

Tübingen Geowissenschaftliche Arbeiten

Thomas Seeger

Abfluß- und Stofffrachtseparation
im Buntsandstein
des Nordschwarzwaldes

Reihe C

Hydro-, Ingenieur- und Umweltgeologie

Nr. 6, 1990

Herausgeber: Institut und Museum für Geologie und Paläontologie
der Universität Tübingen
Sigwartstr. 10
D-7400 TÜBINGEN

Schriftleitung für die Reihe C:

Lehrstuhl für Allgemeine und Angewandte Geologie
Prof. Dr. G. Einsele

ISSN 0935-4948

Abfluß- und Stofffrachtseparation im Buntsandstein des Nordschwarzwaldes

von Thomas Seeger*

K u r z f a s s u n g: In den im Nordschwarzwald gelegenen Buntsandstein-Gebieten Seebach, Rotenbach und Kleine Kinzig wurden in den Jahren 1985 bis 1988 (Seebach) bzw. 1987/88 (Rotenbach und Kleine Kinzig) Untersuchungen zum Abflußverhalten und zum Stoffumsatz durchgeführt. Die Gebiete werden nahezu lückenlos von periglazialen Deckschichten bedeckt, die vor allem im westexponierten Gebiet Rotenbach große Mächtigkeiten von bis zu 10 m erreichen. Die Deckschichten stellen, durch ihre Funktion als Puffer und Speicher des infiltrierten Niederschlagswassers, ein wichtiges Regelglied für den Wasserhaushalt dar.

Die Trockenwetter-Leerlaufkurven der Vorfluter zeigen nach einem Hochwasser mit guter Übereinstimmung jeweils vier angenäherte, zeitlich voneinander getrennte Geraden unterschiedlicher Steigung. Sie geben das Abflußverhalten verschiedener Abflußkomponenten an, die unterschiedlichen Speicherräumen entstammen. Beim Vergleich mit dem Leerlaufverhalten von Quellen unterschiedlicher Horizonte konnten die vier Komponenten Q_o (oberflächennaher Abfluß), Q_{do} (Abfluß über dem Ortstein bzw. über die oberen, grobporenen Deckschichtenbereiche), Q_d (Abfluß aus den tieferen Deckschichten) und Q_g (Grundwasserabfluß) abgetrennt werden.

In Trockenjahren wie 1985 nimmt der Grundwasserabfluß (Q_g) den größten Teil des Gesamtabflusses ein. In längeren Trockenperioden gewährleisten die Deckschichten durch ihr Puffer- und Speichervermögen eine stetige und dosierte Grundwasserneubildung, wodurch auch in Trockenjahren ein gleichmäßiger Grundwasserabfluß gesichert ist. In Naßjahren (1986 bis 1988) fließt ein Großteil des infiltrierten Niederschlagswassers im Boden (Q_o) oder in den Deckschichten (Q_{do} , Q_d) als hangparalleler Abfluß mit geringer zeitlicher Verzögerung dem Vorfluter zu. Am Rotenbach ist ein starker unterirdischer Grundwasserzstrom vorhanden, der auch in Naßjahren einen hohen Grundwasseranteil am Gesamtabfluß bewirkt.

Der Lösungsinhalt nimmt vom Freilandniederschlag zum Bestandesniederschlag deutlich zu. Die stärksten Zunahmen sind bei Kalium durch Kronenauswaschung und bei Sulfat durch trockene Deposition festzustellen. Die pH-Werte sind dementsprechend im Bestandesniederschlag bei Werten zwischen 3,9 und 4,4 niedriger als im Freiland.

* Dissertation an der Geowissenschaftlichen Fakultät der Universität Tübingen
Anschrift des Verfassers: Staufenweg 8, 7271 Rohrdorf

Die chemische Beschaffenheit der oberflächennahen Abflußkomponenten ist weitgehend vom Bestandesniederschlag abhängig. Im oberflächennahen Abfluß (Q₀) ist der Lösungsinhalt in erster Linie durch relative Stoffanreicherung aufgrund von Verdunstungsprozessen gegenüber dem Bestandesniederschlag etwas erhöht. Nach ihren pH-Werten befinden sich die Böden und die oberen Deckschichtenbereiche im Al-Pufferbereich. Auf seinem Weg vom Boden bis in den Festgesteinsaquifer wird das Sickerwasser zunehmend aufkonzentriert, was vor allem auf die Auswaschung von Erdalkalien zurückzuführen ist. Dagegen nehmen die Sulfat- und Nitratgehalte mit zunehmender Tiefe ab. Während im oberflächennahen Abfluß Sulfat das dominierende Ion darstellt, ist im Grundwasser das Hydrogencarbonat vorherrschend. Die Grundwässer befinden sich ganzjährig im Hydrogencarbonat-Pufferbereich und zeigen noch keine Versauerungserscheinungen. Die Lösungsinhalte und pH-Werte in den Vorflutern korrelieren in erster Linie mit der Schüttung bzw. mit den Anteilen der einzelnen Abflußkomponenten am Gesamtabfluß. Bei Hochwasser nach der Schneeschmelze oder nach starken Niederschlagsereignissen kommt es zu Versauerungsschüben im Vorfluter, die vor allem am Seebach sehr ausgeprägt sind (pH_{min} = 3,6). Am Rotenbach sank im Meßzeitraum der pH-Wert aufgrund eines hohen Grundwasserzustromes nie unter 5,9. An der Kleinen Kinzig gewährleistet der Obere Buntsandstein eine bessere Abpufferung als am Seebach (pH_{min} = 5,1).

Die Stoffeinträge nehmen vom Freiland zum Fichtenbestand stark zu, wobei vor allem die Kalium- und Sulfatfrachten deutlich ansteigen. Bei den Stoffausträgen dominieren die geogenen Komponenten Ca, Mg und HCO₃. Die Stofffrachtseparation zeigt, daß die Erdalkalien vorwiegend über das Grundwasser ausgetragen werden. Ein erheblicher Teil wird aus den Deckschichten ausgewaschen und gelangt mit dem Sickerwasser durch den Festgesteinsaquifer über die Basisquellen zum Austrag. Die Böden am Seebach haben praktisch keine puffernde Wirkung mehr. Dagegen tragen die Deckschichten bei zunehmender Verarmung an Erdalkalien noch zur Abpufferung der eingetragenen Säuren bei. An der Kleinen Kinzig fallen die durch Streusalz erhöhten Na- und Cl-Austräge auf. Nennenswerte Speicherungsprozesse sind nur beim SO₄ festzustellen. Vor allem in Trockenjahren wird ein Großteil des Sulfates schon im Oberboden abgelagert. In Naßjahren kommt es in den Böden durch erhöhten Säureeintrag zur teilweisen Remobilisierung des Sulfates, das in den Deckschichten mit steigenden pH-Werten wieder akkumuliert wird.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde mir von Herrn Prof. Dr. G. Einsele überlassen. Für seine fachliche Unterstützung und seine fördernde Betreuung möchte ich ihm hiermit danken.

Desweiteren gilt mein Dank folgenden Personen und Behörden:

- meinen Kollegen Herrn Dr. M. Ehmann, Herrn Dipl. Geol. T. Irouschek, Herrn Dipl. Geol. M. Sauter, Frau Dipl. Geol. H. Schlöser und Herrn Dipl. Geol. H. Schlöser für die gute Zusammenarbeit und für viele wertvolle Anregungen. Besonders möchte ich Herrn Dipl. Geol. Irouschek für die Unterstützung beim installieren der Geräte im Gelände danken.
- Frau Hartmann-Renz für die sorgfältige Durchführung hydrochemischer Analysen
- Herrn H. Reif von den Baden-Werken Forbach für die Entnahme zahlreicher Wasserproben am Seebach
- den Baden-Werken Forbach für die Überlassung zahlreicher Abflußdaten
- den zuständigen Revierförstern für die freundliche Unterstützung im Gelände
- der Oberforstdirektion Karlsruhe für die Erlaubnis zum Befahren von Waldwegen
- Herrn Revierförster Wieland (Oppenau) für das Sammeln zahlreicher Niederschlagsproben
- Herrn Nock von der Stadt Oppenau für seine hilfreichen Hinweise und Anregungen
- dem Betriebsleiter des Zweckverbandes Wasserversorgung Kleine Kinzig Herrn J. Rapp für das zahlreiche Datenmaterial und die Einladung zum Erfahrungsaustausch mit an Forschungen im Gebiet der Trinkwassertalsperre Kleine Kinzig beteiligten Behörden und Forschungsgruppen
- allen Kollegen/innen in U 11 und U 12 des Tübinger Geologischen Instituts für das gute Arbeitsklima und die ständige Bereitschaft zur Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Untersuchungsgebiete	2
2.1 Lage und Morphologie der Arbeitsgebiete	2
2.2 Geologie	5
2.2.1 Grundgebirge (gn, gm)	8
2.2.2 Rotliegendes (ro)	8
2.2.3 Buntsandstein	9
2.2.3.1 Unterer Buntsandstein (su)	9
2.2.3.2 Eck'sches Konglomerat (smc1)	10
2.2.3.3 Bausandstein (sm)	10
2.3.4 Hauptkonglomerat (smc2)	11
2.3.5 Oberer Buntsandstein (so)	12
2.3 Periglaziale Deckschichten	13
2.3.1 Deck- und Blockschutt-Typen	13
2.3.2 Schuttdecken der Hochflächen	14
2.3.3 Schuttdecken der Hanglagen	17
2.3.4 Blockmassen	20
3. Hydrogeologie	22
3.1 Meßstellennetz	22
3.2 Hydrologisch wichtige Kennwerte der Deckschichten und des Buntsandsteinaquifers	25
3.3 Theoretische Überlegungen zum Abflußverhalten der Deckschichten bei verschiedenen Ausgangswassergehalten	29
3.3.1 Infiltration und oberflächennaher Abfluß.	29
3.3.2 Fließbewegungen in den Deckschichten	33
3.3.3 Infiltration in den Festgesteinsaquifer	37
3.3.4 Schlußfolgerungen	38

	Seite	
3.4	Wasserbilanz	39
3.4.1	Niederschlag	39
3.4.2	Verdunstung	42
3.4.2.1	Potentielle Verdunstung	42
3.4.2.2	Reelle Verdunstung	43
3.4.3	Bodenwasserdefizit	46
3.4.4	Abflußhöhen	47
3.5	Abflußverhalten der Vorfluter und Quellen	49
3.5.1	Abflußmengen und -spenden	49
3.5.1.1	Seebach	49
3.5.1.2	Rotenbach	52
3.5.1.3	Kleine Kinzig	53
3.5.2	Niederschlag-Abfluß Beziehungen	54
3.5.2.1	Seebach	56
3.5.2.2	Rotenbach	59
3.4.2.3	Kleine Kinzig	61
3.6	Leerlaufverhalten	63
3.6.1	Seebach	66
3.6.2	Rotenbach	71
3.6.3	Kleine Kinzig	72
3.6.4	Zusammenfassung	74
3.7	Abflußseparation	75
3.7.1	Seebach	78
3.7.2	Rotenbach	83
3.7.3	Kleine Kinzig	86
3.7.4	Grundwasserneubildung	89
3.8	Quell-Einzugsgebiete	90
4.	Hydrochemie	93
4.1	Analytik	93
4.2	Niederschlag	94
4.3	Oberflächennaher Abfluß (Q_o)	97
4.4	Abfluß über dem Ortstein (Q_{do})	99
4.5	Deckschichtenabfluß (Q_d)	101

	Seite	
4.6	Grundwasserabfluß (Q_g)	103
4.6.1	Fliegenlochquelle (Sb8)	103
4.6.2	Rotenbachquellen (R1, R2)	105
4.6.3	Jägerbrunnen (Kq5)	106
4.7	Vorfluter	108
4.7.1	Seebach	109
4.7.1.1	Beziehung Schüttung-Lösungsinhalt im Vorfluter	111
4.7.2	Rotenbach	116
4.7.3	Kleine Kinzig	119
5.	Stoffbilanzen	122
5.1	Stoffeintrag	122
5.2	Stoffaustrag über die verschiedenen Abflußkomponenten - Stofffrachtseparation	125
5.3	Stoffumsatz	133
5.3.1	Einzugsgebiet Seebach	133
5.3.2	Einzugsgebiet Rotenbach	138
5.3.3	Einzugsgebiet Kleine Kinzig	141
	Literaturverzeichnis	144

1. Einleitung

Seit 1984 werden im Rahmen eines größeren Forschungsprojektes "Kurz- und Langzeitwirkung atmogener Schadstoffeinträge auf das Boden- und Grundwasser im Buntsandstein-Schwarzwald" das Abflußverhalten und der Chemismus von Quellen und Vorflutern in mehreren Bacheinzugsgebieten im Nordschwarzwald untersucht (EINSELE et al., 1985 bis 1988). Stoffbilanzen wurden erstellt und der Stoffumsatz vom Eintrag über den Niederschlag bis zum Austrag über den Vorfluter erfaßt (IROUSCHEK, 1989). EHMANN (1988) untersuchte die Veränderungen des Wasserchemismus bei der Passage durch verschiedene Kompartimente des Untergrundes.

In den Gebieten mit ihren basenarmen Buntsandsteinserien ist eine erhöhte Versauerungsgefährdung durch den Eintrag atmogener Schadstoffe gegeben. Besonders in flach zirkulierenden Wässern sind erste Versauerungserscheinungen festzustellen. In oberflächennahen Wässern spiegelt sich der Chemismus im Bestandesniederschlag wider. Hohe Konzentrationen im Niederschlag bewirken erhöhte Sulfat- und Nitratgehalte im Bach- und Grundwasser. Stoffbilanzierungen ergaben hohe Auswaschungsraten an abpuffernden Erdalkalien. Nennenswerte Stoffspeicherungsprozesse sind lediglich beim Sulfat in Form von AlOHSO_4 in geringer Bodentiefe festzustellen (EHMANN, 1988).

In der vorliegenden Arbeit werden die Untersuchungsergebnisse aus drei Einzugsgebieten im Mittleren Buntsandstein des Nordschwarzwalde vorgestellt. Auf den Ergebnissen früherer Arbeiten aufbauend war es vor allem ein Ziel dieser Arbeit, das Abflußverhalten in den ausgewählten Einzugsgebieten unter besonderer Berücksichtigung der periglazialen Deckschichten genauer zu untersuchen. Mit Hilfe permanenter Quellschüttungs- und Bachabflußmessungen wurde das Leerlaufverhalten der verschiedenen Abflußhorizonte bestimmt und eine Abflußseparation in den jeweiligen Vorflutern durchgeführt.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit war, Auswaschungs und Speicherungsprozesse im Untergrund zu lokalisieren und zu quantifizieren. Grundlage dafür waren die vorab durchgeführte Abflußseparation und die Bestimmung des Chemismus der verschiedenen Abflußkomponenten. Anhand der Veränderung des Lösungsinhaltes bei der Passage des Wassers durch Böden, Deckschichten und Festgesteinsaquifer konnte der Stoffumsatz in den verschiedenen Horizonten berechnet werden.

2. Untersuchungsgebiete

2.1 Lage und Morphologie der Arbeitsgebiete

Die drei untersuchten Gebiete liegen im Nordschwarzwald im Bereich Freudenstadt-Oppenau-Forbach (Abb. 1). Als Topographische Grundlage dienten folgende Karten des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg im Maßstab 1:25000:

Gebiet "Seebach":	Blatt 7315 Bühlertal
Gebiet "Rotenbach":	Blatt 7415 Seebach Blatt 7515 Oppenau
Gebiet "Kleine Kinzig":	Blatt 7516 Freudenstadt Blatt 7616 Alpirsbach

Der Nordschwarzwald wird durch den Schwarzwaldhauptkamm in zwei Mittelgebirgszonen getrennt (Abb. 1). Nach Osten erstreckt sich das Buntsandsteinplateau, das von den tief eingreifenden Murg- und Kinzignebenflüssen zerschnitten wird. Die steilen Hänge westlich des Kamms werden von der Stirn des Buntsandsteinplateaus eingenommen. Auf den steilen Hängen wird über kurze Distanz die gesamte, mehrere hundert Meter mächtige Buntsandsteinfolge überwunden und auf tieferem Niveau tritt Grundgebirge zutage.

Das am nördlichsten gelegene Gebiet "Seebach" (Sb) im Einzugsbereich der Schwarzenbachtalsperre reicht bei einer Fläche von 4,5 km² von 680 m ü NN am Seebachpegel bis an den Schwarzwaldkamm in 1003 m ü NN heran. Flache Höhenzüge bilden eine natürliche Abgrenzung die das Gebiet in Form eines nach Südosten offenen Hufeisens umschließen. Die Hochflächen (ca. 16% der Gesamtfläche) gehen in 20-30° steile Hänge (ca. 80%) über, die von tief einschneidenden Abflußrinnen durchzogen werden.

Ein noch steileres Relief findet man am Rotenbach bei Oppenau, wo ca. 95% des Gebietes von bis zu 35° steilen Hängen eingenommen werden. Vom Schwarzwaldkamm in 930 m ü NN fällt der Hang steil nach Westen bis auf 360 m ü NN in der Talsohle ab. Das Arbeitsgebiet "Rotenbach" (Rb) wird talwärts von dem selbst eingebauten Pegel auf 550 m ü NN begrenzt. Mit 0,5 km² oberirdischem Einzugsgebiet ist der Rotenbach das kleinste der untersuchten Gebiete.

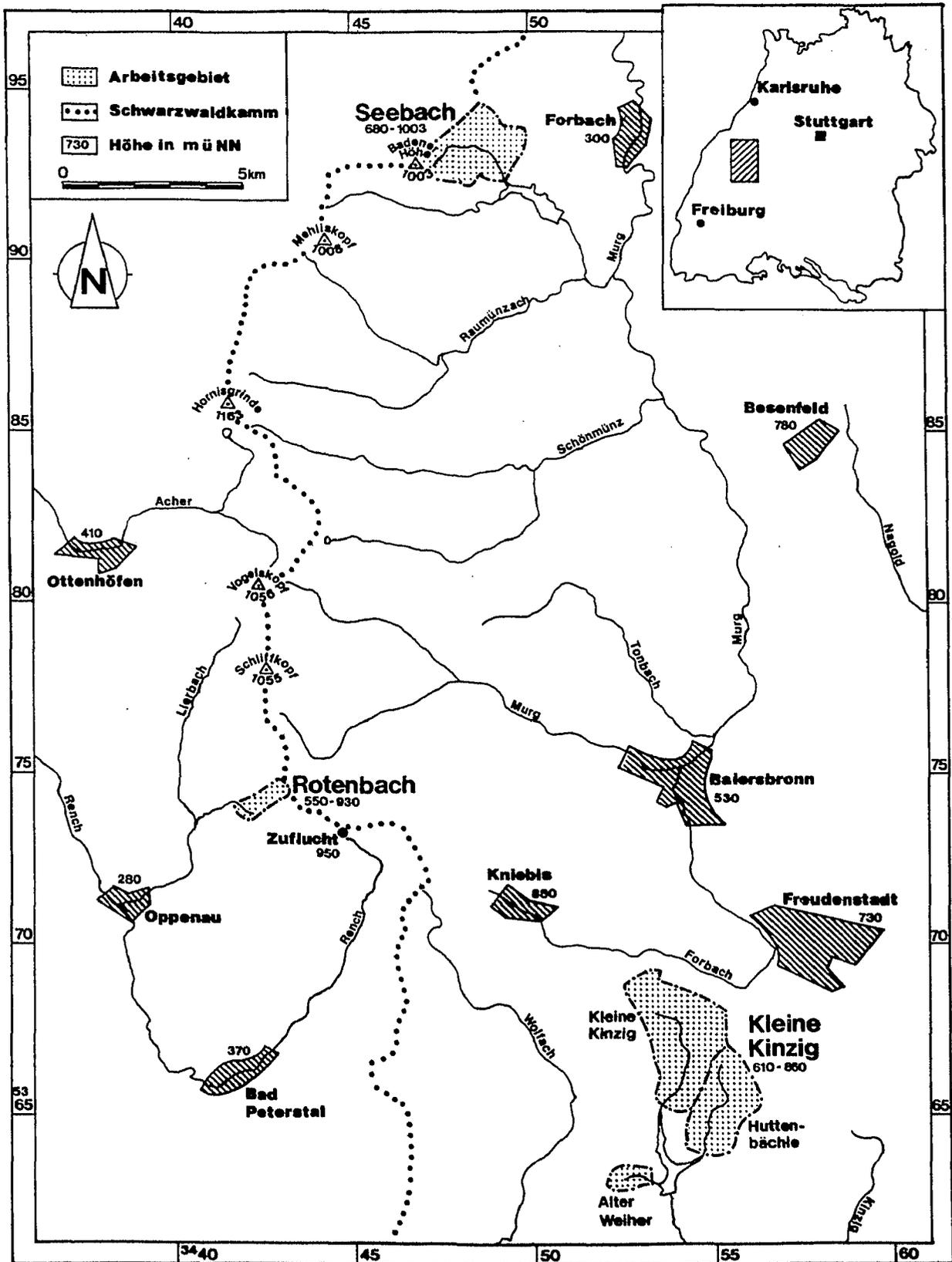


Abb. 1: Lage der Untersuchungsgebiete

Im Einzugsbereich der Trinkwassertalsperre Kleine Kinzig liegt das größte der bearbeiteten Gebiete. Morphologisch geprägt wird das Gebiet durch die Täler der Kleinen Kinzig und des Huttenbächles, die sich von Norden nach Süden fortschreitend tief in die Buntsandsteinabfolge einschneiden. Dabei wird die flach (ca. 2°) nach Südosten abfallende Hochfläche zerteilt. Die Talsohle im Süden liegt auf 550 m ü NN. Die Talflanken steigen mit 20-30° zu den Hochflächen bis auf 850 m ü NN im Nordwesten an. Das Arbeitsgebiet gliedert sich in die drei Bacheinzugsgebiete "Kleine Kinzig" (KK, 6,5 km²), "Huttenbächle" (Hb, 3,9 km²) und Weiherbach (W, 0,82 km²). Der Alte Weiher liegt in einer Karmulde, die sich tief in den Hang eingegraben hat. Der Weiherbach entwässert die steil abfallenden Karhänge (bis 40°) und einen Teil der oben angrenzenden Hochfläche.

Die Verteilung Hochflächen - Hanglagen verschiebt sich in diesen Gebieten gegenüber dem Seebach und dem Rotenbach deutlich zugunsten der Hochflächen. Im Einzugsgebiet Kleine Kinzig nimmt die Hochfläche ca. 45% der Fläche ein, während am Huttenbächle der Anteil der Hochfläche sogar ca. 64% erreicht. In dem kleinen Gebiet des Alten Weihers überwiegen wiederum die Hanglagen mit ca. 75% Flächenanteil.

Die Gebiete sind nahezu vollständig bewaldet und werden forstwirtschaftlich genutzt. Nur vereinzelt wird der fast reine Fichtenbestand durch kleine Lichtungen unterbrochen.

2.2 Geologie

Im Schwarzwald treten die ältesten Gesteine der südwestdeutschen Schichtstufenlandschaft zutage, wobei der Nordschwarzwald vorwiegend aus den Schichten der triasischen Buntsandsteinabfolge aufgebaut wird. Den Sockel bildet das Grundgebirge, bestehend aus einer Reihe von Gneis- und Granitserien, die vor allem westlich des Schwarzaldkammes an der Oberfläche anstehen. Auf der Ostseite tritt das Grundgebirge nur in den tief eingeschnittenen Tälern hervor, wo die Bachläufe das Buntsandsteinplateau durchschnitten haben. Zwischen Grundgebirge und Deckgebirge (Buntsandstein) treten lückenhaft permische Schichten in Form des Rotliegenden auf.

Der geologische Aufbau der einzelnen Einzugsgebiete ist den Abb. 2a-c zu entnehmen. Die geologische Aufnahme und Anfertigung von geologischen Karten erfolgte im Rahmen folgender, am Geol.-Pal. Institut der Universität Tübingen erstellten Diplomarbeiten:

Gebiet Seebach:	SEEGER (1986)
Gebiet Rotenbach:	KLAIBER (1987)
Gebiet Kleine Kinzig:	PREUB (1986) (Kleine Kinzig) PYKA (1986) (Huttenbächle und Alter Weiher)

Grundlage der geologischen Kartierungen waren die zu den unter Kap. 2.1 aufgeführten Topographischen Karten des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg zugehörigen Geologischen Karten.

Im Folgenden werden die in den Gebieten vorkommenden geologischen Einheiten kurz beschrieben.

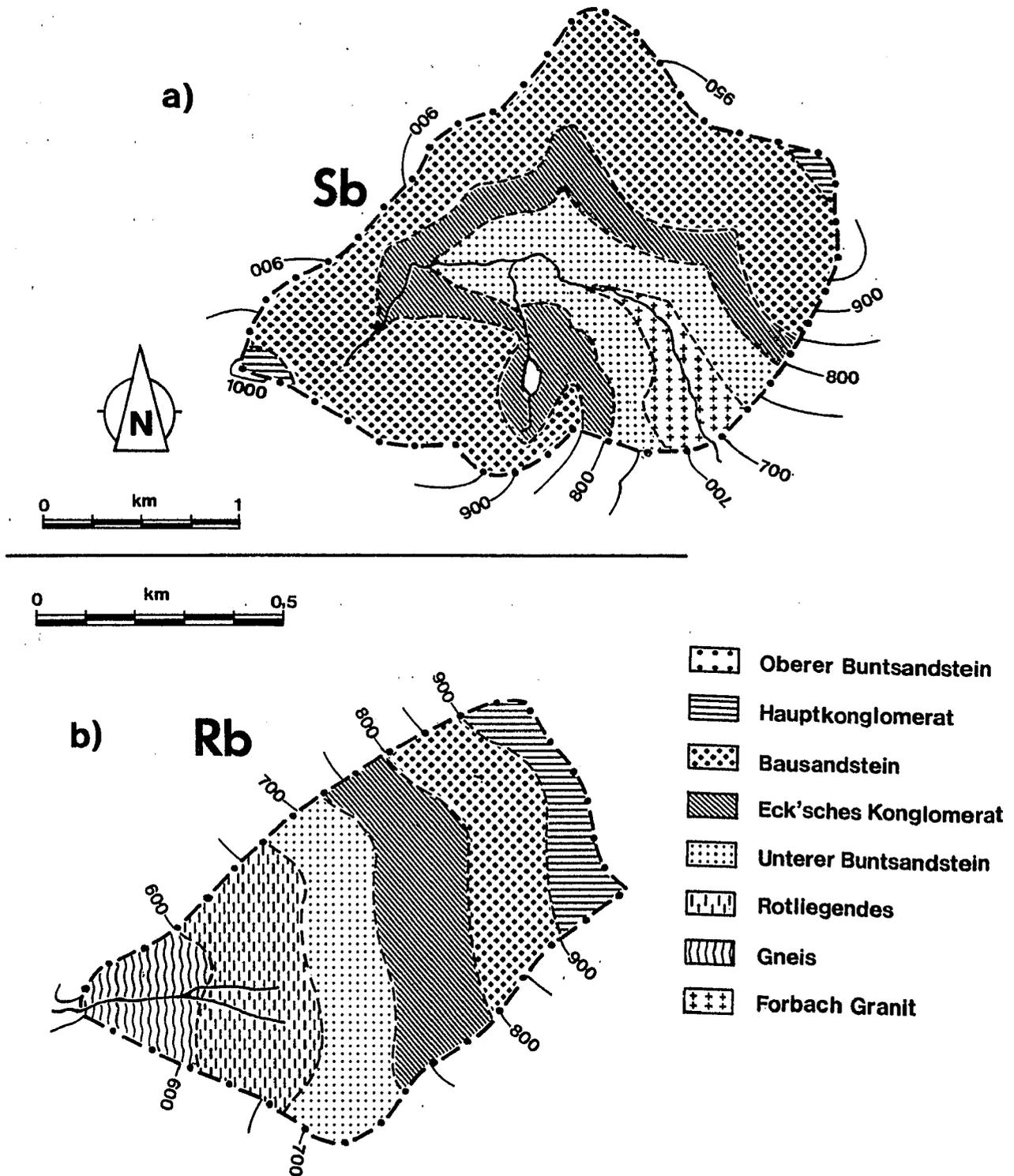


Abb. 2a,b: Geologie der Gebiete Seebach und Rotenbach

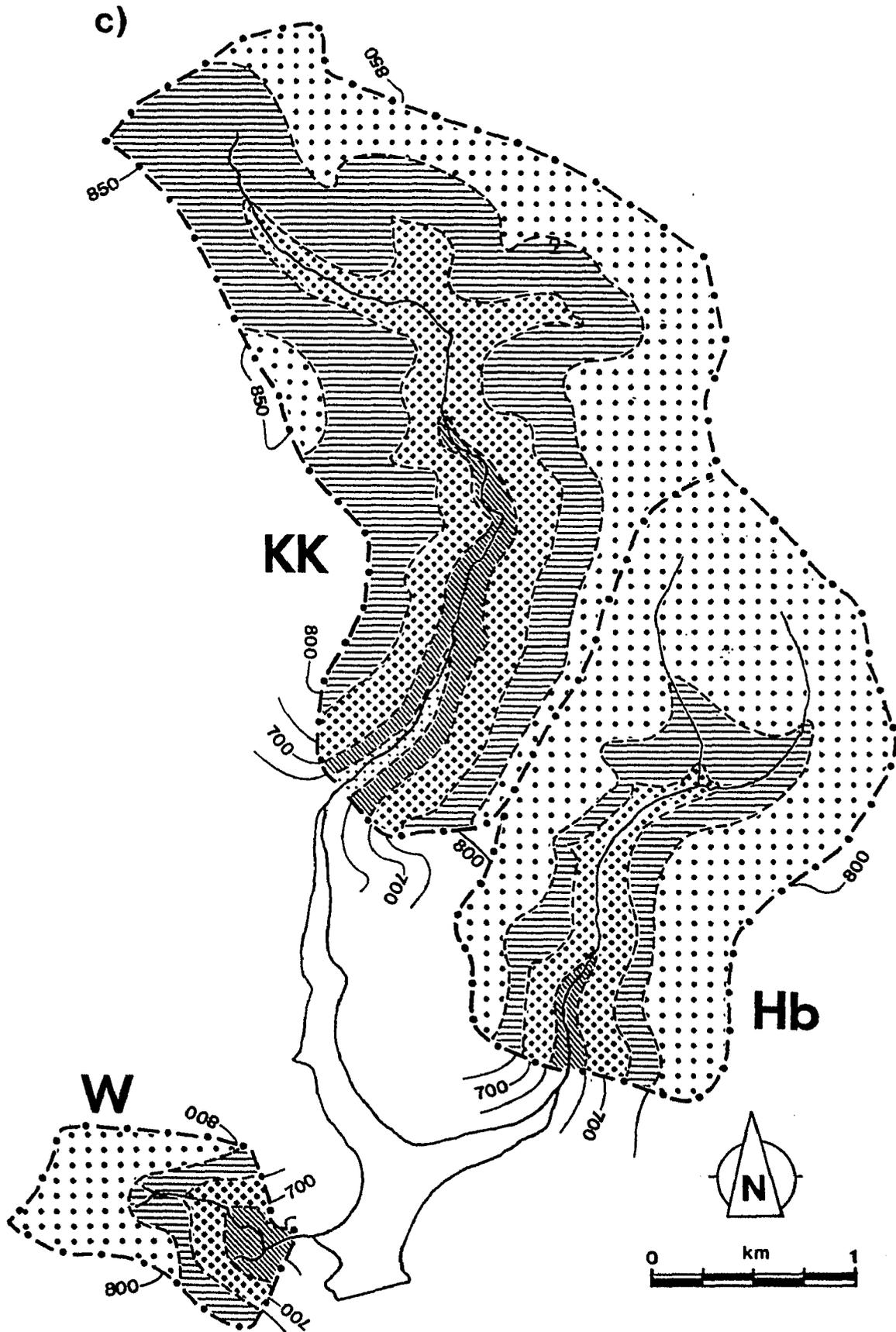


Abb. 2c: Geologie im Gebiet Kleine Kinzig

2.2.1 Grundgebirge (gn, gm)

Grundgebirge tritt nur in den Gebieten Seebach und Rotenbach zutage (Abb. 2a,b).

Am Rotenbach wird das Grundgebirge von den früher als "Renchgneis" bezeichneten Paragneisen aufgebaut, die nach GEYER und GWINNER (1968) praevariskisches Alter besitzen. Der Mineralbestand setzt sich hauptsächlich aus Quarz und Feldspat mit reichlich Biotit zusammen. Die hellen Bestandteile sind als Mobilisate in Lagen angereichert, die von Biotitlagen unterbrochen werden. Das stark zerscherte Gestein bricht besonders gut an den Glimmerlagen und bildet bei der Verwitterung cm bis dm große, kantige Stücke.

Am Seebach tritt das Grundgebirge in Form eines Zweiglimmergranites, dem "Forbachgranit", hervor. Die Granite sind die Folge von Intrusionen granitischen Magmas, das in fremdem Nebengestein, den Gneisen, Platz genommen hat (METZ, 1971). Neben Kalifeldspat wird der Forbachgranit überwiegend aus Plagioklas und fettglänzendem, bis z.T. milchigweißem Quarz gebildet. Daneben können noch Biotit und Muskovit als Hauptgemengteile aufgeführt werden. Unverwittert erscheint das Gestein leicht rosa, während in verwittertem Zustand hellgraue Farbe überwiegt. Der Granit zerfällt bei der Verwitterung aufgrund von nur spärlichen Trennflächen in oft mehrere Meter große Blöcke. Nach ausreichend langer Verwitterungszeit zerfallen die Blöcke aber zu grusig bis grobsandigen Lockermassen, die sehr gut wasserdurchlässig sind.

2.2.2 Rotliegendes (ro)

Rotliegendes kommt nur am Rotenbach mit schwankender Mächtigkeit zwischen 50 und 70 m vor. Das Rotliegende besteht einerseits aus aufgearbeitetem Schutt des Grundgebirges, andererseits aus vulkanischen Gesteinen des Perms und deren Auswurfmassen (REGELMANN, 1907). Am Rotenbach wird der Gneis von den Schichten des Oberen Rotliegenden bedeckt, die sich vorwiegend aus dem erwähnten Grundgebirgsschutt aufbauen. Es handelt sich um ein sandiges, arkoseartiges Gestein, dessen tiefrote Färbung auf einen höheren Eisengehalt zurückzuführen ist. In dieser Grundmasse schwimmen eckige, wenig abgerundete Bruchstücke von vergrustem Granit und Gneis. Die Körner der sandigen Lagen sind nur wenig gerundet und schlecht sortiert. Lokal auftretende tonreiche Partien erklären, weshalb das Obere Rotliegende einen gut ausgeprägten Stau- und Ouellhorizont ausbildet.

2.2.3 Buntsandstein

Den Hauptanteil der Gebiete nehmen die Schichten des während der unteren Trias vorwiegend fluviatil abgelagerten Buntsandsteines ein. Nach der Eck'schen Stratigraphie werden grob fünf Schichtglieder anhand ihrer Geröllführung unterschieden:

- Oberer Buntsandstein (so)
- Mittlerer Buntsandstein
 - Hauptkonglomerat (smc2)
 - Bausandstein (sm)
 - Eck'sches Konglomerat (smc1)
- Unterer Buntsandstein (su)

Diese einfache Gliederung erweist sich für den Nordschwarzwald als sinnvoll, da aufgrund der weitverbreiteten periglazialen Deckschichten und somit schlechten Aufschlußverhältnissen feinere Gliederungen aus anderen Buntsandsteingebieten hier nur mit größten Schwierigkeiten nachvollzogen werden können.

Das Einfallen der Buntsandsteinschichten ist, wie der Verlauf der Schichtgrenzen entlang der Isohypsen (Abb. 2a-c) zeigt, äußerst gering. Großräumige Betrachtungen von REGELMANN (1907) ergeben ein Schichteinfallen von ca. 3% nach SE bis SSE, das jedoch hauptsächlich durch staffelförmige Abbrüche des Schichtpakets zu erklären ist.

2.2.3.1 Unterer Buntsandstein (su)

Der Untere Buntsandstein besteht vorwiegend aus fein- bis mittelkörnigen, nur wenig verfestigten Sandsteinen mit zwischengelagerten tonigen Schichten und Karbonatbänkchen. Neben dem Hauptgemengteil Quarz findet man Feldspat, Karbonat, gelegentlich etwas Glimmer und rote bzw. graugrüne Tongallen. Typisch ist die eckige Form der Quarzkörner. Der Karbonatgehalt (Fe-, Mn-, Mg-, Ca-Karbonat) zeigt sich an eisen- und manganhaltigen Verwitterungsrückständen, die das Gestein mit braunen bis schwarzen Flecken, vereinzelt auch lagenbildend, durchsetzen (Tigersandstein). Die Farbe wechselt in dünnen Lagen oder in einem allmählichen Übergang zwischen weiß bis hellgrau und blassen Rottönen. Im Hangenden können auch einheitlich rotgefärbte, grobbankige, dem Eck'schen Konglomerat ähnliche, Abschnitte auftreten.

Bei der Verwitterung werden die meist flachen Tongallen schnell aus dem Gestein herausgelöst. Zurück bleiben löchrige angewitterte Sandsteine. Dabei liefert der vorwiegend tonig gebundene Sandstein dünnplattige bis schiefrige Bruchstücke die rasch zu einem feinen Sand zerfallen.

Die Mächtigkeit des Unteren Buntsandsteines schwankt in den drei Einzugsgebieten nur unerheblich zwischen 50 und 60 m. Im Gebiet Kleine Kinzig wird lediglich im Teileinzugsgebiet Kleine Kinzig noch Unterer Buntsandstein angetroffen, während er am Huttenbächle und am Alten Weiher erst unter der Wasserlinie der Talsperre hervortritt.

