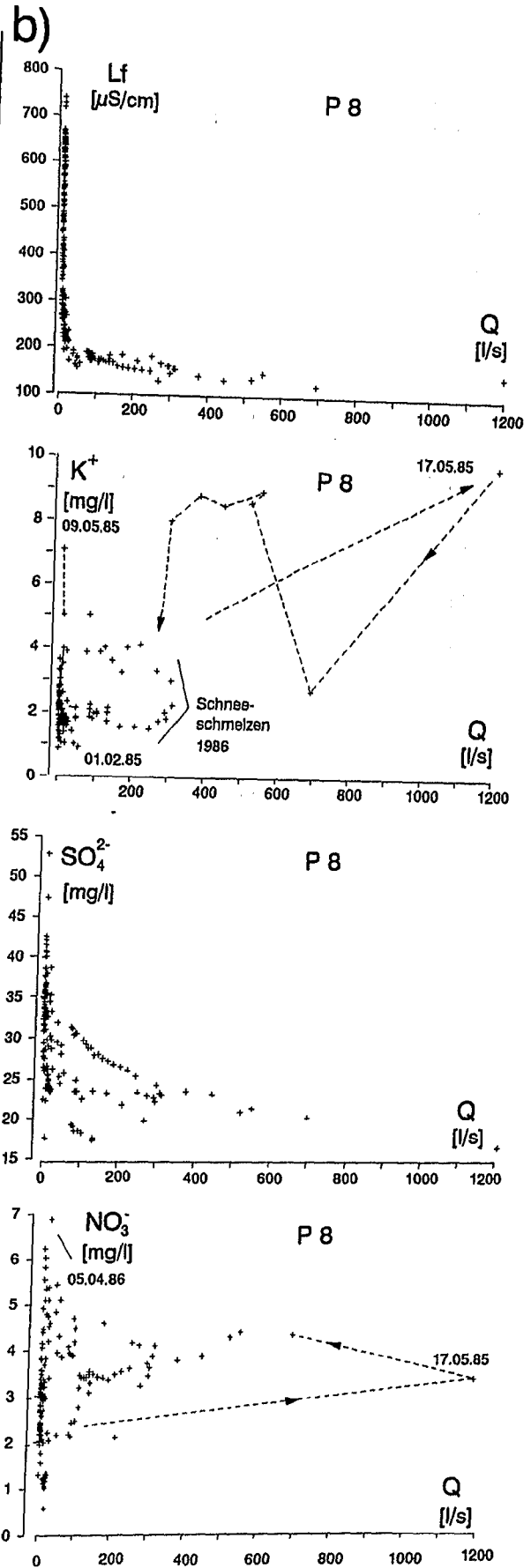
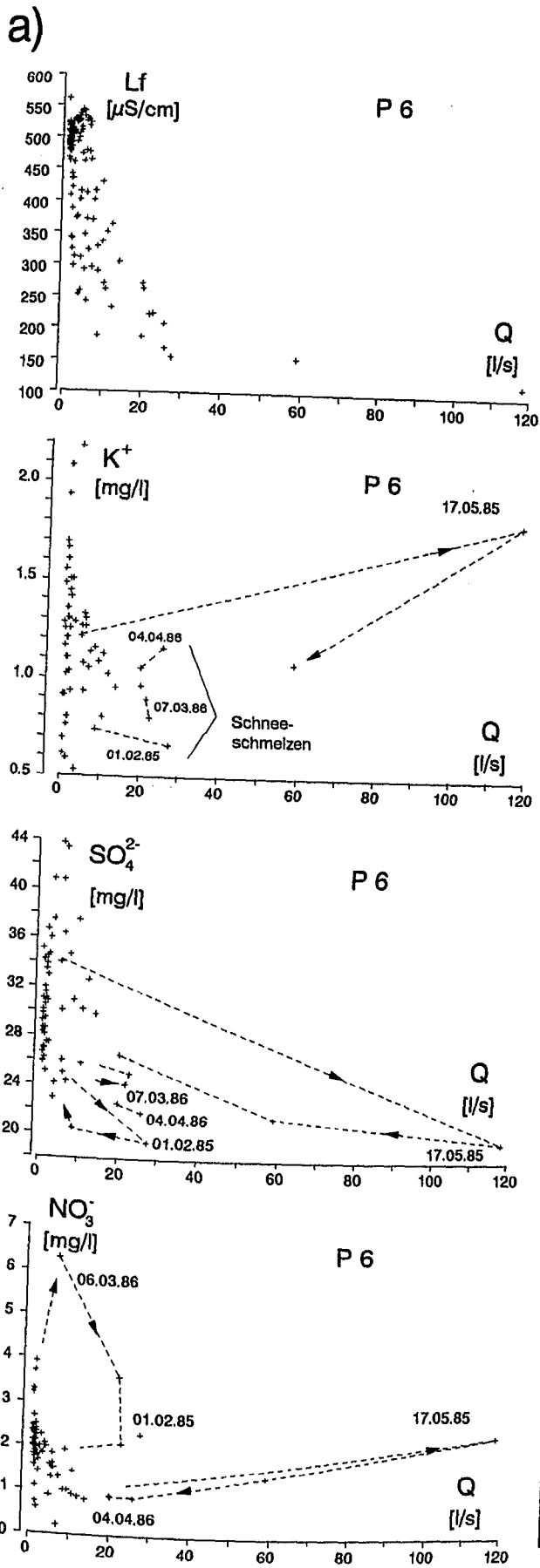
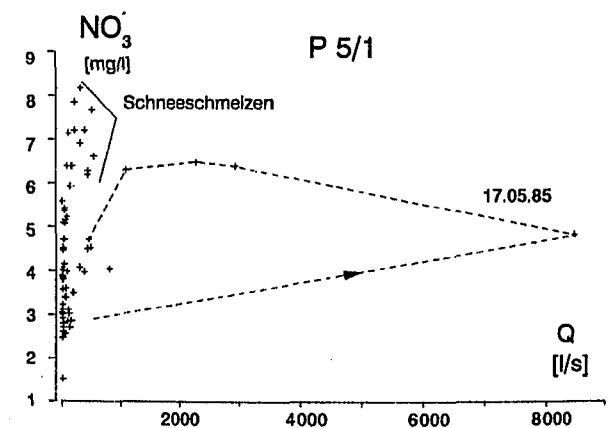
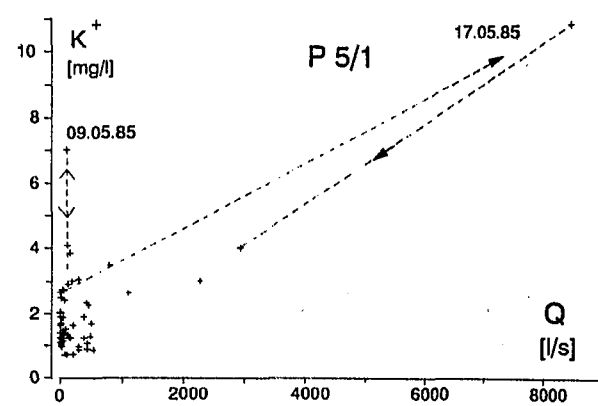
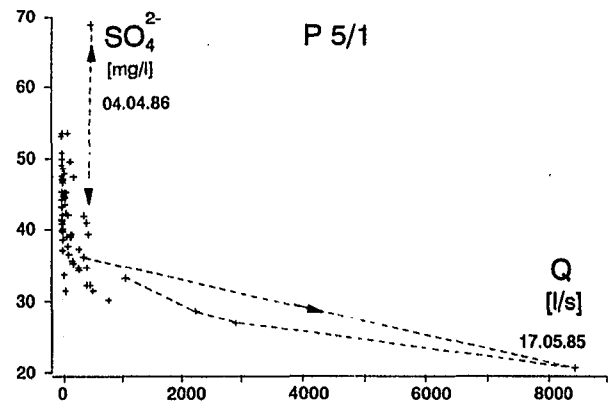
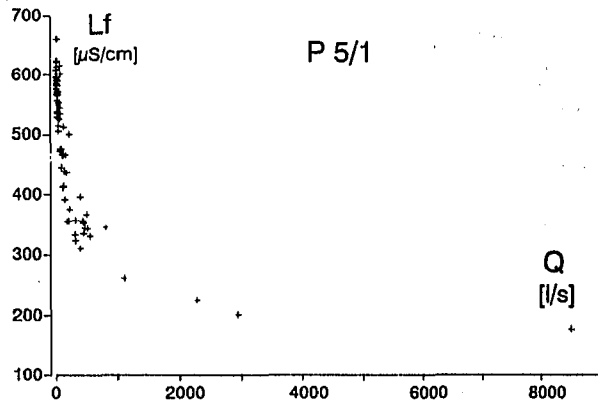


Abb. A-6-7: Konzentrationen gelöster Inhaltsstoffe im Bachwasser in Abhängigkeit von den Abflüßmengen in den "Tongebieten" a) P 6, Einzugsgebiet Bärloch, Lias, überwiegend Laubwald und b) P 8, Einzugsgebiet Kleiner Goldersbach, km4 - Lias, 67% Nadelwald sowie dem "Mischgebiet" c) P 5/1, Einzugsgebiet Kirnbach, km3 - Lias. (Fortsetzung auf der nächsten Seite)

c)



Fortsetzung Abb. A-6-7

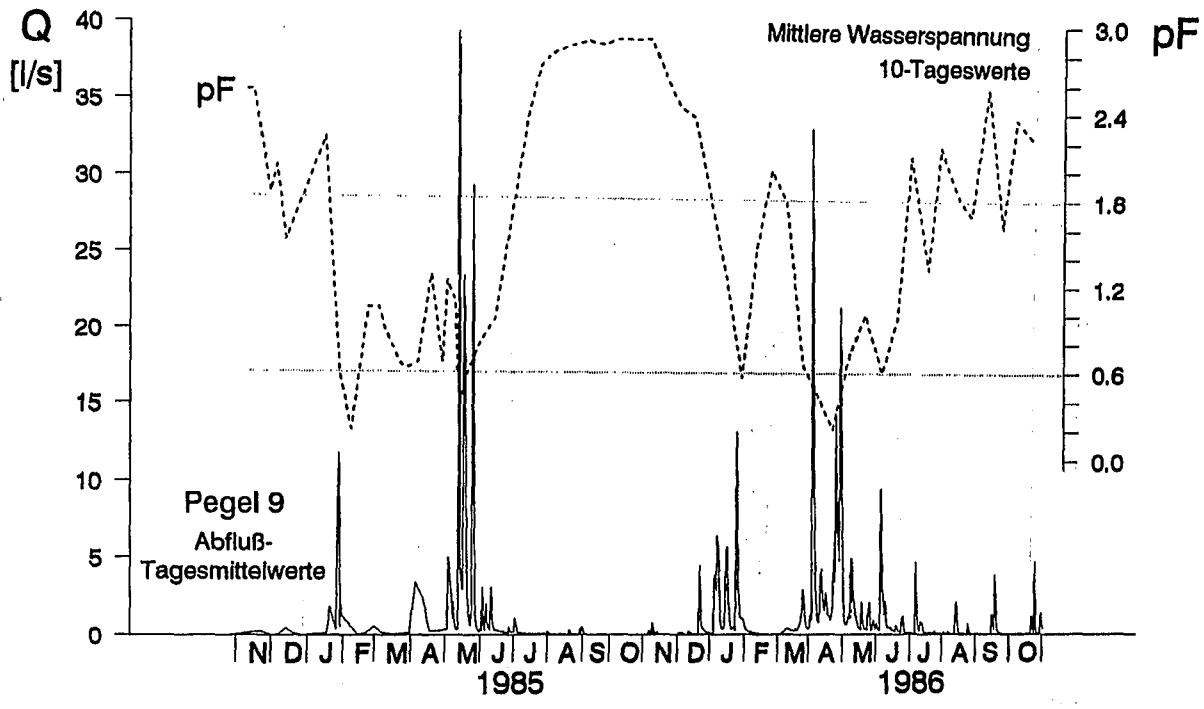


Abb. A-8-1: Durchschnittliche Wasserspannungen im Boden (Ergebnisse der Versuchsfläche S 1, Schlagbaumlinde, mittlere pF-Werte zwischen 0,2 und 1,0 m Tiefe) und Abflüßmengen (Tagesmittelwerte) am Pegel 9, Josefsruh während der hydrologischen Jahre 1985 und 1986.

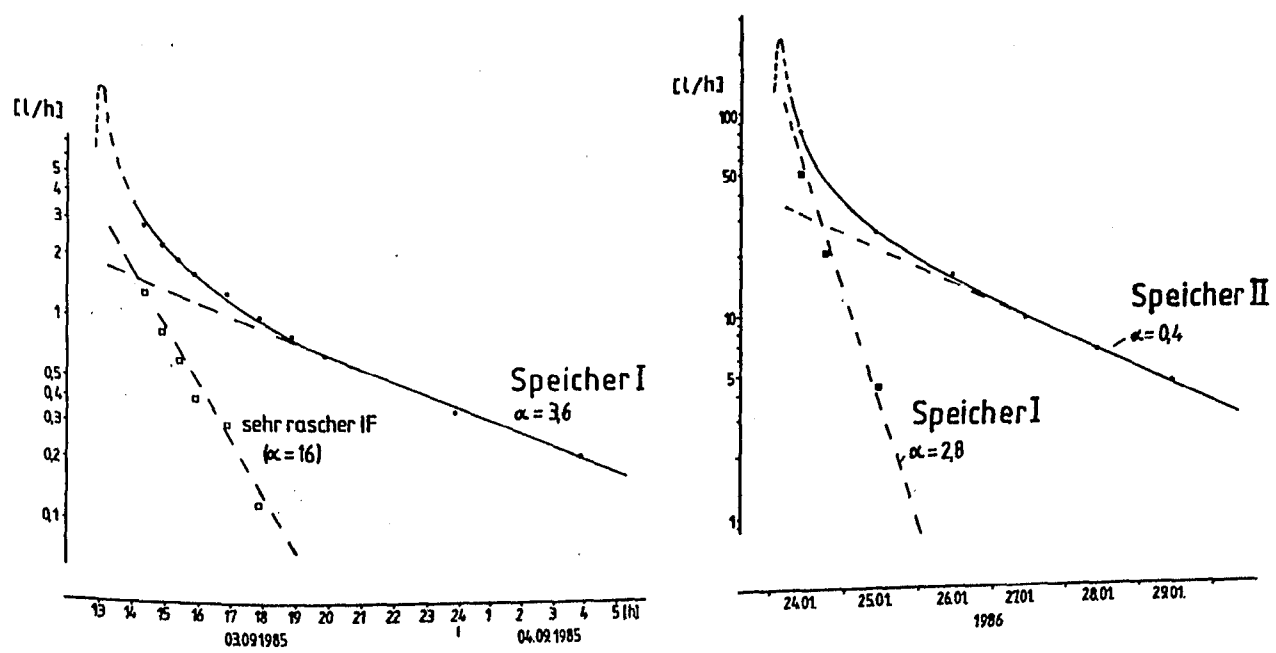


Abb. A-8-2: Interflowmenge aus der Testfläche Denzenberg während der Ereignisse vom 03.09.1985 (links) und 24.01.1986 (rechts) und sowie aus der q-Ganglinie ermittelte α -Werte von zwei Bodenwasserspeichern.

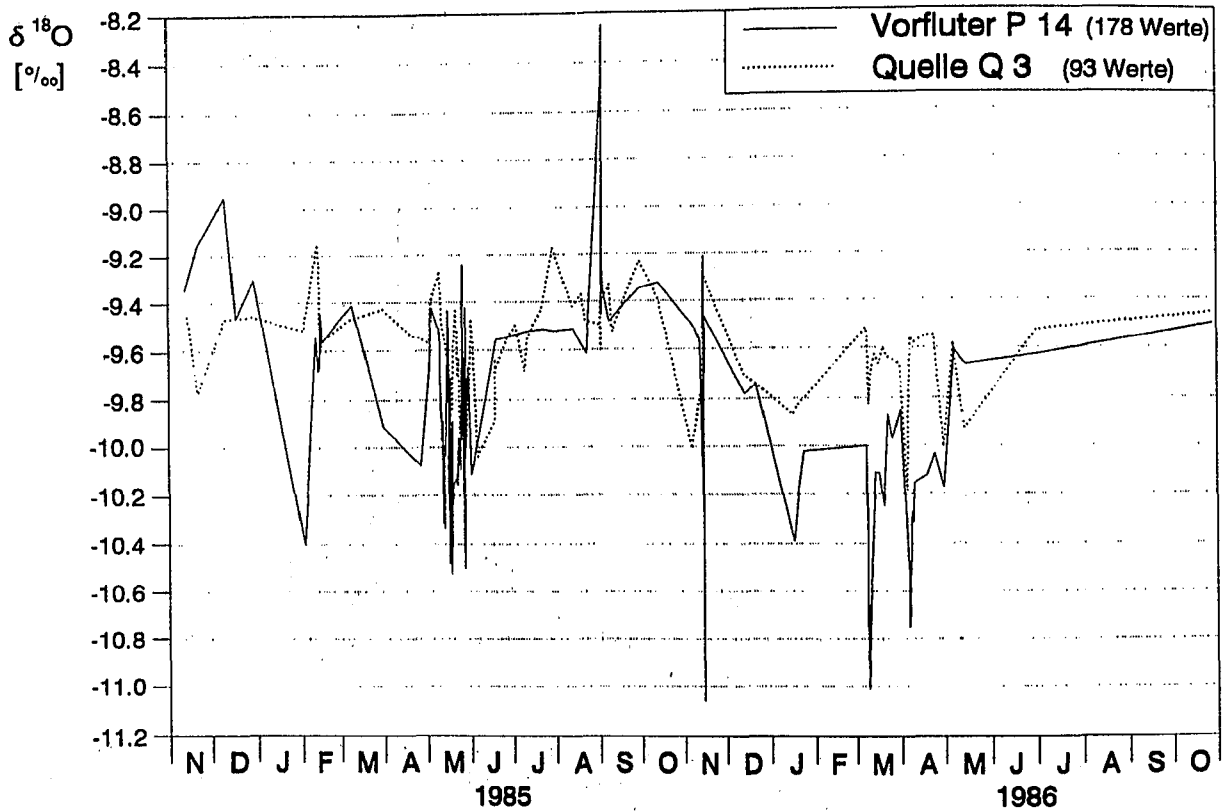


Abb. A-8-3: $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien im Vorfluterabfluß bei P 14 und in der Quellschüttung von Q 3.

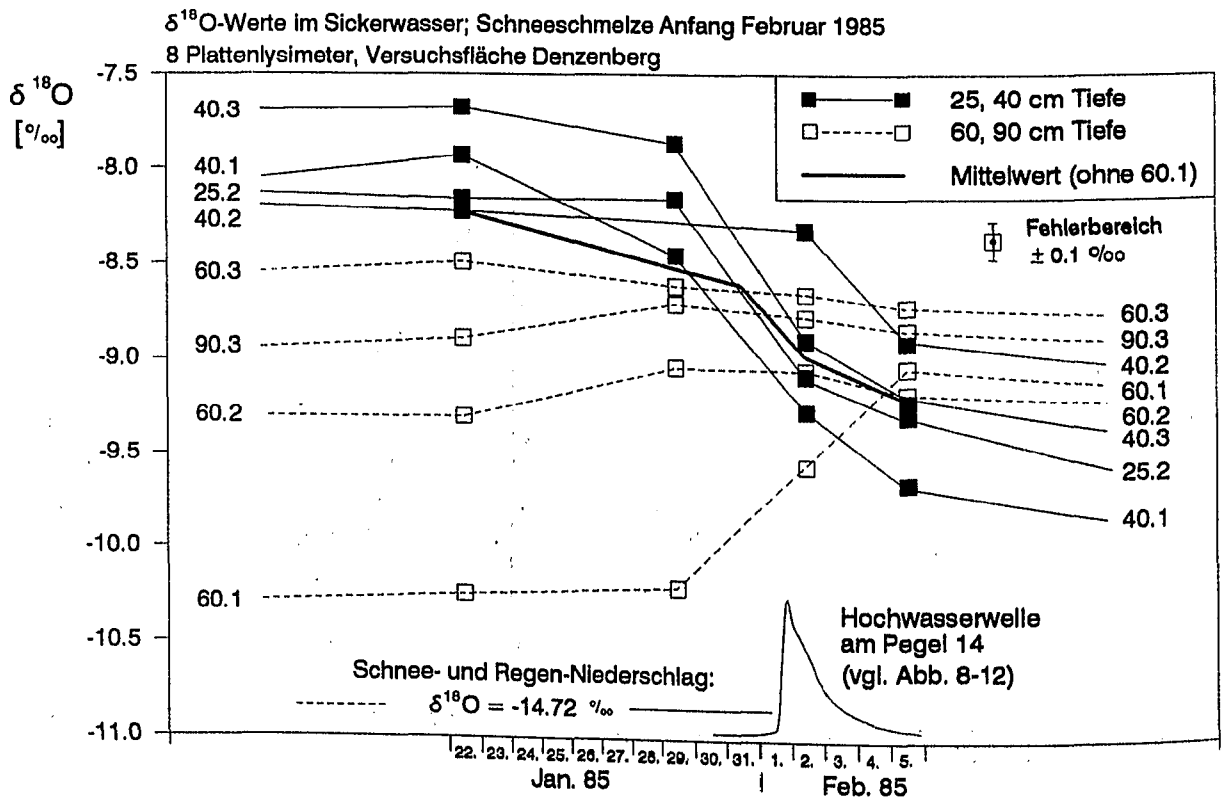


Abb. A-8-4: $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in Sickerwässern auf der Testfläche Denzenberg vor, während und nach der Hochwasserwelle vom 31.01. - 05.02.1985. Vgl. dazu Darstellung der Monatsmittelwerte in Abb. 7-5.

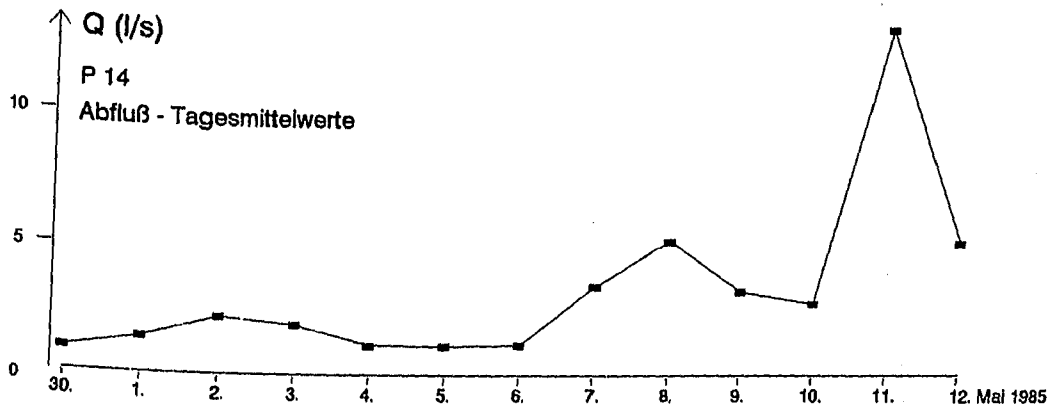
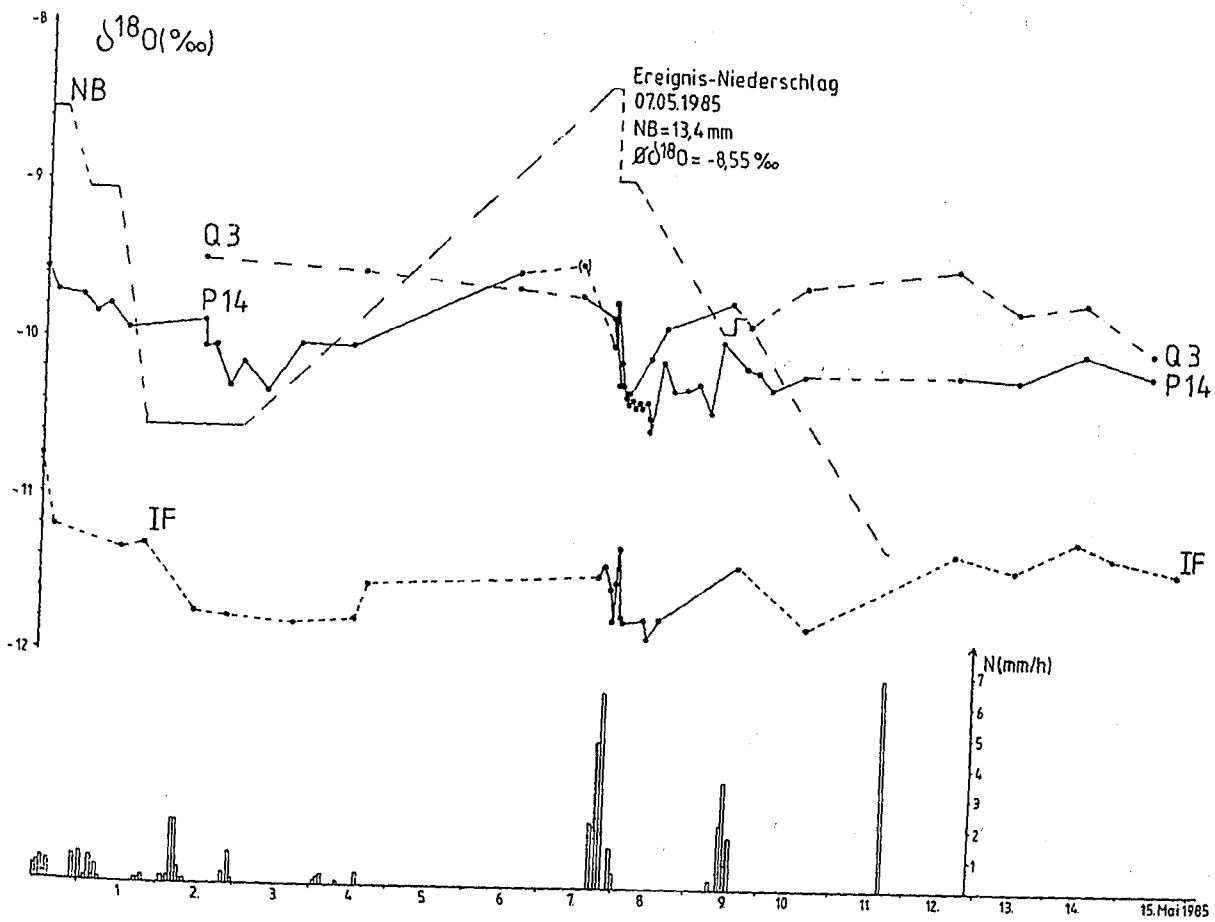