2.2.3.2 Eck'sches Konglomerat (smc1)

Das Eck'sche Konglomerat besteht überwiegend aus hell- bis dunkelroten, manchmal auch grauen, mittel- bis grobkörnigen Sandsteinen. Sie sind vorwiegend tonig-kaolinitisch gebunden und daher wenig verfestigt. Namensgebend sind die zonenweise angehäuften, milchigweißen, walzenförmig gerundeten Quarzgerölle und vereinzelt Kristallingerölle, die häufig Durchmesser von über 5 cm erreichen. Diese Gerölle sind vor allem in den oberen Bereichen des smc1 anzutreffen. Als Hauptgemengteil ist Quarz zu nennen. Nebengemengteile bilden der Feldspat und etwas Glimmer. Im Gegensatz zum Unteren Buntsandstein sind die Körner im Eck'schen Konglomerat gut gerundet. Das Eck'sche Konglomerat ist recht einheitlich ausgebildet, wenn auch vereinzelt kieselig gebundene Bänke und zum Hangenden hin dünne Tonlagen vorkommen. Diese Tonlagen sind für die Ausbildung eines Stauhizontes an der Grenze zum Bausandstein verantwortlich. Quellaustritte und lokale Vernässungszonen erleichtern so die Grenzziehung zum überlagernden Bausandstein.

Bei der Verwitterung zerfällt das leicht zerreibbare Gestein schnell in einen groben Sand vermengt mit cm großen Bruchstücken. Nicht selten sind auch lokale Anhäufungen quaderförmiger Blöcke mit max. 30-40 cm Kantenlänge.

Am Seebach und am Rotenbach erreicht das Eck'sche Konglomerat eine Mächtigkeit von 50-60 m, während PYKA (1986) und PREUB (1986) im Bereich der Kleinen Kinzig 40-50 m angeben.

2.2.3.3 Bausandstein (sm)

Der Bausandstein oder auch mittlerer geröllfreier Buntsandstein beginnt im Liegenden mit dünnen, rot und weißgrau gestreiften Bänkchen eines fein- bis

vorwiegend mittelkörnigen, glimmerfreien Sandsteines. Darüber folgt eine Wechsellagerung mit glimmerführenden, sandigen Schiefertönen.

Den Hauptanteil bilden im mächtigen mittleren Bereich feinkörnige, blaßrötliche, oft verkieselte Sandsteine, die häufig meterdicke kompakte Bänke ausbilden. In diesem homogen ausgebildeten Abschnitt sieht man regelmäßig Schrägschichtung, die im angewitterten Zustand besonders gut zu erkennen ist. Die harten, mächtigen Bänke des Bausandsteines bilden im Gelände oft Steilhänge aus, wo das Anstehende nur noch von einer geringmächtigen Hangschuttdecke überlagert wird, oder auch direkt an der Oberfläche auftritt.

Der Bausandstein setzt sich fast ausschließlich aus Quarz zusammen, wobei in tonigen Einschaltungen auch Glimmer vorkommen. Der Feldspat- und Karbonatgehalt der Sandsteine ist unbedeutend.

Im Hangenden tritt erneut ein häufiger Wechsel von weiß und rot gefärbten Sandsteinen auf, die von dunkelroten, tonigen Horizonten durchsetzt sind. Morphologisch bildet dieser Bereich die Randgebiete der Hochflächen oberhalb der steilen sm-Hänge. Hier kommt es aufgrund der wasserstauenden, tonigen Zwischenlagen verstärkt zur Bildung der weit verbreiteten anmoorigen Böden.

Der Bausandstein verwittert mit seinen häufig verkieselten, bis zu 4 m mächtigen Bänken, die weitständig von Klüften durchsetzt sind, zu großen Blöcken, die im Deckschutt dominieren.

Mit 120-130 m Mächtigkeit am Seebach und Rotenbach sowie 75-85 m an der Kleinen Kinzig bildet der Bausandstein die dominierende Formation in der Buntsandsteinabfolge.

2.2.3.4 Hauptkonglomerat (smc2)

Dieser oberste Abschnitt des Mittleren Buntsandsteines besteht vorwiegend aus einem verkieselten, mittel- bis grobkörnigen, blaßroten Sandstein. Dazwischen kommen feinsandige Tone, feinkörnige Sandsteine sowie grobe, geröllführende Schichten in unregelmäßigem Wechsel vor. Das Hauptkonglomerat unterscheidet sich im wesentlichen nur durch seine geröllführenden Schichten vom Bausandstein. Die Gerölle bestehen im Gegensatz zum smc1 fast ausschließlich aus weißen und rötlichen Quarzgeröllen mit max. 2-3 cm Durchmesser, wobei die geröllführenden Horizonte z.T. mehrere Meter Mächtigkeit erreichen. Die verkieselten Sandsteine des Hauptkonglomerates sind die härtesten Gesteine des gesamten Buntsandsteins. Entsprechend oft werden die Hochflächen im Nordschwarzwald von dieser verwitterungsbeständigen Formation gebildet.

Da die Geröllführung im Niveau stark wechselt und weite Bereiche geröllfrei sind, ist die Abgrenzung zum Bausandstein problematisch. Lediglich die anmoorigen Vernässungszonen, die vor allem im Grenzbereich aufgrund der hier häufig vorkommenden tonigen Zwischenlagen verbreitet sind, geben im Gelände einen deutlichen Hinweis auf die Schichtgrenze.

Wie die verkieselten Schichten des Bausandsteines liefert auch das harte, weitständig geklüftete Hauptkonglomerat bei der Verwitterung vorwiegend große Blöcke.

Das Hauptkonglomerat ist nur im Bereich der Kleinen Kinzig noch vollständig vorhanden und erreicht Mächtigkeiten von ca. 40 m. Im Gebiet des Rotenbachs tritt der schon teilweise abgetragene smc2 im Kammbereich mit einer maximalen Mächtigkeit von ca. 25 m auf. Am Seebach kommt die oberste Formation des Mittleren Buntsandsteines nur noch in Resten von 10-15 m Mächtigkeit auf den höchsten Lagen vor.

2.2.3.5 Oberer Buntsandstein (so)

Im Bereich des Schwarzwaldkammes und damit auch am Seebach und Rotenbach ist der Obere Buntsandstein vollständig abgetragen. Aber auch an der Kleinen Kinzig besteht er in weiten Bereichen zu einem großen Teil nur noch aus Verwitterungsschutt bzw. wird er von einer sandig siltig-tonigen Schuttdecke überlagert. Erst im östlichen Bereich des Einzugsgebietes Huttenbächle erreicht der Obere Buntsandstein nahezu seine ursprüngliche Mächtigkeit von ca. 40 m.

Im Liegenden beginnt der Obere Buntsandstein mit dem bunten Dolomithorizont 2 (EISSELE, 1966), für den der Karneolhorizont, bestehend aus Ausscheidungen roter, feinfaseriger Kieselsäure, charakteristisch ist. Darüber folgt der fein- bis mittelkörnige, tonig oder kieselig gebundene Plattensandstein. Er setzt sich hauptsächlich aus Quarz zusammen, zeigt aber auch einen deutlichen Gehalt an Feldspat und Glimmer. Nur im Oberen Buntsandstein kommen kalkige und dolomitische Bänkchen in größerer Verbreitung vor. Die Farbe wechselt zwischen rot, rotviolett und hellen Lagen, während verkieselte Bänke blauviolett erscheinen.

Der Obere Buntsandstein verwittert zu einem fein- bis mittelkörnigen Sand mit 15-20% Ton-Siltanteil. In der gleichförmigen, roten, bindigen Matrix schwimmen plattige Gesteinsbruchstücke mit max. 30 cm Kantenlänge. Aufgrund des hohen Tongehaltes ist der Verwitterungsschutt nur gering wasserdurchlässig, worauf zahlreiche Feuchtstellen hinweisen.

2.3 Periglaziale Deckschichten

In den drei Arbeitsgebieten sind sowohl die Hanglagen als auch die Hochflächen nahezu lückenlos von oft mehrere Meter mächtigen Blockschuttmassen bedeckt. Diese im Nordschwarzwald weit verbreiteten Deckschichten sind ein Produkt intensiver Frostverwitterung während des Pleistozäns. Nach FEZER (1953/57) sind sie während einer der letzten Kaltzeit folgenden "Frostschuttzeit" unter periglazialen Bedingungen gebildet worden. Dabei waren die Schuttmassen infolge häufiger oberflächennaher Frost-Tau-Wechsel in Bewegung. In der folgenden "Tundrenzeit" wurden die Massenbewegungen durch eine mehr oder weniger geschlossene Vegetationsdecke weitgehend zum Stillstand gebracht. Seit der anschließenden "Waldzeit" sind die Schuttdecken größtenteils fixiert.

In Abhängigkeit von der Gesteinsart, Hangneigung und Exposition entstanden verschiedene Deckschichten-Typen mit unterschiedlichem Auswaschungsgrad des Feinmaterials, die im Folgenden kurz vorgestellt werden (Abb 3a-c). Eine ausführliche Beschreibung mit detaillierten Deckschichtenkarten ist den unter Kap. 2.2 aufgeführten Diplomarbeiten und SEEGER et al. (im Druck) zu entnehmen.

2.3.1 Deck- und Blockschutt-Typen

Blockschuttdecken können nur im Bereich verwitterungsbeständiger, weitständig geklüfteter, massiger oder dickbankiger Gesteine vorkommen. Somit ist der Deckschicht-Typ in erster Linie von der Beschaffenheit und dem Verwitterungsverhalten des Ausgangsgesteines abhängig (Kap. 2.2). Im Buntsandstein sind der mächtige Bausandstein und das Hauptkonglomerat die wichtigsten Blocklieferanten, während die weniger resistenten Schichten des Unteren Buntsandsteines, des Eck'schen Konglomerates und des Oberen Buntsandsteines weniger am Aufbau der Blockschuttdecken beteiligt sind. Im kristallinen Grundgebirge kommen lediglich die Granite als Blocklieferanten in Frage, wobei vor allem der im Seebachgebiet vorkommende Forbachgranit große Blöcke liefert.

Bei der Aufnahme im Gelände wurden zunächst drei übergeordnete Typen von Schuttdecken voneinander unterschieden:

- Schuttdecken der Hochflächen: flächenhaft ausgedehnte Schutt-bzw. Verwitterungsdecken auf den Hochlagen
- Hangschuttdecken: flächenhaft ausgedehnte Schuttdecken in Hanglagen

- Blockmassen: Anhäufung von Blöcken ohne oder mit geringem Feinmaterialanteil. Diese Blockmassen werden in drei morphogenetisch unterschiedliche Gruppen untergliedert:
- Blockmeere: flächig ausgedehnte Blockmassen auf Hochflächen und an flachen Hängen
- Blockströme: in Richtung des Gefälles gestreckte Blockmassen in Mulden, Rinnen und kleineren Taleinschnitten mit größerem Gefälle
- Blockhalden: Blockmassen unter Felswänden

2.3.2 Schuttdecken der Hochflächen

Das Schuttmaterial der Hochflächen wird als an Ort und Stelle aufgelockertes und verwittertes Material betrachtet, da größere Bewegungsvorgänge aufgrund fehlender Hangneigung weitgehend ausgeschlossen werden können.

Am Rotenbach wird die Hochfläche vom Verwitterungsschutt der harten, kieselig gebundenen Gesteine des Hauptkonglomerates eingenommen. Die geringmächtige Schuttauflage (ca. 0,5 m) besteht aus einer sandigen Matrix (ca. 70% Anteil) in der die Kiesfraktion um 3 cm Durchmesser mit 40 bis 50% Anteil stark vertreten ist (KLAIBER, 1987). In dem sandigen Humus an der Oberfläche stecken große, ausgebleichte smc2-Blöcke.

Dasselbe Bild zeigen die Hochflächen im Seebachgebiet, wobei ein Großteil vom nahezu gleich ausgebildeten sm-Verwitterungsschutt eingenommen wird. Für die Hochflächen typische anmoorige Flächen sind hier weit verbreitet und der spärliche Baumbewuchs gibt einen Hinweis auf die wachstumshemmenden Rohhumusböden (Hochmoore und Stagnogleye). Ein für diese Böden typischer Ortsteinhorizont ist auf den Hochflächen nicht ausgebildet, sondern nur eine wenig verfestigte BrauneisenAnreicherungslage, die als Orterde bezeichnet wird.

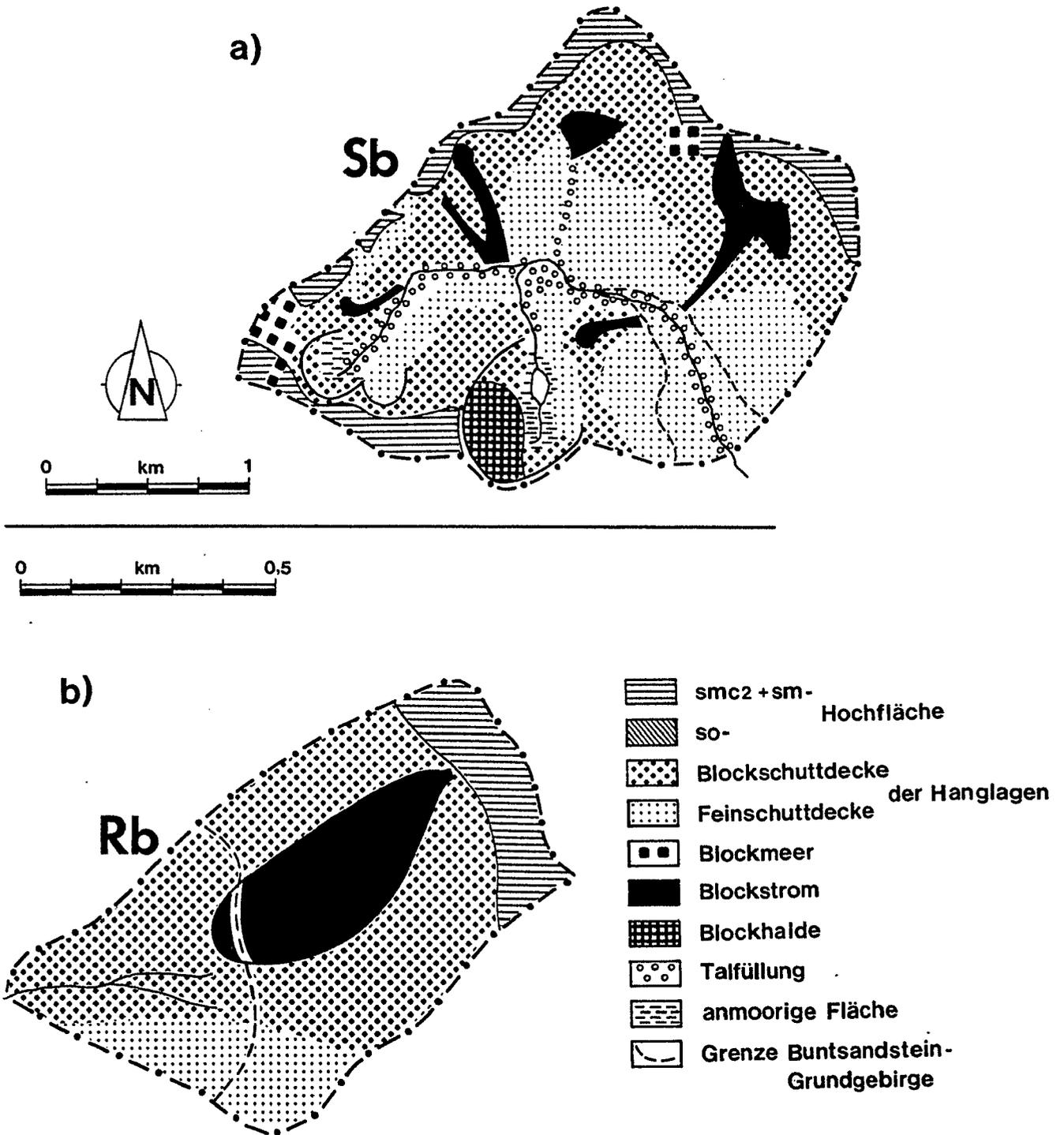


Abb. 3a,b: Deckschichtenverbreitung in den Gebieten Seebach und Rotenbach

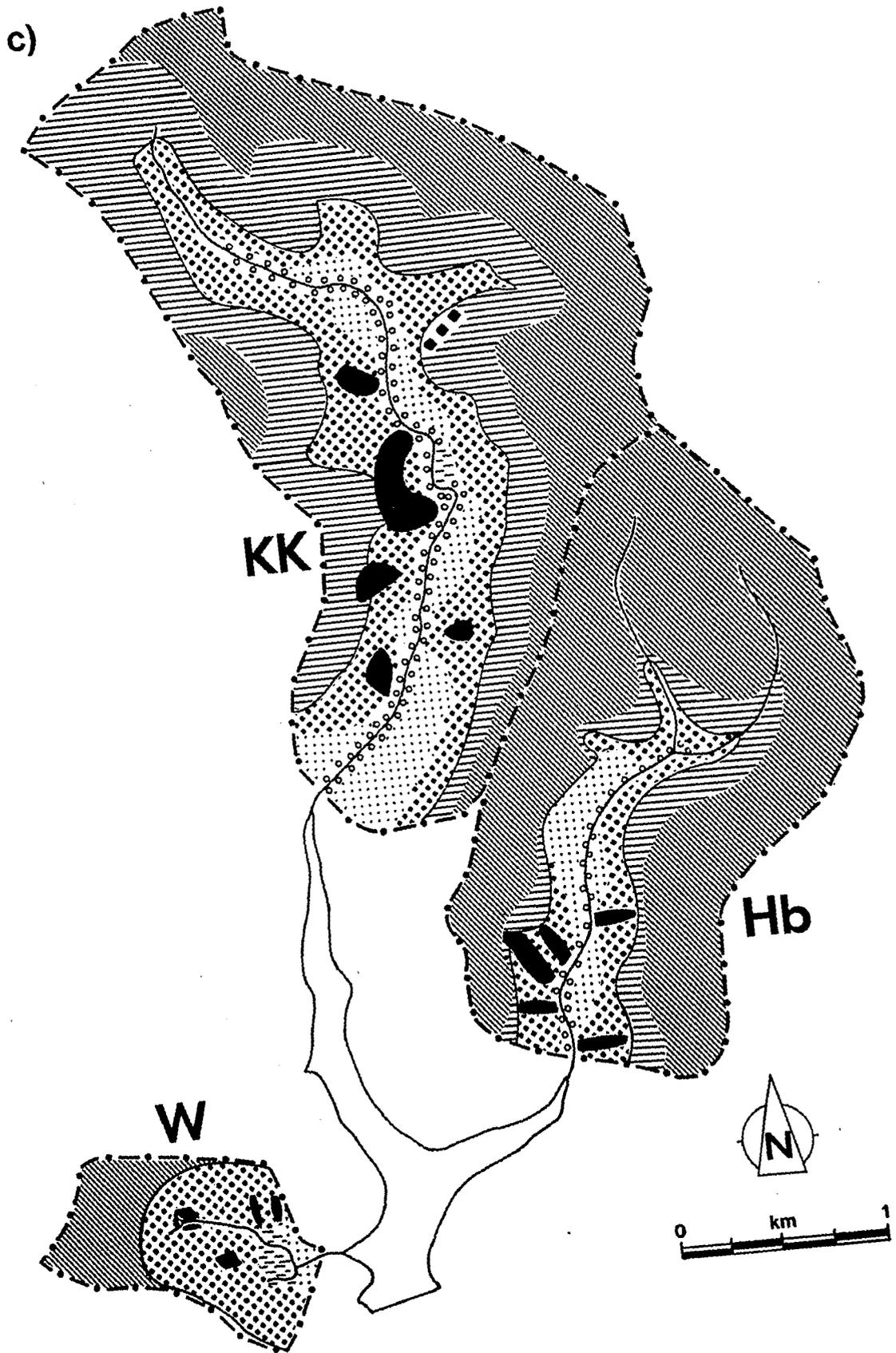


Abb. 3c: Deckschichtenverbreitung im Gebiet Kleine Kinzig

Die Hochflächen im Bereich der Kleinen Kinzig wurden in so- und smc2-sm-Deckschichtenbereiche unterteilt (Abb. 3c). Ihr unterschiedlicher Aufbau ist allein auf die verschiedenen Ausgangsgesteine zurückzuführen. Während der smc2-sm-Verwitterungsschutt den gleichen Aufbau wie am Schwarzwaldkamm zeigt, unterscheidet sich der so-Verwitterungsschutt vor allem durch die Zusammensetzung seiner Matrix. Mit 15-20% Ton-Silt- und 60-70% Sandanteil ist sie deutlich feiner aufgebaut als die grobe smc2-sm-Matrix. In der gleichförmigen, roten, bindigen Grundmasse sind plattige Gesteinsbruchstücke eingelagert, die nach unten zahlreicher werden. Ein Ortstein ist in den karbonatreicheren so-Böden nicht ausgebildet. Nach SCHMIDT & RAU (1904) ist die Ortsteinbildung auf die Schichten des Hauptkonglomerates und des Bausandsteines begrenzt. Die Mächtigkeit der Deckschichten auf den Hochflächen um die Kleine Kinzig beträgt i.a. über 2 m (PREUB, 1986 und PYKA, 1986). Mit einsetzender Hangneigung am Übergang zu den Hanglagen wird die Mächtigkeit auf 0,5-1 m reduziert.

2.3.3 Schuttdecken der Hanglagen

Die Schuttdecken der Hanglagen werden auch als "Wanderschuttdecken" bezeichnet, um die während der Bildungszeit talwärts gerichtete Bewegung hervorzuheben. Periglaziale Massenbewegungen führen EMBLETON & KING (1975) vor allem auf das Zusammenspiel von Frost-Tau-Wechsel und Gravitation zurück. Der Hangschutt wird zum größten Teil aus unterschiedlich weit transportiertem Material aufgebaut, das von den oberhalb anstehenden Gesteinen stammt. Der Aufbau dieser Deckschichten ist abhängig von der Neigung und der Exposition des Hanges sowie von der Gesteinsart im Liefergebiet. Mit steigendem Gefälle nimmt die Mächtigkeit deutlich ab (Abb. 4). Vor allem die oberen Talflanken sind meist steil und von entsprechend geringmächtigen Schuttmassen bedeckt (0,5-1 m). Talwärts flachen die Hänge meist ab, und die Hangschuttdecken werden mächtiger (oft >3 m). FRIED (1984) beschreibt am Beispiel von Buntsandstein-Deckschichten im Odenwald wie die Mächtigkeit am Fuß der Steilhänge durch Aufstau zunimmt. Besonders mächtige Schuttdecken sind bevorzugt an SE- bis SW-orientierten Hängen verbreitet. Mit Hilfe hammerschlagseismischer Untersuchungen wurden am Rotenbach im steilen Westhang bis zu 8 m mächtige Hangschuttdecken erfaßt (KLAIBER, 1987). Eine Deckschichtenbohrung in diesem Bereich wurde durch 10 m Deckschutt bis ins anstehende Gestein abgeteuft (Abb. 11, Kap. 3.3.2). Dabei hängt die Mächtigkeit des Schuttmaterials auch eng mit der Festigkeit und Bankung des jeweils anstehenden Gesteins zusammen. Wie oben beschrieben liefern der Bausandstein und das Hauptkonglomerat den größten

Schuttanteil, während der Anteil der lehmigsandigen Schuttmassen des Eck'schen Konglomerates und des Unteren Buntsandsteines geringer ist. Reine smc1- und su-Schuttdecken kommen nur selten vor, da sie in der Regel von den oberhalb gebildeten sm-Deckschichten überfahren und mit ihnen vermischt worden sind.

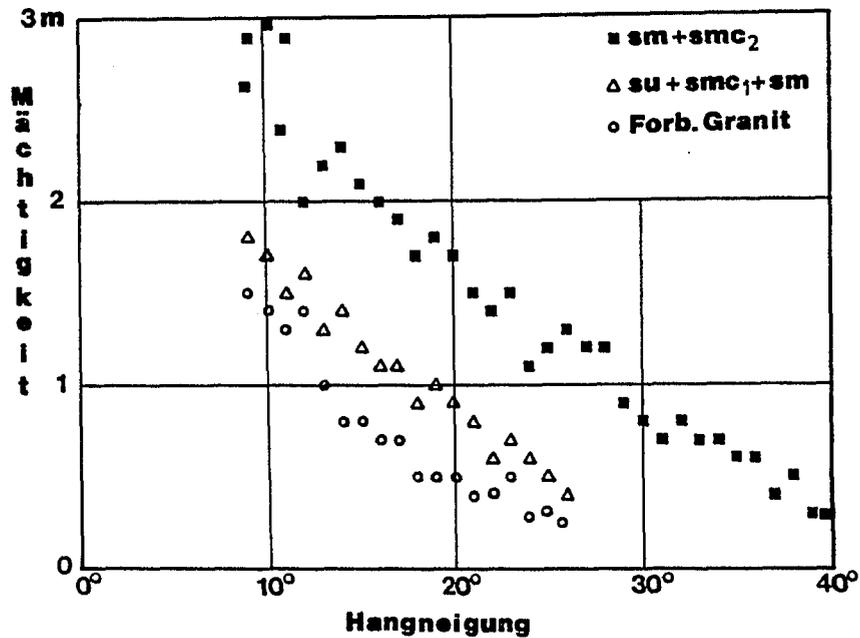


Abb. 4: Schuttmächtigkeit in Abhängigkeit von Hangneigung und Gesteinsart

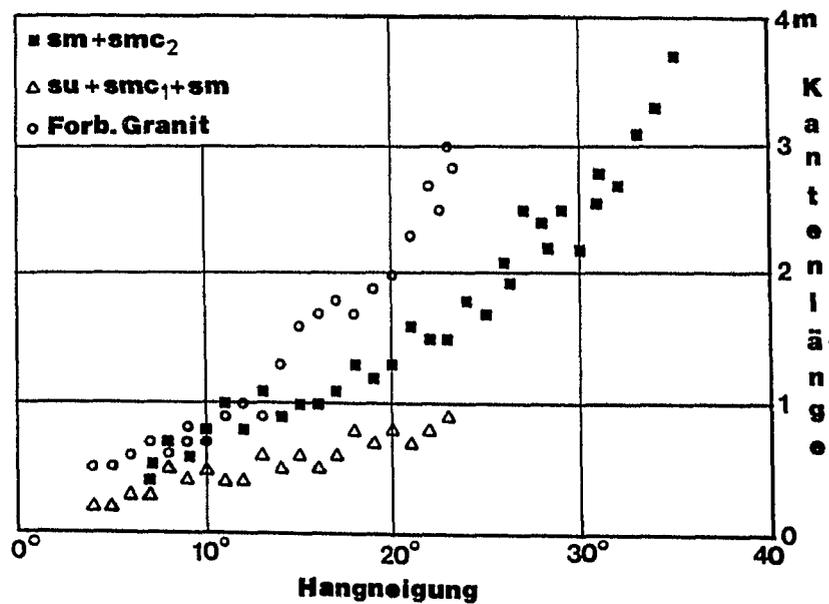


Abb. 5: Größe Kantenlänge der Blöcke in Abhängigkeit von Hangneigung und Gesteinsart

Die Größe und Anzahl der Blöcke innerhalb der Schuttmassen nimmt bei gleichem Ausgangsgestein mit steigendem Gefälle zu (Abb. 5). Auf den steilen Hängen wird das feine Material durch Ausspülung abtransportiert, während die großen Blöcke zurückbleiben. Die Schuttdecken der flachen Hänge führen dagegen einen großen Anteil an Feinmaterial. Dementsprechend können Block- und Feinschuttdecken unterschieden werden (Abb. 3a-c, Abb. 6).

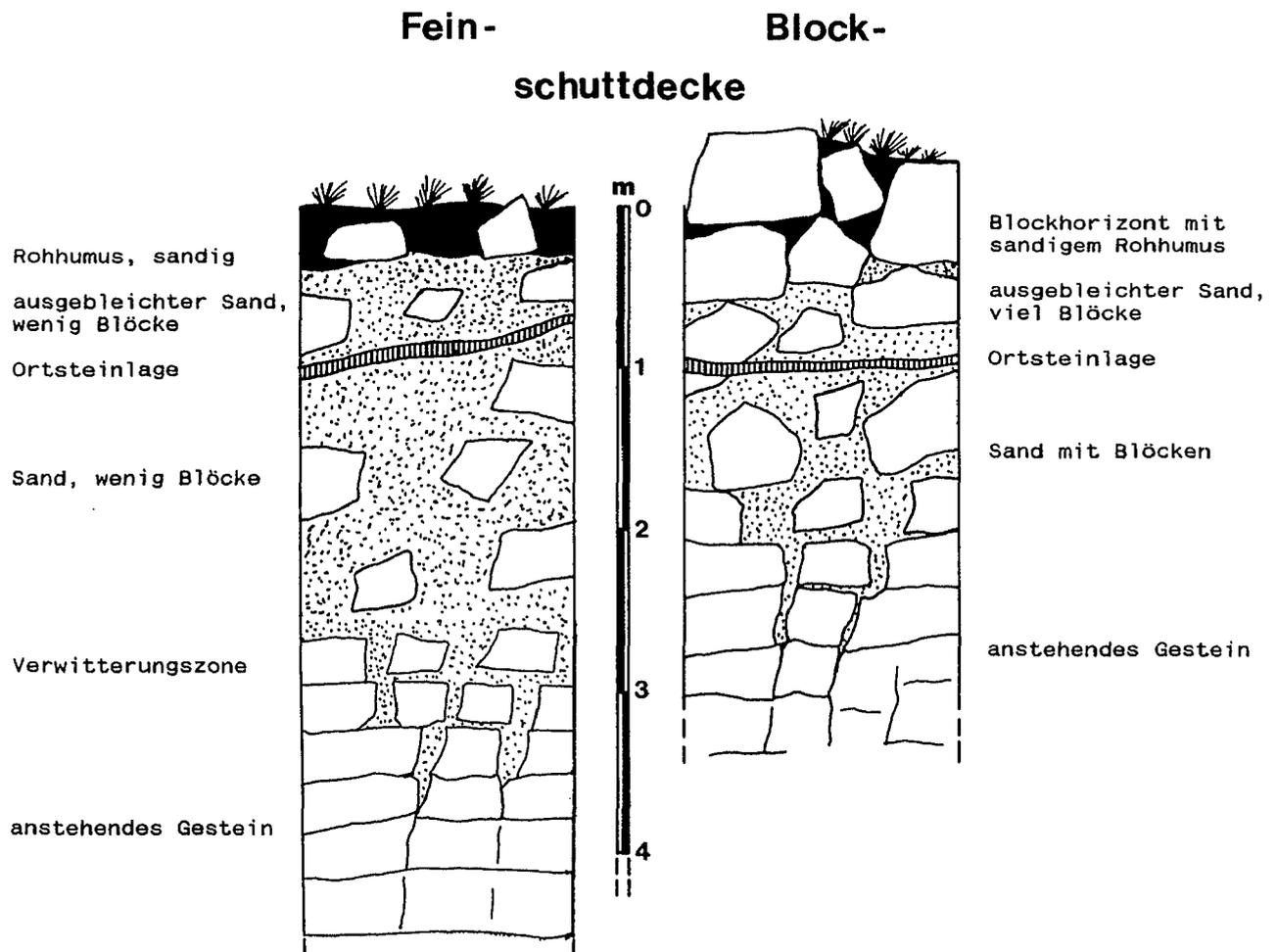


Abb. 6: Profil einer Fein- und einer Blockschuttdecke in Hanglage

In den Blockschuttdecken fällt vor allem der deutliche Blockhorizont (Deckschutt) an oder nahe der Oberfläche auf. Die Zwischenräume sind nur zum Teil mit einer Matrix aus ausgebleichtem vorwiegend Mittel- bis Grobsand oder mit sandigem Rohhumus verfüllt. Darunter nimmt die Blockdichte ab. Häufig anzutreffen ist ein wenige cm mächtiger Ortsteinhorizont in Form verkitteter, roter Bändchen-Podsole. Aufgrund zahlreicher Profilan Schnitte in den drei Gebieten kann der Ortstein als zwar lückenhaft, aber dennoch in den Hanglagen als weit verbreitet angesehen werden. Die Tiefenlage des Ortsteins schwankt zwischen 0,5 und 2,5 m. Unterhalb nimmt die Blockhäufigkeit i.a. ab. Die Matrix

besteht weiterhin vorwiegend aus Mittel- bis Grobsand ursprünglicher, rötlicher Färbung, der also noch nicht durch Reduktionsvorgänge ausgebleicht ist. Diese Zone geht meist ohne einen deutlichen Verwitterungsbereich in anstehendes Gestein über.

In den meist mächtigeren Feinschuttdecken der Flachhänge liegen die groben Blöcke vorwiegend im unteren Bereich. Darüber wird der Schutt von der ebenfalls mittel- bis grobsandigen Matrix beherrscht. Mit steigendem Anteil vom smc1- und su-Schutt nimmt auch der Ton-Schluff-Anteil im Feinmaterial zu (bis 30%). Ebenso häufig ist die Ausbildung eines Ortsteinhorizontes, dem nach oben ein ausgebleichtes Feinmaterial mit vereinzelt, an ihrer Oberfläche ausgebleichten Gesteinsbruchstücken folgt. Auf der Feinschuttdecke befindet sich stets eine Rohhumusauflage mit einer meist dichten Vegetation. Die Grenze zum Anstehenden ist in den Aufschlüssen oft undeutlich, da der angewitterte und aufgelockerte Buntsandstein unter den Feinschuttdecken eine Übergangszone bildet, die dem darüberliegenden Schuttmaterial sehr ähnlich ist (FRIED, 1984).

Die Deckschichten der Hanglagen reichen i.a. über die Grenze Buntsandstein/Grundgebirge hinaus. Besonders auf sonnenexponierten Südhängen und den steilen Westhängen ist Buntsandsteinmaterial oft noch mehrere 100 m unterhalb der Grenze anzutreffen. Dabei vermischt sich der Buntsandsteinschutt mit dem Grundgebirgsmaterial und wird allmählich durch dieses ersetzt.

2.3.4 Blockmassen

Als Blockmassen werden Schuttdecken bezeichnet, bei denen die Oberfläche ausschließlich von Blöcken eingenommen wird. Die Blockmassen fallen meist durch eine karge oder völlig fehlende Vegetation auf. Das Feinmaterial ist zum größten Teil oder völlig ausgewaschen, sodaß die Blöcke direkt aufeinander liegen. Im Buntsandstein werden sie ausschließlich von den Hartgesteinen des Bausandsteines und des Hauptkonglomerates gebildet. Von den in Kap. 2.3.1 aufgeführten Blockmassen-Typen sind in den untersuchten Gebieten nur die Blockströme in nennenswertem Umfang vertreten. Sie erstrecken sich in Form linearer Blockansammlungen in Hangmulden und Rinnen, wobei sie bevorzugt auf sonnenexponierten Hängen vorkommen. Hier konnte die Auswaschung des Feinmaterials besonders intensiv wirken. Zusätzlich wurden die Blöcke in den Rinnen und Mulden durch schwerkraftbedingte Massenverlagerung in Richtung des stärksten Gefälles angereichert (WILHELMY, 1958). Die größte Kantenlänge der Blöcke erreicht im Schnitt 0,5-1,5 m, wobei vereinzelt auch Blöcke von über 3 m

Kantenlänge auftreten. Die häufig 3 bis 5 m mächtigen Blockströme überdecken an ihren Rändern meist die angrenzende Hangschuttdecke. Bei einer Bohrung am Rotenbach im Randbereich eines Blockstromes wurde unter den 3 m mächtigen Blockmassen ein blockreicher, mit fest verbackener Matrix verfüllter Hangschutt mit 6-7 m Mächtigkeit erbohrt.

3. Hydrogeologie

3.1 Meßstellennetz

Die Meßstellen wurden anhand der Vorkenntnisse aus den vorangegangenen Diplomarbeiten in den Untersuchungsgebieten ausgewählt (Abb. 7). Dabei wurde besonders darauf geachtet, Quellen aus verschiedenen Horizonten zu erfassen. Von flachen, vorwiegend aus dem Hangschutt gespeisten Quellen (z.B. Sb1) über Buntsandsteinschichtquellen (z.B. Kq5, Wq2) bis zu den tiefen Basisquellen (z.B. Sb8, R2) geht das gesamte Quellprofil in die Messungen ein. An den meisten Quellen wurden Wehre mit Schreibpegeln installiert. Nur an den Quellen Sb1 und Wq2 war es aufgrund der geringen Schüttungsmengen nicht möglich einen Schreibpegel anzubringen. Ihre Schüttung wurde anhand von Stichtagsmessungen beobachtet.

Der Gesamtabfluß der Gebiete wird an teilweise schon vorhandenen Pegeln im Vorfluter aufgezeichnet. Der Pegel im Seebach wird seit über 60 Jahren von den Baden-Werken betrieben, um den Zufluß in die Schwarzenbachtalsperre zu erfassen. An der Kleinen Kinzig und am Huttenbächle wird der Abfluß vom Zweckverband Wasserversorgung Kleine Kinzig (WKK) aufgezeichnet. So mußten lediglich am Rotenbach und am Weiherbach Wehre mit Schreibpegeln installiert werden. Ein zusätzlicher Pegel mit Wehr wurde im Seebach an der Grenze Buntsandstein-Grundgebirge angebracht, um den Basisabfluß abzutrennen.

Der Deckschichtenabfluß konnte zusätzlich über Sickerplatten, die am Seebach und Rotenbach in verschiedenen Tiefen eingeschlagen wurden, beobachtet werden. Am Rotenbach wurden zwei 3 m lange Pegelrohre gesetzt um den Wasserstand in den hier stets gesättigten Deckschichten zu beobachten.