Abb. A-8-5: $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (Einzeldaten) im Bestandesniederschlag (NB), Gesamtabfluß (P 14), Quellwasser (Q 3), Interflow (aus IF-Meßeinrichtung) sowie Niederschlagshöhen und Gesamtabfluß im Zeitraum 01.05. - 15.05.1985.

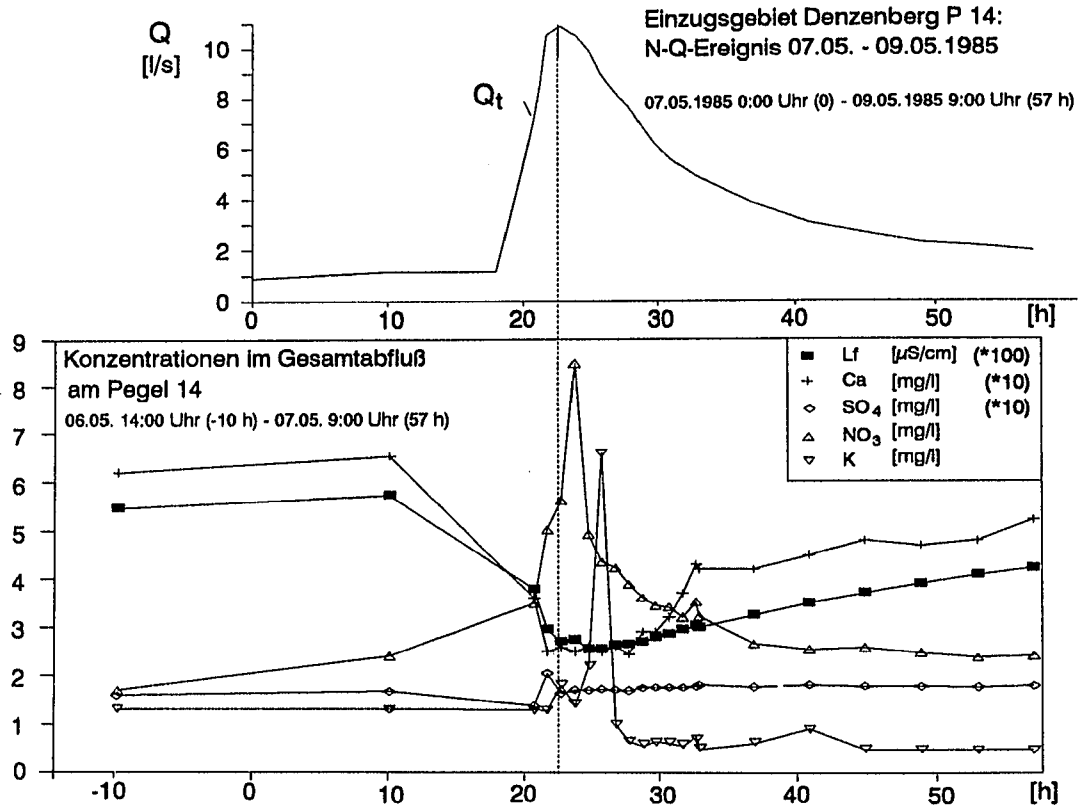


Abb. A-8-6: Gesamtabfluß, Gesamtmineralisation sowie Ca^{2+} -, SO_4^{2-} -, NO_3^- und K^+ -Konzentrationen im Gesamtabfluß bei P 14 während des N-Q-Ereignisses vom 07.05. - 09.05.1985.

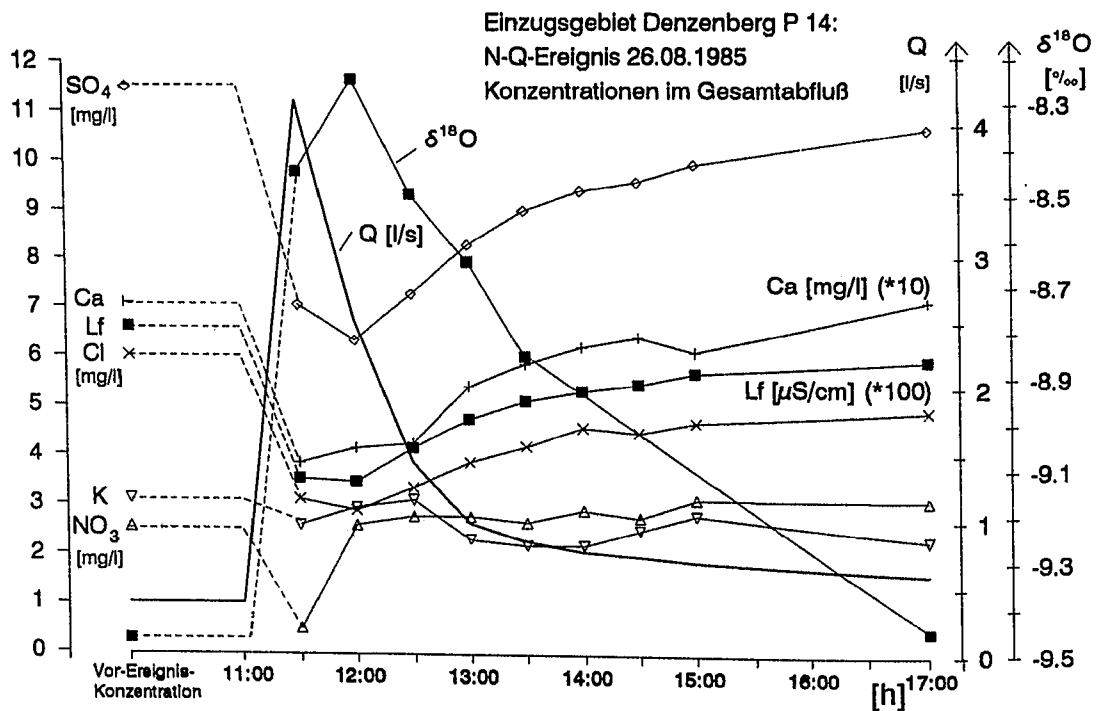


Abb. A-8-7: Gesamtabfluß, Gesamtmineralisation sowie $\delta^{18}\text{O}$ -Werte, Ca^{2+} -, SO_4^{2-} -, NO_3^- und K^+ -Konzentrationen im Gesamtabfluß bei P 14 während des N-Q-Ereignisses vom 26.08.1985.

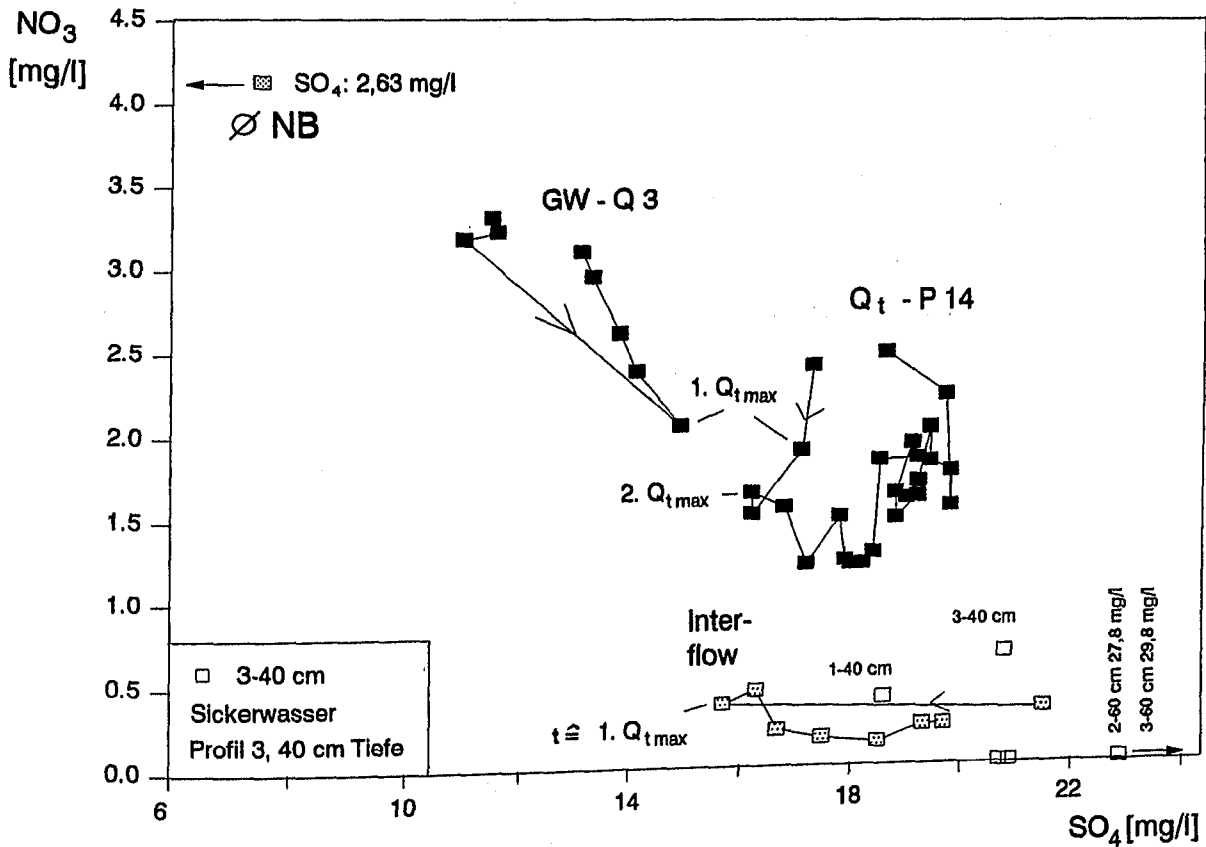
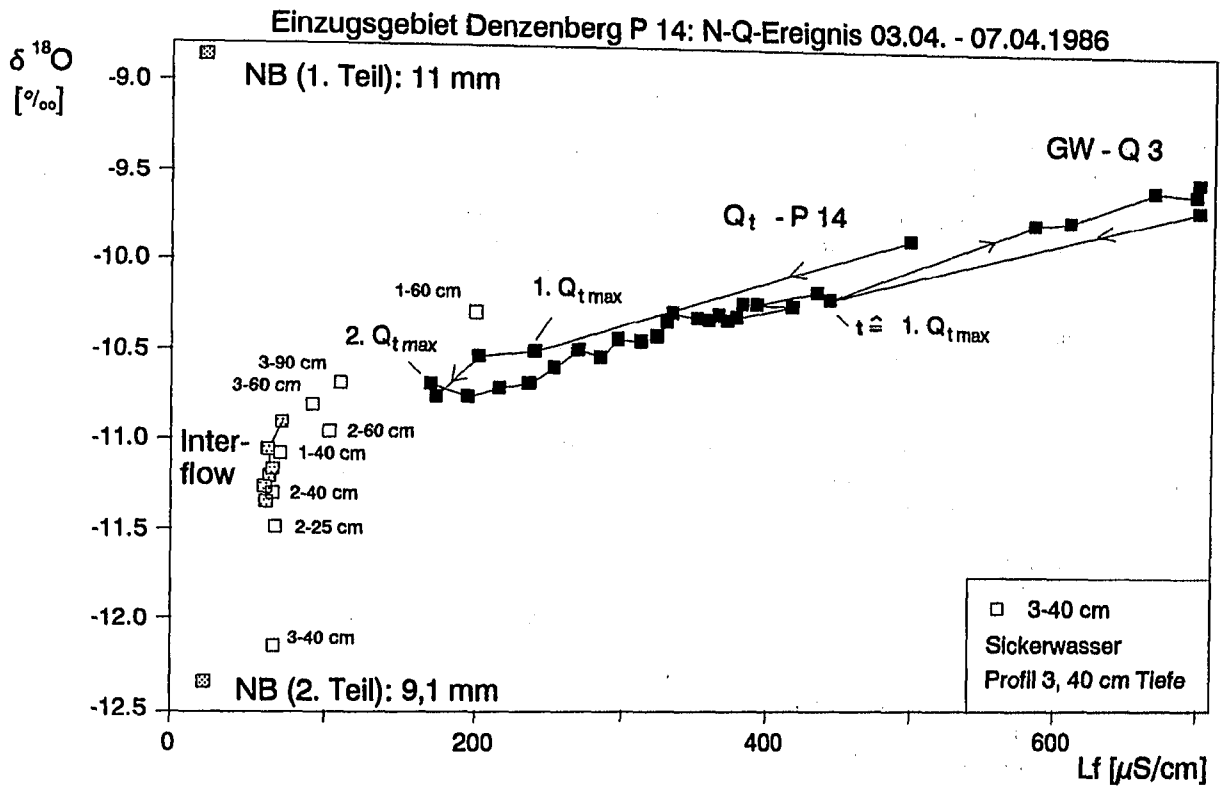


Abb. A-8-8: Hochwasserereignis vom 03. - 07.04.1986 im Einzugsgebiet Denzenberg. Oben: $\delta^{18}\text{O}$ - und Lf-Werte der Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sowie Änderungen während der Abflußerhöhung im Gesamtabfluß, Quellwasser (Q 3) und Interflow, unten: SO_4 - und NO_3 -Werte der Abflußkomponenten GW, IF_{pe} und IF_e sowie Änderungen während der Abflußerhöhung im Gesamtabfluß und Quellwasser.

Anhang - Tabellen

Tab. A-5-1: Potentielle Verdunstung (ETpot in mm) in den Einzugsgebieten; nach HAUDE (1954) mit Korrekturen für Waldbestände nach SOKOLLEK (1983).

Meßstelle	P18	P6	P14	P9	P5/1	P1	P8	P17
Nd (%)	0	11	19	11	50	60	67	80
ETpot (mm)								
WiHj 1985	102	116	157	130	165	199	186	232
SoHj 1985	659	663	682	667	678	698	685	723
1985	761	779	840	797	843	897	871	956
WiHj 1986	96	112	132	127	167	193	191	239
SoHj 1986	680	687	671	695	714	715	726	745
1986	776	799	803	822	881	908	917	985

Nd: Nadelwaldanteil

Tab. A-5-2: Reelle Verdunstung (ETreell in mm) mit Berücksichtigung der Bodenfeuchteänderungen in den Untersuchungsgebieten. Berechnung auf Tagesbasis nach dem von TEUTSCH (1989) und SAUTER (1992) modifizierten UHLIG-Verfahren.

Meßstelle	P18	P6	P14	P9	P5/1	P1	P8	P17
Nd (%)	0	11	19	11	50	60	67	80
ETreell (mm)								
1985	445	461	517	522	518	563	588	605
Rb	-11	-14	-45	-16	-23	-27	-26	-21
1985	456	475	562	538	541	590	614	626
1986	698	713	685	727	799	788	813	838
Rb	129	128	100	128	125	107	123	93
1986	569	585	585	599	674	681	690	745

ETreell-Mittelwerte 1985: 550 mm; 1986: 641 mm

Nd: Nadelwaldanteil

Tab. A-5-3: Halbjahres- und Jahreswerte des Freiland-(NF) und Bestandesniederschlags (NB) von je 2 Fichten und Buchentestflächen mit den daraus ermittelten Kroneninterzeptionsverlusten (Ik) und NB/NF-Verhältnissen für die Jahre 1985 und 1986 (Angaben in mm). Fichtenstandorte: S 1 Schlagbaumlände, S 3 Obere Lange Klinge; Buchenstandorte: S 2: Bärloch, S 4 Denzenberg.

Fichten-Versuchsflächen

	S1			S3		
	NF	NB	Ik	NF	NB	Ik
Wi-Hj.85	290	155	135	284	119	165
So-Hj.85	468	313	155	413	219	194
1985	758	468	290	697	338	359
NB/NF (%)	62			48		
Wi-Hj.86	453	273	180	452	235	217
So-Hj.86	587	364	223	569	325	244
1986	1040	637	403	1021	560	461
NB/NF (%)	61			55		

Durchschnittswerte 85/86

Wi-Hj.	372	214	158	368	177	191
So-Hj.	528	339	194	491	272	219
1985/86	899	553	347	859	449	410

NB/NF (%)

Wi-Hj.	58	48
So-Hj.	64	55
1985/86	62	52

Buchen-Versuchsflächen

	S2			S4		
	NF	NB	Ik	NF	NB	Ik
Wi-Hj.85	268	229	39	276	205	71
So-Hj.85	445	331	114	457	332	125
1985	713	560	153	733	537	196
NB/NF (%)	79			73		
Wi-Hj.86	432	375	57	425	365	60
So-Hj.86	631	475	156	536	412	124
1986	1063	850	213	961	777	184
NB/NF (%)	80			81		

Durchschnittswerte 85/86

Wi.-Hj.	350	302	48	351	285	66
So.-Hj.	538	403	134	497	372	125
1985/86	888	705	183	847	657	190

NB/NF (%)

Wi.-Hj.	86	81
So.-Hj.	75	75
1985/86	79	78

Tab. A-5-4: Niederschlags- und Verdunstungshöhen auf den Fichten- (S1: Schlagbaumlinde; S3: Obere Lange Klinge) und Buchentestflächen (S2: Bärloch; S4: Denzenberg).

	NF	NB	Ik	Is	T	ETA	ETA/NF
	- - - - - (mm) - - - - -						(%)
S1 Fichte							
Wi85	290	155	135	15	50	180	62
So85	468	313	155	39	302	496	106
1985	758	468	290	54	352	676	89
Wi86	453	273	180	24	50	254	56
So86	587	364	223	46	353	622	106
1986	1040	637	403	70	403	876	84
S3 Fichte							
Wi85	284	119	165	15	40	220	77
So85	413	219	194	39	193	426	103
1985	697	338	359	54	233	646	93
Wi86	452	235	217	24	40	281	62
So86	569	325	244	46	271	561	99
1986	1021	560	461	70	311	842	82
S2 Buche							
Wi 85	268	229	39	18	-	57	21
So 85	445	331	114	54	290	458	103
1985	713	560	153	72	290	515	72
Wi86	432	375	57	27	-	84	19
So86	631	475	156	59	378	593	94
1986	1063	850	213	86	378	677	64
S4 Buche							
Wi 85	276	205	71	18	-	89	32
So 85	457	332	125	54	285	464	102
1985	733	537	196	72	285	553	76
Wi86	425	365	60	27	-	87	20
So86	536	412	124	59	325	508	95
1986	961	777	184	86	325	595	62
Jahres-							
Mittelwerte							
Fichte							
1985	728	403	325	54	293	672	92
1986	1031	599	432	70	357	859	83
Buche							
1985	723	549	175	72	288	535	74
1986	1012	814	199	86	352	637	63
Mittlere nutzbare Feldkapazitäten (nFk)							
Fichtenflächen: 120 mm; Buchenflächen: 108 mm							

Tab. A-5-5: Vergleich von Verdunstungswerten der Bodenwasserbilanzmethode (aktuelle Evapotranspiration, ETA) in Anlehnung an FLECK (1986) und der Gebietswasserbilanzen (aktuelle Verdunstung, V_a) in 8 Teileinzugsgebieten des Schönbuschs. P 1: Großer Goldersbach, P 6: Bärloch, P 8: Kleiner Goldersbach, P 9: Josefsruh, P 14: Denzenberg, P 17: Obere Lange Klinge, P 18: Oberes Bärloch.

		$I_k + I_s + T = \text{ETA}$	$V_a = N - Q \pm \Delta R_b \pm \Delta R_g$
P 1	1985	265 + 61 + 296 = 622	596 = 729 - 161 + 27 + 1
	1986	339 + 76 + 360 = 775	716 = 1007 - 171 - 107 - 13
P 5/1	1985	222 + 63 + 316 = 601	541 = 713 - 212 + 23 + 17
	1986	308 + 78 + 386 = 772	650 = 1063 - 240 - 125 - 48
P 6	1985	168 + 70 + 279 = 517	548 = 713 - 182 + 14 + 3
	1986	234 + 84 + 362 = 680	713 = 1063 - 203 - 128 - 19
P 8	1985	245 + 60 + 321 = 626	628 = 758 - 161 + 26 + 5
	1986	340 + 75 + 385 = 800	745 = 1040 - 172 - 123 + 0
P 9	1985	183 + 68 + 307 = 558	650 = 758 - 124 + 16 + 0
	1986	255 + 82 + 387 = 724	756 = 1040 - 153 - 128 - 3
P 14	1985	227 + 67 + 261 = 555	590 = 733 - 205 + 45 + 17
	1986	237 + 83 + 308 = 628	597 = 961 - 240 - 100 - 24
P 17	1985	326 + 58 + 252 = 636	628 = 697 - 92 + 21 + 2
	1986	406 + 73 + 323 = 802	749 = 1021 - 175 - 93 - 4
P 18	1985	153 + 72 + 270 = 495	575 = 713 - 152 + 11 + 3
	1986	213 + 86 + 358 = 657	744 = 1063 - 179 - 129 - 11

Tab. A-5-6: Ausgewählte Kenngrößen und Wasserhaushaltsdaten von 6 Einzugsgebieten mit unterschiedlich modifizierten Abflußfaktoren.

Meßstelle	P 6	P 14	P 5/1	P 1	P 8	P 17
F_N (km ²)	0.38	0.185	9.06	37.6	1.11	0.344
F_U (km ²)	0.46	0.185	11.00	37.6	0.85	0.344
Nd (%)	11	19	50	60	67	80
RE-Stufe	5	6	3	2	4	4
Sdst.	0	83	9	58	25	100
1985						
NF (mm)	713	733	713	729	758	697
NB (mm)	545	506	491	464	513	371
Q_t (mm)	182	205	212	161	161	92
Q_t/NF	0.26	0.28	0.30	0.22	0.21	0.13
Q_t/NB	0.33	0.41	0.43	0.35	0.31	0.25
ΔR (mm)	-17	-62	-40	-28	-31	-23
$\frac{(Q_t + \Delta R)}{NF}$	0.23	0.20	0.24	0.18	0.17	0.10
$\frac{(Q_t + \Delta R)}{NB}$	0.30	0.28	0.35	0.29	0.25	0.19
1986						
NF (mm)	1063	961	1063	1007	1040	1021
NB (mm)	829	724	755	668	700	615
Q_t (mm)	203	240	240	171	172	175
Q_t/NF	0.19	0.25	0.23	0.17	0.17	0.17
Q_t/NB	0.24	0.33	0.32	0.26	0.25	0.28
ΔR (mm)	147	124	173	120	123	97
$\frac{(Q_t + \Delta R)}{NF}$	0.33	0.38	0.39	0.29	0.28	0.27
$\frac{(Q_t + \Delta R)}{NB}$	0.42	0.50	0.55	0.44	0.42	0.44

Abkürzungen: F_N , F_U : ober- und unterirdische Einzugsgebietsgröße; Nd: Anteil des Nadelwalds; RE-Stufe*: Reliefernergiestufe; Sdst.: Gebietsanteil des Sandsteinkeupers; NF, NB: Niederschlagshöhe im Freiland und im Bestand; Q_t : Gesamtabfluß; Delta R: Speicheränderungen im Boden und Aquifer.