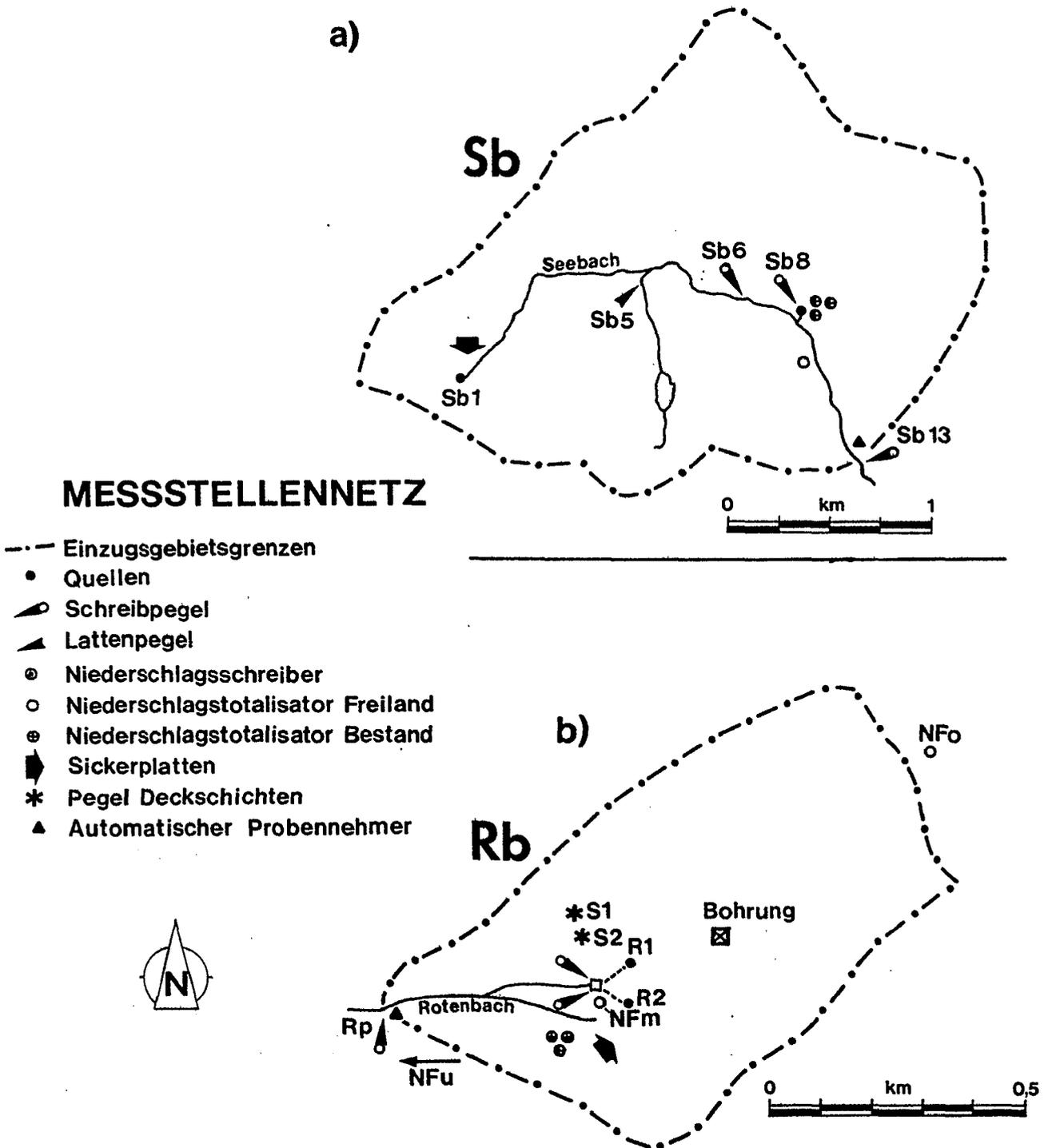


Abb. 7a,b: Meßstellennetz der Gebiete Seebach und Rotenbach

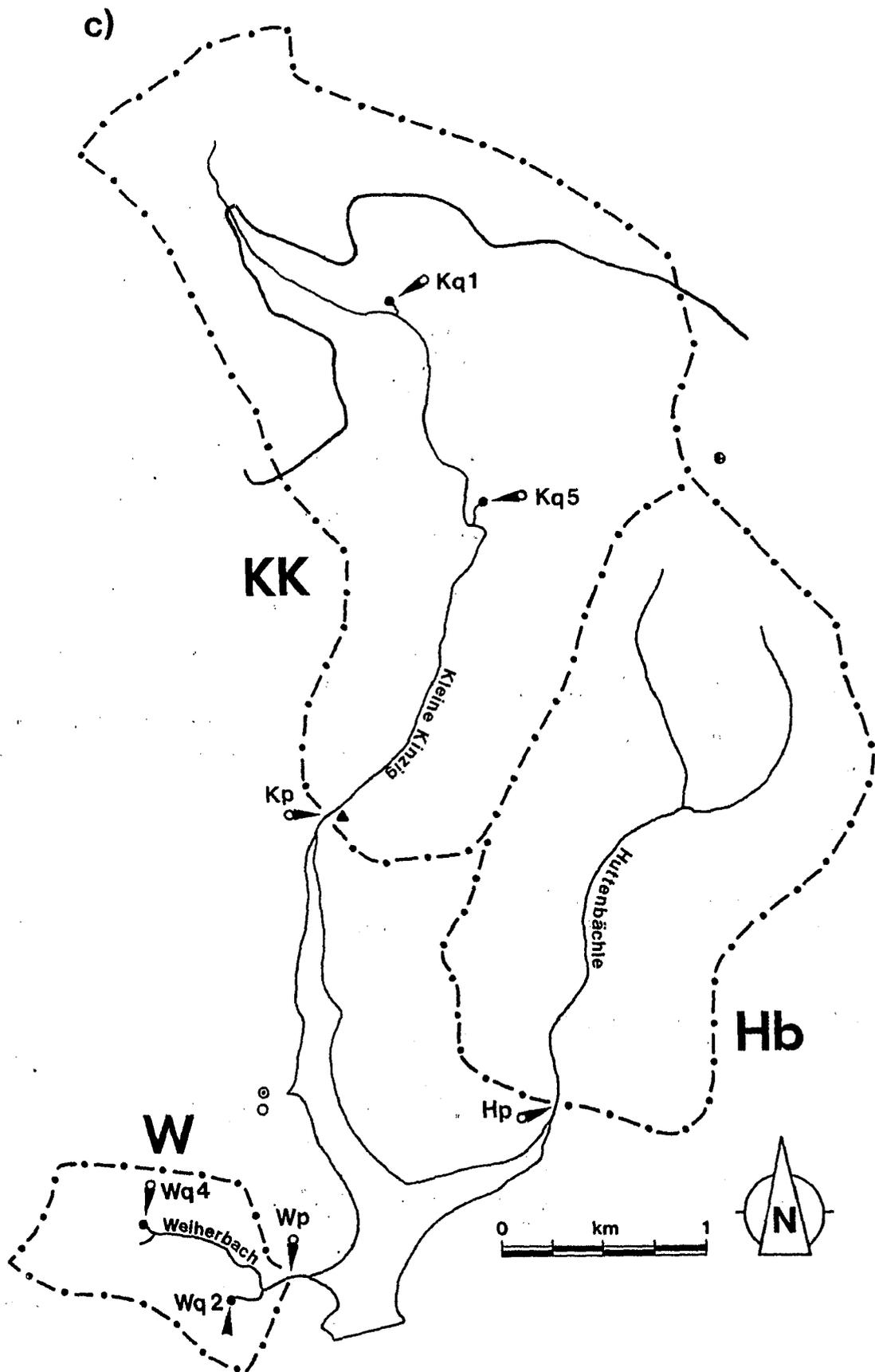


Abb. 7c: Meßstellennetz des Gebietes Kleine Kinzig

Der Niederschlag wurde mit Hilfe von Niederschlagstotalisatoren sowohl im Freiland als auch unter Bestand aufgefangen und gemessen. Für die Bestandesbehälter wurden Standorte ausgesucht, an denen für die Gebiete typische Fichtenbestände stehen (freundliche Mitteilungen der zuständigen Forstämter). Um repräsentative Durchschnittswerte zu bekommen, wurden die Behälter wie folgt aufgestellt:

- ein Behälter zwischen den Baumkronen
- ein Behälter unter der Baumkrone
- ein Behälter nahe am Stamm

Die mittlere Wassermenge aus den drei Behältern ergibt den Niederschlag unter dem Bestand. An der Kleinen Kinzig wurden Messungen der Forstlichen Versuchsanstalt übernommen, die an der nordöstlichen Grenze des Gebietes (Abb. 7c) im Wald durchgeführt wurden.

3.2 Hydrologisch wichtige Kennwerte der Deckschichten und des Buntsandstein-aquifers

Ihre nahezu lückenlose Verbreitung sowie die oft erheblichen Mächtigkeiten lassen einen großen Einfluß der Deckschichten auf den Wasserhaushalt vermuten. Am Beispiel des saarländischen Buntsandsteines diskutierte EINSELE (1970) die sandigen Deckschichten als Puffer und Speicher für den Niederschlag, der seinen Wasservorrat über längere Zeiträume an die Vegetation und den tiefer liegenden Buntsandsteinaquifer abgibt. Durch Auflockerung und Umlagerung erreichen diese Deckschichten ein nutzbares Porenvolumen von 15-30%. Versickerungsversuche an Lysimetern im Saarland ergaben maximale Infiltrationsraten von 160 bis 2500 mm/d, sodaß auch stärkste Niederschläge von den Deckschichten mühelos aufgenommen werden können.

Für die Deckschichten am Rotenbach gibt KLAIBER (1987) einen Gesamtporenanteil von ca. 40% an, wobei der Porenanteil im Ortsteinhorizont auf ca. 30-35% zurückgeht. Die mittlere Korngröße in der Matrix liegt im Bereich eines Mittelsandes (0,3 mm) bei sehr hohem Ungleichförmigkeitsgrad. Mit guter Übereinstimmung zu den saarländischen Buntsandstein-Deckschichten ergibt sich daraus ein nutzbares Porenvolumen (n_e) von 15-25% (HÖLTING, 1984).

Die Durchlässigkeit des sandigen Feinmaterialanteils der Deckschichten wurde im Labor an ungestörten Proben mittels eines Permeameters bei gesättigten Verhältnissen bestimmt (KLAIBER, 1987). Der locker gepackte Sand im oberen

Bereich weist einen k_f -Wert von ca. 10^{-4} m/s auf. Aufgrund der vergleichbaren Werte (Tab. 1) im saarländischen Buntsandstein kann auch die maximale Infiltrationsrate im Nordschwarzwald entsprechend hoch angesetzt werden. Im Bereich des Ortsteines geht die Durchlässigkeit bis auf 10^{-7} m/s zurück. Darunter steigt der k_f -Wert wieder auf Werte um 10^{-4} m/s an. Sind die Deckschichten nicht gesättigt, so ist mit einem um zwei bis drei Zehnerpotenzen geringeren Durchlässigkeitsbeiwert k_u zu rechnen (EDEN et al., 1983).

Über den k_f -Wert und das nutzbare Porenvolumen lassen sich nach dem Darcy'schen Gesetz auch die Fließgeschwindigkeiten in den Deckschichten berechnen (HÖLTING, 1984). Die Filtergeschwindigkeit (v_f) errechnet sich nach der Beziehung

$$v_f = k_f \cdot i \text{ (m/s)}$$

wobei i das Verhältnis aus dem Druckunterschied h und der Fließlänge l darstellt und somit den hydraulischen Gradienten oder das Gefälle angibt. Die tatsächliche Geschwindigkeit gibt die Abstandsgeschwindigkeit (v_a) unter Berücksichtigung des nutzbaren Hohlraumvolumens (n_e) an:

$$v_a = v_f / n_e \text{ (m/s)}$$

	Deckschichten		Buntsandstein
	Nordschwarzwald	Saarland	
n_e	15-25%	15-30%	0,1%
k_f (m/s)	10^{-2} - 10^{-3} 10^{-4} 10^{-7} 10^{-4} - 10^{-5}	Boden Deckschutt Ortstein tiefere Decksch.	10^{-8} Gestein 10^{-6} Gebirge $3 \cdot 10^{-2}$ Klüfte
mittl. v_a (m/d)	300 10 4	Boden Deckschutt tiefere Decksch.	- - - -
max. Infil. (mm/d)	-	160-2500	4 Gestein 100 Gebirge
Aufnahme- kapazität (mm/m)	200	-	-

Tab. 1: Hydrologisch wichtige Kennwerte der Deckschichten und des Bunt sandsteines

Bei einem durchschnittlichen Gefälle von ca. 20° in den Hangbereichen errechnen sich für den oberflächennahen Hangwasserstrom je nach Bodenausbildung Fließgeschwindigkeiten von 60 bis 600 m/d bei einem Mittelwert von ca. 300 m/d (Tab. 1). In den Deckschichten gehen die Fließgeschwindigkeiten mit abnehmenden k_f -Werten stark zurück. Für den hangparallelen Abflußanteil über dem Ortstein errechnet sich eine mittlere Fließgeschwindigkeit von ca. 10 m/d, die über das Grobporensystem aber immer noch Werte von über 100 m/d erreichen kann. Im Ortstein selbst geht aufgrund der sehr geringen Durchlässigkeit die Abstandsgeschwindigkeit auf ca. 10 mm/d zurück. In den tieferen Deckschichten ergeben sich wieder höhere Fließgeschwindigkeiten von durchschnittlich ca. 4 m/d. Dabei dürften für den hangparallelen Abfluß über das Grobporensystem wiederum weit höhere Werte erreicht werden, während die vertikale Versickerung über das Mittel- bis Feinporensystem sicher weit langsamer vor sich geht. Da nur mittlere k_f -Werte bekannt sind, können auch nur mittlere Fließgeschwindigkeiten angegeben werden.

Im Festgestein findet die Wasserbewegung hauptsächlich auf Klüften statt, wobei die Gesteinsporosität unbedeutend erscheint. Nach STÖBER (1986) ist das

Wasser im Porenraum des Buntsandsteins sowie in kleinen Klüften und Haarrissen unter natürlichem Druck adhäsiv gebunden. Lediglich in den mürben Schichten des Eck'schen Konglomerates sind Fließvorgänge innerhalb der Poren denkbar.

Der Buntsandstein wird von zwei verschiedenen Klufttypen durchzogen. Nahe der Oberfläche liegt eine stark geklüftete Auflockerungszone mit hauptsächlich parallel zu den Talhängen verlaufenden Hangentlastungsklüften. In die Tiefe reichende Klüfte sind in der Regel tektonischer Natur. Im Bereich der Trinkwassertalsperre "Kleine Kinzig" erreicht die Auflockerungszone 30-40 m (SAWATZKI & EISSELE, 1981). Im Bereich des oberen Nagoldtales ermittelten EISSELE & LINK (1981) in verschiedenen Bohrungen in ca. 35 m Tiefe eine sprunghafte Abnahme der Klüftigkeit.

EISSELE (1966) gibt ein mittleres nutzbares Kluftvolumen von ca. 0,1% für einen größeren Gesteinskomplex im Nordschwarzwälder Buntsandstein an. Dabei schwankt das Kluftvolumen der verschiedenen Gesteinshorizonte deutlich. Das harte, weitständig geklüftete Hauptkonglomerat und der Bausandstein erreichen ein größeres Kluftvolumen als z.B. die weicheren Schichten des Eck'schen Konglomerates oder des Unteren Buntsandsteines. Die Abnahme des Kluftvolumens wird im Gelände durch den in weiten Gebieten durchgehenden und ergiebigen Quellhorizont an der Grenze Bausandstein -Eck'sches Konglomerat dokumentiert. Für die Gesteinsdurchlässigkeit im saarländischen Buntsandstein gibt EISELE (1970) Werte um $5 \cdot 10^{-8}$ m/s an. Die Gebirgsdurchlässigkeit liegt aufgrund der Klüftung mit ca. 10^{-6} m/s deutlich höher.

In den Deckschichten können also ungleich größere Wassermengen aufgenommen werden als im anstehenden Buntsandstein. Bei einer mittleren Mächtigkeit von ca. 2 m am Seebach und der Kleinen Kinzig können die Deckschichten ca. 400 mm Wasser speichern. Am Rotenbach mit ca. 5 m mittlerer Deckschuttmächtigkeit liegt die Aufnahmekapazität entsprechend höher (ca. 1000 mm). Sicher geht vor allem in den oberen Bereichen ein Teil des Sickerwassers durch die Verdunstung und den Pflanzenbedarf verloren, aber dennoch dringt weit mehr Sickerwasser zur Basis der Deckschichten vor als der anstehende Buntsandstein über seine Klüfte aufnehmen kann.

3.3 Theoretische Überlegungen zum Abflußverhalten der Deckschichten bei verschiedenen Ausgangswassergehalten

3.3.1 Infiltration und oberflächennaher Abfluß

Während eines Niederschlagsereignisses wird in den dichten Fichtenbeständen ein Teil des Niederschlages als Interzeption im Kronenraum zurückgehalten und durch Verdunstung verbraucht. Der größte Teil gelangt allerdings bis auf den Waldboden und sickert schnell in die zumeist dünne, von Blöcken durchsetzte Bodendecke (Abb. 8). Maßgebend für die Aufnahmebereitschaft der Böden ist der Wassergehalt des Bodens vor Beginn eines Niederschlagsereignisses (SCHWARZ, 1986). Liegt eine geringe Ausgangsfeuchte vor, so sind die Böden in der Lage größte Niederschlagsmengen aufzunehmen. Die Bereitschaft zu Direktabfluß erhöht sich mit zunehmender Bodenfeuchte bzw. mit anhaltendem Regen (FREEZE & CHERRY, 1979). Oberflächenabfluß ist nur möglich, wenn die Böden vollständig wassergesättigt sind und die Niederschlagsintensität die minimale Infiltrationsrate des Bodens übersteigt. Über Grobporen, Wurzelkanäle und Grabgänge dringt das Sickerwasser durch den Boden schnell bis zu den sandigen Deckschichten vor. Liegt kein Bodenwasserdefizit (D) vor, d.h. ist der Ausgangswassergehalt größer oder zumindest gleich dem Wassergehalt der Feldkapazität, so kommt es an der Grenze Boden-Deckschichten aufgrund der um 1-2 Zehnerpotenzen abnehmenden Wasserleitfähigkeit (Tab. 1) und der daraus resultierenden geringeren Infiltrationsmenge ($I_d < I_p$) zu einem Wasserstau (Abb. 9). In Hanglagen fließt ein Teil des Wassers hangparallel, in Form von oberflächennahem Abfluß ab, während es auf nur schwach geneigten Flächen zu permanenten Staunässezonen im Boden kommen kann.

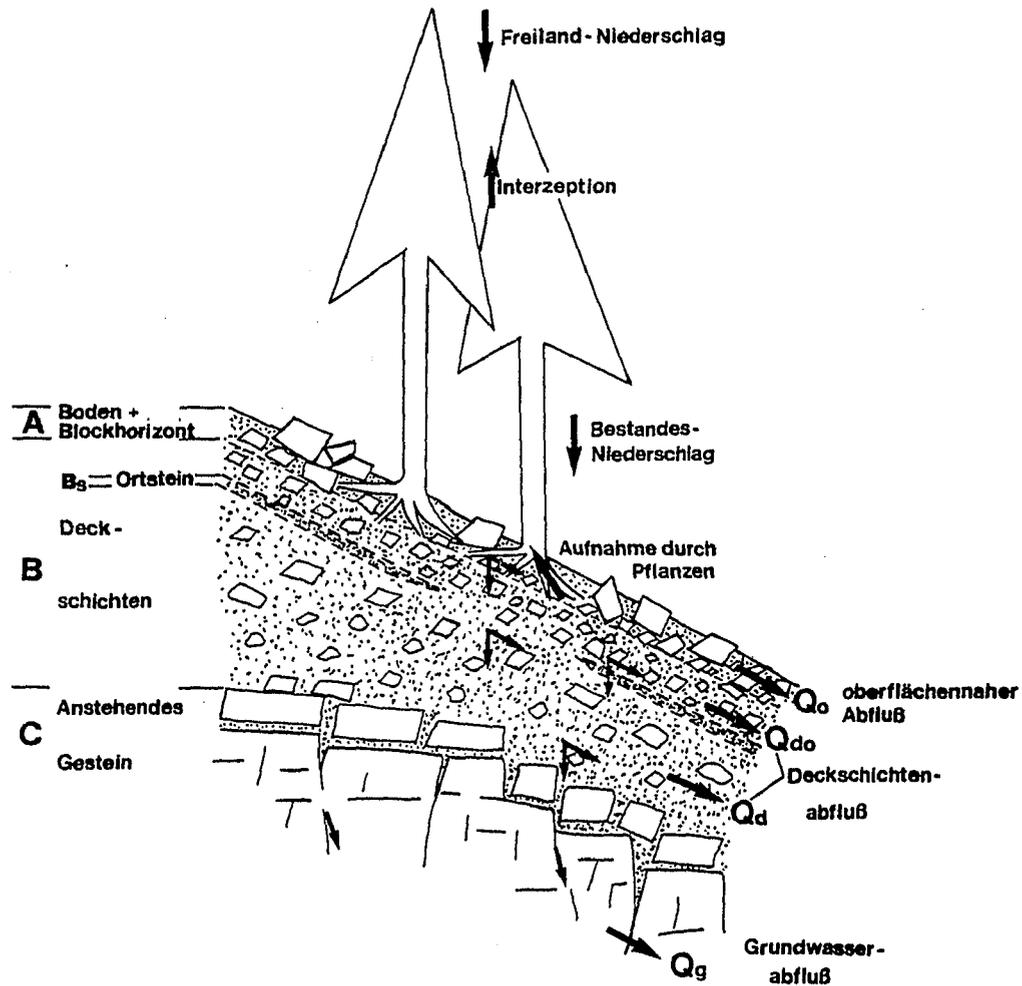


Abb. 8: Vereinfachtes Schema zur Erläuterung des Abflußverhaltens

Zusätzlich wird oberflächennaher Abfluß mit zunehmender Hangneigung begünstigt. Allerdings läßt sich ein Einfluß der Hangneigung nur erkennen, wenn die Böden denselben Aufbau zeigen. An den steilen Hängen ist der Boden meist von großen Blöcken durchsetzt, die stellenweise auch die Oberfläche bedecken. Die Zwischenräume sind oft nur unvollständig oder gar nicht mit Bodenmaterial verfüllt, sodaß Niederschläge praktisch ungehindert einsickern können. Im Flachhang dagegen erscheint der Boden durch das Fehlen großer Blöcke und seiner feineren Matrix dichter aufgebaut, wodurch die Infiltration eher behindert wird.

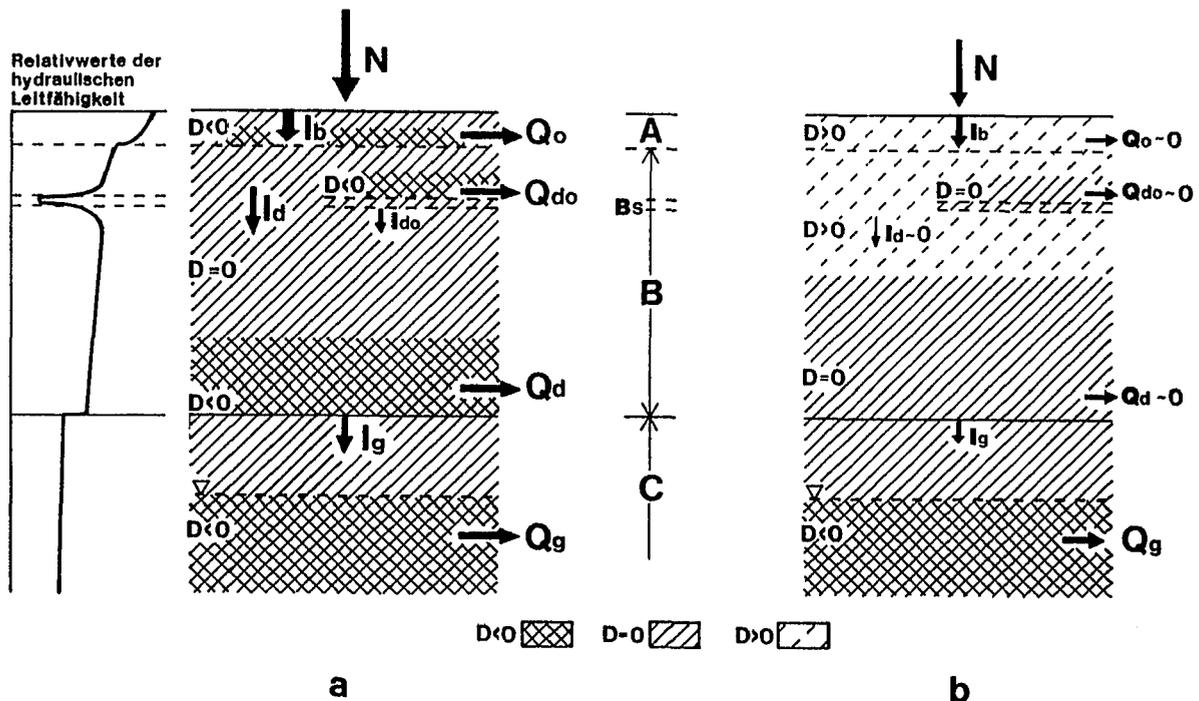


Abb. 9: Vereinfachtes Schema zur Erläuterung der lateralen und vertikalen Fließbewegungen vom Boden bis ins Festgestein bei hohem (a) und niedrigem (b) Ausgangswassergehalt (D = Bodenwasserdefizit gegenüber der Feldkapazität)

Ein nennenswerter Überlandabfluß konnte während des gesamten Meßzeitraumes nur einmal und lokal begrenzt beobachtet werden. Kurz nach der Schneeschmelze im Frühjahr 1988, also bei gesättigten Bodenverhältnissen, kam es zu einem Niederschlagsereignis hoher Intensität. Im Seebachgebiet im Übergangsbereich vom Steilhang zum Flachhang etwas oberhalb der Talsohle kam es an einer Stelle zu Überlandabfluß, der in breiter Front direkt dem Vorfluter zufließt. Hangaufwärts stellte sich dann allerdings heraus, daß auch hier der Überlandabfluß nicht direkt aus dem Niederschlag entstand. Vielmehr trat am Übergang vom Steilhang zum Flachhang, der hier mit einem deutlichen Wechsel des Deckschichtenaufbaus zusammenfällt, Wasser aus der blockreichen Deckschicht zutage. Im darüberliegenden Steilhang wurde der Niederschlag schnell von dem blockreichen Deckschutt aufgenommen. An der Grenze vom Deckschutt zum matrixreicheren unterlagernden Schutt floß ein Teil des Sickerwassers hangparallel ab. Der grobe Deckschutt keilt am Übergang zum Flachhang aus, sodaß der hangparallele, oberflächennahe Abfluß hier wieder zutage trat und sich auf der gesättigten Feinschuttdecke Überlandabfluß bildend ausbreitete.

Auch EDEN & PRÖSL (1985) beschreiben die große Bedeutung des Makroporenraumes auf die Infiltration der Niederschläge und den oberflächennahen Abfluß. In den Deckschichten nordalpiner Gebiete stellten sie fest, daß 25-35% des Gesamtabflusses über den oberflächennahen Abfluß dem Gerinne zufließen, wobei dieser Anteil über das Makroporensystem und/oder an der Grenzschicht Oberboden zu tieferen Deckschichten hangparallel abfließt.

Es ist also sicher realistischer, von einem oberflächennahen Abfluß als von Überlandabfluß zu sprechen, der auf direktem Wege dem Vorfluter zugeleitet wird. Dieser oberflächennahe Abflußanteil ist für die hohen und steilen Hochwasserspitzen in den Nordschwarzwälder Vorflutern verantwortlich. Schon kurz nach Beginn starker Regenfälle steigt der Wasserspiegel in den Vorflutern schnell an, um nach dem Niederschlagsereignis ein rasches Abklingen der Hochwasserwelle anzuzeigen. Allerdings kann es nur zu starken Hochwässern kommen, wenn die Böden vor dem Ereignis schon etwa den Wassergehalt der Feldkapazität besaßen.

Dazu schreibt SCHOENEFELDT (1963): "Die Waldböden schütten, sobald ihre beträchtliche Aufnahmekapazität überschritten ist, das Regenwasser so plötzlich aus, daß die Erklärung naheliegt, der Vorgang ähnele im kleinen der Entladung aufgestauter Wassermengen unzähliger kleiner Wildbäche."

Im Schönbuchgebiet mit z.T. ähnlichen sandigen Deckschichten über Keupersandsteinen weisen EINSELE et al. (1986) darauf hin, daß nach einem Anfangsverlust durch Verdunstung, ausgehend von der Feldkapazität bzw. einem aufgefüllten Bodenwasserdefizit, 10-30 mm Niederschlag nötig sind, um durch Teilsättigung der obersten, grobporenen Bodenschicht oberflächennahen Abfluß auszulösen. Im Rotenbachgebiet mit seinen steilen Hängen und groben Blockschuttdecken über feinerem Hangschutt hat KLAIBER (1987) schon nach 10 mm Niederschlag einen Schüttungsanstieg im Vorfluter beobachtet. Ist ein Bodenwasserdefizit vorhanden, dann wird das infiltrierende Wasser zunächst zur Sättigung des Bodens beitragen. So kann schon in den obersten Bereichen der Deckschichten ein Teil der Niederschläge in den Mittel- und Feinporen zurückgehalten werden. Dieser nur langsam und stark verzögert absickernde Teil des Niederschlages steht den Pflanzen zur Verfügung und bildet das maßgebende Regelglied für die Evapotranspiration.

NEMETH et.al. (1985) beschreiben die Bedeutung von Temperaturänderungen in der ungesättigten Zone. Der Durchlässigkeitsbeiwert verhält sich umgekehrt proportional zur Viskosität. Bei Temperaturschwankungen von 0-25 °C, die im obersten Meter im Laufe eines Jahres durchaus möglich sind, erreicht dieser Effekt den Faktor 2. Dies begünstigt einen steileren Verlauf der oberen Abschnitte der Auslaufkurven im Sommer. Im Winter wiederum wird bei gefrorenem

Boden schneller oberflächennaher Abfluß infolge des herabgesetzten Infiltrationsvermögens begünstigt.

3.3.2 Fließbewegungen in den Deckschichten

Der größte Teil der infiltrierten Niederschläge versickert in die tieferen Deckschichten. Dabei wird das schon vorhandene Sickerwasser z.T. verdrängt und das Frischwasser kommt selbst nur verzögert zum Abfluß. Aus Isotopenuntersuchungen ist bekannt, daß im Winter und während der Schneeschmelze eine nahezu vollständige Erneuerung des Deckschichtenwassers stattfindet (EDEN & PRÖSL, 1985). Die Menge an versickerndem Wasser hängt wiederum stark vom Ausgangswassergehalt ab (HEITTELE, 1968). Wie oben beschrieben, kann bei geringem Wassergehalt der Niederschlag zwar schneller eindringen, aber nur wenig gelangt in tiefere Bereiche, da zunächst ein Teil des Sickerwassers zum Auffüllen des Bodenwasserdefizites verbraucht wird. Bei hohem Ausgangswassergehalt ist die Versickerungsgeschwindigkeit geringer, aber es gelangt dennoch mehr Wasser in die tieferen Deckschichten.

Auf seinem Weg in die Tiefe wird das Sickerwasser vielerorts von den weitverbreiteten Ortsteinbändern behindert (Abb. 8). Mit ca. 3 Zehnerpotenzen (Tab. 1) niedrigerer Wasserleitfähigkeit als die umgebenden Deckschichten bilden die verkitteten, dichten Anreicherungslagen ausgeprägte Stauhorizonte ($I_{d0} \ll I_d$, Abb. 9). Ist kein Bodenwasserdefizit vorhanden, sind also die Mittel- und Feinporen mit Wasser erfüllt, so kommt es rasch zur Bildung einer Stauwasserzone und ein weiterer, nicht unerheblicher Teil des Sickerwassers gelangt durch hangparalleles Abfließen über dem Ortstein rasch (v_a bis 100 m/d) zum Vorfluter.

Auch WEYER (1972) beschreibt, wie sich über im Boden ausgedehnte stauende Lagen schmale wassergesättigte Zonen mit positivem hydraulischem Druck ausbilden. Aus diesen Lagen kann auch im Sommer eine geringe Menge Wasser längere Zeit nach Niederschlägen auslaufen. In Schürfgruben und an Weganschnitten konnte dieser Vorgang des öfteren beobachtet werden.

Nahe der Seebachquelle Sb1 unterhalb der Badener Höhe in 880 m ü NN wurden in einer Schürfgrube vier Sickerplatten (SP1-4) in die Deckschichten eingeschlagen (Abb. 7a).

Hier ist ein 3 m mächtiges Profil einer Blockschuttdecke im mit ca. 20° abfallenden Nordhang aufgeschlossen. In unterschiedlicher Tiefe und versetzt angebracht nahmen die Platten Sickerwasser auf (Abb. 10). Über Schläuche wurde das Wasser in Flaschen (2 Liter) geleitet, die 2-wöchentlich geleert wurden. Die oberste Sickerplatte (SP1) lag in 20 cm Tiefe direkt unter dem aus sandigem Roh-

humus bestehenden Bodenhorizont. SP2 wurde direkt über der Ortsteinlage angebracht, während SP3 unmittelbar unter dem Ortstein lag. SP4 nahm Sickerwasser in 1,8 m Tiefe aus einem ca. 1 m mächtigen blockarmen Abschnitt des Deckschichtenprofils auf.

In Abb. 10 sind zusätzlich die mittleren aufgefangenen Wassermengen dargestellt. SP1 brachte im Gegensatz zu den tiefer gelegenen Sickerplatten SP2 und SP3 nur wenig Wasser. Der obersten Sickerplatte floß nur während oder unmittelbar nach Niederschlägen vertikal absickerndes Wasser zu. Der Einzugsbereich der Sickerplatte war auf ihre Fläche beschränkt. Dagegen wurde SP2 in erster Linie vom hangparallelen Abfluß über dem Ortstein genährt. Auch an anderen Stellen, wie Weganschnitten oder alten Schürfgruben im Rotenbachgebiet, war zu sehen, wie nach größeren Niederschlägen über dem Ortstein Wasser aus dem Hang drang, während die Deckschichten unter der Ortsteinlage meist nahezu trocken erschienen. Der Einzugsbereich von SP2 kann sich in den Deckschichten weit hangaufwärts erstreckt haben. Erst 2-4 Tage nach dem Niederschlag konnte kein Wasseraustritt über SP2 mehr festgestellt werden.

Im vorliegenden Deckschichtenprofil konnten allerdings auch unterhalb der Ortsteinlage größere Wasseraustritte beobachtet werden. SP3 brachte nahezu soviel Wasser wie SP2 (Abb. 10). Dies deutet auf die lückenhafte Verbreitung des Ortsteines hin. Zwischen den "Ortsteinlinsen" kann Sickerwasser ungehindert tiefer gelangen, wobei in den steilen Hanglagen und bei gesättigten oder zumindest teilgesättigten Verhältnissen immer eine hangparallele Komponente vorhanden ist und Sickerwasser unter die Ortsteinlage hindurch abgeführt wird.

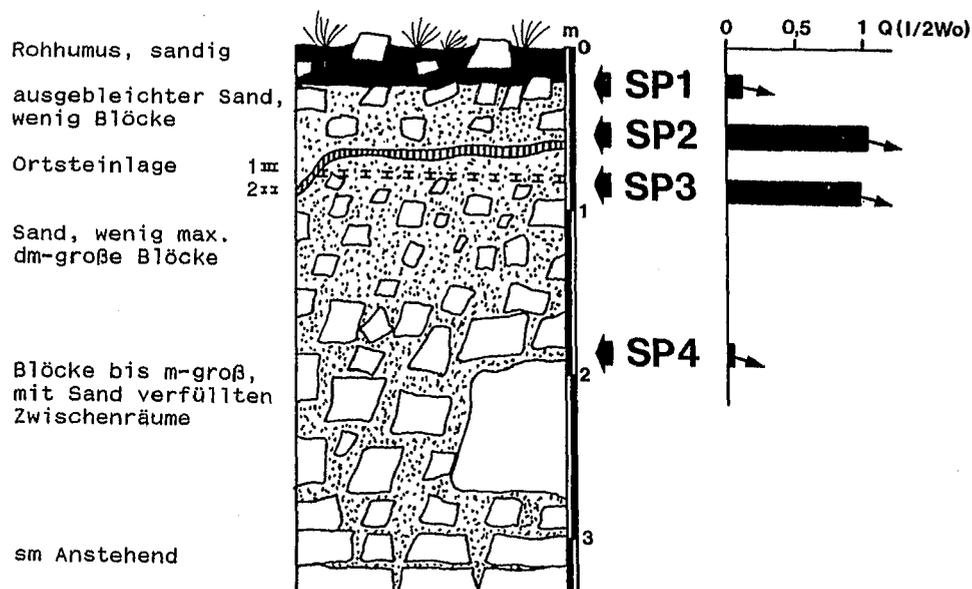


Abb. 10: Deckschichtenprofil in Hanglage am Seebach mit Ergiebigkeit von Sickerplatten in unterschiedlicher Tiefe

Das Sickerwasser in den Deckschichten bewegt sich also auf bevorzugten Bahnen. Eine geschlossen vordringende Sickerwasserfront ist in der Regel nicht ausgebildet. Dies bestätigen auch Beobachtungen an einer Deckschichtenbohrung die im Mai 1987 oberhalb der Rotenbachquellen in den ca. 10 m mächtigen Blockschutt am Rande eines Blockstromes im ca. 30° steilen Hang abgeteuft wurde (Abb. 7b). Mit dem Bohrfortschritt wurden Proben zur Profilaufnahme genommen und deren Wassergehalt im Labor bestimmt. Trotz eines großen Wasserangebotes nach der winterlichen Schneeschmelze war das Profil nahezu "trocken" (Abb. 11). Lediglich im Bereich des Ortsteines und am Übergang von einer lockergepackten zu einer verdichteten Blocklage in 3-4 m Tiefe stieg der Wassergehalt deutlich an. Die Wasserbewegungen sind in diesem Bereich der Deckschichten auf wenige bevorzugte Bahnen beschränkt, über die eine hangparallele Entwässerung stattfindet. Vertikale Sickerwasserbewegungen scheinen dagegen kaum stattzufinden, sodaß zumindest im Bereich dieser mächtigen Deckschichten keine nennenswerte Grundwassererneuerung im tieferen Buntsandsteinaquifer stattfindet.