*Einteilung nach der Methode nach BRÜNNING (in DÖRHÖFER und JOSPEIT, 1980): Quotient aus maximaler Höhendifferenz und zugehöriger Gebietsgröße wird in sechs Stufen von $<5\text{m}/\text{km}^2$ bis $>160\text{m}/\text{km}^2$ unterteilt.

Tab. A-5-7: Gesamtabfluß Q_t , Oberflächen- bzw. oberflächennaher Abfluß Q_{on} , Grundwasserabfluß Q_g in [mm/a] sowie Anteile [%] von Q_{on} und Q_g am Gesamtabfluß. Vergleich der Untersuchungsjahre 1985 und 1986 mit den Mittelwerten der früheren Meßperiode von 1979 bis 1982.

Meßstation	Meß- zeitraum	Q_t	Q_{on} mm	Q_g	Q_g/Q_t %	Q_{on}/Q_t
P 1	1985	161	58	103	64	36
Goldersbach/ Bebenhausen	Wi.Hj.85	63	17	46	73	27
	So.Hj.85	98	41	57	58	42
$F_N=F_U=37,6$	1986	172	73	99	58	42
	Wi.Hj.86	94	49	45	48	52
	So.Hj.86	78	24	54	69	31
	1979-82	172	68	104	60	40
P 5/1	1985	212	85	127	60	40
Kirnbach	Wi.Hj.85	66	21	45	68	32
	So.Hj.85	146	64	82	56	44
$F_N=9,06$ $F_U=11,0$	1986	240	97	143	60	40
	Wi.Hj.86	121	59	62	51	49
	So.Hj.86	119	38	81	68	32
	1979-82*	207	91	116	56	44
P 6	1985	182	70	112	62	38
Bärloch	Wi.Hj.85	48	17	31	65	35
	So.Hj.85	134	53	81	61	39
$F_N=0,38$ $F_U=0,48$	1986	203	81	122	60	40
	Wi.Hj.86	92	50	42	46	54
	So.Hj.86	111	31	80	72	60
	1979-82	241	83	158	66	34
P 8	1985	161	80	81	50	50
Kleiner Goldersbach	Wi.Hj.85	47	15	32	68	32
	So.Hj.85	114	65	49	43	57
$F_N=1,11$ $F_U=0,85$	1986	172	89	83	48	52
	Wi.Hj.86	108	60	48	44	56
	So.Hj.86	64	29	35	55	45
	1979-82	156	74	82	53	47
P 14	1985	205	59	146	71	29
Denzenberg	Wi.Hj.85	58	9	49	84	16
	So.Hj.85	147	50	97	66	34
$F_N=F_U=0,185$	1986	240	82	158	66	34
	Wi.Hj.86	112	48	64	57	43
	So.Hj.86	128	34	94	73	27
	1979-82	175	55	120	69	31
P 17	1985	92	35	57	62	38
Obere Lange Klinge	Wi.Hj.85	39	16	23	59	41
	So.Hj.85	53	19	34	64	36
$F_N=F_U=0,344$	1986	175	80	95	54	46
	Wi.Hj.86	88	37	51	58	42
	So.Hj.86	87	43	44	51	49
	1979-82	110	39	71	65	35

1979-82: Daten nach AGSTER (1986); *: umgerechnet auf veränderte F_U -Größe

Tab. A-6-1: Halbjährliche und jährliche Stoffeinträge mit dem Freiland (NF)- und Bestandesniederschlag (NB: Kronentraufe und Stammablauf) in die Versuchsflächen S 1 Schlagbaumlinde und S 3 Obere Lange Klinge (Fichte) sowie S 2 Bärloch und S 4 Denzenberg (Buche bzw. Buche/Eiche) während des Untersuchungszeitraums 1985 und 1986.

Angaben in kg/ha
H⁺: mol/ha

		S 1: Schlagbauml. (Fi)				S 2: Bärloch (Buche)				S 3: Ob. L.Klinge (Fi)				S 4: Denzenberg (Bu/Ei)			
		Nfs1	Nbs1	Nfs1	Nbs1	Nfs2	Nbs2	Nfs2	Nbs2	Nfs3	Nbs3	Nfs3	Nbs3	Nfs4	Nbs4	Nfs4	Nbs4
		1985	1985	1986	1986	1985	1985	1986	1986	1985	1985	1986	1986	1985	1985	1986	1986
Nied. (mm)	1.Hj.	290	155	453	273	268	229	432	375	284	119	452	235	276	205	425	365
	2.Hj.	468	313	587	364	445	331	631	475	413	219	569	325	457	332	536	412
	Summe	758	468	1040	637	713	560	1063	850	697	338	1021	560	733	537	961	777
H ⁺	1.Hj.	66	324	150	519	71	127	164	171	39	185	130	725	52	91	138	155
	2.Hj.	69	243	135	744	107	133	49	184	84	282	92	836	81	126	60	151
	Summe	136	567	285	1263	177	260	213	355	124	467	223	1561	133	216	198	306
Ca ²⁺	1.Hj.	1,59	5,03	1,68	10,33	1,50	3,86	4,88	4,12	0,82	5,86	4,43	12,83	1,74	4,32	3,61	6,34
	2.Hj.	4,77	4,10	3,76	6,74	6,00	5,54	4,23	8,24	4,58	8,97	3,64	8,85	8,77	7,01	2,85	9,17
	Summe	6,36	9,13	5,44	17,07	7,50	9,40	9,11	12,36	5,40	14,83	8,07	21,68	10,51	11,33	6,46	15,51
Mg ²⁺	1.Hj.	0,29	0,87	0,45	1,44	0,27	1,01	0,43	0,76	0,17	0,81	0,63	1,59	0,28	0,87	0,38	1,07
	2.Hj.	0,66	0,78	0,65	1,38	0,58	0,73	0,76	1,57	0,58	1,44	0,74	1,59	1,05	1,14	0,70	1,74
	Summe	0,95	1,65	1,10	2,82	0,85	1,74	1,19	2,33	0,75	2,25	1,37	3,18	1,33	2,01	1,08	2,81
Na ⁺	1.Hj.	1,36	1,07	1,63	2,64	1,96	1,06	3,29	2,17	1,02	1,20	2,98	3,38	0,75	1,33	2,25	2,92
	2.Hj.	3,65	2,00	2,76	2,70	3,20	1,07	4,16	3,03	2,97	2,84	3,24	2,34	2,69	1,63	2,04	2,13
	Summe	5,01	3,07	4,39	5,34	5,16	2,13	7,45	5,20	3,99	4,04	6,22	5,72	3,44	2,96	4,29	5,05
K ⁺	1.Hj.	0,49	5,03	1,31	10,33	0,89	6,61	0,78	9,47	0,34	5,45	2,08	9,31	0,39	9,05	0,98	11,05
	2.Hj.	1,78	10,74	1,23	12,31	1,11	8,47	3,03	14,11	1,24	11,42	1,14	11,80	2,28	10,33	1,71	15,79
	Summe	2,27	15,77	2,54	22,64	2,00	15,08	3,81	23,58	1,58	16,87	3,22	21,11	2,67	19,38	2,69	26,84
Cl ⁻	1.Hj.	3,30	4,90	3,17	7,20	3,57	4,16	2,90	5,30	2,87	5,25	3,03	10,81	2,46	4,73	3,19	6,07
	2.Hj.	2,81	7,39	3,58	5,72	2,49	4,56	4,48	5,30	2,39	7,42	3,36	6,24	2,92	4,08	3,05	4,47
	Summe	6,11	12,29	6,75	12,92	6,06	8,72	7,38	10,60	5,26	12,67	6,39	17,05	5,38	8,81	6,24	10,54
SO ₄ -S	1.Hj.	2,12	12,73	3,69	18,81	2,18	6,04	4,34	6,54	2,02	11,93	4,52	25,33	1,80	7,05	3,47	8,27
	2.Hj.	6,21	9,63	4,36	11,39	6,09	7,23	5,53	8,72	4,86	16,34	4,93	14,20	5,48	8,24	4,63	9,33
	Summe	8,33	22,36	8,05	30,20	8,28	13,27	9,87	15,26	6,87	28,27	9,45	39,53	7,28	15,28	8,10	17,60
NO ₃ -N	1.Hj.	1,48	2,20	2,36	5,50	1,62	1,82	2,68	3,02	1,35	3,10	2,81	8,63	1,21	2,12	2,28	4,07
	2.Hj.	3,20	3,92	2,57	5,36	3,51	3,78	3,36	4,29	3,04	8,05	2,70	8,66	3,31	4,55	2,88	4,44
	Summe	4,68	6,11	4,93	10,86	5,14	5,60	6,04	7,31	4,39	11,15	5,50	17,29	4,52	6,67	5,16	8,51
NH ₄ -N	1.Hj.	0,99	2,03	3,73	3,45	1,40	1,63	2,96	2,05	0,44	3,13	2,39	6,93	1,33	1,43	2,12	2,50
	2.Hj.	5,68	3,70	4,20	6,09	3,94	2,48	7,70	6,44	6,84	10,24	2,70	7,23	1,84	3,66	3,96	5,97
	Summe	6,67	5,73	7,93	9,54	5,34	4,11	10,66	8,49	7,28	13,38	5,09	14,16	3,17	5,09	6,07	8,46

Tab. A-8-1: Abfluß aus i.w. Interflow am Pegel 9 (IF, Q-P 9) und Bestandesniederschlag (Gebiet P 9: Josefsruh); Gesamtabflusses am Pegel 8 (Q_t-P 8) sowie daraus berechnete IF/NB- und IF/Q_t-Verhältnisse im Untersuchungszeitraum (Monatswerte).

P 9: Pegel Josefsruh, Oberlauf des Kleinen Goldersbachs; P 8: Pegel Kleiner Goldersbach
 NB - P 9: Gebietsniederschlag entsprechend dem Nd/Lb-Verhältnis von 22/78.

Berechnungsgrundlage: Ergebnisse der Testflächen S 1 (Fichte) und S 2 (Buche).

		IF (Q-P9)	NB	IF/NB	Q _t -P8	IF/Q _t
		(mm/Mo)	(mm/Mo)	(%)	(mm/Mo)	(%)
1984	November	1,0	34,8	2,9	3,5	27,3
	Dezember	0,9	30,8	2,9	4,5	19,9
1985	Januar	4,1	44,6	9,2	4,8	86,7
	Februar	5,8	22,7	25,6	15,3	37,7
	März	1,4	23,5	6,0	10,1	13,5
	April	9,1	56,2	16,2	9,2	98,9
	Mai	39,3	156,1	25,2	93,0	42,2
	Juni	4,2	46,1	9,1	10,4	39,9
	Juli	1,0	33,7	3,0	4,3	24,1
	August	0,3	50,2	0,6	2,4	13,6
	September	0,3	29,3	1,0	2,2	12,8
	Oktober	0,0	11,5	0,0	1,3	0,0
	November	0,4	53,5	0,7	3,3	11,7
1986	Dezember	2,4	36,6	6,6	7,2	33,7
	Januar	17,7	82,8	21,4	25,9	68,2
	Februar	0,5	17,5	2,9	1,8	27,4
	März	3,5	39,0	9,0	14,7	24,1
	April	36,1	123,8	29,2	55,3	65,4
	Mai	7,6	74,2	10,2	15,9	47,5
	Juni	6,4	66,5	9,6	13,6	47,1
	Juli	2,6	90,9	2,9	12,6	20,2
	August	1,2	98,3	1,2	6,6	18,5
	September	1,9	56,8	3,3	8,4	22,7
	Oktober	2,4	64,3	3,7	6,8	34,9

Tab. A-8-2: Hochwasser-Ereignis vom 26.08.1985 im Einzugsgebiet Denzenberg, P 14. Variationen von Abfluß, $\delta^{18}\text{O}$ -Werten, elektrischer Leitfähigkeit, Ca^{2+} - und SO_4^{2-} -Konzentrationen sowie Ergebnisse der Ganglinien-Separationen mit Lf, $\delta^{18}\text{O}$ und Ca-SO_4 .