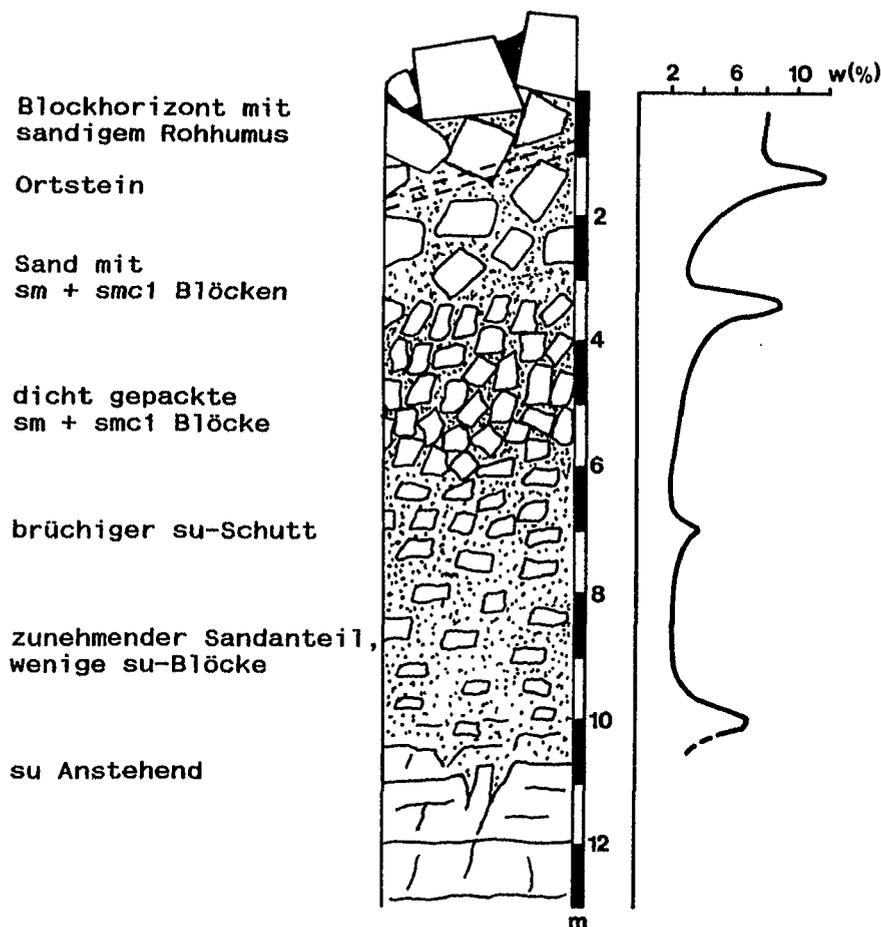


Abb. 11: Profil einer Deckschichtenbohrung im Hangschutt oberhalb der Rotenbachquellen mit Wassergehaltsprofil

Durch einen intakten, lückenlosen Ortstein können nach Berechnungen von KLAIBER (1987) maximal 8-9 mm Sickerwasser pro Tag gelangen. Ist der Ortstein in den oberen Bereichen (0,5-1 m) ausgebildet, so gelangt das überschüssige Wasser, ähnlich dem oberflächennahen Abfluß, mit geringer zeitlicher Verzögerung von wenigen Stunden (v_a bis 100 m/d) in den Vorfluter (Q_{dO} , Abb. 8 und 9). Die geringe maximale Durchsickerungsrate erklärt auch die Schüttungszunahmen im Rotenbach nach nur 10 mm Niederschlag. Während längerer Trockenperioden, die in den letzten Jahren allerdings selten waren, wird der Staunässebereich langsam abgebaut und der hangparallele Abfluß kommt allmählich zum Erliegen. Auch die Sickerrate in die tieferen Deckschichten und somit die Grundwasserneubildung geht zurück. Mit zunehmendem Bodenwasserdefizit sind die Fließbewegungen vollständig auf das Mittel- bis Feinporensystem beschränkt. Die Grobporen sind im ungesättigten Bereich nicht mit Wasser gefüllt und führen nur nach Niederschlagsereignissen bei vollständiger Sättigung der Mittel- bis Feinporen Wasser (MERKEL, 1983). Im ungesättigten Zustand finden nur noch vertikale Sickerwasserbewegungen mit geringerer Fließgeschwindigkeit statt (Abb. 9). In die Deckschichten nach längeren Trockenperioden infiltriertes Niederschlagswasser füllt zunächst das vorhandene Bodenwasserdefizit auf. Erst nach Auffüllen des Mittel- bis Feinporensystems bzw. Erreichen der Feldkapazität gelangen wieder größere Wassermengen in Richtung Festgestein und es setzen über den Grobporenraum wieder laterale Fließbewegungen ein.

Ähnliche Beobachtungen machte EINSELE (1970) bei Lysimeterversuchen in den Deckschichten des saarländischen Buntsandsteines. In feuchten Sommern spricht die Durchsickerung auf starke Niederschläge deutlich an, wogegen in trockenen Sommern die Sickerwassermenge vom Frühjahr ab kontinuierlich zurückgeht, ohne durch folgende Niederschläge beeinflusst zu werden. Dabei kann es mehrere Monate dauern bis die langsam abnehmende Durchsickerung völlig versiegt.

Nach herbstlichen Starkniederschlägen kann zwar oberflächennaher Abfluß Q_o und Deckschichtenabfluß über dem Ortstein Q_{dO} kurzfristig einsetzen, der Abfluß aus den tieferen Deckschichten (Q_d) bleibt aber gering. Schon kurze Zeit nach dem Niederschlag wird der Vorfluter wieder nahezu vollständig von Grundwasser gespeist.

3.3.3 Infiltration in den Festgesteinsaquifer

Zu einem weiteren Wasserstau kann es an der Grenze zwischen den Deckschichten und dem Festgestein kommen. Besonders in den weicheren, kluftarmen Schichtfolgen des Eck'schen Konglomerates oder dem Unteren Buntsandstein können sich Stauhohizonte ausbilden (Abb. 11, Wassergehaltszunahme über dem anstehenden Gestein). Mit einer mittleren Gebirgsdurchlässigkeit von ca. 10^{-6} m/s können in den Kluftgrundwasserleiter Buntsandstein maximal 80-100 mm/d Sickerwasser (I_g) infiltrieren, wobei in kluftarmen Bereichen die Gebirgsdurchlässigkeit noch geringer sein kann. Für die Gesteinsdurchlässigkeit, also kluftfreie Abschnitte, gibt HEITALE (1968) für den saarländischen Mittleren Buntsandstein 4,1 mm/d ($k_f = 4,7 \cdot 10^{-8}$) an. Die potentielle Durchsickerungsrate (I_d) in den sandigen Deckschichten kann bei einem k_f -Wert von 10^{-5} m/s 500 mm/d erreichen. Das Festgestein ist nicht in der Lage solche große Wassermengen aufzunehmen. Der überschüssige Teil fließt als Deckschichtenabfluß hangparallel ab und speist die Hangschuttquellen oder fließt direkt aus dem Hangschutt in den Vorfluter. Hier ist allerdings zu beachten, daß der Wert der potentiellen Durchsickerungsrate von 500 mm/d in den Deckschichten in der Regel bei weitem nicht erreicht wird. Auch die höchsten im Meßzeitraum gemessenen Niederschläge erreichen i.a. keine 100 mm/d, wovon wiederum ein Teil an die Verdunstung und ein weiterer Teil durch oberflächennahen Abfluß verloren geht. Im Bereich einer erweiterten Kluft, die in der Auflockerszone nicht selten sind, kann also durchaus das gesamte bis zum Festgestein versickernde Wasser zumindest in die oberen, aufgelockerten Bereiche infiltrieren. Lediglich während der Schneeschmelze bei permanentem Sickerwassernachschub kann die Aufnahmefähigkeit von kluftreichen Abschnitten überschritten werden.

Mit nachlassendem Sickerwassernachschub in trockenen Sommern wird der eventuelle Staubebereich abgebaut und der Deckschichtenabfluß klingt ab. Der Festgesteinsaquifer wird aber weiterhin durch einen langsamen Abtropfvorgang aus den Mittel- und Feinporen gespeist. Mit einem Bodenwasserdefizit ist im unteren Bereich der Deckschichten nicht zu rechnen, da aufgrund der häufigen und starken Niederschläge im Nordschwarzwald der Sickerwassernachschub aus den oberen Bereichen praktisch nie über längere Zeit zum Erliegen kommt. So gewährleisten die Deckschichten als Puffer und Speicher eine stetige, mehr oder minder intensive Grundwasserneubildung, die im gleichförmigen Verlauf des Grundwasserabflusses Q_g über die Basis- und tieferen Schichtquellen zum Ausdruck kommt,

Die Hartgesteine des Mittleren Buntsandsteines (sm, smc2) sind z.T. von weitständigen Großklüften durchsetzt (Kap. 2.2). Anhand von Färbversuchen hat

EISSELE (1966) in diesen Klüften mittlere Fließgeschwindigkeiten von 50-150 m/h bei Spitzenwerten von bis zu 300 m/h ermittelt. Daraus errechnet sich ein mittlerer k_f -Wert von $3 \cdot 10^{-2}$ m/s. Solche Klüfte sind in der Lage, jede Sickerwassermenge aus den Deckschichten aufzunehmen. Vor allem im Bereich solcher Großklüfte kommt es zu einer intensiven Grundwasserneubildung. Hier sind keine Stauwasserzonen zu erwarten und der hangparallele Deckschichtenabfluß über dem Festgestein ist nur gering. Besonders hier wird die Bedeutung der Deckschichten als Puffer und Speicher deutlich. Mit ihrem höheren Retentionsvermögen bestimmen sie den Sickerwassernachschub in die Großklüfte und sichern auch in diesen stark durchlässigen Bereichen des Festgesteines eine stetige und dosierte Grundwasserneubildung.

3.3.4 Schlußfolgerungen

Die obigen Überlegungen zeigen u.a., daß die übliche Abflußseparation in streng abgegrenzte, übereinander angeordnete Aquifere mit den drei Komponenten oberflächennaher Abfluß, Deckschichtenabfluß und Grundwasserabfluß für den Buntsandstein unzureichend ist. Vielmehr müssen die unterschiedlich großen Porenhohlräume als auch die Variation ungesättigte - gesättigte Leitfähigkeit berücksichtigt werden. In Anlehnung an MERKEL (1983) kann hier folgendes Drei-Boxen-Modell aufgestellt werden:

- Poren Kategorie 1: Schluff und Feinsand; inaktiv
- Poren Kategorie 2: Sandkorn, Mittel- und Feinporen;
Sickerwasserbewegung
- Poren Kategorie 3: Grobporen; sind im ungesättigten Bereich
i.d. Regel nicht mit Wasser gefüllt, nur nach Niederschlags-
ereignissen

Der Grobporenanteil nimmt mit zunehmender Tiefe in den Deckschichten zwar ab, dennoch sind sie nicht auf die oberen Bereiche begrenzt, sondern durchziehen zusammen mit den Mittel- und Feinporen das gesamte Deckschichtenprofil. So fließt bei gesättigten Verhältnissen (Mittel- und Feinporen gefüllt) und nach Niederschlägen der intermittierende Abflußanteil im Vorfluter nicht ausschließlich über die oberflächennahen Bereiche ab. Zumindest ein Teil gelangt über das Grobporensystem bis in die tieferen Deckschichten und verdrängt hier eventuell schon vorhandenes Wasser, das mit geringer zeitlicher Verzögerung dem Vorfluter zugeführt wird (piston flow). Bei ungesättigten

Verhältnissen zeigen die Deckschichten ein abweichendes Abflußverhalten. Die Grobporen tragen nicht zum Abflußgeschehen bei und der Deckschichtenabfluß wird durch das höhere Retentionsvermögen der Mittel- und Feinporen bestimmt. Es kann also aus denselben Horizonten zu Abflüssen mit verschiedenen Verzögerungszeiten kommen. Dennoch kann aufgrund der Schichtung Boden-Deckschichten und den wasserstauenden Ortsteinbändern davon ausgegangen werden, daß der kurzfristige Abfluß vorwiegend aus den oberflächennahen Grobporensystemen stammt. Das längerfristige Deckschichtenwasser entstammt aus dem Mittel- und Feinporensystem des gesamten Boden- und Deckschichtenprofils.

Diese Überlegungen werden im Folgenden durch Beobachtungen vor Ort, Auswertung verschiedener Bach- und Quellabflußganglinien sowie hydrochemischen Untersuchungen überprüft.

3.4 Wasserbilanz

3.4.1 Niederschlag

Der Schwarzwald gehört nach RADKE (1973) zum subozeanischen Waldklimabereich der kühlgemäßigten Zone. METZ (1971) beschreibt den hohen Nordschwarzwald mit Niederschlagshöhen um 2000 mm/a als das niederschlagsreichste außeralpine Gebiet Deutschlands. Der Schwarzwald stellt für die überwiegend aus südwestlicher Richtung ankommenden Regenwinde eine klimatische Barriere dar und wirkt als Regenstauer (WAGNER, 1964). Hieraus ergibt sich eine extreme Höhenabhängigkeit der Niederschlagsverteilung mit einem Niederschlagsgradienten zwischen Rheintal und Hochschwarzwald von 132 mm/100 m. KLAIBER (1987) gibt mit ca. 3% erhöhter Niederschlagsmenge pro 100 m einen etwas geringeren Niederschlagsgradienten an.

Zur Ermittlung der Niederschlagssummen wurden Daten von den nahegelegenen Niederschlags- und Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes herangezogen. Zusätzlich wurden in den Gebieten Niederschlagstotalisatoren im Freiland und im Bestand aufgestellt (Abb. 7). Die aufgefangene Wassermenge wurde gemessen und über die Fläche des Auffangtrichters in mm Niederschlagshöhe umgerechnet. Die berechneten Werte sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Im Meßzeitraum 1985-1988 fällt mit 1985 ein trockenes Jahr, während 1986-1988 Jahre mit reichlichen Niederschlägen folgen, die deutlich über dem langjährigen Mittel liegen.

Für den Seebach ist die Niederschlagsstation Herrenwies repräsentativ. Sie liegt nur ca. 500 m von der Südgrenze des Gebietes entfernt und fällt mit 764 m ü NN in den Höhenbereich des Seebaches (680-1003 m ü NN). Die über den Freilandtotalisator gemessenen Niederschlagshöhen stimmen mit 3% Abweichung gut mit den Werten der Station Herrenwies überein. Im Bestand liegen die Werte ca. 25% unter dem Freilandniederschlag. Nur ca. 75% des Niederschlages erreichen im Fichtenbestand des Seebachgebietes den Boden. Die restlichen 25% werden von den Baumkronen aufgefangen und durch Interzeption verbraucht.

(mm/a)	Höhe (mm ü NN)	1985	1986	1987	1988	Mittel 1951-88
Seebach						
St. Herrenwies	764	1624	2412	2226	2471	1931
Tot. NF	710	1675	2396	2265	2413	-
Tot. NB	730	1245	1908	1771	1881	-
Rotenbach						
St. Oppenau	315	-	1861	1750	1789	-
St. Bühlertal	478	-	-	1745	1817	-
Tot. NFu	380	-	-	1715	1794	-
Tot. NFm	650	-	-	2012	2251	-
Tot. NFo	930	-	-	2032	2284	-
Tot. NB	660	-	-	1431	1555	-
Kleine Kinzig						
St. Freudenstadt	797	1356	2275	1850	2191	1602
FVA NB			1679	1324	1643	
N-Schreiber KK	650	-	-	-	2154	-

Tab. 2: Niederschlagshöhen (mm/a) in den Untersuchungsgebieten

Die nächstgelegene Niederschlagsstation zum Rotenbach liegt ca. 5 km WSW in Oppenau mit 315 m ü NN weit unterhalb des Gebietes (550-930 m ü NN). Am Rotenbach selbst wurde der Freilandniederschlag in drei unterschiedlichen Höhenlagen aufgefangen. Die Niederschlagshöhen im untersten Totalisator direkt unterhalb des Gebietes (NFu, 380 m ü NN) stimmen wiederum gut mit den Werten der Station Oppenau überein. Auf 650 m ü NN (NFm) wurden ca. 15-20% höhere Niederschlagssummen erreicht, während auf 930 m ü NN (NFo) nur noch ein unbedeutender Zuwachs gegenüber NFm zu verzeichnen ist. Die Bestandestotalisatoren (NB) liegen mit 660 m ü NN in unmittelbarer Nähe von

NFm. Mit guter Übereinstimmung zum Seebach werden am Rotenbach 25-30% des Niederschlages im Kronenraum der Fichten zurückgehalten.

Die nächstgelegene Klimastation liegt ca. 20 km nördlich ebenfalls am Westhang in Bühlertal mit 478 m ü NN etwas tiefer als das Untersuchungsgebiet. Da die Niederschlagswerte gut mit den Werten am Rotenbach zu vergleichen sind, können von dieser Klimastation die für die folgenden Verdunstungsberechnungen (Kap. 3.4.2) nötigen Daten übernommen werden.

Um die Niederschlagsmengen im Bereich der Kleinen Kinzig zu erfassen, wurde ein beheizter Niederschlagsschreiber installiert. Allerdings wurde nur der Niederschlag des hydrologischen Jahres 1988 gemessen. Die ermittelte Niederschlagshöhe ist nahezu identisch mit der in der ca. 5 km nordöstlich gelegenen Station des Wetterdienstes gemessenen Höhe (Tab. 2). So können für die vorangegangenen Jahre die Werte der Wetterstation herangezogen werden. Der Bestandesniederschlag wird von der Forstlichen Versuchsanstalt in unmittelbarer Nähe des Gebietes gemessen (Abb. 7). Auch hier gehen im Kronenraum der Fichten ca. 25-30% des Niederschlages durch Interzeption verloren.

Die Niederschlagsverteilung vom Winter- zum Sommerhalbjahr ist meistens recht ausgeglichen (Tab. 3). Darauf hat schon KREBS (1979) hingewiesen, der im Eyachtal bei Wildbad im Nordschwarzwald für die Jahre 1966-1979 einen mittleren Anteil des Jahresniederschlages von 52% im Winter und 48% im Sommer angibt. Nach STAHR (1973) sind die Niederschläge im Hochschwarzwald gemäß dem atlantischen Klimacharakter annähernd gleichmäßig über das Jahr verteilt. Dabei ist zu bemerken, daß im Sommerhalbjahr (vor allem im Spätsommer und Herbst) eher wenige hohe Niederschlagsspitzen auftreten, wogegen die Niederschlagsverteilung im Winterhalbjahr ausgeglichener erscheint.

Die täglichen Niederschlagshöhen in den verschiedenen Arbeitsgebieten sind den Abb. 24 bis 27 in Kapitel 3.7 zu entnehmen.

(mm)		1985	1986	1987	1988	Mittel
St. Herrenwies	Wi	837	1191	980	1454	1116
	So	787	1221	1246	1017	1068
St. Oppenau	Wi	-	876	729	1018	874
	So	-	985	1021	771	926
St. Bühlertal	Wi	-	-	666	876	771
	So	-	-	1079	942	1011
St. Freudenstadt	Wi	804	1218	939	1392	1088
	So	583	1057	911	799	838

Tab. 3: Niederschlagsverteilung Winter-Sommerhalbjahre

3.4.2 Verdunstung

Da die Verdunstung ein wichtiges Glied im Wasserhaushalt darstellt und vor allem in den oberen Boden- und Deckschichtenbereichen das Abflußverhalten nachhaltig beeinflusst, wird an dieser Stelle versucht, die Verdunstung in den einzelnen Gebieten anhand verschiedener Verfahren zu ermitteln. Zur Berechnung der Verdunstung wurden vom Deutschen Wetterdienst die notwendigen Daten der nächstgelegenen Klimastationen zur Verfügung gestellt. Für die Gebiete Kleine Kinzig und Seebach konnten die Werte der Klimastation Freudenstadt herangezogen werden. Die Station liegt in Höhenlage beider Gebiete, ist aber mit ca. 25 km zum Seebach zu weit entfernt, um absolut zuverlässige Werte für dieses Gebiet zu bieten. Dennoch liefert die Klimastation Freudenstadt repräsentativere Werte als die zwar nähere, aber viel tiefer liegende Klimastation Bühlertal.

Die Klimadaten der Station Bühlertal dienten zur Berechnung der Verdunstung im Gebiet Rotenbach, da in Oppenau nur die Niederschlagshöhen ermittelt wurden. Die nahezu übereinstimmenden Niederschlagswerte der beiden Stationen (Tab. 2), sowie die ähnliche Höhenlage am Fuße des Schwarzwaldes zeigen, daß die Werte auf das Rotenbachgebiet übertragbar sind.

3.4.2.1 Potentielle Verdunstung

Die potentielle Verdunstung bzw. potentielle Evapotranspiration (ET_{pot}) wurde nach den Verfahren von HAUDE in allen Gebieten, sowie nach SCHENDEL und THORNTHWAITE am Seebach und der Kleinen Kinzig bestimmt (in HÖLTING, 1984). Diese Verfahren liefern zunächst die Verdunstungshöhen über einer freien Wasseroberfläche. Handelt es sich um bewaldete Gebiete so ändert sich die Verdunstung erheblich. Dazu gibt HAUDE (in SOKOLLEK, 1983) je nach Art des Bestandes verschiedene Pflanzenfaktoren an, die eine Korrektur der Verdunstungsmenge erlauben.

Im Sommer ist die Verdunstung aufgrund intensiver Interzeption in den Baumkronen und der Transpiration aus den Pflanzen höher als über einer freien Wasseroberfläche. Im Winter dagegen geht die Verdunstung im Bestand stark zurück. Da ohnehin der weitaus größte Teil der jährlichen Verdunstung im Sommer erfolgt (in den vorliegenden Gebieten 85-95%, Abb. 12), ist die Verdunstung über das gesamte Jahr im Bestand erheblich höher (20-30%).

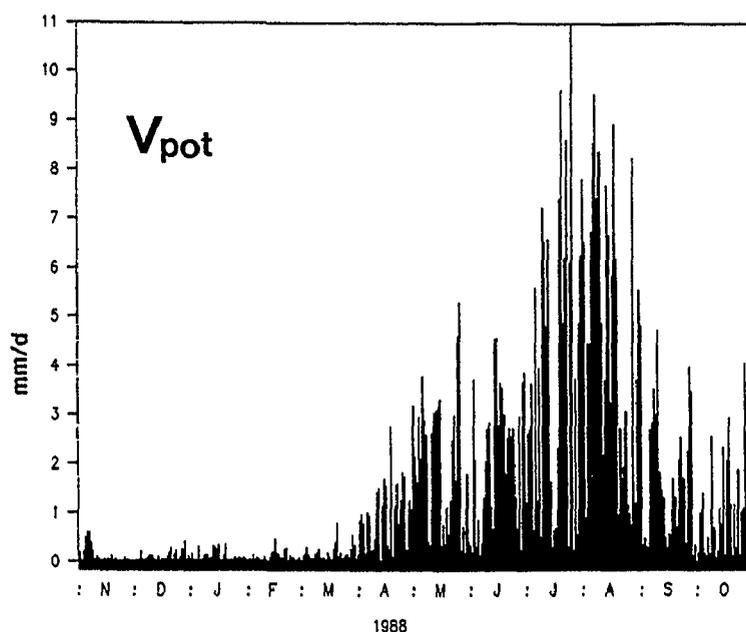


Abb. 12: Jahrgang der potentiellen Verdunstung nach Haude Station Freudenstadt

Die drei Verfahren liefern Werte, die sehr gut miteinander übereinstimmen (Tab. 4). Im trockenen Jahr 1985 wird mit einem Mittelwert aus den drei Verfahren von 743 mm/a die höchste potentielle Verdunstungsrate im Laufe der vier Meßjahre erreicht. In den folgenden niederschlagsreichen Jahren geht die potentielle Verdunstung deutlich zurück.

(mm/a)		1985	1986	1987	1988
Haude	Seebach/ Kl. Kinzig	731	666	585	601
	Rotenbach	-	-	585	702
Schende1	Seebach	761	719	639	646
Thornthwaite	Seebach	736	681	601	634

Tab. 4: Potentielle Verdunstung (mm/a) in den Untersuchungsgebieten

3.4.2.2 Reelle Verdunstung

Die reelle Verdunstung (ET_{reell}) wurde nach den Verfahren von TURC und UHLIG (in HÖLTING, 1984) sowie am Seebach zusätzlich aus der langjährigen Wasserbilanz ermittelt (Tab. 5).

Aus der langjährigen Wasserbilanz ($V = N - A$) ergibt sich am Seebach anhand der letzten 17 Jahre eine Verdunstungsrate von 534 mm/a.

Wie bei den Verfahren zur Berechnung der potentiellen Verdunstung hat TURC versucht, die reelle Verdunstung über klimatologische Daten zu bestimmen. In seiner Formel werden lediglich die Jahresniederschlagshöhe und die mittlere Jahrestemperatur berücksichtigt:

$$ET_{\text{reellTU}} = N / (0,9 + (N/I_t)^2)^{0,5}$$

mit: N = Jahresniederschlagshöhe (mm/a)

$$I_t = 300 + 25t + 0,05t^3$$

t = Jahresmittel der Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)

Dieses Verfahren liefert unabhängig von den klimatischen Unterschieden in den vier Jahren recht einheitliche Werte, die lediglich im westexponierten Rotenbachgebiet etwas höher sind (Tab. 5). Der Wert aus der langjährigen Wasserbilanz am Seebach liegt mit guter Übereinstimmung nur geringfügig unter den Werten von TURC.

(mm/a)		1985	1986	1987	1988
Turc	Seebach	559	544	563	595
	Kl. Kinzig	551	543	558	593
	Rotenbach	-	-	621	655
Uhlig	Seebach	516	643	585	593
	Kl. Kinzig	410	643	538	543
	Rotenbach	-	-	585	603
langj. Wasserbilanz (V=N-Q)	Seebach	1972-1988 534			
Interzeption (NF-NB)	Seebach	379	504	455	590
	Kl. Kinzig	347	546	526	548
	Rotenbach	-	-	400	387

Tab. 5: Reelle Verdunstung (mm/a) in den Untersuchungsgebieten

Bei dem Verfahren nach UHLIG wird der evtl. vorhandene Wasserüberschuß oder das Wasserdefizit je nach Niederschlagsangebot im Boden berücksichtigt. Ist die Niederschlagsmenge größer als die potentielle Verdunstung ($N > ET_{\text{pot}}$), so

wird angenommen, daß $ET_{pot} = ET_{reell}$ ist. Ist die potentielle Verdunstung größer als der Niederschlag ($ET_{pot} > N$), so ergibt sich ein Wasserdefizit. Nun erfolgt die Verdunstung aus dem Boden, der je nach nutzbarer Feldkapazität mehr oder weniger Wasser an die Verdunstung abgibt. In Folge der geringen Feldkapazität (75-100 mm) der sandigen Buntsandsteinböden sickert der größte Teil des infiltrierten Niederschlages schnell tiefer, oder fließt mit geringer zeitlicher Verzögerung dem Vorfluter zu. Somit steht während Trockenperioden nur wenig zurückgebliebenes Haftwasser im oberen Bodenbereich der Verdunstung zur Verfügung. Folgedessen geht die Verdunstung auf ein Minimum zurück und liegt während Trockenzeiten deutlich unter der potentiellen Verdunstung. Dies verdeutlicht ein Vergleich mit der potentiellen Verdunstung nach HAUDE von der UHLIG bei seinem Verfahren ausgeht. Vor allem im Trockenjahr 1985 liegt die reelle Verdunstung nach UHLIG um 215 mm/a am Seebach bzw. 321 mm/a an der Kleinen Kinzig weit unter dem Wert nach HAUDE (Tab. 4, 5). In den feuchten Jahren 1986-1988 dagegen liegt die reelle Verdunstung nur wenig unter der potentiellen Verdunstung. Im Jahr 1987 waren die monatlichen Niederschlagssummen am Seebach und am Rotenbach immer größer als die potentielle Verdunstung. Dementsprechend ist in diesem Jahr die reelle Verdunstung der potentiellen gleichzusetzen. Im östlich gelegenen Gebiet Kleine Kinzig ist die reelle Verdunstung im Vergleich zum Seebachgebiet aufgrund der etwas geringeren Niederschläge entsprechend geringer und erreicht nie ganz die Werte der potentiellen Verdunstung.

Im Gegensatz zum Verfahren nach TURC weichen die Werte nach UHLIG deutlich voneinander ab. Dabei zeigt sich wiederum ein Zusammenhang zwischen Verdunstung und Jahresklima. In Trockenjahren geht die Verdunstung erheblich zurück, was verständlich wird wenn man den großen Anteil der Interzeption an der Verdunstung in Fichtenbeständen beachtet. Je mehr Niederschlag in einem Jahr fällt, desto mehr Wasser wird im Laufe des Jahres von den Baumkronen zurückgehalten und geht durch Interzeption in die Verdunstung mit ein. In Trockenjahren wie 1985 ist die jährliche Interzeptionsmenge deutlich geringer als in Naßjahren (Tab. 5), wobei der Anteil an der Gesamtverdunstung unabhängig vom Jahresklima im Mittel ca. 65-70% erreicht. Der Großteil der restlichen 25-30% dürfte auf die Transpiration der Pflanzen zurückzuführen sein, während die schattigen Bodenregionen an den steilen Hängen nur wenig zur Verdunstung beitragen. Wie schon erwähnt, begünstigen die gut durchlässigen, sandigen Böden dieses Verhalten, da der größte Teil des Niederschlagswassers sofort versickert und der Verdunstung nicht mehr zur Verfügung steht.

3.4.3 Bodenwasserdefizit

Wie unter Kap. 3.4.2.2 beschrieben läßt sich nach dem Verfahren von UHLIG (in HÖLTING, 1984) zur Berechnung der reellen Verdunstung auch das potentielle Wasserdefizit im Boden abschätzen. Dazu werden die Werte der monatlichen Niederschlagssummen und der potentiellen Verdunstung nach Haude gegenübergestellt, wobei sich aus der Differenz Zuwachs oder Verminderung die Bodenfeuchte ergibt. Ist der Niederschlag höher als die Verdunstung, so dient der Überschuß zur Auffüllung der Bodenfeuchte bis zur Feldkapazität oder versickert als reeller Wasserüberschuß in den tieferen Untergrund. Übersteigt die potentielle Verdunstung den Niederschlag, so entsteht ein potentielles Wasserdefizit D .

In Abb. 13 ist die monatliche Bilanz ($N-ET_{pot}$) für den Seebach dargestellt. Zu einem nennenswerten Bodenwasserdefizit kam es lediglich im trockenen Herbst 1985. In den folgenden Jahren lag aufgrund der hohen, über das Jahr verteilten Niederschläge fast immer ein Wasserüberschuß vor. Besonders im Frühjahr 1988 kam es durch die Schneeschmelze zu einem sehr hohen Wasserüberschuß, der die Vorfluter über Wochen Hochwasser führen ließ (Abb. 23-27, Kap. 3.7). Dementsprechend kam es auch in den Gebieten Rotenbach und Kleine Kinzig im Verlaufe der Meßperiode 1987-1988 zu keinem größeren Wasserdefizit im Boden bzw. in den oberen Deckschichtenbereichen.

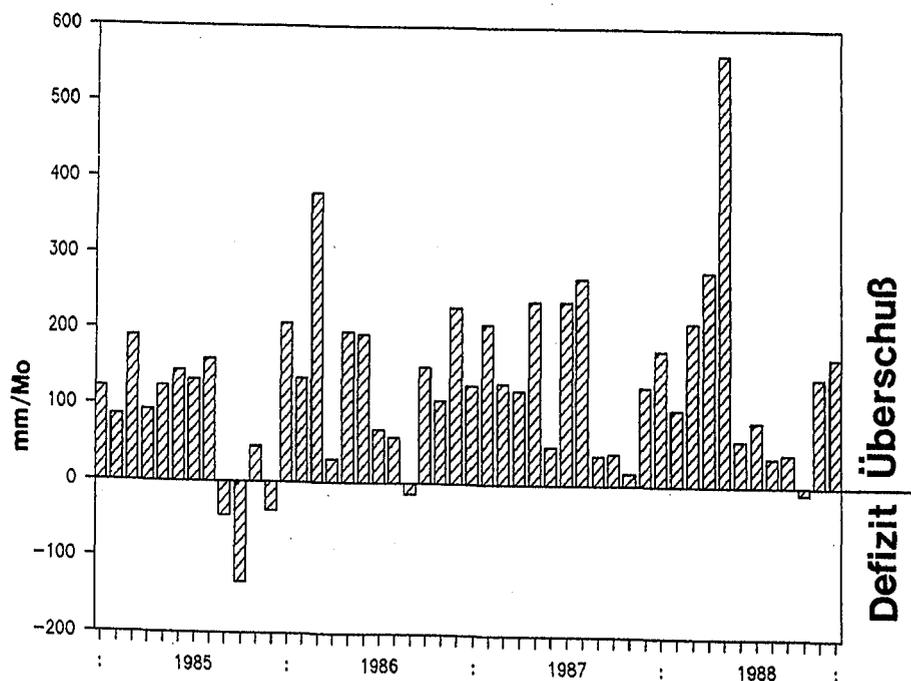


Abb. 13: Bodenwasserbilanz am Seebach 1985 bis 1988

3.4.4 Abflußhöhen

Unter der Voraussetzung, daß kein Grundwasser das Gebiet auf unkontrollierbarem, unterirdischem Weg verläßt, wird am Pegel eines Vorfluters der Gesamtabfluß des zugehörigen Einzugsgebietes gemessen. Über die Größe der oberirdischen Einzugsgebiete (F_o), die aufgrund des ausgeprägten Reliefs in den Gebieten mit guter Genauigkeit mit Hilfe topographischer Karten bestimmt werden konnten, wurde die gemessene Abflußmenge (m^3/a) in Abflußhöhen (mm/a) umgerechnet. Dies ermöglicht einen Vergleich der Gebiete untereinander.

Eine gute Übereinstimmung konnte an den Vorflutern Seebach, Kleine Kinzig und Huttenbächle festgestellt werden (Tab. 6). Über den gesamten Meßzeitraum gesehen weichen die Abflußhöhen dieser Gebiete nur geringfügig voneinander ab. Irreal hoch erscheinen die gemessenen Abflußhöhen am Rotenbach. Dies wird bestätigt, wenn man die Abflußhöhe aus der jährlichen Wasserbilanz nach der folgenden Beziehung berechnet:

$$Q = N - V$$

mit $V = V_{Uhlig}$ (Tab. 5) und ohne Berücksichtigung evtl Bodenwasservorratsänderungen

In den nassen, niederschlagsreichen Jahren 1987 und 1988 kann von nahezu gleichbleibenden, gesättigten Bodenwassergehalten ausgegangen werden, sodaß keine bedeutenden Bodenwasservorratsänderungen berücksichtigt werden müssen (Kap. 3.4.3).

(mm/a)	F_o	1985	1986	1987	1988
Seebach	4,50	953	1722	1694	1915
Rotenbach	0,50	-	-	3090	3291
Kl. Kinzig	6,50	1039	1599	1507	1650
Huttenbächle	3,90	906	1537	1613	1803
Weierbach	0,82	-	-	-	1129

Tab. 6: Abflußhöhen (mm/a) in den Untersuchungsgebieten

Es ergeben sich Abflußhöhen am Rotenbach, die gut mit den Werten aus den anderen Gebieten übereinstimmen (Tab. 7). Der Fehler kann nur in der Größe des Einzugsgebietes liegen. Das unterirdische Einzugsgebiet (F_u) muß weit größer

sein als das oberirdische Einzugsgebiet vermuten läßt (zur Berechnung der unterirdischen Einzugsgebiete siehe Kap. 3.8).

(mm/a)	1985	1986	1987	1988
Seebach	1108	1769	1641	1878
Rotenbach	-	-	1427	1648
Kl. Kinzig	946	1632	1312	1648

Tab. 7: Abflußhöhen (mm/a) aus der Wasserbilanz ($Q = N - V$)

Etwas zu niedrig erscheint die Abflußhöhe am Weiherbach. Hier handelt es sich um einen meßtechnischen Fehler, da sich das selbst installierte Wehr bei Spitzenabflüssen als zu klein erwies und überflutet wurde. Somit konnte nicht der gesamte Abfluß aus dem Gebiet Weiherbach erfaßt werden.

Im Vergleich der Meßjahre zeigt das Trockenjahr 1985 die geringsten Abflußhöhen. Dabei scheint sich der trockene Herbst noch auf das Abflußgeschehen des folgenden Jahres auszuwirken. In den Jahren 1986 und 1988 fielen nahezu die gleichen, weit über dem langjährigen Durchschnitt liegenden Niederschlagsmengen (Tab. 2). Dennoch lag die Abflußhöhe des Jahres 1986 deutlich unter dem klimatisch vergleichbaren Jahr 1988. Im trockenen Herbst 1985 wurde der Grundwasserabstrom vorwiegend durch Speichervorräte aus den Deckschichten und dem Festgesteinaquifer gespeist. Zu Beginn des folgenden Jahres wurde ein Teil der starken Niederschläge bzw. des daraus resultierenden starken Sickerwassernachschubes zum Auffüllen des entstandenen Wasserdefizites in den Deckschichten sowie des teilweise entleerten Festgesteinsaquifers verbraucht. Für den Anfang des Jahres 1988 kann dagegen aufgrund der vorangegangenen beiden Naßjahre davon ausgegangen werden, daß die Wasserspeicher gefüllt waren. Dementsprechend floß 1988 mehr Wasser über die verschiedenen Abflußhorizonte dem Vorfluter zu als 1986. Die Werte aus der jährlichen Wasserbilanz bestätigen diese Überlegungen. Während die Werte für 1988 aus den Tab. 6 und 7 am Seebach und im Bereich der Kleinen Kinzig gut übereinstimmen, müßte 1986 laut Wasserbilanz mehr Wasser über die Vorfluter abgeflossen sein als tatsächlich gemessen wurde.

Die Abflußganglinien der Vorfluter und Quellen sind in den Abb. 24 bis 28 (Kap. 3.7) dargestellt.

3.5 Abflußverhalten der Vorfluter und Quellen

Neben der permanenten Abflußmessung an den Vorflutern sollten auch die Schüttungsmengen bzw. -schwankungen von Quellen verschiedener Horizonte möglichst genau erfaßt werden. Dazu wurden an den wichtigsten Quellen der jeweiligen Einzugsgebiete Pegelschreiber und Meßwehre installiert, die den Schüttungsgang lückenlos aufzeichneten. So konnte beobachtet werden, ob und wie die Quellen auf Niederschlagsereignisse reagieren, und welches Leerlaufverhalten sie aufweisen.

3.5.1 Abflußmengen und -spenden

Liegen mehrjährige Meßreihen von Abflüssen vor, so können diese abflußstatistisch ausgewertet werden. Die statistisch relevanten Werte werden durch die gewässerkundlichen Hauptzahlen erfaßt (siehe z.B. HÖLTING, 1984).

Neben der mittleren Schüttungsmenge (MQ) sind die niedrigsten (NQ) und die höchsten (HQ) gemessenen Tageswerte der angegebenen Zeiträume in Tab. 8 aufgelistet. Über das oberirdische Einzugsgebiet der jeweiligen Vorfluter (Tab. 6) wurden die Abflußspenden ($l/s \cdot km^2$) berechnet. Die Einzugsgebiete der Quellen können nur mit Kenntnis der Grundwasserneubildung und somit erst nach der Abflußseparation ermittelt werden.

3.5.1.1 Seebach

Langjährige Abflußaufzeichnungen bestehen nur am Vorfluter-Pegel des Seebaches (Sb13). Für Sb13 werden die Abflußmengen und -spenden verschiedener Zeiträume dargestellt, um das langjährige Abflußverhalten mit den innerhalb des Meßzeitraumes (1985-1988) gültigen Werten zu vergleichen und um eine Gegenüberstellung mit anderen Meßstellen zu ermöglichen, an denen z.T. nur über kürzere Zeiträume Messungen durchgeführt werden konnten. Die Werte von 1985-1988 passen gut in die langjährige Meßreihe. Der niedrigste Abflußwert wurde im Laufe der letzten 17 Jahre mehrmals erreicht. Dabei fällt der NQ-Wert stets in ein Sommerhalbjahr trockener Jahre. Im Meßzeitraum wurde dieser Niedrigstwasserabfluß nur im Herbst des Trockenjahres 1985 erreicht. Der höchste Abflußwert (HQ) wurde am 23.10.1986 ebenfalls im Meßzeitraum gemessen und ist mit 16900 l/s der höchste gemessene Wert seit des ca. 60-jährigen Bestehens des Seebachpegels (freundliche Mitteilung von Seiten der Badenwerk AG,

Forbach). Dementsprechend ist der Schüttungsquotient NQ/HQ sehr gering. Die mittlere Abflußmenge liegt aufgrund des ausgeprägten Trockenjahres 1985 etwas unter dem Wert aus der langjährigen Meßreihe. Dennoch liegen die Werte aus dem Meßzeitraum im langjährigen Trend und können somit für dieses Gebiet als repräsentativ angesehen werden. Da die klimatischen Bedingungen in den drei Gebieten weitgehend gleich sind, gilt dies auch für die Gebiete Rotenbach und Kleine Kinzig, wo keine langjährigen Meßreihen vorliegen.

Das Abflußverhalten ausgesprochener Naßjahre dokumentieren die Abflußmengen der Jahre 1986-1988. Während dieser Jahre wird der langjährige NQ-Wert nicht erreicht. Infolgedessen ist der Schüttungsquotient für diesen Zeitraum etwas höher. Die mittlere Schüttungsmenge liegt deutlich über dem Wert der Jahre 1985-1988, aber nur geringfügig über dem langjährigen Mittel.

	NQ	MQ (1/s)	HQ	Nq	Mq (1/s · km ²)	Hq	NQ/HQ	Meßjahre
Seebach								
Sb13	35	237	16900	7,8	52,7	3756	1/483	72-88
Sb13	35	213	16900	7,8	47,3	3756	1/483	85-88
Sb13	45	242	16900	10,0	53,8	3756	1/376	86-88
Sb13	62	242	3920	13,8	53,8	871	1/63	87-88
Sb6	4	83	2300	1,4	29,6	821	1/575	87-88
Sb1	0,03	0,2	1,0	-	-	-	1/32	85-88
Sb8	16,7	30,0	47,1	-	-	-	1/2,8	85-88
Rotenbach								
Rp	18,2	46,9	300	36,0	94,0	600	1/17	86-88
R1	5,0	10,5	44,6	-	-	-	1/8,9	86-88
R2	9,7	13,1	25,4	-	-	-	1/2,6	86-88
Kl. Kinzig								
Kp	60	326	15600	9,2	50,2	2400	1/260	86-88
Kq1	2,2	22,8	91,6	-	-	-	1/42	87-88
Kq5	24,4	54,6	130	-	-	-	1/5,3	87-88
Hp	30	204	9500	7,7	52,3	2436	1/317	86-88
Wp	4	28	2000	4,9	34,1	2439	1/500	87-88
Wq2	0,15	1,1	5,2	-	-	-	1/35	87-88
Wq4	0,5	5,4	(50)	-	-	-	(1/100)	87-88

Tab. 8: Abflußmengen und -spenden in den Untersuchungsgebieten

Interessanter ist ein Vergleich des Vorfluters bzw. des Gesamtabflusses mit den zugehörigen Quellen oder der bachaufwärtsgelegenen Vorfluter-Meßstelle Sb6 (Abb. 7a). Letztere liegt oberhalb der Grenze Buntsandstein/Grundgebirge. Hier wird der Vorfluter nur von oberflächennahem Abfluß und Deckschichtenabfluß gespeist, während Grundwasserabfluß erst unterhalb der

Meßstelle hinzukommt. Da von dieser Meßstelle nur Werte der letzten zwei Jahre vorliegen, werden zum Vergleich mit Sb13 die Werte des entsprechenden Zeitraumes herangezogen (zum Vergleich dient die Abflußspende in $l/s \cdot km^2$).

Im Gegensatz zu Sb13, wo immer ein gewisser Basisabfluß vorhanden ist, fällt Sb6 in längeren Trockenperioden nahezu trocken. Sogar in den Naßjahren 1987 und 1988, während denen es auch in den Sommerhalbjahren keine längeren Trockenperioden gab, geht die Abflußspende bis auf den geringen Wert von $1,4 l/s \cdot km^2$ zurück. Bei Hochwasser werden bei Sb6 fast so hohe Abflußspenden erreicht wie bei Sb13, da der größte Teil des Gesamtabflusses bei Hochwasser aus oberflächennahem Abfluß und Deckschichtenabfluß besteht. Daher kommt es im Vorfluter oberhalb der Basisquellen zu ungleich stärkeren Abflußschwankungen, die sich in dem viel kleineren Schüttungsquotienten äußern (Tab. 8). Die mittlere Abflußspende erreicht mit $29,6 l/s \cdot km^2$ ca. 55% der mittleren Abflußspende bei Sb13 bzw. des Gesamtabflusses. Somit kann schon mit Hilfe der Abflußspenden abschätzungsweise ein Grundwasseranteil von ca. 45% am Gesamtabfluß in den Jahren 1987 und 1988 angegeben werden.

Das Schüttungsverhalten der Quellen läßt Rückschlüsse auf die Eigenschaften des dazugehörenden Aquifers zu. Starke Schüttungsschwankungen, bzw. ein kleiner Schüttungsquotient, sind typisch für flache Quellen, die schnell auf ein Niederschlagsereignis reagieren. Sie entwässern einen Aquifer mit geringem Retentionsvermögen und entsprechend hoher Wasserwegsamkeit. Zu diesen Quelltypen gehören die Hangschuttquellen wie z.B. die Quelle Sb1 am Ursprung des Seebaches. Sie versiegt in Trockenzeiten fast vollständig, erreicht aber auch nach stärkeren Niederschlägen oder während der Schneeschmelze nie Werte über $1 l/s$. Allerdings konnte hier aufgrund der geringen Schüttungsmengen kein Pegelschreiber installiert werden, sodaß nur stichprobenartige Abflußmessungen in zumeist 2-wöchentlichen Abständen möglich waren. Messungen an weiteren Hangschuttquellen in den Jahren 1985 und 1986 zeigen jedoch, daß die an Sb1 gemessenen Abflußwerte als charakteristisch für diesen Quelltyp im Seebachgebiet anzusehen sind (SEEGER, 1986). Es fällt auf, daß die Hangschuttquellen im Seebachgebiet nur in den Karen anzutreffen sind. Hier liegen die Quellaustritte über den morastigen Böden, die den Untergrund abdichten. Der größte Teil des Deckschichtenabflusses gelangt auf diffusem Weg in den Deckschichten der Hanglagen direkt in den Vorfluter.

Ausschließlich von Grundwasser wird die Basisquelle Sb8 gespeist. Die Schüttungsschwankungen sind im Vergleich zum Vorfluter bei ca. 170-fach höherem Schüttungsquotient und auch zu der Hangschuttquelle Sb1 stark gedämpft. Die Trinkwasserversorgungsquelle zeigt auch nach stärksten Niederschlägen nur einen verhältnismäßig geringen Anstieg. Mit einer mittleren

Schüttung von 30 l/s ist sie die weitaus ergiebigste Quelle im Seebachgebiet. Selbst in langen Trockenperioden bringt die Quelle noch große Wassermengen und ist so ein zuverlässiger Wasserlieferant für die Gemeinde Forbach.

3.5.1.2 Rotenbach

Im Vorfluter des Rotenbachgebietes (Rp) sind die Schüttungsschwankungen weit geringer als im Seebachgebiet. Allerdings konnte hier das Meßwehr das Jahrhunderthochwasser vom Oktober 1986 nicht vollständig fassen, sodaß der über die Wasserbilanz abgeschätzte Maximalwert eventuell zu niedrig ist. Zudem ist die mittlere Abflußspende nahezu doppelt so hoch wie in den anderen Gebieten. Aus den mittleren Niederschlagshöhen von 2132 mm/a in den Jahren 1987 und 1988 errechnet sich ein Eintrag von $67,6 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$, wovon nach Abzug der Verdunstung noch ca. $47 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ für den Abfluß übrigbleiben. Dies zeigt, daß sowohl die mittlere Abflußspende ($94 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$), als auch die minimale Abflußspende ($36 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$) für das kleine oberirdische Einzugsgebiet viel zu hoch sind.

Beim Vergleich des Vorfluters mit den beiden Rotenbachquellen fällt der mit ca. 50% sehr hohe Anteil der Quellen am Gesamtabfluß auf. Bei Niedrigwasser stammen über 80% des Gesamtabflusses im Vorfluter aus den beiden Quellen. Ihr unterirdisches Einzugsgebiet, das sicher deutlich größer ist als das durch die Topographie festgelegte oberirdische Einzugsgebiet des Rotenbaches, nach Kenntnis der Grundwasserneubildung zu berechnen, erscheint besonders interessant. Vor allem da diese Quellen von der Stadt Oppenau als Trinkwasserlieferanten genutzt werden und das bestehende Schutzgebiet vom oberirdischen Einzugsgebiet ausgeht.

Die Quelle R2 zeigt mit einem sehr hohen Schüttungsquotienten dasselbe relativ konstante Abflußverhalten wie die Quelle Sb8 am Seebach. Beide gehören zum gleichen Quelltyp und entwässern, am Übergang vom Buntsandstein zum Grundgebirge austretend, als Basisquellen den Festgesteinsaquifer.

Einen geringeren Schüttungsquotienten besitzt die Quelle R1, die trotz geringerer Grundschüttung höhere Maximalwerte erreicht als R2. Schwache Gelbfärbungen bei Hochwasser deuten auf den Zufluß intermittierender Wässer hin, während die Quelle bei geringer Schüttung ebenfalls ausschließlich von Grundwasser aus dem Buntsandsteinaquifer gespeist wird.

3.5.1.3 Kleine Kinzig

Die Kleine Kinzig und das Huttenbächle bringen mit 50,2 bzw. 52,3 l/s · km² etwa die gleichen mittleren Abflußspenden wie der Seebach. Unterschiede im Abflußverhalten zeigen sich nur bei Hochwasser. Trotz hoher HQ-Werte erreichen die beiden Vorfluter im Gebiet der Kleinen Kinzig nicht die enorm hohen Abflußspitzen des Seebaches, woraus die etwas geringeren Schüttungsschwankungen resultieren. Dies dürfte zum einen auf die etwas geringeren Niederschläge und zum anderen auf den weit größeren Hochflächenanteil (Kap. 2.1) im Gebiet Kleine Kinzig zurückzuführen sein. Auf den schwach geneigten Hochflächen ist der oberflächennahe Abfluß gegenüber den Hanglagen stark reduziert und fließt zudem langsamer ab. Außerdem sind die Hänge des Seebachgebietes vor allem im Oberlauf steiler als im Gebiet Kleine Kinzig. Der Zusammenhang zwischen der Flächenaufteilung Hochflächen-Hanglagen und dem HQ-Wert bzw. Hangneigung und HQ-Wert wird am Beispiel des Weiherbachs bestätigt. In dem überwiegend von steilen Karhängen eingenommenen Gebiet werden trotz geringerer mittlerer und minimaler Abflußspende ähnlich hohe Hochwasserspenden erreicht wie an der Kleinen Kinzig und am Huttenbächle. Dabei verzeichnet der Weiherbach die größten Abflußschwankungen der betrachteten Vorfluter.

Die Quelle Kq5 (Jägerbrunnen) im Einzugsgebiet der Kleinen Kinzig ist mit einer mittleren Abflußmenge von 54,6 l/s die ergiebigste Quelle in den drei Gebieten. Im Gegensatz zu Sb8, R2 und R1 ist sie keine Buntsandstein-Basisquelle, sondern gehört zu dem weit verbreiteten Quellhorizont an der Grenze vom Bausandstein zum tonreicheren und kluftärmeren Eck'schen Konglomerat. Die Schüttungsschwankungen sind mit Ausnahme der von oberflächennahem Wasser beeinflussten Quelle R1 etwas höher als bei den Basisquellen. Dennoch deutet der immer noch sehr geringe Schüttungsquotient von 1/5,3 auf ein hohes Retentionsvermögen des zugehörigen Aquifers hin.

Aus demselben Quellhorizont entspringt die Quelle Wq2 am Weiherbach. Ihre niedrigen Abflußmengen und der deutlich geringere Schüttungsquotient, der dem NQ/HQ-Verhältnis von Sb1 gleicht, weist allerdings auf einen starken Einfluß von hangparallelem Abfluß aus den Deckschichten hin.

Quellen flacheren Charakters sind Kq1 (Knöpflesbrunnen) an der Kleinen Kinzig und die Quelle des Weiherbaches (Wq4). Dabei erweist sich Kq1 mit einem MQ-Wert von 22,8 l/s ebenfalls als ergiebige Quelle. Sie zeigt allerdings schon während kurzer Trockenperioden einen starken Schüttungsrückgang. Bei einem NQ-Wert von nur 2,2 l/s in den letzten beiden Naßjahren (für das Trockenjahr

1985 gibt PREUB (1986) einen NQ-Wert von 1,0 l/s an) und einer maximalen Schüttung von 91,6 l/s, sind ihre Schüttungsschwankungen weit höher als bei Kq5.

Die Quelle liegt nur ca. 30 Höhenmeter unterhalb der Hochfläche und entwässert den oberflächennahen, aufgelockerten Bereich des Bausandsteines sowie die darüberlagernden Deckschichten.

In ähnlicher Lage, aber noch höher unmittelbar am Rand zur Hochfläche liegt die Quelle Wq4, die an der Oberkante des Weiherbach-Kares entspringt. An dieser Quelle konnte der Pegelschreiber nicht direkt am Quellaustritt angebracht werden. Der Quellausfluß mündet unmittelbar nach dem Austreten in eine Abflußrinne, die nur während starken Niederschlagsereignissen Wasser führt. So wurde an dem Meßwehr bei Hochwasserereignissen oberflächennaher Abfluß mitgemessen, der nicht aus der Quelle stammt. Infolgedessen ist der ermittelte Schüttungsquotient für die Quelle zu niedrig. Vergleicht man das Verhältnis von NQ zum mittleren Abfluß MQ der Quelle mit dem von Kq1 (bei beiden ist $NQ/MQ \text{ ca. } = 1/10$), dann wird deutlich, daß Wq4 zum selben Quelltyp gehört. Diese Quellen weisen durch ihren ungleichmäßigeren Schüttungsverlauf auf ein größeres, rasch entleerbares Kluftvolumen und ein daraus resultierendes geringeres Retentionsvermögen der oberflächennahen, aufgelockerten Bereiche gegenüber den tieferen Bereichen des Festgesteinsaquiferes hin.

3.5.2 Niederschlag-Abfluß Beziehungen

Die Auswirkungen der Niederschlagsverteilung bzw. -höhen auf das Abflußverhalten der Vorfluter und Quellen wird an zwei aus den Abflußganglinien ausgewählten Abschnitten mit gegensätzlichen Ausgangsbedingungen diskutiert. Da an einigen Meßstellen lückenlose Schüttungsaufzeichnungen nur aus dem hydrologischen Jahr 1988 vorliegen, wurden aus diesem Jahr zwei beispielhafte Niederschlag-Abfluß Situationen entnommen.

Der erste Zeitabschnitt 13. März bis 14. April beschreibt das Abflußverhalten zu Beginn des Frühjahres während und unmittelbar nach der Schneeschmelze. Nach starken Schneefällen im Februar und Anfang März, die in Höhenlagen Schneehöhen von 1-1,5 m zur Folge hatten, setzte nach einer ca. 3-wöchigen, schwachen Frostperiode mit steigenden Temperaturen (Abb. 14) die Schneeschmelze am 10. März ein. In tieferen und sonnenexponierten Lagen war der Großteil der Schneemassen schon Mitte März abgetaut. In sonnenabgewandten Hochlagen hielten sich Schneereste bis in den April. Zu den großen Schmelzwassermengen kamen von Mitte bis Ende März starke Niederschläge. Insgesamt fielen in dem betrachteten Abschnitt vom 13. März bis 14. April

271 (Rotenbach) bis 404 mm (Seebach) Niederschlag. Die Verdunstung war zu dieser Jahreszeit sehr gering (Abb. 12), sodaß der größte Teil zum Abfluß gelangte. Die Böden und die Deckschichten waren nach der Schneeschmelze vollständig wassergesättigt. Der Wassergehalt lag weit über dem Wassergehalt der Feldkapazität und auch die Makroporenräume waren wassererfüllt. Die Wasseraufnahmefähigkeit der Böden war dementsprechend gering und ein Großteil der Niederschläge gelangte schnell zum Abfluß.

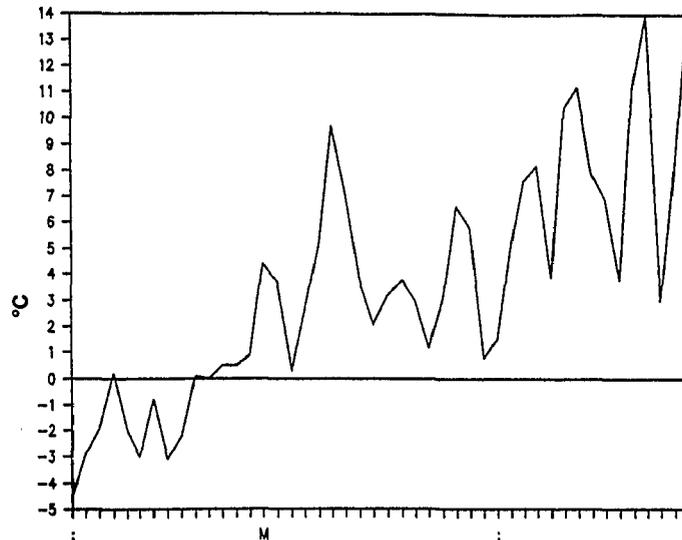


Abb. 14: Mittlere Tagestemperaturen Station Freudenstadt vom 1. März bis 15. April 1988

Gegensätzliche Ausgangsbedingungen lagen bei dem zu vergleichenden Beispiel im Herbst vor. Auch in dem relativ feuchten Sommer überschritt die stark ansteigende potentielle Verdunstung das Niederschlagsdargebot. Daraus ergab sich ein geringes potentielles Wasserdefizit (Abb. 13), das durch Verdunstung aus dem Boden, vor allem über die Transpiration der Pflanzen, ausgeglichen wurde. Der Ausgangswassergehalt der Böden war weit geringer als im Frühjahr. Er lag etwa im Bereich der Feldkapazität bzw. aufgrund des geringen Niederschlagsdefizites gegenüber der Verdunstung etwas darunter. Die Makroporenräume waren nicht wassererfüllt und die Aufnahmekapazität der Böden war dementsprechend höher als nach der frühjährlichen Schneeschmelze.

In beiden Beispielen fielen zu Beginn große Niederschlagsmengen mit vergleichbarer Intensität, die gegen Ende stark abnahmen. Allerdings muß, wie schon oben erwähnt, der erhöhten Verdunstung im Herbst bei dem Vergleich Rechnung getragen werden.

Anstelle von Tagesmittelwerten wurden in den Abb. 15 bis 17 zur besseren Auflösung der Abflußschwankungen die mittleren Abflußmengen von jeweils 6 Stunden dargestellt.

3.5.2.1 Seebach

Nach anhaltendem Schüttungsrückgang während der ca. 3-wöchigen Frostperiode von Mitte Februar bis zum 10. März reagierte der Seebach sehr schnell auf die einsetzende Schneeschmelze und die jetzt wieder als Regen fallenden Niederschläge. Schmelzwasser aus der anhaltenden Schneeschmelze infiltrierte in großen Mengen in die Böden und sorgte für einen permanenten Sickerwassernachschub in die Deckschichten. Die Aufnahmekapazität der Böden und Deckschichten wurde innerhalb weniger Tage überschritten. Ein Großteil des Schmelzwassers floß über das Makroporensystem in den Böden hangparallel ab und bewirkte eine erhöhte "Grundschüttung" im Vorfluter, die erst Ende April abklang (Abb. 25, Kap. 3.7)). Schon bei mittleren Niederschlagsmengen von 10 bis 15 mm/d wurden im Vorfluter hohe Abflußspitzen erreicht (Abb. 15, Ereignis 3). Zu Beginn von Ereignis 3 traten aufgrund sinkender Temperaturen wieder Schneefälle ein. Dies erklärt das schwache, zeitlich verzögerte Ansprechen des Vorfluters nach dem Wiederanstieg der Temperatur gegen Ende des Ereignisses. Durch den weiter anhaltenden Temperaturanstieg verstärkte sich die Schneeschmelze, sodaß schon im Vorfeld von Ereignis 4 die Schüttung zunahm. Schon geringe Niederschläge bewirkten jetzt einen starken Schüttungsanstieg (Ereignis 4 und 5). Zu diesem Zeitpunkt waren nur noch in schattigen Lagen größere Schneereste zu finden. Der Niederschlag gelangte ungehindert in die oberen Bodenschichten und verdrängte das in den Makroporen befindliche Vorereigniswasser.

Ähnliche Beobachtungen machten EINSELE et.al. (1986) im Schönbuch, wo bei mittelstarken Ereignissen etwa 60% des Gesamtabflusses aus verdrängtem Vorereigniswasser aus der Bodenzone stammen.

Somit werden die jährlichen Abflußmaxima in der Regel im Verlauf der winterlichen Schneeschmelze erreicht (siehe auch AGSTER, 1986). Lediglich sehr starke Gewitterniederschläge, die zumeist im Spätsommer oder Herbst vorkommen, können ähnliche Abflußspitzen erzeugen, oder in seltenen Fällen wie bei dem Jahrhunderthochwasser im Oktober 1986 noch übertreffen (Abb. 24).

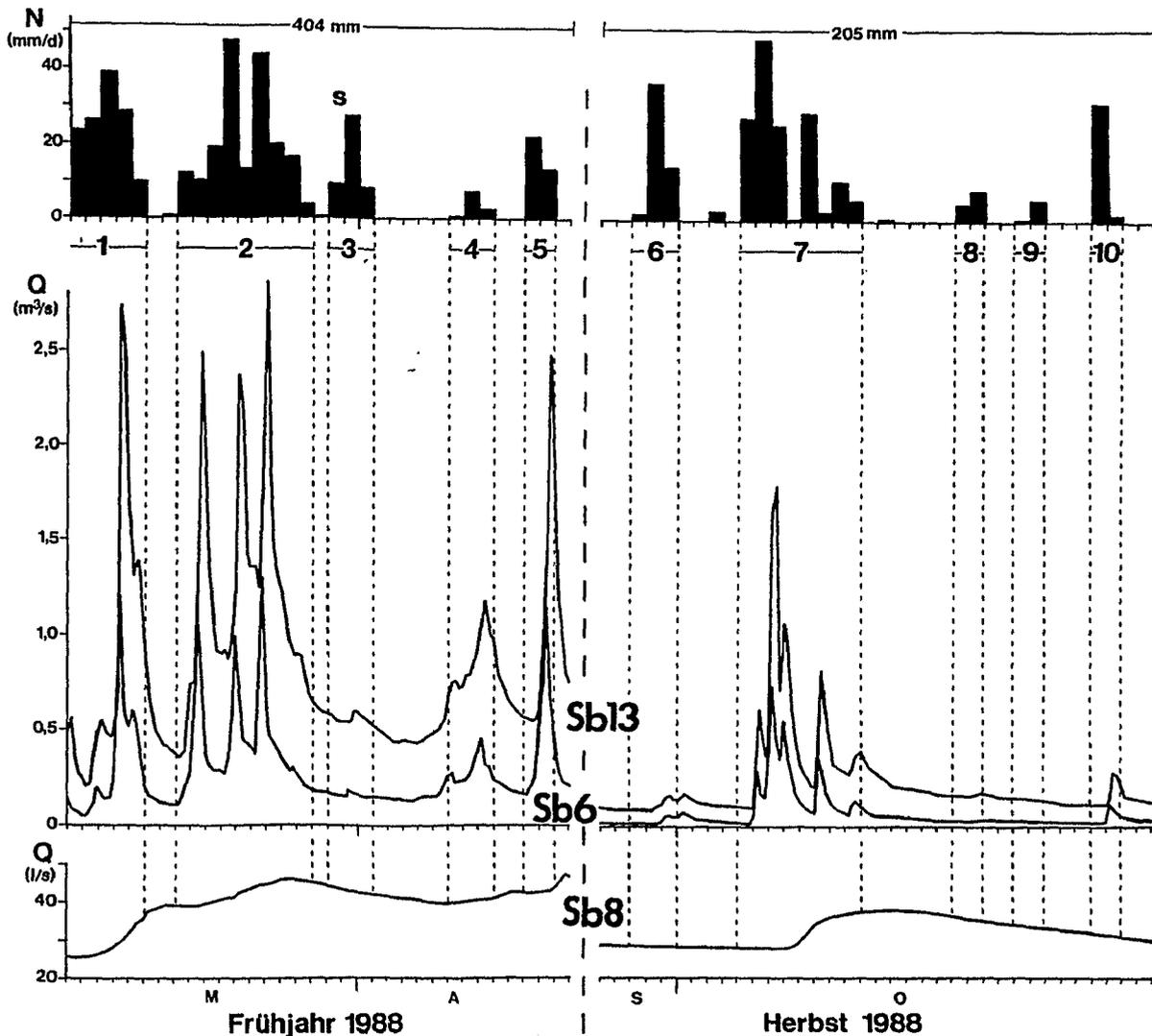


Abb. 15: Niederschlag-Abflußbeziehung am Seebach

- Sb13: Seebach-Pegel
- Sb6: Vorfluter-Pegel oberhalb Grenze
Buntsanstein/Granit
- Sb8: Fliegenlochquelle, Basisquelle

Im Herbst reagierte der Vorfluter auch auf mittelstarke Niederschläge nur schwach. Ein Großteil der Niederschläge wurde zum Auffüllen des im Sommer entstandenen Bodenwasserdefizites verbraucht. Obwohl im feuchten Sommer 1988 kein großes Wasserdefizit entstanden ist (Abb. 13), zeigte der Vorfluter auch nach recht hohen Niederschlägen, die in Ereignis 6 am 29. September immerhin 37 mm/d erreichten, nur einen geringen Anstieg. Erst nach weiteren starken Niederschlägen kam es zu ähnlich hohen Abflußspitzen wie im Frühjahr. Dabei reagierte der Vorfluter mit größerer zeitlicher Verzögerung erst nach zumindest teilweise Auffüllen des Makroporenraumes der Böden und Deckschichten (Ereignis 7).

Darauf weist auch EBHARDT (1983) hin, der den aktuellen Bodenwasservorrat als wichtigen Parameter für die Form der Abflußganglinie beschreibt. Beim Vergleich von simulierten mit gemessenen Ganglinien interpretierte EBHARDT das Auftreten von Hochwasserspitzen, die im Modell höher waren als in der Natur, so, daß in der Natur zuerst eine gewisse Auffüllung des Bodenvorrates erfolgt, ehe es zu oberflächennahem Abfluß kommt. Umgekehrt übersteigen im Frühjahr die gemessenen Abflußspitzen die des Modells, da weder die Schneeschmelze noch die durch die Übersättigung und nicht zuletzt auch durch Frost herabgesetzte Infiltrationsrate im Modell berücksichtigt werden.

Diese Beziehungen werden bestätigt bei einem Vergleich von Ereignis 10, Ende Oktober nach einer weitgehend trockenen Periode, mit den Ereignissen 4 und 5. Trotz größerer Niederschlagsmengen zeigte der Vorfluter im Gegensatz zum Frühjahr bei Ereignis 10 nur eine geringe Schüttungsänderung. Dabei seien allerdings nochmals die weit größeren Verdunstungsraten im Sommerhalbjahr erwähnt, die nicht vernachlässigt werden dürfen.

Dasselbe Abflußverhalten zeigte der Vorfluter an der Meßstelle Sb6 oberhalb der Basisquellen, wobei eine geringe zeitliche Verschiebung festzustellen war. Der Anstieg in Sb6 begann mit konstanter Gleichmäßigkeit über den gesamten Meßzeitraum 2 bis 4 Stunden früher als am Pegel Sb13. Demzufolge wurden auch die zumeist kurzanhaltenden Abflußspitzen im Unterlauf gegenüber Sb6 erst zeitlich verzögert erreicht. Da es im Sommer 1988 zu keinen längeren Trockenperioden kam, blieb in Sb6, wo der Abfluß fast ausschließlich aus den Deckschichten stammt, immer eine Restschüttung erhalten. Infolgedessen führte auch der Unterlauf des Seebaches immer einen Anteil an Deckschichtenwasser, im Gegensatz zu trockenen Jahren, in denen das Abflußverhalten zeitweise nur von den Basisquellen bestimmt wird.

Mit größerer Verzögerung reagierte auch die Basisquelle Sb8 auf die Niederschlagsereignisse und die Schneeschmelze im Frühjahr. Die Quelle sprach ca. 2 Tage nach dem Einsetzen der Schneeschmelze und der Regenfälle an (Ereignis 1 und 2). Ihr Schüttungsmaximum erreichte sie 1 bis 2 Tage nach Abklingen der stärksten Niederschläge. Der Buntsandsteinaquifer wurde durch den andauernden starken Sickerwassernachschub aus der Schneeschmelze allmählich aufgefüllt. Bei diesen Verhältnissen wirkten sich auch geringe Niederschläge über die wassererfüllten Deckschichten durch verdrängen von Vorereigniswasser bis in die Basisquellen aus (Ereignis 4 und 5).

Bei Niedrigwasserführung im Herbst zeigte die Quelle auch bei kurzzeitigen Starkregen keine Reaktion. Erst nach mehreren Tagen andauernden starken Niederschlägen sprach die Quelle durch Schüttungszunahme an (Ereignis 7). Die zeitliche Verzögerung bis zum Anstieg war mit 3 bis 4 Tagen nach Beginn der

Niederschläge doppelt so hoch wie im Frühjahr. Erst nachdem die Sickerwasserfront das gesamte Deckschichtenprofil überwunden hatte, bzw. ein eventuelles Wasserdefizit aufgefüllt worden war, konnte es zu einer verstärkten Infiltration in den Festgesteinsaquifer kommen.

Diese Beziehungen zeigen, daß auch das Abflußverhalten des Grundwassers in Abhängigkeit von den Ausgangsbedingungen variieren kann. Daher sind für eine zuverlässige Abflußseparation permanente Quellschüttungsmessungen und damit die lückenlose Erfassung des Grundwasserdargebotes unerlässlich. Die übliche Abtrennung durch Konstruktion der Grundwasserganglinie mit Hilfe der "Linie des langfristigen Grundwassers" (NATERMANN, 1951) kann dagegen bestenfalls Ergebnisse orientierenden Charakters liefern.

3.5.2.2 Rotenbach

Auf den ersten Blick schien der Rotenbach (Abb.16) gegenüber dem Seebach weit geringeren Schüttungsschwankungen zu unterliegen. Genauer betrachtet, unter Berücksichtigung der etwas vom Seebach abweichenden Ausgangsbedingungen, konnten doch ähnliche Beziehungen erkannt werden:

- Vom 13. März bis 14. April fielen mit 271 mm am Rotenbach über 30% weniger Niederschlag als am Seebach (40 mm). Im Herbst vom 26. September bis 31. Oktober fielen dagegen mit 187 mm nur um ca. 10% geringere Niederschläge.
- Der Grundwasseranteil am Gesamtabfluß war infolge des gegenüber dem oberirdischen Einzugsgebiet größeren unterirdischen Einzugsgebietes höher als am Seebach. Durch die entsprechend höhere Grundschüttung wirkten die Abflußspitzen niedriger und die Ganglinie nimmt einen gleichmäßigeren Verlauf.

Infolge seines von steilen Hängen geprägten Einzugsgebietes reagierte auch der Rotenbach durch raschen Schüttungsanstieg auf die beginnende Schneeschmelze und die einsetzenden Regenfälle (Ereignis 1 und 2). Auch in den folgenden niederschlagsärmeren Wochen verhielt sich der Rotenbach ähnlich wie der Seebach und zeigte schon bei geringen Niederschlägen deutliche Abflußspitzen (Ereignis 3 bis 5).

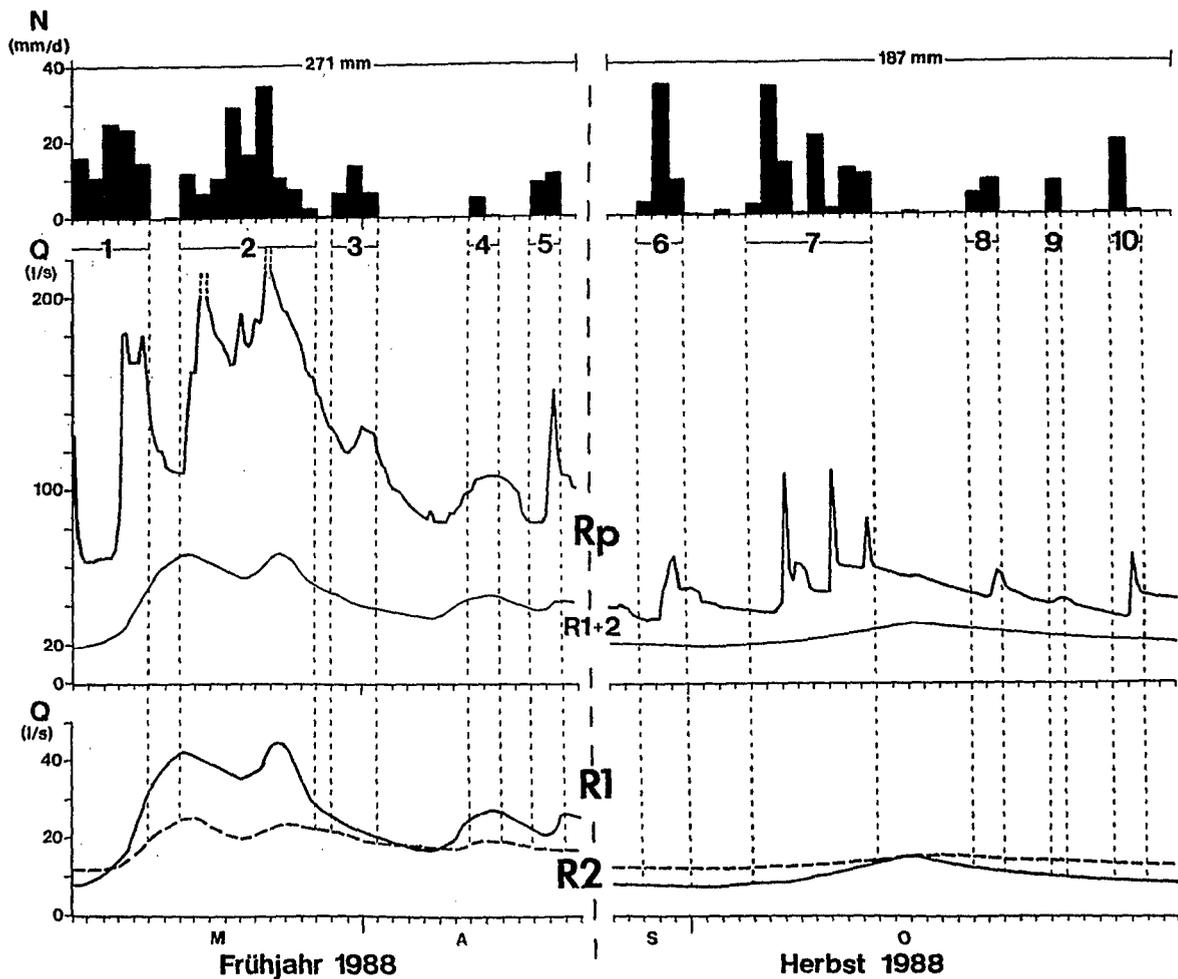


Abb. 16: Niederschlag-Abfluß-Beziehungen am Rotenbach

Rp: Rotenbach-Pegel

R1, R2: Rotenbachquellen

Dagegen wich im Herbst das Abflußverhalten des Rotenbach von dem des Seebach stärker ab. Bei vergleichbaren Niederschlagsmengen verzeichnete der Rotenbach ausgeprägtere Abflußspitzen. Selbst nach den niederschlagsarmen Wochen vor dem betrachteten Zeitabschnitt reagierte der Rotenbach ohne Verzögerung auf einsetzende Niederschläge (Ereignis 6). Auch geringe Niederschlagsmengen hatten merkbare Schüttungsanstiege zur Folge, die aber auch am Rotenbach nicht die Intensität wie im Frühjahr erreichten (Ereignis 8 bis 10). Über die gerade in diesem Gebiet weitverbreiteten Ortsteinlagen (KLAIBER, 1987) kam es in den steilen Hängen über das Makroporensystem schnell zur Bildung von hangparallelem, oberflächennahem Abfluß. Am Hangfuß, unterhalb des zentral gelegenen Blockstromes und den Blockschuttdecken (Abb. 3b, Kap. 2.3) trat ein Teil des rasch abfließenden Hangwassers an die Oberfläche. Gerade in diesem Bereich durchschneiden mehrere über den Hang verlaufende Wege mit künstlich angelegten Abflußrinnen das Gelände. Sie nehmen das Hangwasser,

bevor es in den angrenzenden Flachsuttddecken wieder versickern kann, auf und führen es unmittelbar dem Vorfluter zu.