Einzugsgebiet Denzenberg: N-Q-Ereignis 26.08.1985

Zeit	Q	$\delta^{18}\text{O}$	Lf	Ca	SO ₄	Separation der GW-Komponente					
						mit $\delta^{18}\text{O}$		mit Lf		mit Ca-SO ₄	
						GW/Q _t	GW	GW/Q _t	GW	GW/Q _t	GW
(h)	(l/s)	(‰)	(µS/cm)	(mg/l)	(%)	(l/s)	(%)	(l/s)	(%)	(l/s)	(%)
10:00	0,39	-9,47	660	71,0	11,5	99	0,38	91	0,35	78	0,30
11:00	0,39									78	0,30
11:30	4,21	-8,44	354	38,6	7,06	47	1,98	44	1,83	40	1,68
12:00	2,53	-8,24	348	41,6	6,34	37	0,94	43	1,08	44	1,11
12:30	1,45	-8,49	416	42,5	7,29	50	0,72	53	0,77	45	0,65
13:00	0,99	-8,64	474	54,1	8,31	57	0,56	62	0,61	59	0,58
13:30	0,86	-8,85	512	58,6	9,01	67	0,58	68	0,58	64	0,55
14:00	0,78	-	531	62,0	9,41			71	0,55	68	0,53
14:30	0,74	-	544	64,0	9,58			73	0,54	67	0,50
15:00	0,71	-	566	61,0	9,94			76	0,54	70	0,49
17:00	0,61	-9,45	590	71,0	10,6	97	0,59	80	0,49	73	0,45
Abflußkomponenten:											
GW		-9,50	720	90,0	11,3						
IFe		-7,50	71	2,1	4,0						
IFpe		-9,28	84	5,6	19,7						

Tab. A-8-3: Hochwasser-Ereignis vom 08.11.1985 im Einzugsgebiet Denzenberg, P 14. Variationen von Abfluß, $\delta^{18}\text{O}$ -Werten, elektrischer Leitfähigkeit und SO_4^{2-} -Konzentrationen sowie Ergebnisse der Ganglinien-Separationen mit Lf- SO_4 und Lf- $\delta^{18}\text{O}$.

Einzugsgebiet Denzenberg: N-Q-Ereignis 08.11. - 09.11.1985

Zeit (h)	Q (l/s)	Lf ($\mu\text{S/cm}$)	$\delta^{18}\text{O}$ ($^{\circ}/\text{‰}$)	SO_4 (mg/l)	3-Komponenten-Separations						
					mit Lf - SO_4			mit Lf - $\delta^{18}\text{O}$			
					GW	IFpe	IFe	GW	IFpe	IFe	
(1)	10,00	0,20	640	-9,50	11,40	88	4	8	89	11	0
(2)	12,40	0,60	534	-10,09	10,90	71	8	21	70	13	17
(3)	12,60	0,74	506	-10,02	10,70	66	9	25	66	20	14
(4)	13,10	0,87	456	-10,53	10,30	58	10	32	58	14	28
(5)	13,60	1,33	401	-11,06	9,67	49	10	41	48	11	41
(6)	14,10	1,46	390	-10,96	10,00	47	12	41	47	14	39
(7)	14,60	1,49	388	-10,97	10,80	46	16	38	47	14	39
(8)	15,10	1,48	396	-10,27	11,60	48	20	32	48	16	36
(9)	15,20	1,48	397	-10,78	11,70	49	20	31	48	18	34
(10)	16,20	1,44	410	-10,53	13,50	50	29	21	50	22	28
(11)	17,20	1,37	422	-10,30	13,70	52	29	19	52	26	22
(12)	18,20	1,14	447	-9,92	15,00	56	34	10	56	31	13
(13)	19,20	0,92	474	-9,79	15,10	60	34	6	61	30	9
(14)	20,20	0,79	497	-9,62	15,80	63	37	0	63	30	7
(15)	21,20	0,70	515	-9,21	15,90	66	34	0	67	26	7
(16)	22,20	0,64	531	-9,72	15,50	69	31	0	70	22	8
(17)	23,20	0,60	541	-9,60	15,30	71	29	0	71	24	5
(18)	24,20	0,56	551	-9,66	14,20	72	26	2	72	21	7
(19)	25,20	0,54	566	-9,66	14,90	74	26	0	75	20	5
(20)	26,20	0,51	571	-9,61	14,40	75	25	0	76	20	4
(21)	27,20	0,48	576	-9,58	13,90	77	22	1	77	20	3
(22)	29,20	0,44	585	-9,69	13,80	78	21	1	78	20	2
(23)	30,20	0,42	592	-9,64	13,60	79	20	1	79	16	5
(24)	31,20	0,40	593	-9,65	13,90	79	20	1	80	16	4
(25)	34,30	0,37	613	-9,46	12,30	83	12	5	82	16	2
Abflußkomponenten:											
			GW	720	-9,50	11,3					
			IFe	71	-13,50	4,7					
			IFpe	84	-9,30	23,9					

Tab. A-8-4:

Kenndaten verschiedener Niederschlag-Abfluß-Ereignisse im Einzugsgebiet Denzenberg (P 14)

	P 14 01.-05.02. 1985	P 14 07.-09.05. 1985	P 14 26.08. 1985	P 14 08.-09.11. 1985	P 14 05.-11.03. 1986	P 14 03.-07.04. 1986
NB-Höhe (mm)	19,0	13,4	6,42	10,7	20,7	20,1
Vor-Ereignis-Abfluß Q _{tpe} (l/s)	0,36	1,12	0,39	0,20	0,38	1,66
Hochwasser						
Dauer	5 Tage	2 Tage	7 Stunden	1 Tag	6 Tage	>5 Tage
Q _{tmax} (l/s)	10,55	10,83	4,21	1,49	3,2	25,55
Basisabfluß (mm)	0,84	1,02	0,05	0,09	1,06	3,74
Q _t (mm)	6,55	3,60	0,15	0,40	3,93	12,43
Q _{t+} (mm)	5,71	2,58	0,10	0,31	2,87	8,69
Q _t /NB (%)	34	27	2,3	3,8	19	62
Q _{t+} /NB (%)	30	19	1,6	2,9	14	43
Q _{tmax} /Q _{tpe} (%)	29	10	11	7	8	15
Komponenten-Separation						
Q _t (mm)	6,55	3,60	mit δ ¹⁸ O 0,15	mit Lf-δ ¹⁸ O 0,40	mit Lf-δ ¹⁸ O 3,93	mit δ ¹⁸ O 12,43
GW (mm)	1,70	1,37	0,09	0,23	1,45	4,72
IF _{pe} (mm)	4,00	1,63	-	0,08	2,28	6,59
IF _e (mm)	0,85	0,60	0,06	0,09	0,20	1,12
Q _t (%)	100	100	100	100	100	100
GW (%)	26	38	60	58	37	38
IF _{pe} (%)	61	45	-	20	58	53
IF _e (%)	13	17	40	22	5	9
IFgesamt/Q _t (%)	74	62	40	42	63	62
IFgesamt/NB (%)	26	17	0,9	1,6	12	38
IFe/NB (%)	4	4	0,9	0,8	1	6
GW+ (mm)	1,09	0,52	0,04	0,15	0,58	1,63
GW+/Q _{t+} (%)	19	20	40	27	20	36
NB-Q _{t+} (mm)	13,3	10,8	6,32	10,39	19,8	11,41
Q 3						
Schüttungs- variation						
Minimum (l/s)	0,039	0,084	ohne ereig- nisbedingte	0,0450	0,035	ca. 0,06
Maximum (l/s)	0,126	0,182	Änderungen	0,0495	0,067	ca. 0,14
IF _{pe} max/Q _t (%)	54	47		8 (IFges)	29	41
IF _e max/Q _t (%)	0	15			0	
Komponenten- Separation:						
Q _t (%)	100	100		100	100	100
GW (%)	82	70		>95	85	85
IF _{pe} (%)	18	27		<5 (IFges.)	15	15(IFges)
IF _e (%)	0	3			0	

Tab. A-8-5: Einzugsgebiet Denzenberg, P 14, Hochwasser-Ereignis vom 03. - 07.04.1986. Variationen von Abfluß, elektrischer Leitfähigkeit (Lf) und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten sowie Ergebnisse der Ganglinien-Separationen mit Lf und $\delta^{18}\text{O}$.

Einzugsgebiet Denzenberg: N-Q-Ereignis 03. - 07.04.1986

Datum	Q (l/s)	Lf ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	$\delta^{18}\text{O}$ ($^{\circ}/\text{‰}$)	- 2-Komponenten-Separation* -			
				mit Lf		mit $\delta^{18}\text{O}$	
				GW/ Q_t (%)	GW (l/s)	GW/ Q_t (%)	GW (l/s)
Basisabfluß	1,66	500	-9,85	69	1,14	79	1,32
03.04.86 11:00 ^x	12,61	240	-10,49	28	3,48	42	5,27
15:00	19,51	202	-10,52	22	4,21	40	7,80
19:00	25,55	174	-10,75	17	4,39	26	6,76
23:00 ^x	20,30	170	-10,68	17	3,36	31	6,21
04.04.86 03:00	8,86	195	-10,75	20	1,81	26	2,35
07:00	5,75	216	-10,70	24	1,37	29	1,69
11:00	4,25	236	-10,67	27	1,14	31	1,32
15:00	3,51	253	-10,58	30	1,04	36	1,28
19:00	3,10	270	-10,48	32	1,00	42	1,31
23:00	2,88	285	-10,52	35	1,00	40	1,15
05.04.86 03:00	2,69	297	-10,42	37	0,98	46	1,23
07:00	2,48	313	-10,43	39	0,97	45	1,12
11:00	2,35	324	-10,40	41	0,96	47	1,11
15:00	2,22	331	-10,32	42	0,93	52	1,15
19:00	2,14	335	-10,27	43	0,91	55	1,17
23:00	2,07	352	-10,30	45	0,94	53	1,10
06.04.86 03:00	2,01	360	-10,31	46	0,93	52	1,05
07:00	1,96	367	-10,28	48	0,93	54	1,06
11:00	1,92	373	-10,31	49	0,93	52	1,00
15:00	1,87	379	-10,29	49	0,92	54	1,00
19:00	1,82	418	-10,23	56	1,01	57	1,04
23:00	1,77	383	-10,22	50	0,89	58	1,02
07.04.86 03:00	1,74	393	-10,22	52	0,90	58	1,00
17:00	1,65	435	-10,15	58	0,96	62	1,02
*Grundwasser		700	-9,50				
Interflow		65	-11,20				

x 1. Q_t max ca. 10:00 Uhr
x 2. Q_t max ca. 20:00 Uhr

Tab. A-8-6: Einzugsgebiet Kleiner Goldersbach, P 8, Hochwasser-Ereignis vom 07. - 09.05.1985. Variationen von Abfluß, elektrischer Leitfähigkeit (Lf) und $\delta^{18}O$ -Werten sowie Ergebnisse der Ganglinien-Separationen mit Lf und $\delta^{18}O$ (vgl. Abb. 8-15).