Die Basisquellen R1 und R2 reagierten sehr unterschiedlich auf die einsetzende Schneeschmelze und Niederschläge im Frühjahr. Während R1 ohne große Verzögerung mit steilem Schüttungsanstieg ansprach, nahm die Schüttung in R2 nur langsam und verzögert zu (Ereignis 1).

Ihr Schüttungsmaximum erreichten die Quellen 2 bis 3 Tage nach dem Niederschlagsereignis, wobei R2 ca. 1 Tag gegenüber R1 zurückblieb. Im Verlauf des folgenden Ereignisses (2) sprachen die Quellen erst nach zunehmender Niederschlagsintensität an. Geringe Niederschlagsmengen wirkten sich nur auf die Quelle R1 aus, die auch deutlich auf die wiedereinsetzende Schneeschmelze im Vorfeld von Ereignis 4 reagierte.

Bei geringeren Bodenwassergehalten im Herbst war die vertikale Sickerwasserbewegung weitgehend unterbrochen (Abb. 9, Kap. 3.3). Zudem wurde ein Großteil der Niederschläge über den Ortsteinlagen, wie beschrieben, oberflächennah abgeführt. Dementsprechend reagieren auch am Rotenbach die Quellen im Herbst nur auf starke und andauernde Niederschläge (Ereignis 7). Dabei kam es nur zu Schüttungsanstiegen geringer Amplitude die wie bei Sb8 mit größerer zeitlicher Verzögerung als im Frühjahr einsetzten.

3.5.2.3 Kleine Kinzig

Aus dem Gebiet der Kleinen Kinzig wird in diesem Kapitel nur der Vorfluter Kleine Kinzig und die zugehörigen Quellen betrachtet, da das Huttenbächle eine zur Kleine Kinzig nahezu parallel verlaufende Abflußganglinie aufwies (Abb. 27, 28). Dagegen zeigte das Weiherbachgebiet mit seinen steilen Karhängen ähnliche Niederschlag-Abfluß Beziehungen wie der Seebach und Rotenbach und war somit für das zum großen Teil von Hochflächen eingenommene Gesamtgebiet nicht repräsentativ.

Obwohl die Niederschlagsmengen und -intensitäten jeweils zu Beginn der betrachteten Zeitabschnitte größer waren als am Seebach und am Rotenbach, zeigte die Kleine Kinzig eine weitaus ruhiger verlaufende Abflußganglinie (Abb. 17). Zu Beginn der Schneeschmelze und den Regenfällen stieg die Schüttung nur relativ gering an (Ereignis 1). Erst nach wiederholten, starken Niederschlägen und nachdem die Quellen, bzw. der tiefere Deckschichten- und Grundwasserabfluß maximale Schüttungsmengen erreicht hatten, kam es zu sehr großen Hochwasserspitzen (Ereignis 2). Auf die folgenden geringen Niederschläge

reagierte der Vorfluter nur schwach (Ereignis 3 bis 5). Der Anstieg während Ereignis 4 resultierte wiederum aus der zunehmenden Schneeschmelze.

Auch im Herbst sprach die Kleine Kinzig schwächer als der Seebach und Rotenbach auf Niederschläge an. Trotz z.T. sehr hohen Niederschlagsintensitäten von bis zu 70 mm/d (Ereignis 7) wurden nur verhältnismäßig geringe Amplituden mit zeitlicher Verzögerung erreicht. Danach hielt sich nach Abklingen des intermittierenden Abflußanteiles aufgrund der erhöhten Quellschüttungen über mehrere Tage ein erhöhtes Abflußniveau, das nur langsam mit zurückgehender Quellschüttung abnahm.

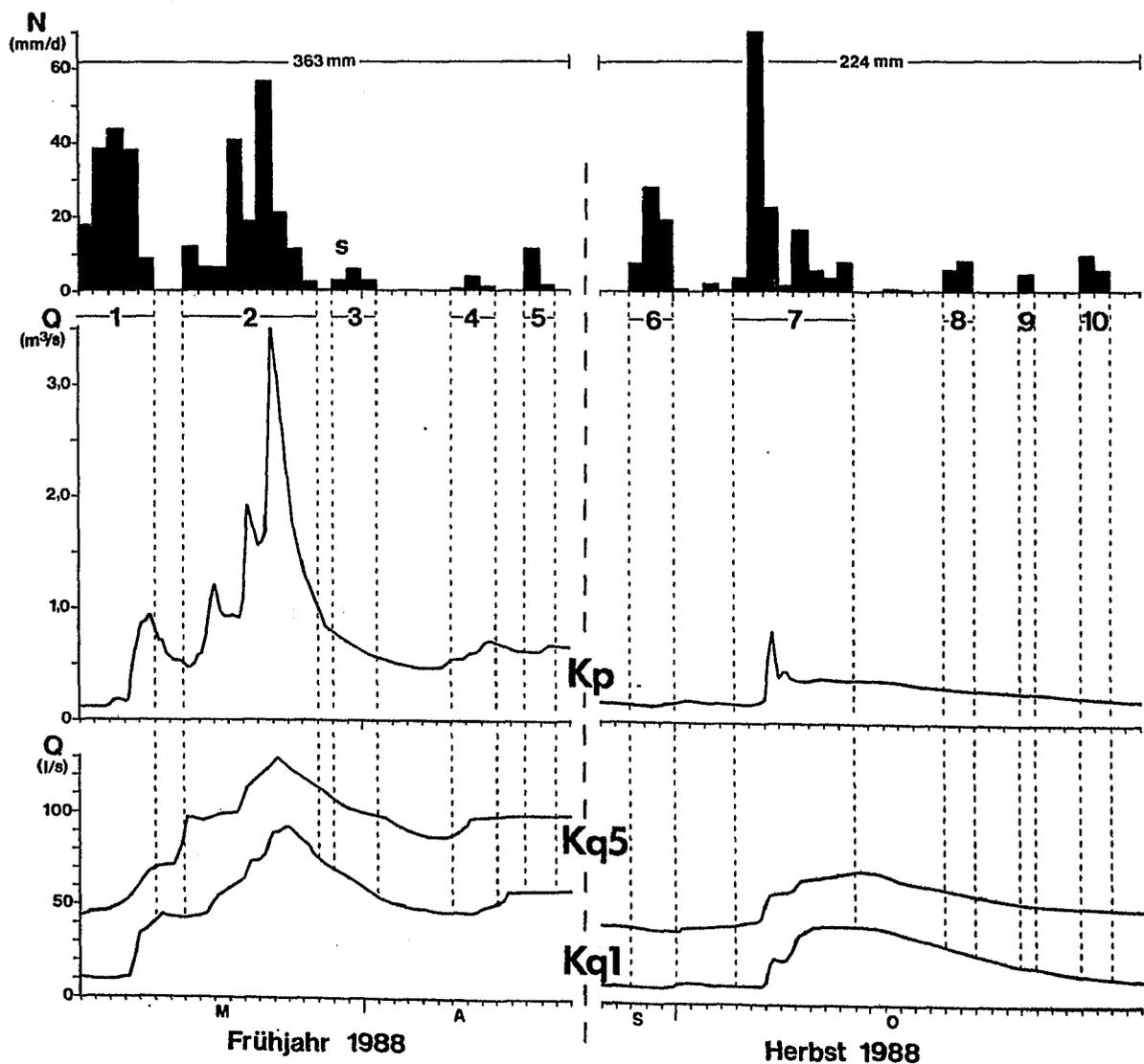


Abb. 17: Niederschlag-Abfluß-Beziehungen an der Kl. Kinzig

Kp: Kleine Kinzig-Pegel

Kq1: Knöpflesbrunnen

Kq5: Jägerbrunnen

Der gleichmäßigere Verlauf der Abflußganglinie gegenüber den anderen Vorflutern ist vor allem auf den großen Hochflächenanteil und die i.a. weniger steil abfallenden Hänge im Gebiet der Kleinen Kinzig zurückzuführen (siehe Kap. 3.5.1.3). Dabei wird der größte Teil der Hochflächen von den Deckschichten des Oberen Buntsandsteines eingenommen (Abb. 3c), in denen kein Ortsteinhorizont ausgebildet ist (SCHMIDT & RAU, 1930). Bei großem Sickerwassernachschub kann das infiltrierte Wasser die Deckschichten über das Makroporensystem schnell überwinden und in den Festgesteinsaquifer eindringen. Dafür spricht auch das schnelle Ansprechen der Quelle Kq1 und vor allem auch der tieferen Schichtquelle Kq5. Beide Quellen zeigen praktisch ohne zeitliche Verzögerung zum Vorfluter starke Schüttungszunahmen nach größeren Niederschlagsereignissen.

Während der Schneeschmelze erreichte die tiefere Quelle Kq5 z.T. sogar vor Kq1 ihr Schüttungsmaximum (besonders deutlich bei Ereignis 4). Dies dürfte in erster Linie auf die etwas früher einsetzende Schneeschmelze im Einzugsgebiet der um ca. 70 Höhenmeter tiefer gelegenen Schichtquelle Kq5 zurückzuführen sein. Dagegen unterliegt Kq1 im Herbst doch deutlich höheren Abflußschwankungen, die das geringere Retentionsvermögen des oberflächennahen Aquiferes andeuten (siehe Kap. 3.5.1.3).

3.6 Leerlaufverhalten

Aus den Rezessionsanteilen einer Abflußganglinie läßt sich eine Trockenwetterganglinie (TWL) konstruieren, die das Leerlaufverhalten des Speichers im Einzugsgebiet wiedergibt (Abb. 18); näheres siehe HÖLTING, 1984). Bei einem homogenen Aquifer nimmt die TWL einen exponentiellen Verlauf nach der Beziehung (MAILLET, 1905):

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

- mit: Q_t = Abfluß zum Zeitpunkt t
 Q_0 = Abfluß zum Zeitpunkt t_0
 α = Leerlaufkoeffizient (d^{-1})
 (empirische Konstante)
 t = Zeit in Tagen

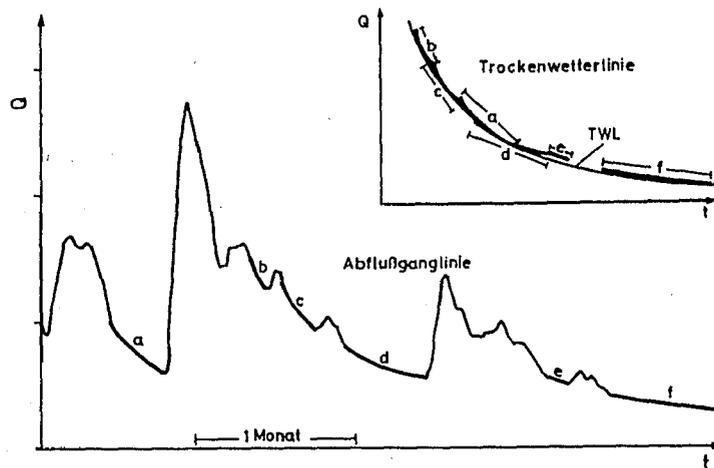


Abb. 18: Zusammensetzung der Trockenwetterlinie aus Rezessionsanteilen der Abflußganglinie (aus RICHTER & LILICH 1975)

Nach WEYER (1972) entsteht beim Entleeren eines Aquifers immer dann eine e-Funktion wenn die Grundwasserströmung durch einen Bewegungswiderstand proportional zur Geschwindigkeit behindert wird. Dabei beschreibt die Leerlaufkurve nur bei geologisch einheitlichen Verhältnissen eine einfache Exponentialfunktion (MATTHESS, 1983).

Der Leerlaufkoeffizient α gibt die Steigung der TWL an und ermöglicht Aussagen über das Retentionsvermögen des zugehörigen Aquiferes. Ein hoher α -Wert und somit steiler Abfall der TWL zeigt ein schnelles Entleeren des Aquiferes infolge eines geringen Retentionsvermögens an. Dagegen weisen niedrige α -Werte Aquifere mit großem Rückhaltevermögen aus.

Zur Ermittlung von α wird die TWL halblogarithmisch dargestellt (RICHTER & LILICH, 1975). Durch Logarithmierung obiger Gleichung läßt sich der Leerlaufkoeffizient nach folgender Beziehung bestimmen:

$$\alpha = \log Q_0 - \log Q_t / \log e \cdot t \text{ (d}^{-1}\text{)}$$

mit $\log e = 0,4343$

Im Idealfall bei homogenem Aufbau des Aquiferes ergibt die TWL in dieser Darstellungsform eine Gerade. Ist der Aquifer inhomogen zusammengesetzt, oder liegen verschiedene Speichersysteme in einem Einzugsgebiet vor, so führt dies zu einer Überlagerung der verschiedenen Abflußkomponenten und die TWL weicht von dem Idealbild einer Geraden ab (siehe auch AGSTER, 1983). Dominiert eine

Abflußkomponente, so stellt sich zumindest näherungsweise eine Gerade ein, deren α -Wert der jeweiligen Abflußkomponente zugeordnet werden kann.

Die meisten Untersuchungen haben das Ziel, über die TWL und die α -Werte den Grundwasserabfluß zu erfassen. Dementsprechend werden bei der Konstruktion der TWL bzw. der Ermittlung der Leerlaufkoeffizienten i.a. die ersten drei bis vier Tage nach dem Niederschlag außer Betracht gelassen und nur die flacheren Kurvenabschnitte berücksichtigt (MATTHESS, 1983). Es werden lediglich die Abflußkomponenten erfaßt, die während Trockenperioden zum Abfluß beitragen. Die eigenen Untersuchungen schließen dagegen auch die oberen, steilen Ganglinienabschnitte, die sich unmittelbar nach dem Niederschlag ergeben, mit ein. So werden auch die oberflächennahen, intermittierenden Abflußkomponenten berücksichtigt, die das Abflußgeschehen nach Niederschlagsereignissen mitbestimmen.

Für jede Meßstelle wurden anhand der Abflußganglinien aus dem jeweiligen Meßzeitraum mehrere TWL erstellt und die entsprechenden Leerlaufkoeffizienten berechnet. Zusammengefaßt ergeben die TWL eine Typkurve für die jeweiligen Vorfluter und Quellen, die das mittlere Leerlaufverhalten mit den verschiedenen α -Werten der einzelnen Meßstellen wiedergeben (Abb. 19 bis 21). In Tabelle 9 sind die mittleren α -Werte der verschiedenen Abflußkomponenten in den Vorflutern und Quellen aufgelistet.

	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4
Seebach					
Sb13	0,236	0,081	0,040	0,018	-
Sb6p	0,297	0,093	0,045	0,021	-
Sb8	-	-	-	0,016	0,005
Sb1			0,043		
Rotenbach					
Rp	0,213	0,084	0,048	0,020	-
R1	0,202	0,076	0,040	0,018	0,008
R2	-		0,044	0,017	0,005
Kleine Kinzig					
Kp	0,140	0,078	0,045	0,020	-
Kq1	-	0,087	0,049	0,020	-
Kq5	-	-	0,034	0,016	(0,006)
Hp	0,151	0,074	0,043	0,017	-
W1	0,194	0,087	0,044	0,015	-
Wq2			0,039		
Wq4	0,164	0,088	0,059	0,021	-

Tab. 9: Leerlaufkoeffizienten in den Untersuchungsgebieten

3.6.1 Seebach

Die TWL am Seebach wurde aus den Abflußganglinien der Jahre 1985 bis 1988 des Vorfluterpegels Sb13 erstellt. Dabei zeigt sich, daß keine gleichförmige Schüttungsabnahme und somit auch kein einheitlicher Speicher im Einzugsgebiet des Seebaches gegeben ist. Vereinfachend kann die TWL des Vorfluters in mehrere Abschnitte angenäherter Geraden aufgeteilt werden, die sich, getrennt durch einen gleichmäßig abfallenden, wenige Stunden einnehmenden Übergangsbereich, aneinanderreihen. Ausgehend von Tagesmittelwerten erscheinen diese Übergangsbereiche als "Knickpunkte" in der TWL, die das Abklingen einer Abflußkomponente markieren.

Es ergeben sich mit ausgeprägter Konstanz jeweils vier gut angenäherte, zeitlich voneinander getrennte und lückenlos anschließende Geraden (Abb. 19). Somit können die im Vorfluter zeitlich voneinander getrennten Abflußkomponenten den entsprechenden α -Werten zugeordnet werden.

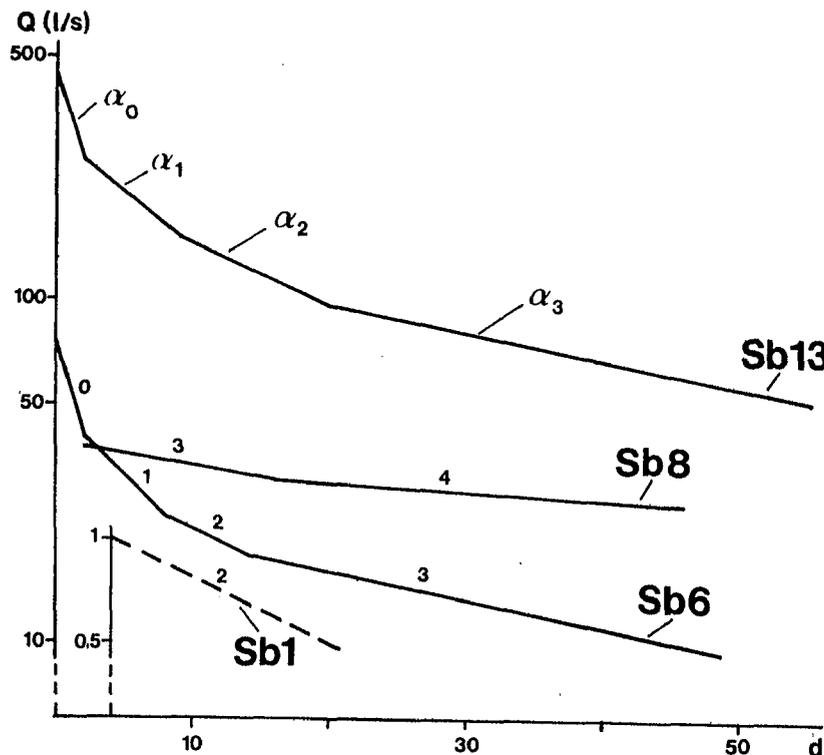


Abb. 19: Leerlaufverhalten im Gebiet Seebach

Unmittelbar nach einem Niederschlagsereignis bzw. bei hoher Schüttung werden bei steil abfallender Ganglinie hohe α -Werte von 0,2 bis 0,3 d^{-1} bei einem Mittelwert von 0,24 d^{-1} im Vorfluter erreicht (Tab. 9). Je nach Niederschlagsmenge und -intensität flacht die Abflußganglinie ein bis zwei Tage

nach dem Niederschlag ab. Anhand der folgenden Geländebeobachtungen kann diese Beziehung bestätigt werden. Nach starken Niederschlägen über das Makroporensystem der Böden einsetzender oberflächennaher Abfluß (Q_0) wird mit geringer zeitlicher Verzögerung von den natürlich gebildeten Abflußrinnen in den Talhängen und den künstlich angelegten Abflußrinnen entlang der Wege aufgenommen und dem Vorfluter zugeführt. Nach sommerlichen Starkregen versiegt der oberflächennahe Abfluß nach dem Überschreiten seines Höhepunktes innerhalb von Stunden bis zu einem Tag völlig. Nach länger anhaltenden Regenperioden oder während der Schneeschmelze und somit vollständigem Auffüllen des Makroporensystemes im Bodenbereich, kann der Q_0 noch zwei bis drei Tage nach den Niederschlägen das Abflußgeschehen im Vorfluter bestimmen. Stichprobenartige Abflußmessungen an Wegabflußrohren, die ausschließlich den intermittierenden oberflächennahen Abfluß aus den Hängen aufnehmen, untermauern diese Beobachtungen (SEEGER, 1986). Da diese Abflußkomponente nicht über einen wirklichen Wasserspeicher abfließt, sondern lediglich den oberflächennahen Makroporenraum der Böden mit geringer zeitlicher Verzögerung durchfließt, werden die zugehörigen α -Werte mit α_0 bezeichnet.

Im Oberlauf des Vorfluters (Sb6) erfolgt bei einem Mittelwert für α_0 von $0,297 \text{ d}^{-1}$ der oberflächennahe Abfluß noch etwas rascher als im Unterlauf, was auch schon die geringeren Schüttungsquotienten gegenüber Sb13 andeuteten (Kap. 3.5.1, Tab. 8). Hier wirken sich wiederum die steiler abfallenden Hänge im oberen Teil des Einzugsgebietes beschleunigend auf den Abfluß aus. Zudem sind in den Steilhängen die groben Blockschuttdecken verbreitet (Kap. 2.3), die in den oberen Horizonten vorwiegend von Blöcken und Gesteinsbruchstücken aufgebaut werden. Über die oft unverfüllten Zwischenräume nahe der Oberfläche kann sich das Wasser nahezu ungehindert talwärts bewegen.

Nach dem Abklingen des Q_0 flacht die TWL merklich ab. Die α -Werte nehmen etwa dreifach geringere Werte um $0,081 \text{ d}^{-1}$ (Tab. 9) mit mäßiger Streuung zwischen $0,07$ und $0,11 \text{ d}^{-1}$ an. Jetzt wird das Abflußverhalten im Vorfluter in erster Linie von dem Abfluß aus den oberen Deckschichtenbereichen geprägt. Ein Teil des über die Böden in die Deckschichten infiltrierten Sickerwassers fließt über die wasserstauenden Ortsteinbänder hangparallel ab (Q_{d_0} , Kap. 3.3). Zudem gelangt auch ein Teil des tiefer eingedrungenen Sickerwassers bei gesättigten Verhältnissen über den Makroporenraum der oberen Deckschichtenbereiche mit geringer zeitlicher Verzögerung zum Abfluß. Messungen an flachen, von rasch abfließendem Hangwasser beeinflussten Quellen belegen diese Zusammenhänge. Da am Seebach von keiner Hangschuttquelle permanente Abflußmessungen vorliegen, wird die nähere Bedeutung der α_1 -Werte

erst in den folgenden Kapiteln mit Hilfe von Quellmessungen in den anderen Gebieten ermittelt.

Sechs bis zehn Tage nach dem Niederschlag flacht die Abflußganglinie bei zurückgehenden Leerlaufkoeffizienten (α_2) weiter ab. Mit geringen Abweichungen stellen sich im Mittel α -Werte im Vorfluter von $0,04 \text{ d}^{-1}$ ein. Ein Vergleich mit der Hangschuttquelle Sb1 zeigt, daß das Leerlaufverhalten im Vorfluter nach Abklingen der Hochwasserwelle zunächst von den Hangschuttquellen bzw. dem zugehörigen Aquifer bestimmt wird. Die Hangschuttquellen sprechen mit geringer zeitlicher Verzögerung auf Niederschläge an (Kap. 3.5.2). Allerdings wird diese Abflußkomponente im Vorfluter, wie oben beschrieben, zunächst von dem Abfluß aus dem Boden und den oberen Deckschichtenbereichen überlagert. So stellen sich erst nach Abklingen der Hochwasserwelle die den Hangschuttquellen entsprechenden α_2 -Werte im Vorfluter ein.

Die α_2 -Werte beschreiben das Leerlaufverhalten des Grobporenraumes in den tieferen Deckschichten. Bei hohem Wasserangebot, das in dem betrachteten Zeitraum fast immer vorhanden war, ist das Festgestein zumindest in kluftärmeren Bereichen nicht in der Lage, das gesamte, über den Grobporenraum rasch nachfließende Sickerwasser aufzunehmen (Kap. 3.3). Das überschüssige Wasser speist durch hangparalleles Abströmen die Hangschuttquellen oder tritt direkt in den Vorfluter über. Zudem kommt es in den Hanglagen bei wassergesättigten Deckschichten auch schon über der Deckschichtenbasis zu einem hangparallelen Abfluß über den Grobporenraum.

Während längeren Trockenperioden fällt die Hangschuttquelle Sb1 nahezu trocken. Verlängert man die TWL von Sb1 bis zu der Abszisse, so wird deutlich, daß ausgehend von der maximalen Schüttung (1 l/s) die Quelle nach ca. 30 Tagen ohne Niederschlag versiegt. Dazu kam es während des Meßzeitraumes lediglich im Herbst des Trockenjahres 1985 nach einem verhältnismäßig trockenen Sommer. Anfang September wurde an der Quelle nur noch eine geringe Restschüttung von etwa $0,03 \text{ l/s}$ gemessen und auch der Oberlauf des Seebaches war nahezu trockengefallen. Mitte September setzten starke Niederschläge ein, die bis zu 65 mm/d erreichten (Abb. 24). Am Vorfluter stieg die Schüttung innerhalb kurzer Zeit von 60 auf 790 l/s an. Nach dem Abklingen der Niederschläge folgte die Abflußganglinie zunächst der für den Seebach charakteristischen Trockenwetterleerlaufkurve (Abb. 20). Nachdem allerdings der Abfluß aus den oberen Deckschichtenbereichen (Q_{d0}) bzw. der α_1 entsprechende TWL-Abschnitt abgeklungen war, nahm die Abflußganglinie einen von der Typkurve abweichenden Verlauf. Nach dem steilen Ast mit den hohen α_1 -Werten wird der Abfluß im Vorfluter ohne Übergang vom Grundwasseranteil (α_3) bestimmt.

Abfluß aus den tieferen Deckschichten (Q_d) mit den entsprechenden α_2 -Werten findet nicht statt. Das gesamte aus den Niederschlägen resultierende Sickerwasser, abzüglich dem hangparallelen Abfluß im Boden (Q_o) und den oberen Deckschichtenbereichen (Q_{do}), wird zum Auffüllen des im Sommer entstandenen Wasserdefizites im Mittel- und Feinporenraum verbraucht. Der Grobporenraum der tieferen Deckschichten wurde während der Trockenperiode vollständig entleert und nimmt nicht mehr am Abflußgeschehen teil. Der Deckschichtenabfluß (Q_d) versiegt und reagiert auch nicht auf die zwar kurzen aber starken Herbstniederschläge. Infolgedessen geht auch die Grundwasserneubildung zurück.

Lediglich der Wasservorrat in den Mittel- bis Feinporen der tieferen Deckschichten mit ihrem großen Retentionsvermögen gewährleistet durch einen anhaltenden, langsamen Abtropfvorgang eine minimale Infiltration in das Festgestein (siehe auch EINSELE, 1970). Der Deckschichtenabfluß und mit ihm die Hangschuttquellen zeigen erst im folgenden Frühjahr nach der ersten Schneeschmelze, d.h. nach vollständigem Auffüllen des Wasserdefizites in den Deckschichten, wieder bemerkenswerte Schüttungsanstiege.

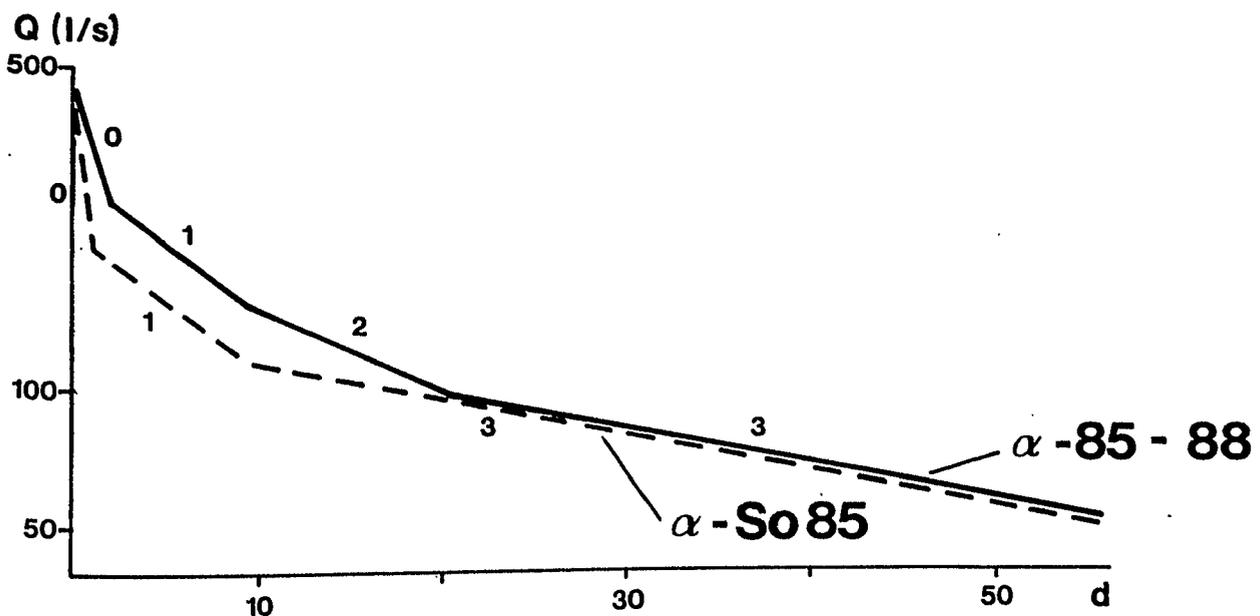


Abb. 20: Vergleich des Leerlaufverhaltens am Seebach im Trockenjahr 1985 mit den Naßjahren 1986 bis 1988

Bei anhaltendem Trockenwetter, oder wenn sich nur geringe Niederschläge ereignen, flacht die Abflußganglinie im Vorfluter weiter ab. Mit α_3 -Werten um $0,018 d^{-1}$ zeigt der Vorfluter dasselbe Leerlaufverhalten wie die Basisquelle Sb8

(Tab. 9, Abb. 19). Jetzt wird der Gesamtabfluß zum größten Teil vom Grundwasserabfluß (Q_g) gestellt. Bei niedriger Schüttung gehen die Leerlaufkoeffizienten bei Sb8 bis auf Minimalwerte von $0,001 \text{ d}^{-1}$ bei einem Mittel um $0,005 \text{ d}^{-1}$ zurück. Vergleichbare Werte von $0,001$ bis $0,0024 \text{ d}^{-1}$ geben RICHTER & LILICH (1975) für wenig geklüftete Sandsteine an. Mit nachlassender Grundwasserneubildung sinkt der Kluftgrundwasserspiegel ab. Aufgrund der im Gestein mit der Tiefe abnehmenden Kluftdichte und Kluftweite geht auch die Gebirgsdurchlässigkeit zurück und das Speichervolumen sowie die Wasserwegsamkeit werden herabgesetzt (AGSTER, 1983). Die Großklüfte sind weitgehend entleert und die Quelle wird größtenteils aus den Feinklüften des Buntsandsteines, d.h. aus speicherinternen Vorräten, gespeist. Dabei dienen die Großklüfte nur noch als Bindeglied zur Quelle, indem sie das Wasser aus den Feinklüften aufnehmen und dem Quellaustritt zuführen.

Die höheren α_3 -Werte kennzeichnen den in großen Bereichen weitständig geklüfteten Buntsandstein (vor allem sm und smc2). Mit Werten zwischen $0,01$ und $0,03 \text{ d}^{-1}$ liegen die α_3 -Werte im Bereich verkarsteter Kalksteine. BROWN et al. (1975) haben an Karstquellen Leerlaufkoeffizienten von $0,007$ bis $0,1 \text{ d}^{-1}$ bei einem Mittelwert von $0,01 \text{ d}^{-1}$ bestimmt. Auch die hohen Fließgeschwindigkeiten, die EISSELE (1966, Kap. 3.2) mittels Färbversuchen an Buntsandsteinquellen des Schwarzwaldes festgestellt hat, zeigen, daß die weitständigen Klüfte im Buntsandstein eine ähnlich hohe Wasserwegsamkeit wie verkarstete Kalksteine besitzen. KREBS (1979) hat für Quellen, die aus weniger zementierten Lagen des Eck'schen Konglomerates entspringen, Werte um $0,015 \text{ d}^{-1}$ errechnet.

In kluftarmen Bereichen der Buntsandsteinschichtfolge (vor allem im smc1 und su) kann auch das aus den Mittel- bis Feinporen der Deckschichten stetig abtropfende Wasser nicht vollständig in das Festgestein infiltrieren. Der überschüssige Anteil fließt ebenfalls, aber mit größerer zeitlicher Verzögerung als die intermittierenden Abflußkomponenten direkt dem Vorfluter zu. So ist auch oberhalb der Buntsandstein-Granit-Grenze nach dem Abklingen des rascheren Deckschichtenabflusses (α_2) im Vorfluter bei Sb6 immer noch eine Restschüttung vorhanden. Eventuell unter den Deckschichten austretende, nicht erfaßbare Schichtquellen, die diese Restschüttung vielleicht mitbewirken, können nicht berücksichtigt werden.

Mit Werten um $0,021 \text{ d}^{-1}$ stellen sich in Sb6 nur geringfügig höhere α_3 -Werte als am Vorfluterpegel Sb13 und der Basisquelle Sb8 ein. Dies zeigt, daß zumindest der Basisabfluß über die Großklüfte des Festgesteines von dem Mittel- bis Feinporensystem reguliert wird. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, geben die tieferen Deckschichten ihren Wasservorrat dosiert an den Festgesteinsaquifer ab und sorgen für eine stetige Grundwasserneubildung.

3.6.2 Rotenbach

Der Vorfluter im Rotenbachgebiet zeigt dasselbe Leerlaufverhalten wie der Seebach (Abb. 21, Tab. 9). Nach maximal ein bis zwei Tagen oberflächennahem Abfluß (α_0) in Folge von starken Niederschlägen wird das Leerlaufverhalten von dem hangparallelen Abfluß über dem Ortstein bzw. über das Grobporensystem der oberen Deckschichtenbereiche (α_1) bestimmt. Auch bei niedriger Schüttung und geringen α -Werten verlaufen die TWL vom Rotenbach und Seebach nahezu parallel. Dies zeigt, daß sowohl die Deckschichten als auch der Buntsandstein im Hinblick auf ihre hydrologischen Eigenschaften über weite Strecken recht einheitlich aufgebaut sind.

Übereinstimmend mit den für eine Basisquelle niedrigen Schüttungsquotienten (Tab. 8) verzeichnet die Quelle R1 bei hoher Schüttung sehr hohe, dem Vorfluter angenäherte α -Werte. Dies bestätigt die Annahme, daß der Quelle nach starken Niederschlägen oberflächennaher Abfluß zuströmt (Kap. 3.5.2). Beim Anlegen der Quelfassung wurden starke oberflächennahe Wasserzutritte aus den oberen Boden- und Deckschichtenbereichen beobachtet (freundliche Mitteilung von Wassermeister Nock, Oppenau). Zudem erfolgen auch noch aus den tieferen Deckschichten Wasserzutritte in die Quelle, was durch die α_2 -Werte belegt wird. Infolgedessen besteht nicht der gesamte, am Meßwehr R1 gemessene Abfluß aus Quellwasser. Vielmehr können die Abflußspitzen den oberflächennaheren Abflußkomponenten Q_0 , Q_{d0} und Q_d zugeordnet werden. Der Einfluß oberflächennaher Abflußkomponenten läßt sich auch anhand der hydrochemischen Daten untermauern (siehe Kap. 4).

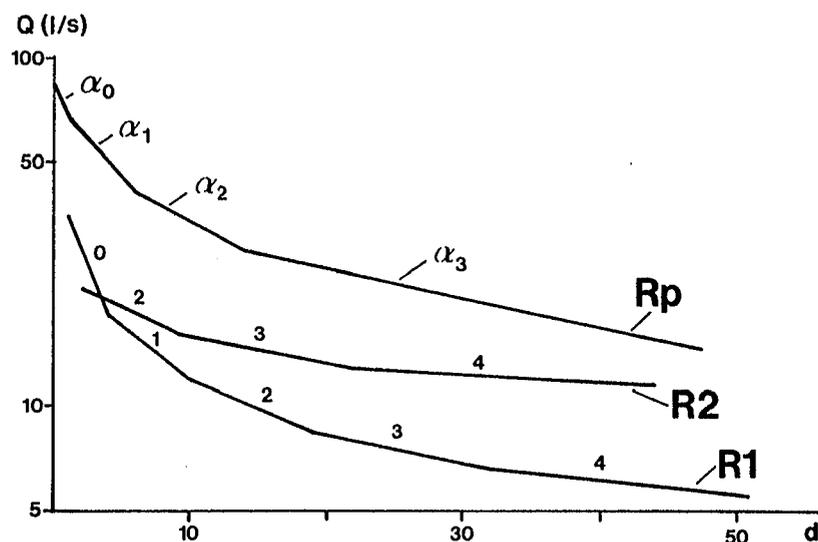


Abb. 21: Leerlaufverhalten im Gebiet Rotenbach

Die tiefer im Hang austretende Basisquelle R2 wird nicht von oberflächennah zutretendem Hangwasser beeinflusst. Lediglich aus den tieferen Deckschichten scheint während Feuchtperioden und vor allem während der Schneeschmelze ein bemerkenswerter Wasserzufluß zu bestehen (α_2 -Werte).

Zehn bis zwanzig Tage nach größeren Niederschlagsereignissen zeigen die TWL der beiden Quellen ähnlich niedrige Leerlaufkoeffizienten. Jetzt besteht der gesamte Abfluß wie bei der Quelle Sb8 am Seebach aus Grundwasserabfluß über das Kluftsystem des Buntsandsteinaquiferes. Mit nachlassendem Sickerwasser-nachschub und anhaltendem Leerlaufen der Großklüfte wird auch hier der Grundwasserabstrom zunehmend aus den Vorräten der Feinklüfte des tieferen Aquiferes genährt.

3.6.3 Kleine Kinzig

In Übereinstimmung mit den obigen Aussagen über die geringeren Schüttungsschwankungen bzw. den niedrigeren Abflußspitzen aufgrund der geringeren Reliefenergie und der weiten Verbreitung von so-Deckschichten (Kap. 3.5 und 2.3), liegen die α_0 -Werte an der Kleinen Kinzig (Kp) und dem Huttenbächle (Hp) deutlich unter den Werten der anderen Vorfluter (Tab. 9, Abb. 21). Am Weiherbach (Wp) mit seinem von steilen Karhängen geprägten Einzugsgebiet fließt der oberflächennahe Abflußanteil (Q_0) bei α_0 -Werten um $0,194 \text{ d}^{-1}$ dagegen ähnlich schnell ab wie am Rotenbach und Seebach. Nach dem Abklingen des ein bis maximal drei Tage andauernden Q_0 stellen sich mit abflachender TWL an allen Meßstellen gut übereinstimmende α_1 bis α_3 -Werte ein. So zeigen die Vorfluter Kleine Kinzig und Huttenbächle praktisch dasselbe Abflußverhalten, wobei an der Kleinen Kinzig der Deckschichtenabfluß (Q_{d0} und Q_d) etwas rascher abklingt. Dementsprechend flacht die TWL etwas früher ab, woraus sich der höhere Schüttungsquotient an der Kleinen Kinzig erklärt (Tab. 8).

Anschluß an verschiedene Speicherräume haben auch die Quellen in diesem Gebiet. An den flacheren Quellen Kq1 und Wq4 stellen sich infolge starker Niederschläge nach überschreiten der Abflußspitze hohe α_1 -Werte ein. An Schürfgruben und Wegböschungen konnten unmittelbar nach Niederschlägen stark zunehmende Wasseraustritte über dem Ortsteinhorizont und in den oberen Deckschichtenbereichen beobachtet werden, die in Übereinstimmung zu den α_1 -Werten in den Quellen und Vorflutern nach sechs bis zehn Tagen wieder abklingen (Kap. 3.3). So fließt den flachen Quellen bei Hochwasser hangparalleler Abfluß über den Ortsteinhorizont und den Grobporenraum der oberen Deckschichtenbereiche (Q_{d0}) zu und bestimmt somit das Leerlaufverhalten. Die

α_0 -Werte bei Wq4 sind wie beschrieben auf oberflächennahen Abfluß, der über das etwas unterhalb der Quelle angebrachte Wehr fließt, zurückzuführen (Kap. 3.5.1.3).

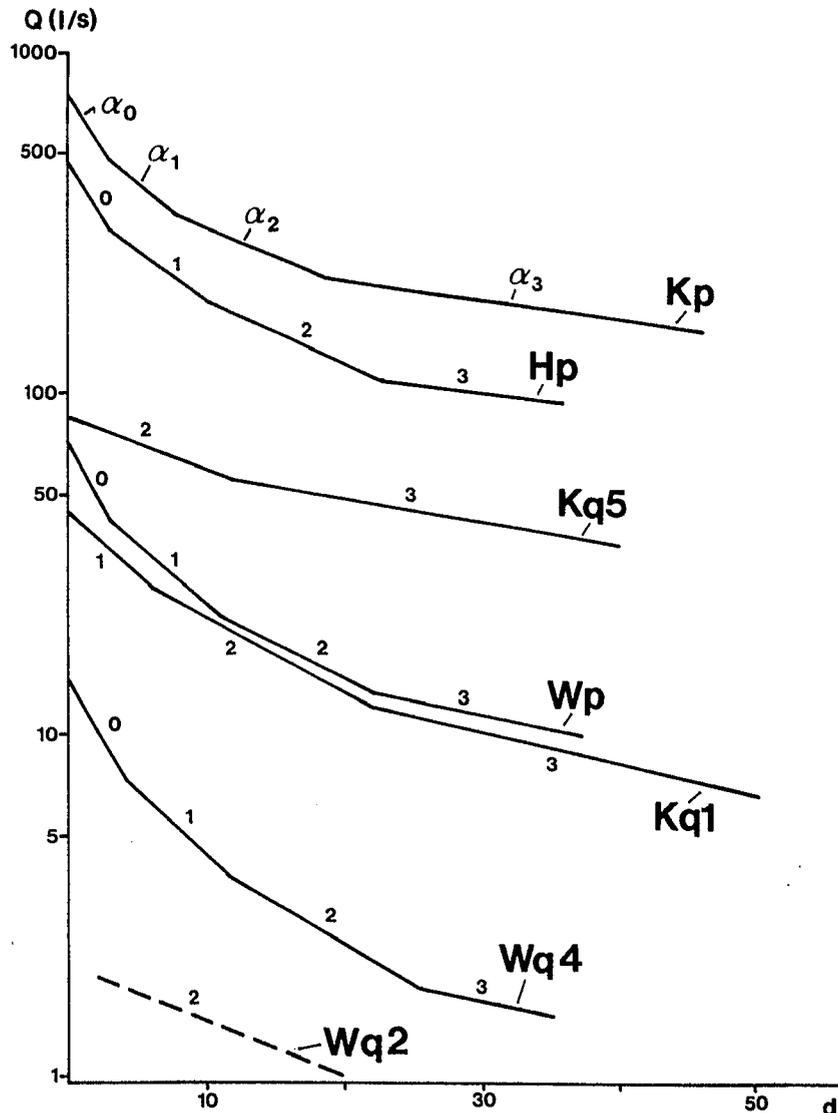


Abb. 22: Leerlaufverhalten im Gebiet der Kleinen Kinzig

Nach dem Versiegen von Q_{d0} wird das Leerlaufverhalten der Quellen und Vorfluter wieder durch hangparallelen Abfluß aus den tieferen Deckschichtenbereichen geprägt. An diesen Speicher haben auch die tieferen Schichtquellen Kq5 und Wq2 Anschluß, wobei die etwas geringeren α_2 -Werte eine gewisse Verzögerung anzeigen.

Kommt es innerhalb von 20 bis 30 Tagen zu keinen stärkeren Niederschlägen, dann klingt der Hangwasserstrom in den Deckschichten ab und der Abfluß in den Quellen und Vorflutern wird ausschließlich aus dem

Festgesteinsaquifer und den in die Klüfte infiltrierenden Sickerwasserstrom aus dem Mittel- bis Feinporensystem der tieferen Deckschichten bestritten (α_3, Q_g). Dabei zeigen die flachen Quellen Kq1 und Wq4 nur geringfügig höhere α -Werte als die tiefere Schichtquelle Kq5. Die weitständigen Großklüfte reichen demnach bis in tiefere Bereiche des Buntsandsteines und führen auch den Schichtquellen an der Basis des Bausandsteines (sm) große, rasch abfließende Grundwassermengen zu.

Flachere, α_4 entsprechende Kurvenabschnitte stellten sich auch in Kq5 während der beiden Meßjahre 1987 und 1988 nicht ein. PREUB (1986) ermittelte allerdings im Trockjahr 1985 nach mehrwöchiger, niederschlagsarmer Trockenperiode α -Werte um $0,006 \text{ d}^{-1}$. So haben auch die Schichtquellen Anschluß an das Feinklufsystem des Festgesteinaquiferes, das sich durch ein hohes Retentionsvermögen auszeichnet.

3.6.4 Zusammenfassung

Die TWL der Vorfluter setzen sich mit guter Konstanz aus vier gut angenäherten, zeitlich voneinander getrennten Geraden mit unterschiedlicher Steigung bzw. α -Werten (α_0 bis α_3) zusammen. Sie geben das Abflußverhalten der verschiedenen Abflußkomponenten, die den unterschiedlichen Speicherräumen entstammen, wieder. Die α -Werte der Quellen verschiedener Horizonte stimmen gut mit den α -Werten entsprechenden TWL-Abschnitte der Vorfluter überein, wobei sich in den tieferen Quellen während niederschlagsarmen Perioden nochmals geringere α_4 -Werte einstellen. So können über das Leerlaufverhalten der Quellen die ermittelten α -Werte bzw. TWL-Abschnitte in den Vorflutern verschiedenen Abflußkomponenten zugeordnet werden:

- α_0 (0,140-0,297): Q_0 ; oberflächennaher Abfluß über das Makroporensystem (Grobporen, Grabgänge, Wurzelgänge) des Oberbodens. Fließt nahezu ohne zeitliche Verzögerung als hangparalleler Abfluß unmittelbar dem Vorfluter zu. Klingt nach wenigen Stunden bis maximal drei Tagen ab.
- α_1 (0,074-0,093): Q_{d0} ; Deckschichtenabfluß vorwiegend über den wasserstauenden Ortsteinhorizont und über das Grobporensystem der oberen Deckschichtenbereiche. Fließt mit geringer zeitlicher Verzögerung als Hangwasserstrom in den oberen Deckschichtenbereichen direkt oder über Hangschuttquellen in den Vorfluter. Hält sechs bis zehn Tage nach einem Niederschlagsereignis an.

- α_2 (0,034-0,059): Q_d ; Deckschichtenabfluß vorwiegend über das Grobporensystem der tieferen Deckschichten. Fließt größtenteils über dem Festgestein den Hangschuttquellen oder dem Vorfluter zu. Bei übersättigten Verhältnissen tritt auch Wasser aus den Mittel- bis Feinporen in das Grobporensystem über und speist den tieferen Deckschichtenabfluß. Versiegt nach 25 bis 30 Tage anhaltender Trockenperiode und spricht erst nach Auffüllen des Wasserdefizites in den Deckschichten, d.h. nach starken, anhaltenden Niederschlägen oder nach der Schneeschmelze wieder an.

- α_3 (0,015-0,021): Q_g ; Grundwasserabfluß über das Kluftsystem des Buntsandsteines. Beschreibt das Leerlaufverhalten der vor allem im oberflächennahen Bereich des Festgesteines vorkommenden Großklüfte und des Mittel- bis Feinporenraumes der tieferen Deckschichten, die durch einen stetigen Abtropfvorgang den Festgesteinsaquifer speisen. Tritt vor allem über Schicht- und Basisquellen zutage.

- α_4 (0,005-0,008): Q_g ; Grundwasserabfluß über das Feinkluftsystem des Festgesteinsaquiferes. Speicherinterner Vorrat, der erst nach längeren Trockenperioden bzw. nachlassendem Sickerwassernachschub aus den Deckschichten das Abflußverhalten in den Basis- und Schichtquellen bestimmt. In den Vorflutern wurden innerhalb des Meßzeitraumes diese niedrigen α -Werte nicht erreicht, sodaß der Grundwasserabfluß bei der folgenden Abflußseparation als eine einheitliche Abflußkomponente betrachtet wird.

3.7 Abflußseparation

Grundlage für die Abflußseparation war das Verfahren nach NATERMANN (1951, 1958), wobei auf graphischem Wege zunächst die Grundwasserganglinie vom Gesamtabfluß im Vorfluter abgetrennt wird. Bei dieser Methode werden die Tiefpunkte der Ganglinie zu einer Q_g -Linie, die die "Linie des langfristigen Grundwassers" darstellt, verbunden (HÖLTING, 1984). FLECK (1987) bezeichnet die Bestimmung der Grundwassererneuerung über das Q_g -Linien-Verfahren für wirtschaftliche Zwecke als ausreichend, weist aber darauf hin, daß der bei geneigten Standorten auftretende Interflow nicht eindeutig zugeordnet werden kann.

Durch Vergleich mit Quellschüttungen kann die Bestimmung der Abflußkomponenten wesentlich verfeinert werden, wobei die Genauigkeit mit der

Anzahl der erfaßten Quellen und ihrer addierten Schüttung steigt (EINSELE et al., 1969). Grundsätzlich verläuft die Q_g -Linie eines Pegels synchron zu den oberhalb der Meßstelle erfaßten Ganglinien von Grundwasserquellen (KRIELE, 1977). Somit kann mit Hilfe der lückenlos aufgezeichneten Quellschüttungen in den Untersuchungsgebieten der Grundwassergang in den Vorflutern mit guter Genauigkeit wiedergegeben werden.

Diese Beziehung gilt auch für weitere Abflußkomponenten im Vorfluter, deren Gang bzw. deren zeitliche Präsenz (bei intermittierenden Abflußanteilen) sich aus dem Abfluß- und Leerlaufverhalten entsprechender Quellen ergeben. Dementsprechend können neben der Q_g -Linie auch die Anteile der weiteren, in Kap. 3.6 bestimmten Abflußkomponenten (Q_g , Q_{do} , Q_o) mit Hilfe des graphischen Verfahrens bestimmt werden. Die vorab durchgeführten, umfangreichen Untersuchungen über das Leerlaufverhalten der Vorfluter und Quellen und die dabei ausgewiesenen, den einzelnen Abflußkomponenten entsprechenden verschiedenen α -Werte (Kap. 3.6), ermöglichen eine erheblich genauere Abflußseparation als das herkömmliche Verfahren.

Nach einem Niederschlagsereignis wird das Abflußgeschehen im Vorfluter zunächst vom oberflächennahen Abfluß Q_o bestimmt. Sein Abklingen wird bei semilogarithmischer Darstellung der TWL durch einen Knickpunkt markiert (Kap. 3.6). In diesem Punkt setzt die Ganglinie der nächst tieferen, bisher überdeckten Abflußkomponente (Q_{do}) an der Gesamtabflußganglinie an (Abb. 23). Fällt in der Zwischenzeit kein Niederschlag, so folgen weitere Knickpunkte, bis die intermittierenden Abflußkomponenten abgeklungen sind und der Abfluß im Vorfluter ausschließlich vom Grundwasseranteil gebildet wird.

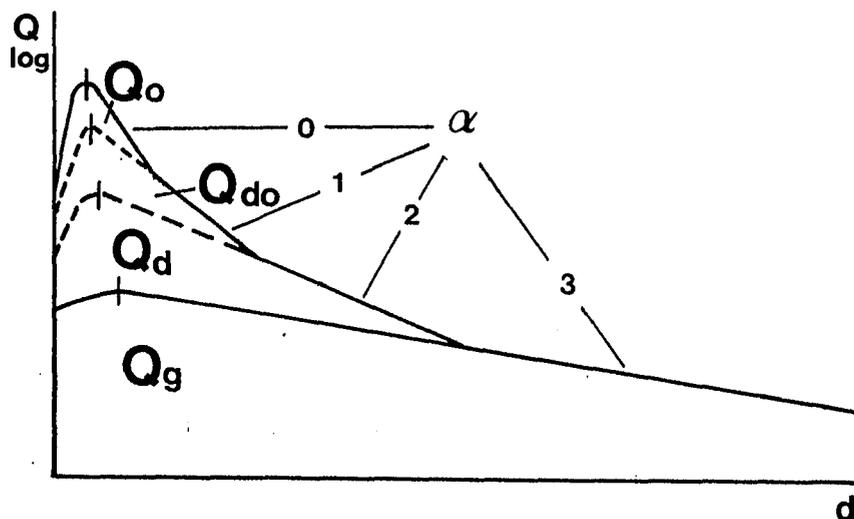


Abb. 23: Abflußseparation mit Hilfe der Leerlaufkoeffizienten α (Näherungsverfahren)

Ein ähnliches Verfahren beschreibt CHOW (1964), der zur Abtrennung der Abflußanteile die Abflußganglinie ebenfalls in mehrere Geraden aufteilt. Ebenso beschreibt MATTHESS (1983) den Übergang vom Hochwasser zum Grundwasserabfluß als Knickpunkt auf den Rezessionsabschnitten einer Ganglinie.

Die Maxima der tieferen Abflußanteile (Q_{do} , Q_d und Q_g) werden nach einem Niederschlag vom oberflächennahen Abfluß überdeckt. Daher müssen die jeweiligen Ganglinien der Abflußanteile konstruiert werden. UDLUFT (1972) löst dieses Problem, indem er den semilogarithmisch-linearen Ast der Abflußkurve rückwärts verlängert und so den Abfluß für das durch Sickerwasser unbeeinflusste Grundwasser bei hoher Auffüllung erhält. EINSELE et al. (1969) schätzen aus dem Verhältnis von Quellschüttungen zum Grundwasserabfluß im Vorfluter bei Trockenwetter den unterirdischen Abfluß während nasser Perioden aus der Quellschüttung ab.

Die Lage der Maxima der Abflußanteile ergeben sich aus den Schüttungsmaxima zugehöriger Quellen. Da der α -Wert die Steigung der Ganglinie angibt, können auch die Höhen der überdeckten Maxima von der Abflußganglinie ausgehend mit guter Genauigkeit rückrechnend bestimmt werden (mit bekanntem Q_t und Auflösung der Formel von MAILLET (1905) nach Q_0) (Abb. 23). Das Ansprechen der verschiedenen Abflußkomponenten auf Niederschlagsereignisse bzw. ihr Schüttungsanstieg vermitteln die beobachteten Niederschlag-Abfluß-Beziehungen (Kap. 3.5.2).

Die Anteile der einzelnen Abflußkomponenten in den verschiedenen Vorflutern sind der Tabelle 10 zu entnehmen, während ihre zeitliche Verteilung und ihr Gang aus den Abb. 24-27 zu ersehen ist. Zusätzlich wurde auch der Abfluß der wichtigsten Quellen mit Hilfe der ermittelten α -Werte aufgetrennt und in den Abb. 24-27 dargestellt.

(mm/a)	Jahr	Qges	Qg	QgRb	Qgw	Qd	Qdo	Qo
Sb13	1985	953	553	-	-	114	109	181
	1986	1722	568	-	-	499	206	447
	1987	1694	695	-	-	407	186	424
	1988	1915	670	-	-	613	211	421
Sb6	1988	795	0	-	-	424	106	265
Rp	1987	3090	2023	360	1663	691	233	143
	1988	3291	1975	332	1643	887	257	172
Kp	1987	1507	936	-	-	372	79	120
	1988	1650	963	-	-	408	131	148
(%)	Jahr	Qges	Qg	QgRb	Qgw	Qd	Qdo	Qo
Sb13	1985	100	58	-	-	12	11	19
	1986	100	33	-	-	29	12	26
	1987	100	41	-	-	24	11	25
	1988	100	35	-	-	32	11	22
Sb6	1988	100	0	-	-	53	13	34
Rp	1987	100	65	11	54	22	8	5
	1988	100	60	10	50	27	8	5
Kp	1987	100	62	-	-	25	5	8
	1988	100	58	-	-	25	8	9

Tab. 10: Gesamtabfluß (Q_{ges}), Grundwasserabfluß (Q_g , Q_{gRb}), Grundwasserzustrom (Q_{gw}), Deckschichtenabfluß (Q_d), Abfluß über dem Ortstein (Q_{do}) und oberflächennaher Abfluß (Q_o) in mm/a und Anteilen am Gesamtabfluß in %

3.7.1 Seebach

Am Seebach flossen im Trockenjahr 1985 mit 953 mm/a nur stark die Hälfte der Abflußmenge der Naßjahre 1986-1988 (im Mittel 1777 mm/a) ab. Dagegen erscheint der Grundwasserabfluß Q_g mit geringen Schwankungen von 553 bis 677 mm/a sehr ausgeglichen. Dies bestätigt, daß auch über längere Trockenperioden durch die Pufferfähigkeit der tieferen Deckschichten ein gleichmäßiger und lang anhaltender Grundwasserabfluß vorhanden ist. Infolgedessen ist der Grundwasseranteil am Gesamtabfluß im Trockenjahr 1985 mit 58% deutlich höher als in den folgenden Naßjahren (33-41%)

Den geringsten Grundwasseranteil mit 33% des Gesamtabflusses verzeichnete das Jahr 1986, wobei der Grundwasserabfluß trotz nahezu doppelt so hohem Gesamtabfluß gegenüber dem Vorjahr nur geringfügig anstieg. Hier wirkte sich das im Sommer 1985 entstandene Wasserdefizit in den Deckschichten und dem Festgesteinsaquifer besonders deutlich aus (Kap. 3.4.3). Ein Teil des im Winter 1986 nach starken Niederschlägen einsetzenden Sickerwassernachschubes wurde zum Auffüllen der teilweise entleerten Speicher verbraucht.

Den höchsten Grundwasserabfluß brachte das Jahr 1987 obwohl ca. 250 mm weniger Niederschlag registriert wurden als im folgenden Jahr (Tab. 2). Ende 1986 waren die Speicher aufgrund starker Niederschläge im Sommer gefüllt. Ende Oktober 1986 fielen weit über 100 mm Niederschlag, die zum Teil erst im November und damit im hydrologischen Jahr 1987 über den Vorfluter aus dem Gebiet abfließen (IROUSCHEK, 1989). Dies gilt vor allem für den Grundwasserabfluß Q_g , der gegenüber den anderen Abflußkomponenten stark verzögert auf Niederschläge anspricht (Kap. 3.5.2). Zudem fielen 1987 über das gesamte Jahr verteilt immer wieder starke Niederschläge (Tab. 3, Abb. 25), die vor allem auch im Sommer einen stetigen Sickerwassernachschub ermöglichten. Dagegen fielen 1988 die stärksten Niederschläge im Winterhalbjahr, wovon der größte Teil zunächst in bis zu 2 m hohen Schneemassen gebunden wurde (Kap. 3.5.2). Durch schnell ansteigende Temperaturen im Frühjahr setzte eine rasche Schneeschmelze ein. Die gesättigten Deckschichten waren nicht in der Lage, die großen Schmelzwassermassen aufzunehmen, sodaß der größte Teil oberflächennah bzw. über das Grobporensystem der Deckschichten abfloß und nicht zur Grundwasserneubildung beitragen konnte. Während der Schneeschmelze im März und April 1988 führte der Seebach über fast 2 Monate Hochwasser (Abb. 25, Sb13 und Sb6). In diesem Winterhalbjahr flossen ca. 75% des gesamten oberflächennahen Abflusses und Deckschichtenabflusses von 1988 ab, wogegen in den vorangegangenen Jahren die Verteilung Winter-Sommerhalbjahr ausgeglichener erscheint (Tab. 11). Dementsprechend erreichte der Deckschichtenabfluß Q_d 1988 mit 613 mm/a sowohl die größte Menge als auch mit 32% den größten Anteil am Gesamtabfluß im Verlauf des Meßzeitraumes.

Im Verlauf der Naßjahre 1986 - 1988 war der Deckschichtenabfluß nahezu durchgehend am Gesamtabfluß beteiligt.

Der Seebach versiegte auch oberhalb des Basisabflusses, d.h. oberhalb der Grenze Buntsandstein/Granit, nie völlig. Sowohl an der Seebachquelle Sb1, als auch am Wehr Sb6 (Abb. 25) blieb immer eine Restschüttung vorhanden.

Im Trockenjahr 1985 nahm Q_d mit 114 mm/a nur einen vergleichsweise geringen Anteil von 12% am Gesamtabfluß ein. Aufgrund der relativ geringen Niederschläge im Frühjahr und Sommer 1985 klang der Deckschichtenabfluß

schon Anfang Juli völlig ab (Abb. 24). Auch nach starken, aber kurzen Niederschlägen im Herbst setzte kein Q_d ein. Wie in Kap. 3.6.1 beschrieben wurde das gesamte durch die Niederschläge nachgelieferte Sickerwasser, abzüglich dem hangparallelen Abfluß im Boden (Q_o) und den oberen Deckschichtenbereichen (Q_{do}), zum Auffüllen des im Sommer entstandenen Wasserdefizites in den tieferen Deckschichten aufgebraucht. Die Grobporen waren nicht wasserführend und die Mittel- bis Feinporen gaben ihr restliches, gespeichertes Wasser nur langsam in Richtung Festgesteinsaquifer ab. Nach längerem Trockenwetter war das Festgestein bei abgesunkenem Kluftgrundwasserspiegel in der Lage, den ohnehin verringerten Sickerwassernachschub aus den Deckschichten vollständig aufzunehmen, sodaß sich kein hangparalleler Hangwasserstrom über dem Festgestein ausbilden konnte.

Erst Anfang 1986 nach starken, anhaltenden Niederschlägen bzw. nach zumindest teilweise Wiederauffüllen des Mittel- und Feinporenraumes der Deckschichten und wieder verstärktem Sickerwasserstrom, setzte wieder ein Abfluß aus den tieferen Deckschichten (Q_d) ein. Auch der Basisabfluß (Q_g) reagierte nach stetigem Rückgang wieder durch einen deutlichen Schüttungsanstieg.

Zwischen 109 mm/a 1985 und 211 mm/a 1988 entfielen auf die Abflußkomponente Q_{do} aus den oberen Deckschichtenbereichen, bzw. auf den hangparallelen Abfluß über den Ortsteinlagen (Tab. 10). Dies bedeutete einen konstanten Anteil am Gesamtabfluß von 11-12%, der sich unabhängig vom Niederschlagsangebot einstellte. Dabei schien weder die Niederschlagsverteilung noch die Stärke der winterlichen Schneefälle eine Rolle zu spielen. Jeweils 11-12% des Sickerwassers wurde vor allem über die Ortsteinhorizonte als Hangwasser direkt dem Vorfluter zugeführt. Dies bestätigte auch der Q_{do} -Anteil in Sb6, der 1988 bei 106 mm/a 13% des Gesamtabflusses ausmachte. Diese Werte geben allerdings keinen Hinweis auf die Verbreitung der Ortsteinlagen. Wie gesagt, wird über die Leerlaufkoeffizienten als Q_{do} nur der Abflußanteil ausgewiesen, der über die oberen Deckschichtenbereiche direkt in den Vorfluter gelangt. Ein sicher nicht unerheblicher Teil des zunächst über dem lückenhaft verbreiteten Ortstein (Kap. 2.3) abströmenden Hangwassers gelangt zwischen den Ortsteinlinsen doch noch in tiefere Deckschichtenbereiche und speist den Deckschichtenabfluß bzw. den Grundwasserabfluß über das Festgestein (Abb. 8, Kap. 3.3).

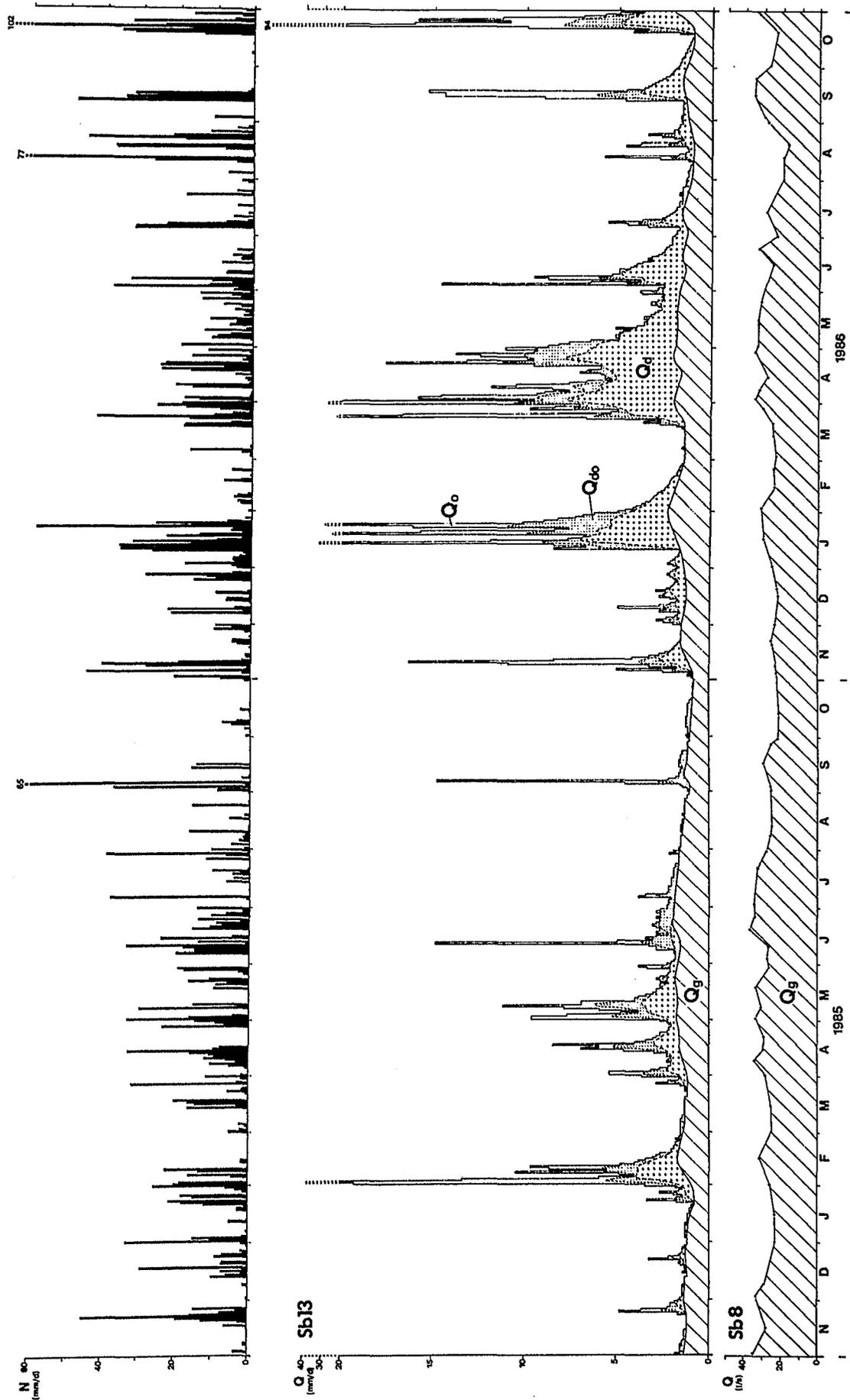


Abb. 24: Abflußganglinie des Seebaches bei Sb13 und der Basisquelle Sb8 mit Niederschlägen 1985 und 1986

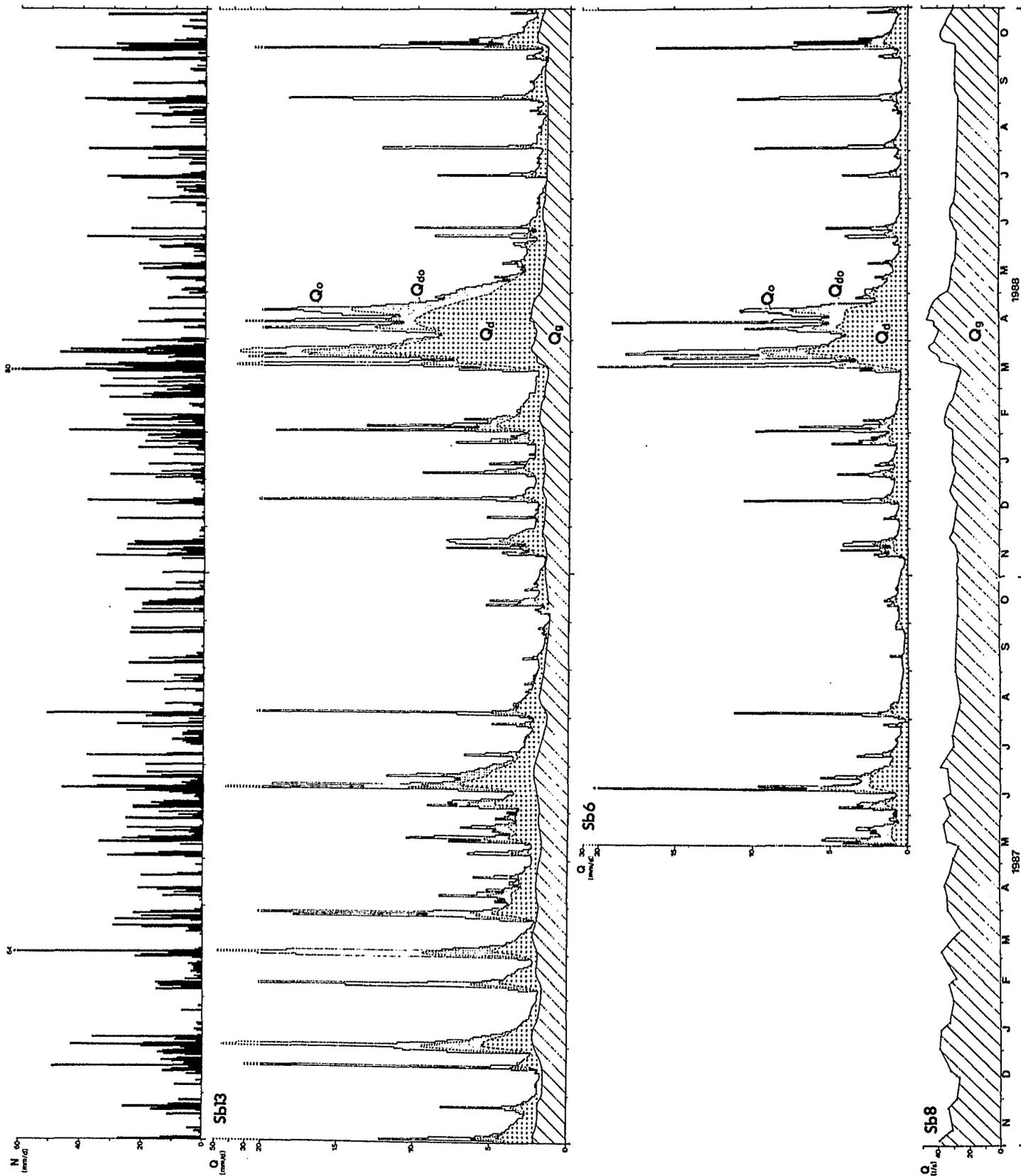


Abb. 25: Abflußganglinie des Seebaches bei Sb13, Sb6 und der Basisquelle Sb8 mit Niederschlägen 1987 und 1988

Im Gegensatz zu Q_d stellte sich Q_{do} auch nach nur mäßigen Niederschlägen in Trockenwetterperioden ein (siehe auch KLAIBER, 1987). Auch IROUSCHEK (1989) führt das schnelle Ansprechen des Seebaches auf eine weite Verbreitung relativ dichter Ortsteinhorizonte zurück. Zusätzlich wird der unruhige Verlauf der Abflußganglinien durch das steile Relief verstärkt (Kap. 3.5.2).

Stärkeren, witterungsabhängigen Schwankungen unterliegt naturgemäß der oberflächennahe Abfluß Q_o , der über das Makroporengefüge des Bodens mit geringer zeitlicher Verzögerung direkt in den Vorfluter gelangt. Dennoch erreicht Q_o am Seebach auch in Trockenjahren einen erheblichen Anteil am Gesamtabfluß, der 1985 mit 181 mm/a immerhin bei 19% lag. In Naßjahren schwillt der oberflächennahe Abfluß sehr stark an und nimmt nahezu ein Drittel des Gesamtabflusses ein. Schon geringe Niederschläge führen zur Bildung von Q_o über die steilen Hänge des Seebachgebietes. Dazu gibt KOEHLER (1971) an, daß aufgrund der stark wechselnden Durchlässigkeitsverhältnisse der Böden und Deckschichten bei kleineren Niederschlagsereignissen oberflächennaher Abfluß nur aus einigen Teilbereichen des Einzugsgebietes stammt. Darauf verweisen auch EINSELE et al. (1986), die im Schönbuch bei Waldbodenkartierungen Teilflächen feststellten, die frei von Überlandabfluß bleiben.

Somit setzt sich der Gesamtabfluß aus Abflüssen einzelner Teilgebiete zusammen, von denen jedes andere Abflußeigenschaften aufweist. Dies gilt insbesondere für die oberflächennahen Abflußkomponenten Q_o und Q_{do} . Vor allem Q_{do} ist weitgehend auf die Verbreitung des Ortsteinhorizontes beschränkt, der nach SCHMIDT & RAU (1930) vorwiegend im Deckschutt des sm und smc2 anzutreffen ist (Kap. 2.3).