Einzugsgebiet Kleiner Goldersbach: N-Q-Ereignis 07.05. - 09.05.1985

	Zeit (h)	Q (l/s)	Lf ($\mu S/cm$)	$\delta^{18}O$ ($^{\circ}/\infty$)	3-Komponenten-Separation mit Lf - $\delta^{18}O$					
					GW	IFpe	IFe	GW	IFpe	IFe
					----- (%) -----			----- (l/s) -----		
(1)	13,6	1,07	479	-9,61	78	14	8	0,84	0,15	0,09
(2)	19,0	1,22	449	-9,53	71	16	13	0,86	0,19	0,16
(3)	21,5	4,21	310	-9,19	40	25	35	1,68	1,05	1,47
(4)	22,0	11,17	310	-9,20	40	26	34	4,47	2,90	3,80
(5)	22,3	11,40	266	-9,19	30	33	37	3,42	3,76	4,22
(6)	22,6	11,61	192	-9,06	14	40	46	1,63	4,64	5,34
(7)	23,3	136,90	182	-9,16	13	46	41	17,80	62,97	56,13
(8)	23,6	135,60	175	-9,22	12	49	39	16,27	66,44	52,88
(9)	24,6	106,00	169	-9,32	11	53	36	11,66	56,18	38,16
(10)	25,3	96,42	174	-9,43	10	55	35	9,64	53,03	33,75
(11)	25,6	87,25	171	-9,45	11	56	33	9,60	48,86	28,79
(12)	26,3	85,02	171	-9,40	11	58	31	9,35	49,31	26,36
(13)	26,6	80,57	177	-9,62	13	62	25	10,47	49,95	20,14
(14)	35,3	24,86	211	-9,68	21	60	19	5,22	14,92	4,72
(15)	35,6	23,16	214	-9,72	23	58	19	5,33	13,43	4,40
(16)	36,3	22,51	214	-9,68	23	59	18	5,18	13,28	4,05
(17)	36,6	21,35	217	-9,66	24	59	19	5,12	12,60	4,06
(18)	37,3	20,05	214	-9,81	23	59	18	4,61	11,83	3,61
(19)	37,6	19,25	216	-9,77	24	58	18	4,62	11,17	3,47
(20)	38,3	18,20	217	-9,80	25	58	17	4,55	10,56	3,09
(21)	38,6	17,50	221	-9,71	24	61	15	4,20	10,68	2,63
(22)	39,3	17,34	226	-9,74	24	59	17	4,16	10,23	2,95
(23)	39,6	16,52	224	-9,84	25	58	17	4,13	9,58	2,81
(24)	40,3	15,46	229	-9,80	25	62	13	3,87	9,59	2,01
(25)	40,6	14,69	232	-9,69	26	60	14	3,82	8,81	2,06
(26)	41,3	14,42	229	-9,83	25	62	12	3,61	8,94	1,73
(27)	60,9	5,60	289	-9,78	38	51	11	2,13	2,86	0,62

Abflußkomponenten:

GW	583	-9,64
IFe	150	-7,75
IFpe	95	-10,31

GW: Mittelwert der km4-Quellen Q6a und Q6a1 und der Lias-Quelle Q 31
 IFe: Bestandesniederschlag, Testfläche S 1, Schlagbaumlinde, NB-Höhe = 14,1 mm
 IFpe: Mittelwert der flachen Deckschichten-Quellen Q6b, Q6b1 und des Sickerwassers aus S 1 75-3

Tab. A-8-7: Einzugsgebiet Kleiner Goldersbach, P 8, Hochwasser-Ereignis vom 04. - 11.03.1986. Variationen von Abfluß, elektrischer Leitfähigkeit (Lf) und $\delta^{18}O$ -Werten sowie Ergebnisse der Ganglinien-Separationen mit Lf und $\delta^{18}O$ (vgl. Abb. A-8-10 und Erläuterungen im Text, Kap. 8.5.3.2).

Gebiet Kleiner Goldersbach: N-Q-Ereignis 05.03. - 11.03.1986

	Datum	Zeit (h)	Q (l/s)	Lf ($\mu S/cm$)	$\delta^{18}O$ ($^{\circ}/\infty$)	3-Komponenten-Separation mit Lf - $\delta^{18}O$					
						GW	IFpe	IFe	GW	IFpe	IFe
						----- (%) -----			----- (l/s) -----		
(1)	04.03.86	15:48	0,53	641	-9,06	92	8	0	0,48	0,04	0,00
(2)	05.03.86	14: 0	0,89	633	-9,07	91	9	0	0,81	0,08	0,00
(3)	06.03.86	16:18	2,23	545	-10,11	77	14	9	1,71	0,31	0,20
(4)	07.03.86	12:48	26,88	170	-11,10	14	71	15	3,76	19,08	4,03
(5)	08.03.86	16:12	23,06	210	-10,74	21	69	10	4,84	15,91	2,31
(6)	09.03.86	14:36	10,06	238	-10,51	25	66	9	2,52	6,64	0,91
(7)	11.03.86	14: 6	5,54	289	-10,22	34	60	6	1,88	3,32	0,33

Abflußkomponenten:

IFpe	86	-9,86
IFe	73	-18,34
GW	692	-9,21

Tab. A-8-8: Einzugsgebiet Kleiner Goldersbach, P 8, Hochwasser-Ereignis vom 03. - 07.04.1986. Variationen von Abfluß, elektrischer Leitfähigkeit (Lf) und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten sowie Ergebnis der 3-Komponenten-Separation mit Lf und $\delta^{18}\text{O}$ (vgl. Erläuterungen im Text, Kap. 8.5.3.3).

Gebiet Kleiner Goldersbach: N-Q-Ereignis 03.04. - 07.04.1986

	Datum	Zeit (h)	Q (l/s)	Lf ($\mu\text{S/cm}$)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
(1)	03.04.86	11:48	89,750	185	-9,96
(2)	03.04.86	12:18	86,500	181	-9,91
(3)	03.04.86	12:48	87,000	183	-9,85
(4)	03.04.86	13:18	92,000	178	-9,95
(5)	03.04.86	13:48	105,870	168	-9,95
(6)	03.04.86	14:48	134,500	170	-9,95
(7)	03.04.86	15:18	171,370	185	-9,97
(8)	03.04.86	15:48	211,500	172	-9,92
(9)	03.04.86	16:18	251,250	182	-10,04
(10)	03.04.86	16:48	276,000	168	-10,00
(11)	03.04.86	17:18	293,750	163	-9,99
(12)	03.04.86	17:48	297,500	163	-10,05
(13)	03.04.86	18:18	308,750	157	-10,11
(14)	03.04.86	18:48	313,750	157	-10,11
(15)	04.04.86	12:24	48,875	175	-10,10
(16)	04.04.86	12:24	48,875	179	-10,15
(17)	04.04.86	17:18	37,875	183	-10,06
(18)	04.04.86	17:18	37,875	191	-10,02
(19)	05.04.86	13:42	16,825	221	-9,90
(20)	05.04.86	14:12	16,150	219	-9,85
(21)	05.04.86	14:42	15,887	221	-9,79
(22)	05.04.86	15:12	15,625	217	-9,98
(23)	07.04.86	13:18	7,800	278	-9,91
Abflußkomponenten:			IFpe	92	-9,81
			IFe	185	-10,63
			GW	692	-9,21

3-Komponenten-Separation mit Lf - $\delta^{18}\text{O}$

Mittlere Anteile der Abflußkomponenten am Gesamtabfluß

	GW	IFpe	IFe
	-----	(%)	----
	12	62	24

Tab. A-8-9: Einzugsgebiet Großer Goldersbach, P 1, Hochwasser-Ereignis vom 07. - 09.05.1985. Variationen von Abfluß, elektrischer Leitfähigkeit (Lf) und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten sowie Ergebnisse der Ganglinien-Separationen mit Lf und $\delta^{18}\text{O}$ (vgl. Abb. A-8-11 und Erläuterungen im Text, Kap. 8.5.4.1).

Einzugsgebiet Großer Goldersbach: N-Q-Ereignis 07.05. - 09.05.1985

Datum	Zeit (h)	t (Std.)	Q (l/s)	3-Komponenten-Separation mit Lf - $\delta^{18}\text{O}$			3-Komponenten-Separation mit Lf - $\delta^{18}\text{O}$					
				Lf ($\mu\text{S/cm}$)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	GW	IFpe	IFe	GW	IFpe	IFe	
	07.05.85	14:00	0,0	148								
(1)	07.05.85	18:50	14,8	168	608	-9,45	78	13	9	131	22	15
(2)	08.05.85	10:00	20,0	816	331	-9,69	36	43	21	294	351	171
(3)	08.05.85	17:20	27,3	603	334	-9,75	35	46	19	211	277	115
(4)	09.05.85	13:50	47,8	342	415	-9,83	49	40	11	168	137	38

Abflußkomponenten:

GW	730	-9,4
IFe	85	-8,1
IFpe	88	-10,8

GW: Mittelwert Niedrigwasser bei P 1

IFe: Bestandesniederschlag, Mittelwert NB S 1, S 3, S 4, NB-Höhe = 13,8 mm

IFpe: Mittelwert der IF-Meßanlage Denzenberg, der flachen Deckschichten-Quellen Q6b, Q6b1 und IF-Proben aus dem Gebiet P 8

3-Komponenten-Separation mit Lf - $\delta^{18}\text{O}$

Mittlere Anteile der Abflußkomponenten am Gesamtabfluß

	GW	IFpe	IFe
	-----	(%)	----
	46	38	16

Tab. A-8-10: Kenndaten verschiedener N-Q-Ereignisse. Vergleich der Gebiet P 14, P 8 und P 1.

	P 14 07.-09.05. 1985	P 8 07.-09.05. 1985	P 1 07.-09.05. 1985	P 14 05.-11.03. 1986	P 8 05.-11.03. 1986	P 1 05.-11.03. 1986	P 14 03.-07.04. 1986	P 8 03.-07.04. 1986	P 1 03.-07.04. 1986
NB-Höhe (mm)	13,4	14,1	13,8	<20,7	<16,0	<17,9	20,1	29,1	25,5
Vor-Ereignis-Q. Q _{tpe} (l/s)	1,12	1,07	148	0,38	0,53	50	1,66	1,18	148
Hochwasser									
Dauer	2 Tage	2 Tage	2 Tage	6 Tage	6 Tage	6 Tage	5 Tage	5 Tage	5 Tage
Basisabfl. (mm)	1,02	0,16	0,68	1,06	0,29	0,69	3,74	0,46	1,7
Q _t (mm)	3,60	3,70	2,49	3,93	5,39	3,91	12,43	18,9	8,8
Q _{t+} (mm)	2,58	3,54	1,81	2,87	5,10	3,22	8,69	18,4	7,1
q _t /NB (%)	27	26	18	>19	>34	>22	62	65	34
q _{t+} /NB (%)	19	25	13	>14	>32	>18	43	63	28
q _t max (l/s)	10,83	136,9	1075	3,2	26,88	463	25,55	313,75	4658
Q _t max/Q _{tpe}	10	128	7	8	51	9	15	266	31
Komp.-Separat.									
Q _t (mm)	3,60	3,70	2,49	3,93	5,39	3,91	12,43	18,9	8,8
GW (mm)	1,37	0,56	1,14	1,45	1,24	1,88	4,72	2,27	2,3
IF _{pe} (mm)	1,63	2,11	0,95	2,28	3,56	1,76	6,59	11,72	2,8
IF _e (mm)	0,60	1,04	0,40	0,20	0,59	0,27	1,12	4,91	3,7
Q _t (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
GW (%)	38	15	46	37	23	48	38	12	26
IF _{pe} (%)	45	57	38	58	66	45	53	62	32
IF _e (%)	17	28	16	5	11	7	9	26	42
IF _{gesamt} /Q _t (%)	62	85	54	63	77	52	62	88	74
IF _{gesamt} /NB (%)	17	22	10	>12	>25	11	38	57	25
IF _e /NB (%)	4	7	3	>1	>3	>2	6	17	15
GW+ (mm)	0,52	0,43	0,46	0,58	0,95	1,19	1,63	1,81	0,6
GW+Q _{t+} (%)	20	12	25	20	19	37	36	10	7
NB-Q _{t+} (mm)	10,8	10,6	12,0	<19,8	<10,9	14,7	11,41	10,7	18,4
Einzelwerte:									
GW min (l/s)	0,85	0,84	ca. 148	0,31	0,53	50	1,34	<1,18	<148
GW max (l/s)	2,82	17,80	630	0,90	4,84	199	7,80	37,65	ca. 838
IF _{pe} min (l/s)	0,09	0,15	-	0,05	0,04	3	0,34	-	-
IF _{pe} max (l/s)	5,15	66,40	351	1,76	19,08	227	15,03	194,53	ca. 1584
IF _e max (l/s)	3,14	56,10	180	0,23	4,03	37	3,76	81,58	ca. 2236
Maximum									
IF _{gesamt} /Q _t (%)	77	90	65	62	86	57	74	88	84

Tab. A-8-11: Einzugsgebiet Großer Goldersbach, P 1, Hochwasser-Ereignisse vom 05.03. - 11.03.1986 (oben) und vom 03. - 07.-04.1986 (unten). Variationen von Abfluß, elektrischer Leitfähigkeit (Lf) und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten sowie Ergebnisse der Ganglinien-Separationen mit Lf und $\delta^{18}\text{O}$ (vgl. Abb. A-8-12 und Erläuterungen im Text, Kap. 8.5.4.2 und 8.5.4.3).

Einzugsgebiet Großer Goldersbach: N-Q-Ereignis 05.03. - 11.03.1986

Datum	Zeit (h)	Lf ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Q (l/s)	$\delta^{18}\text{O}$ ($^{\circ}/\text{‰}$)	3-Komponenten-Separation mit Lf - $\delta^{18}\text{O}$					
					GW	IFpe	IFe	GW	IFpe	IFe
					----- (%) -----			----- (l/s) -----		
05.03.86	16:18	876	86	-9,52	96	4	0	83	3	0
07.03.86	13:48	442	463	-10,66	43	49	8	199	227	37
08.03.86	17:18	425	342	-10,60	41	51	8	140	174	27
11.03.86	17:18	512	148	-10,10	52	46	2	77	68	3
14.03.86	17:12	541	140	-10,13						

Abflußkomponenten:

GW	914	-9,55
IFe	94	-17,18
IFpe	80	-10,32

Mittlere Anteile der Abflußkomponenten am Gesamtabfluß

GW	IFpe	IFe
----- (%) -----	----- (%) -----	----- (%) -----
48	45	7

GW: Mittelwert Niedrigwasser bei P 1

IFe: Bestandesniederschlag, Mittelwert der Versuchsflächenergebnisse, NB-Höhe = 17,9 mm

IFpe: Mittelwert der IF-Messungen im Gebiet Denzenberg und Kleiner Goldersbach

Einzugsgebiet Großer Goldersbach: N-Q-Ereignis 03.04. - 07.04.1986

Datum	Zeit (h)	Lf ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Q (l/s)	$\delta^{18}\text{O}$ ($^{\circ}/\text{‰}$)	3-Komponenten-Separation mit Lf - $\delta^{18}\text{O}$					
					GW	IFpe	IFe	GW	IFpe	IFe
					----- (%) -----			----- (l/s) -----		
03.04.86	12:48	359	1008	-9,89	32	40	28	323	403	282
04.04.86	12:12	232	1383	-10,24	17	13	70	235	180	968
04.04.86	14:54	242	1147	-10,08	18	35	47	206	401	539
05.04.86	16:12	314	445	-10,07	27	23	50	120	102	223
08.04.86	13: 6	454	205	-10,02	44	9	47	90	18	96

Abflußkomponenten:

GW	914	-9,55
IFe	104	-9,74
IFpe	79	-10,51

Mittlere Anteile der Abflußkomponenten am Gesamtabfluß

GW	IFpe	IFe
----- (%) -----	----- (%) -----	----- (%) -----
26	32	42

Tab. A-8-12: Einzugsgebiete Großer Goldersbach (P 1) und Kirnbach (P 5/1). Daten einer extreme Hochwasser-Situation am Beispiel des N-Q-Ereignisses vom 17. und 18.05.1985. Variationen von Abfluß, elektrischer Leitfähigkeit (Lf) und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten sowie Ergebnisse der Gangli-nen-Separationen mit Lf und $\delta^{18}\text{O}$ (vgl. Abb. A-8-12 und Erläuterungen im Text, Kap. 8.5.5).

Einzugsgebiet Großer Goldersbach: N-Q-Ereignis 17.05. - 18.05.1986

Datum	Zeit (h)	Q (l/s)	Lf ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	3-Komponenten-Separation mit Lf - $\delta^{18}\text{O}$						K ⁺ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
					GW	IFpe (%)	IFe	GW (l/s)	IFpe	IFe		
(1)	17.05.85 05:30	3805	287	-8,99	30	5	65	1142	190	2473	2,84	3,45
(2)	17.05.85 09:00	4441	207	-8,98	17	10	73	755	444	3242	7,20	5,70
(3)	17.05.85 12:40	2728	227	-9,13	20	22	58	546	600	1582	7,20	6,11
(4)	17.05.85 15:00	2080	234	-9,26	21	32	47	437	665	978	7,40	6,04
(5)	18.05.85 15:20	540	349	-9,57	39	48	13	211	259	70	6,44	4,50
	20.05.85 17:50	342	408	-9,54							6,04	3,45
	28.05.85 17:00	220	582	-9,38							6,44	3,39

Q_{t,max}:
17.05.85 06:30 8250

Abflußkomponenten:	Q	Lf	$\delta^{18}\text{O}$	Mittlere Anteile der Abflußkomponenten am Gesamtabfluß
GW	730	-9,40		GW IFpe IFe
IFe	100	-8,74		----- (%) -----
IFpe	105	-9,94		28 17 55

Einzugsgebiet Kirnbach: N-Q-Ereignis 17.05. - 18.05.1986

Datum	Zeit (h)	Q (l/s)	Lf ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	3-Komponenten-Separation mit Lf - $\delta^{18}\text{O}$					
					GW	IFpe (%)	IFe	GW (l/s)	IFpe	IFe
(1)	26.04.85 12:00	30	552	-9,60	89	11	0	27	3	0
(2)	17.05.85 05:42	8500	174	-8,98	22	17	61	1870	1445	5185
(3)	17.05.85 09:18	2940	200	-9,07	26	19	55	764	559	1617
(4)	17.05.85 11:30	2281	224	-9,21	30	22	48	684	502	1095
(5)	17.05.85 15:30	1100	260	-9,76	37	40	23	407	440	253
(6)	18.05.85 10:48	466	343	-9,62	52	29	19	242	135	89
(7)	18.05.85 15:30	436	355	-9,59	53	27	18	231	118	78
(8)	20.05.85 14:36	390	395	-9,56	61	24	15	238	94	59
(9)	28.05.85 14:00	73	544	-9,42	88	9	3	64	7	2

Q_{t,max}:
17.05.85 05:20 9862

Abflußkomponenten:	Q	Lf	$\delta^{18}\text{O}$	Mittlere Anteile der Abflußkomponenten am Gesamtabfluß
GW	610	-9,30		GW IFpe IFe
IFe	50	-8,28		----- (%) -----
IFpe	68	-11,03		25 19 56

In der Reihe C der Tübinger Geowissenschaftlichen Arbeiten (TGA) sind bisher erschienen:

- Nr. 1: Grathwohl, Peter (1989): Verteilung unpolarer organischer Verbindungen in der wasserungesättigten Bodenzone am Beispiel der leichtflüchtigen aliphatischen Chlorkohlenwasserstoffe. 102 S.
- Nr. 2: Eisele, Gerhard (1989): Labor- und Felduntersuchungen zur Ausbreitung und Verteilung leichtflüchtiger chlorierter Kohlenwasserstoffe (LCKW) im Übergangsbereich wasserungesättigte/wassergesättigte Zone. 84 S.
- Nr. 3: Ehmann, Michael (1989): Auswirkungen atmosphärischer Stoffeinträge auf Boden- und Grundwasser sowie Stoffbilanzierungen in drei bewaldeten Einzugsgebieten im Oberen Buntsandstein (Nordschwarzwald). 134 S.
- Nr. 4: Irouschek, Thomas (1990): Hydrogeologie und Stoffumsatz im Buntsandstein des Nordschwarzwaldes. 144 S.
- Nr. 5: Sanns, Matthias (1990): Experimentelle Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten von leichtflüchtigen Chlorkohlenwasserstoffen (LCKW) in der wassergesättigten Zone. 122 S.
- Nr. 6: Seeger, Thomas (1990): Abfluß- und Stofffrachtseparation im Buntsandstein des Nordschwarzwaldes. 154 S.
- Nr. 7: Einsele, Gerhard & Pfeffer, Karl-Heinz (Hrsg.) (1990): Untersuchungen über die Auswirkungen des Reaktorunfalls von Tschernobyl auf Böden, Klärschlamm und Sickerwasser im Raum von Oberschwaben und Tübingen. 151 S.
- Nr. 8: Douveas, Nikon G. (1990): Verwitterungstiefe und Untergrundabdichtung beim Talsperrenbau in dem verkarsteten Nord-Pindos-Flysch (Projekt Pigai-Aoos, NW-Griechenland). 165 S.
- Nr. 9: Schlöser, Heike (1991): Quantifizierung der Silikatverwitterung in karbonatfreien Deckschichten des Mittleren Buntsandsteins im Nordschwarzwald. 93 S.
- Nr. 10: Köhler, Wulf-Rainer (1992): Beschaffenheit ausgewählter, nicht direkt anthropogen beeinflusster oberflächennaher und tiefer Grundwasservorkommen in Baden-Württemberg. 144 S.
- Nr. 11: Bundschuh, Jochen (1991): Der Aquifer als thermodynamisch offenes System. - Untersuchungen zum Wärmetransport in oberflächennahen Grundwasserleitern unter besonderer Berücksichtigung von Quellwassertemperaturen (Modellversuche und Geländebeispiele). 100 S.
- Nr. 12: Herbert, Mike (1992): Sorptions- und Desorptionsverhalten von ausgewählten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) im Grundwasserbereich. 111 S.
- Nr. 13: Sauter, Martin (1993): Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a karst aquifer (Gallusquelle, Malm, SW-Germany). 150 S.
- Nr. 14: Bauer, Michael (1993): Wasserhaushalt, aktueller und holozäner Lösungsabtrag im Wutachgebiet (Südschwarzwald). 130 S.
- Nr. 15: Einsele, Gerhard & Ricken, Werner (Hrsg.) (1993): Eintiefungsgeschichte und Stoffaustag im Wutachgebiet (SW-Deutschland). 215 S.

- Nr. 16: Jordan, Ulrich (1993): Die holozänen Massenverlagerungen des Wutachgebietes (Südschwarzwald). 132 S.
- Nr. 17: Krejci, Dieter (1994): Grundwasserchemismus im Umfeld der Sonderabfalldeponie Billigheim und Strategie zur Erkennung eines Deponiesickerwassereinflusses. 121 S.
- Nr. 18: Hekel, Uwe (1994): Hydrogeologische Erkundung toniger Festgesteine am Beispiel des Opalinustons (Unteres Aalenium). 170 S.
- Nr. 19: Schüth, Christoph (1994): Sorptionskinetik und Transportverhalten von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) im Grundwasser - Laborversuche. 80 S.
- Nr. 20: Schlöser, Helmut (1994): Lösungsgleichgewichte im Mineralwasser des überdeckten Muschelkalks in Mittel-Württemberg. 76 S.
- Nr. 21: Pyka, Wilhelm (1994): Freisetzung von Teerinhaltstoffen aus residualer Teerphase in das Grundwasser: Laboruntersuchungen zur Lösungsrate und Lösungsvermittlung. 76 S.
- Nr. 22: Biehler, Daniel (1995): Kluftgrundwässer im kristallinen Grundgebirge des Schwarzwaldes - Ergebnisse von Untersuchungen in Stollen. 103 S.
- Nr. 23: Schmid, Th. (1995): Wasserhaushalt und Stoffumsatz in Grünlandgebieten im württembergischen Allgäu. 145+92 S.
- Nr. 24: Kretzschmar, Thomas (1995): Hydrochemische, petrographische und thermodynamische Untersuchungen zur Genese tiefer Buntsandsteinwässer in Baden-Württemberg. 142 S.
- Nr. 25: Hebestreit, Christoph (1995): Zur jungpleistozänen und holozänen Entwicklung der Wutach (SW-Deutschland). 88 S.
- Nr. 26: Hinderer, Matthias (1995): Simulation langfristiger Trends der Boden- und Grundwasserver-sauerung im Buntsandstein-Schwarzwald auf der Grundlage langjähriger Stoffbilanzen. 175 S.



ATTEMPTO SERVICE GmbH
Wilhelmstraße 7 · 72074 Tübingen
Telefon: 0 70 71 / 29 59 95 / 29 35 58