3.7.2 Rotenbach

Bei der Abflußseparation am Rotenbach kristallisierte sich der Grundwasserabfluß (Q_g) als bestimmende Komponente heraus, die im Meßzeitraum 1987/88 ca. 2/3 des Gesamtabflusses stellt (Tab. 10). Wie in Kap. 3.4.3 beschrieben, liegt hier ein erheblicher unterirdischer Grundwasserzustrom (Q_{gw}) in das oberirdische Einzugsgebiet des Rotenbaches vor. Dieser Grundwasseranteil kann nur über die Wasserbilanz ($Q=N-V$) abgeschätzt werden. Daraus ergibt sich ein Gesamtabfluß von 1430 mm/a für das Jahr 1987 bzw. 1650 mm/a für 1988 (Tab. 7, Kap. 3.4.3). Die Differenz zu den tatsächlich am Wehr gemessenen Gesamtabflüssen gibt den Grundwasserzustrom Q_{gw} an:

$$Q_{gw} = Q_{ges} - Q_{Wasserbilanz}$$

$$1987 Q_{gw} = 3090 - 1427 = 1663 \text{ mm/a}$$

$$1988 Q_{gw} = 3291 - 1648 = 1643 \text{ mm/a}$$

Mit Hilfe von Q_{gw} kann die aus dem Gebiet abgeflossene Grundwassermenge Q_{gRb} berechnet werden:

$$Q_{gRb} = Q_g - Q_{gw}$$

$$1987 Q_{gRb} = 2023 - 1663 = 360 \text{ mm/a}$$

$$1988 Q_{gRb} = 1975 - 1643 = 332 \text{ mm/a}$$

Somit stammen nur ca. 16% des Grundwassers aus der Versickerung bzw. der Grundwasserneubildung innerhalb des oberirdischen Einzugsgebietes des Rotenbaches, was aus Abb. 26 nach Auftrennung der Grundwasserkomponente Q_g in Q_{gw} und Q_{gRb} ersichtlich wird.

Es bleibt festzuhalten, daß die Grundwasserneubildung im oberirdischen Einzugsgebiet Rotenbach deutlich geringer ist als am Seebach. Während der Q_g -Anteil am Seebach in den Jahren 1987/88 im Mittel ca. 38% des Gesamtabflusses einnimmt, erreicht der Q_{gRb} -Anteil am Rotenbach nur ca. 22%. Dagegen übertrifft der Deckschichtenabfluß Q_d im Rotenbachgebiet den am Seebach bei weitem (Tab. 10). Dies dürfte vor allem auf die weit mächtigeren Deckschichten und das noch steilere Relief am Rotenbach zurückzuführen sein (Kap. 2.3).

Der laterale Hangwasserstrom in den oberen Deckschichtenbereichen und über die Ortsteinlagen Q_{dO} ist ebenfalls größer als am Seebach. Hier scheint sich eine größere Verbreitung des Ortsteines, wie sie auch von KLAIBER (1987) anhand von mehreren Schürfgaben festgestellt wurde, auf die Bildung von Q_{dO} positiv auszuwirken.

Der oberflächennahe Abfluß Q_o ist gegenüber dem Seebach stark reduziert. Das Rotenbachgebiet wird vornehmlich von Blockschuttdecken mit einem ausgeprägten Blockhorizont im oberen Bereich eingenommen, während sich im Zentrum des Gebietes ein mächtiger Blockstrom in einer Mulde talwärts erstreckt (Abb. 3c, Kap. 2.3). Es ist nur eine dünne und lückenhafte Bodendecke vorhanden, sodaß Niederschläge nahezu ungehindert über die oft unverfüllten Blockzwischenräume eindringen und tiefer gelangen können. Die Bildung von oberflächennahem Abfluß ist in diesen Bereichen kaum möglich. Vor allem in Trockenjahren dürfte der oberflächennahe Abfluß am Rotenbach kaum eine Rolle spielen.

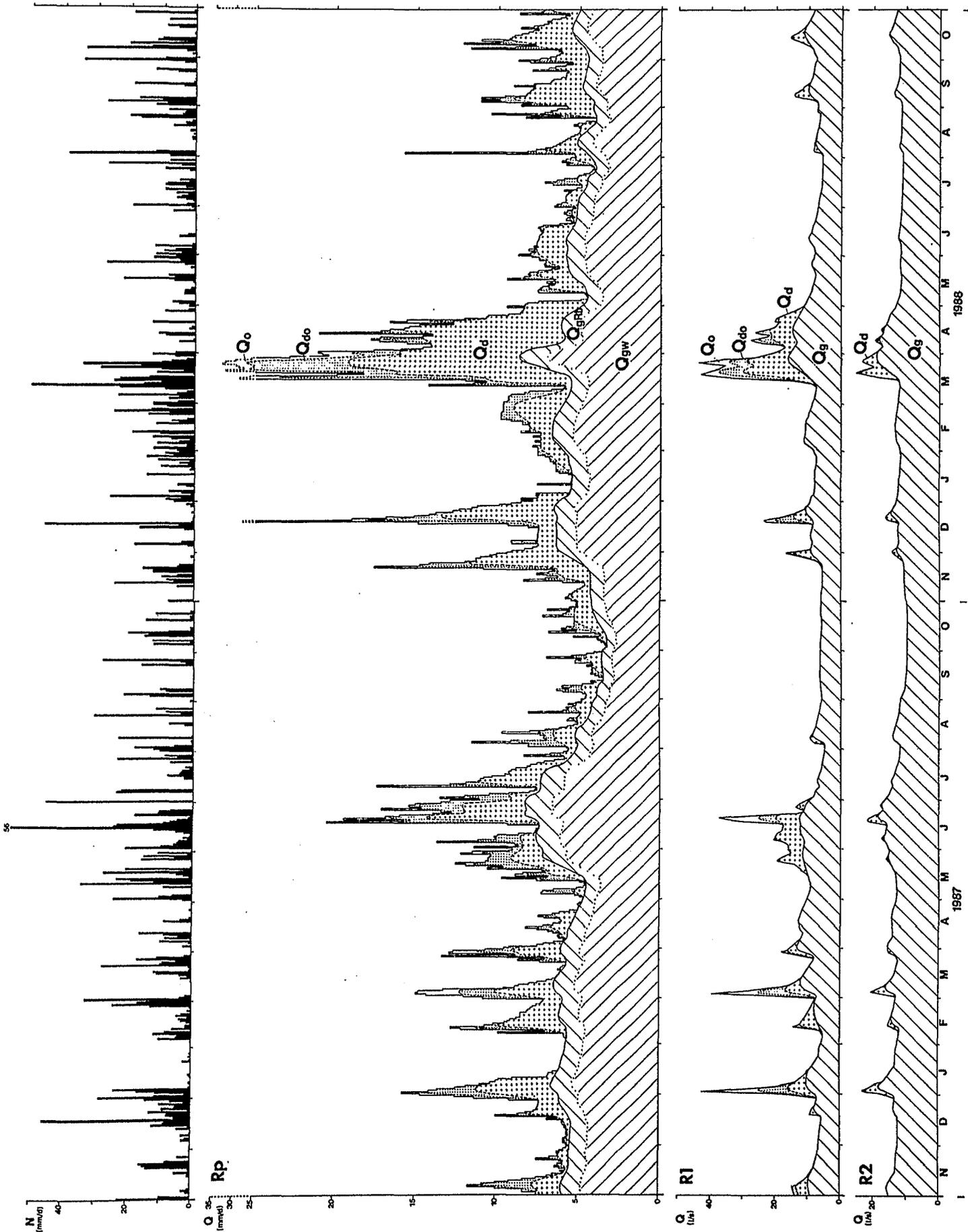


Abb. 26: Abflußganglinie des Rotenbaches und der Rotenbachquellen mit Niederschlägen 1987 und 1988

Der Grundwasserabfluß entstammt fast ausschließlich den beiden Trinkwasserquellen R1 und R2. Im Gegensatz zu Sb8 am Seebach (Abb. 25) werden die beiden Quellen nicht ausschließlich vom Kluftaquifer gespeist. Besonders R1 korrespondiert bei Hochwasser mit den Deckschichten und erreicht sehr hohe Abflußspitzen, die von oberflächennahem Abfluß gebildet werden (Abb. 26). Die Quelle R2 zeichnet sich durch einen ausgeglicheneren Verlauf aus und hat lediglich bei Hochwasser einen geringen Zufluß von Deckschichtenwasser.

3.7.3 Kleine Kinzig

An der Kleinen Kinzig liegt in Übereinstimmung zum Seebach kein unterirdischer Grundwasserzustrom in das Einzugsgebiet vor. Dennoch ist der Grundwasseranteil am Gesamtabfluß mit ca. 60% in beiden Meßjahren weit höher als am Seebach. Dagegen sind trotz vergleichbarer Niederschlagshöhen sowohl die Abflußanteile aus den Deckschichten als auch der oberflächennahe Abfluß stark reduziert (Tab. 10). Dies verdeutlicht auch der ruhigere Verlauf der Ganglinie der Kleinen Kinzig, die im Vergleich zu den anderen Gebieten gedämpft auf Niederschläge reagiert (Abb. 27). Dazu bemerkt IROUSCHEK (1989), daß der Anteil verschiedener Abflußkomponenten stark von der Topographie, vom geologischen Bau des Einzugsgebietes sowie von der Bodenausbildung und der Deckschichtenmächtigkeit beeinflusst wird.

Die Topographie betreffend hat sich im Gebiet der Kleinen Kinzig mit seinen großen Hochflächenanteilen ein weit schwächeres Relief herausgebildet (Kap. 2.1). Es kommt nicht so leicht zu hangparallelem Abfluß an oder nahe der Oberfläche, der zudem langsamer abfließt, was die geringeren Leerlaufkoeffizienten verdeutlichen (Tab. 9, Kap. 3.6). Dem Niederschlagswasser bleibt mehr Zeit, in die Deckschichten zu infiltrieren. Dies gilt auch für das Abflußverhalten in den Deckschichten, wo der laterale Hangwasserstrom aufgrund geringerer Hangneigung nicht so ausgeprägt ist wie in den anderen Gebieten.

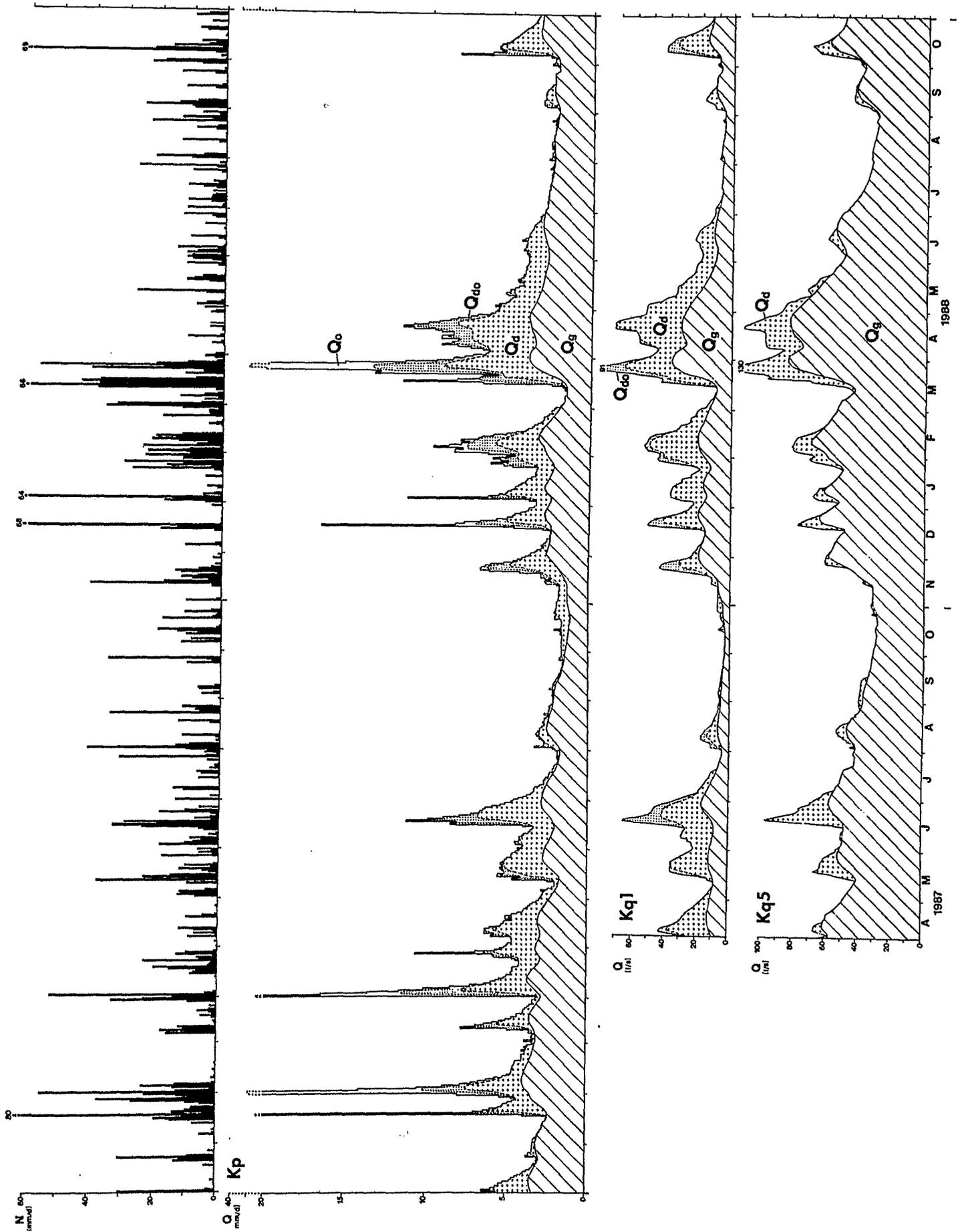


Abb. 27: Abflussganglinie der Kleinen Kinzig und der Quellen Kq1 und Kq5 mit Niederschlägen 1987 und 1988

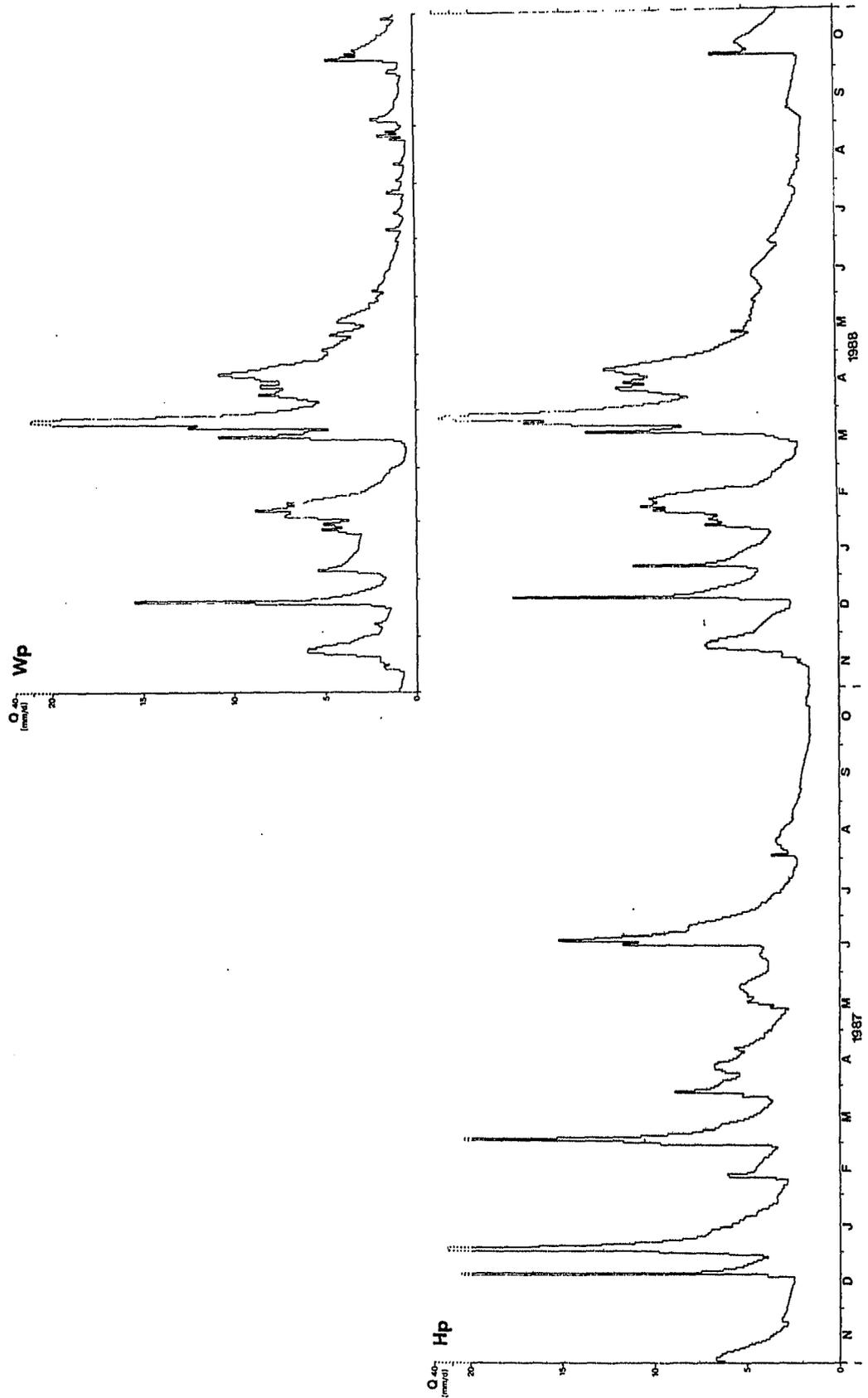


Abb. 28: Abflußganglinie des Weierbaches und des Huttenbächles

Die Boden- bzw. Deckschichtenausbildung betreffend wirkt sich vor allem die in diesem Gebiet geringere Verbreitung des Ortsteines negativ auf die Bildung von hangparallelem Abfluß aus den oberen Deckschichtenbereichen aus (Kap. 3.5). Der Q_{d0} -Anteil ist gegenüber dem Seebach stark reduziert (Tab. 10). Das Sickerwasser kann relativ rasch durch die im Mittel etwas geringmächtigeren Deckschichten in Richtung Festgesteinsaquifer vordringen. Darauf weist auch das schnelle Ansprechen der Quellen Kq1 und Kq5 hin (Kap. 3.5). Dabei zeigen beide Quellen eine Verbindung zu den Deckschichten, wobei vor allem die flachere Quelle Kq1 einen großen Teil ihrer Schüttungsmenge aus den Deckschichten bezieht (Abb. 27).

An Huttenbächle und Weiherbach wurden keine Abflußseparationen durchgeführt. Der Verlauf der Ganglinien (Abb. 28) sowie die ermittelten Leerlaufkoeffizienten (Kap. 3.6) zeigen allerdings, daß die Verhältnisse am Huttenbächle denen an der Kleinen Kinzig entsprechen, während das Abflußverhalten im steilen Weiherbachgebiet dem des Seebaches sehr nahe kommt.

3.7.4 Grundwasserneubildung

Im Anschluß an die Abflußseparation erscheint es sinnvoll, die eigenen, über das Leerlaufverhalten und Quellschüttungen ermittelten Werte für die Grundwasserneubildung mit anderen Verfahren zu vergleichen. Dazu wurde die Grundwasserneubildung nach den i.a. üblichen Verfahren bestimmt und die ermittelten Werte in Tab. 11 einander gegenübergestellt.

(mm/a)	Jahr	α -Werte	Natermann Qg-Linie	Wundt MoMNQ	Wundt SoMNQ	Wundt langj.	Kille
Sb	1985	553	594	521	507	630	-
	1986	568	715	627	535		464
	1987	695	886	733	754		687
	1988	670	851	957	711		-
Rb	1987	2023	2153	1879	1771	-	-
	1988	1975	2017	2068	1777	-	-
KK	1987	936	1035	909	724	-	891
	1988	963	1047	1004	987	-	-

Tab. 11: Grundwasserneubildungsraten (Q_g in mm/a) in den Untersuchungsgebieten

Zunächst wurde die Grundwasserneubildungsrate nach dem oben beschriebenen Q_g -Linien-Verfahren nach NATERMANN (1958) auf graphischem Wege ermittelt.

WUNDT (1958) berechnet die Grundwasserneubildung durch statistische Auswertung der gewässerkundlichen Hauptzahlen. Er nimmt an, daß der niedrigste Tagesabfluß eines Monats ausschließlich aus Grundwasser besteht. Somit errechnet sich für die Grundwasserneubildung aus den monatlichen Kleinstabflußspenden des gesamten Jahres ($1/12$ MoMNO) bzw. aus denen des Sommerhalbjahres ($1/6$ SoMoMNO) ein Wert für den Mindestgrundwasserabfluß.

KILLE (1970) korrigiert das Verfahren nach WUNDT auf graphischem Wege und scheidet damit Extremwerte aus, die aus einem wechselnden Anteil von Zwischenabfluß im Vorfluter vor allem während der Wintermonate resultieren.

Für die Jahre 1986 und 1987 wurden die von IROUSCHEK (1989) nach WUNDT und KILLE errechneten Werte am Seebach und der Kleinen Kinzig übernommen.

Die anhand der verschiedenen Verfahren ermittelten Werte stimmen recht gut überein (Tab. 11). Die höchsten Werte vermittelt das Verfahren nach NATERMANN. Durch das Anlegen der Q_g -Linie an die Tiefpunkte der Abflußganglinie erhält man einen Maximalwert für den Grundwasserabfluß. Vor allem in Naßjahren dürften die ermittelten Werte zu hoch sein, da auch in den Tiefpunkten meist noch Deckschichtenwasser am Abfluß beteiligt ist.

Etwas unregelmäßigere Werte liefert das SoMoMNO-Verfahren nach WUNDT. Besonders am Rotenbach und 1987 an der Kleinen Kinzig weichen die Werte etwas stärker nach unten ab. Dabei ist bei der Auswertung von jeweils einem Jahr Vorsicht geboten, da die von WUNDT getroffenen Annahmen in erster Linie für langjährige Meßreihen gelten. So liefert dieses Verfahren vor allem bei der Auswertung langjähriger Meßreihen, die nur am Seebach vorliegen, einen zuverlässigen Wert, der im vorliegenden Fall gut mit den eigenen übereinstimmt.

3.8 Quell-Einzugsgebiete

Nach Bestimmung der einzelnen Abflußkomponenten können die unterirdischen Einzugsgebiete der Quellen berechnet werden. Aus der mittleren Quellschüttung (MQ) und dem Grundwasserabfluß Q_g als Abflußspende kann folgende Beziehung hergeleitet werden:

$$F_u = MQ / Mq_g \quad (l/s) / (l/s \cdot km^2) = km^2$$

Bei Quellen, deren Schüttung sich aus unterschiedlichen Abflußkomponenten zusammensetzt, werden die entsprechenden Abflußanteile mitberücksichtigt. Dies ergibt z.B. für Kq1 folgende Beziehung:

$$F_u = MQ / Q_g + Q_d = MQ / Mq_{g+d}$$

Die Größe der Quell-Einzugsgebiete schwankt je nach Niederschlagsdargebot von Jahr zu Jahr. Dies betrifft vor allem die Basisquellen, die den Festgesteinsaquifer entleeren. Bei hohem Grundwasserstand können sich wesentlich andere hydraulische Verbindungen im Aquifer ergeben als bei Niedrigwasser. Kluftsysteme, die bei hohem Grundwasserstand verbunden sind, können mit absinkendem Grundwasserspiegel getrennt werden. Bereits geringe Grundwasserspiegelschwankungen haben oft starke Verschiebungen der unterirdischen Wasserscheide zur Folge (IROUSCHEK, 1989).

Das Einzugsgebiet der Basisquelle Sb8 schwankte innerhalb des Meßzeitraumes je nach Grundwasserstand zwischen 1,4 und 1,7 km² um einen Mittelwert von 1,5 km² (Tab. 12). Unter der Annahme, daß die Quelle noch von Deckschichtenwasser beeinflusst wird, ermittelte IROUSCHEK (1989) ein Einzugsgebiet von 0,9 km², während sich an der Seebachquelle Sb1 übereinstimmende Werte ergaben.

	NQ	MQ (l/s)	HQ	F _u (km ²)	NQ	MQ (l/s · km ²)	HQ
Sb1	0,03	0,2	1,0	0,006	5,0	33,3	167,0
Sb8	16,7	30,0	47,1	1,6	10,4	20,0	31,4
R1	5,0	10,5	44,6	0,9	5,6	11,7	50,0
R2	9,7	13,1	25,4	0,9	10,8	14,6	28,2
Kq1	2,2	22,8	91,6	0,6	3,7	25,3	102,0
Kq5	24,4	54,6	130,0	1,8	13,6	30,3	72,2

Tab. 12: Quelleinzugsgebiete (F_u), Quellabflußmengen und -spenden

Für die Rotenbachquellen R1 und R2 wurde jeweils ein Einzugsgebiet von ca. 0,9 km² bestimmt. Liegen die Einzugsgebiete der im Hang übereinander austretenden Quellen im Aquifer ebenfalls übereinander, so ergibt sich eine Mindestgröße von 0,9 km² für das unterirdische Einzugsgebiet des Rotenbaches. Dies bestätigt Berechnungen von KLAIBER (1987), der für 1986 ein Einzugsgebiet von 0,83 km² angibt. Somit ist am Rotenbach das unterirdische Einzugsgebiet

deutlich größer als das oberirdische ($0,52 \text{ km}^2$). Infolgedessen erscheint es ratsam die bestehende Schutzgebietsabgrenzung um die Trinkwasserquellen am Rotenbach nochmals zu überprüfen. Dabei läßt sich die Form der Einzugsgebiete anhand der durchgeführten Untersuchungen nicht bestimmen. Quelleinzugsgebiete im Kluftgrundwasserleiter Buntsandstein dürften eher längliche Formen aufweisen. Färbversuche in Kluftgrundwasserleitern (SCHULZ, 1957) bestätigen, daß der Grundwasserabfluß weniger flächig, sondern eher lateral erfolgt. Eingegebene Tracer konnten in vielen Fällen nur in einer oder in eng benachbarten Quellen nachgewiesen werden.

Aus der korrigierten Einzugsgebietsgröße ergeben sich auch für die Abflußpenden aus dem Rotenbachgebiet neue und vor allem sinnvollere Werte, die die Einzugsgebietsberechnungen untermauern. Mit 52 l/s km^2 mittlerer Abflußpende ergeben sich auch am Rotenbach mit den anderen Gebieten gut übereinstimmende Werte (Tab. 8, Tab. 12).

Das größte Quelleinzugsgebiet mit $1,8 \text{ km}^2$ wurde am Jägerbrunnen (Kq5) an der Kleinen Kinzig ermittelt. Nach den Wasserbilanzen (Kap. 3.4) erstreckt sich das gesamte Quelleinzugsgebiet innerhalb des oberirdischen Einzugsgebietes der Kleinen Kinzig, da kein Grundwasserzustrom festgestellt werden konnte. Dasselbe gilt für die flachere Quelle Kq1, die neben Grundwasser einen erheblichen Anteil an Deckschichtenwasser führt.

4. Hydrochemie

4.1 Analytik

Um die physikalisch-chemischen Parameter des Niederschlages und der verschiedenen Abflußkomponenten zu erfassen, wurden regelmäßig der Niederschlag sowie Quellen und Vorfluter beprobt. Zudem wurden Sickerwässer über Sickerplatten aufgefangen und analysiert.

Im Gelände wurden folgende Messungen sofort durchgeführt:

- pH-Wert
- Temperatur in °C
- elektrolytische Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$
- HCO_3 -Gehalt

Der pH-Wert, die Temperatur und die elektrische Leitfähigkeit wurden mit batteriebetriebenen Meßgeräten der Firma WTW gemessen (WTW pH 90, WTW LF 91). Zur Bestimmung des Hydrogencarbonates wurden nach DIN 38409-H6 mit Hilfe des Indikators Methylorange und 0,01 n HCl jeweils 100 ml Probenwasser bis zum Farbumschlag titriert. Aus der verbrauchten Menge 0,01 n HCl wird die HCO_3 -Konzentration in mg/l berechnet.

Im Labor wurde der Ioneninhalt der Wasserproben bestimmt. Folgende Ionen sind regelmäßig auf ihre Konzentration hin gemessen worden:

- Kalium: AAS 1100 Perkin Elmer
- Natrium: AAS 1100 Perkin Elmer
- Calcium: AAS 1100 Perkin Elmer
- Magnesium: AAS 1100 Perkin Elmer

- Nitrat: Ionenchromatograph Dionex 2000i
- Chlorid: Ionenchromatograph Dionex 2000i
- Sulfat: Ionenchromatograph Dionex 2000i

Außerdem wurden am Seebach Stichproben auf Aluminium am AAS untersucht.

4.2 Niederschlag

Der Chemismus des Niederschlages ist in den letzten Jahren mit zunehmenden Waldschäden immer mehr in den Mittelpunkt wissenschaftlichen Interesses gerückt. Mit Entwicklung der Industrie seit Mitte des 19. Jahrhunderts nahmen die Schadstoffkonzentrationen in der Luft ständig zu. Die pH-Werte sind gegenüber der vorindustriellen Zeit zurückgegangen, was zu einer Versauerung der Niederschläge führte (ULRICH et al., 1979). Dabei traten diese Verunreinigungen im Niederschlag in den vergangenen Jahren auch zunehmend in emittententfernten Gebieten und nicht nur in den Industriezentren auf. Einen allgemeinen Überblick über die Entwicklung des Niederschlagschemismus gibt IROUSCHEK (1989). Die Ausbreitung von Luftschadstoffen in der Atmosphäre ist das Thema zahlreicher Untersuchungen (z.B. UBA, 1980; ULRICH et al., 1978; VDI, 1983).

Beim Eintrag atmosphärischer Luftverunreinigungen über den Niederschlag werden prinzipiell eine nasse und eine trockene Deposition unterschieden. Die nasse Deposition umfaßt alle Stoffe die zusammen mit Niederschlägen in Form von Regen, Schnee oder Hagel die Erdoberfläche erreichen. Dagegen bezeichnet die trockene Deposition die direkte Ablagerung von Gasen und Partikeln auf natürliche Oberflächen (Vegetation, Boden, Wasser, Schnee). Vor allem im Baumbestand spielt die trockene Deposition durch die Filterwirkung des Kronenraumes eine große Rolle. Zudem kommt es durch die Interzeptionsverdunstung zu einer relativen Stoffanreicherung. Besonders Schwefel, Magnesium und Calcium erfahren so eine deutliche Konzentrationserhöhung.

Da man davon ausgehen kann, daß die aus der Luft gefilterten, bzw. trocken deponierten Stoffe mit Ausnahme von Stickstoffverbindungen nur in geringem Ausmaß von den Pflanzen aufgenommen werden, kann der Stoffinhalt im Bestandesniederschlag (Kronentraufe) als Summe aus der nassen und trockenen Deposition betrachtet werden. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß deponierte Protonen im Kronenraum durch Auswaschung von Kationen (leaching) z.T. abgepuffert werden (MATZNER, 1985). Davon betroffen ist vor allem Kalium, das über die Spaltöffnungen der Blätter ausgeschieden wird (FASSBENDER, 1977). Trotz dieser Pufferung ist der pH-Wert im Bestandesniederschlag aufgrund der stark erhöhten trockenen Deposition in der Regel wesentlich tiefer als im Freiland.

Am Seebach schwanken die pH-Werte im Freilandniederschlag (NF) zwischen 3,5 und 5,5 um einen Mittelwert von 4,4 (Tab. 13). Im Bestandesniederschlag (NB) stellen sich zwischen 2,7 und 4,5 bei einem Mittelwert von 3,9 deutlich niedrigere pH-Werte ein. Dabei sind tiefe pH-Werte meistens mit erhöhten SO_4 -Konzentrationen verbunden. Nach GEORGII (1981) wird der heute

weit verbreitete Luftschadstoff Schwefeldioxid (SO_2) in Aerosolen hauptsächlich zu SO_4 umgewandelt und als Schwefelsäure (H_2SO_4) mit dem Niederschlag aus der Atmosphäre entfernt. Entsprechend groß ist die Auswirkung des Sulfatgehaltes auf den Versauerungsgrad des Niederschlages.

Die Sulfatwerte liegen im Freiland zwischen 0,8 und 5,4 mg/l um einen Mittelwert von 2,5 mg/l. Im Bestand steigt der SO_4 -Gehalt um ca. das 2-3 fache auf durchschnittlich 7,2 mg/l bei Schwankungen zwischen 1,0 und 11,0 mg/l an. Eine ähnliche Anreicherung im Bestand erfährt das Nitrat mit 4,0 mg/l im Mittel (0,7 bis 8,6 mg/l) gegenüber 2,2 mg/l (0,5 bis 4,5 mg/l) im Freiland. Dagegen sind die Chlorid-Konzentrationen im Bestand nur geringfügig erhöht (Tab. 13).

Gebiet	Freiland			Bestand		
	Sb	Rb	KK	Sb	Rb	KK(*)
Meßzeitraum	85-88	87-88	87-88	85-88	87-88	87-88
pH	4,4	4,5	4,8	3,9	4,0	4,4
el. LF ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	26,3	29,0	30,3	63,2	68,4	41,5
K^+ (mg/l)	0,41	0,63	0,49	1,47	2,04	1,45
Na^+ "	0,28	0,33	0,38	0,58	0,46	0,56
Ca^{++} "	0,63	0,59	0,90	1,36	1,43	1,40
Mg^{++} "	0,11	0,12	0,16	0,26	0,21	0,18
NO_3^- "	2,16	1,98	2,20	4,04	7,06	4,32
SO_4^{--} "	2,49	2,31	2,40	7,16	8,19	5,76
Cl^- "	1,25	1,22	1,48	1,86	1,69	1,65

Tab. 13: Mittelwerte der physikalisch-chemischen Parameter im Niederschlag (pH-Wert über mittlere H^+ -Ionen-Konzentrationen berechnet), ((*) Werte der Forstl. Versuchsanstalt)

Bei den Kationen wird vor allem Kalium durch die beschriebene Auswaschung aus den Baumkronen stark angereichert von durchschnittlich 0,4 mg/l (0,04 bis 1,1 mg/l) im Freiland auf 1,5 mg/l (0,6 bis 2,5 mg/l) im Bestand. Etwas geringeren, aber dennoch deutliche Konzentrationserhöhungen unterliegen die Erdalkalien Calcium und Magnesium. Hier fallen vor allem die starken Konzentrationsschwankungen im Bestandesniederschlag auf. Calcium erreicht bei einem Mittel von 1,4 mg/l Werte zwischen 0,4 und 5,2 mg/l, während die Magnesiumkonzentrationen von 0,1 bis 0,8 mg/l um einen Mittelwert von 0,26 mg/l schwanken. Dazu bemerkt EHMANN (1988), daß die Konzentration aller Inhaltsstoffe mit zunehmender Niederschlagshöhe abnimmt. Kommt es nach einer Trockenperiode zu einem Niederschlagsereignis, so werden die über die trockene

Deposition im Kronenraum angehäuften Stoffe zu Beginn des Ereignisses verstärkt ausgewaschen. Mit anhaltendem Niederschlag bzw. abnehmendem Stoffangebot im Kronenraum gehen die Konzentrationen zurück. Bei zwei direkt aufeinander folgenden Niederschlägen wird der 2. Niederschlag stets geringere Stoffkonzentrationen aufweisen als der vorangegangene. Dies gilt vor allem für die Erdalkalien und das Sulfat, die besonders stark durch die trockene Deposition im Kronenraum angereichert werden (IROUSCHEK, 1989). Dementsprechend steigt auch der pH-Wert mit anhaltender Regendauer an, während die Leitfähigkeit deutlich abnimmt (EHMANN, 1988).

Die im Rotenbachgebiet gemessenen pH-Werte im Freilandniederschlag liegen zwischen 3,5 und 6,5, wobei der tiefste pH-Wert wiederum mit den höchsten, im Meßzeitraum gemessenen Sulfat- und Nitratkonzentrationen von 5,2 bzw. 5,4 mg/l zusammenfällt. Im Bestandesniederschlag lag der pH-Wert zu diesem Zeitpunkt bei 3,0 mit stark erhöhten Sulfat- und Nitratkonzentrationen von 25,6 bzw. 15,2 mg/l. In dem westexponierten Gebiet Rotenbach sind die Sulfat- und Nitratkonzentrationen gegenüber den anderen Gebieten etwas erhöht (Tab. 13). Genauso deuten die etwas höheren Kaliumgehalte von durchschnittlich 2,0 mg/l bei großen Schwankungen von 0,6 bis 5,3 mg/l auf eine verstärkte Auslaugung des Kronenraumes hin. Dagegen erreichen sowohl Calcium und Magnesium als auch Natrium und Chlorid bei gut übereinstimmenden Mittelwerten nahezu dieselben Konzentrationsschwankungen wie am Seebach. Die Leitfähigkeiten sind im Niederschlag am Rotenbach aufgrund des etwas erhöhten Schadstoffeintrages gegenüber dem Seebachgebiet geringfügig erhöht.

An der Kleinen Kinzig sind die pH-Werte sowohl im Freiland als auch im Bestand etwas höher als in den Schwarzwaldkammgebieten Rotenbach und Seebach. Im Freilandniederschlag schwanken die pH-Werte zwischen 4,1 und 6,9 um einen Mittelwert von 4,8, während im Bestand pH-Werte zwischen 3,7 und 5,8 um einen Mittelwert von 4,4 erreicht werden. Die Sulfat- und Nitratkonzentrationen im Bestand liegen mit 4,3 bzw. 5,8 mg/l im Mittel deutlich unter den Werten am Rotenbach, wobei allerdings mit Schwankungen von 1,2 bis 22,8 mg/l SO_4 und 0,7 bis 18,1 mg/l NO_3 ebenso hohe Spitzenwerte erreicht werden. Gute Übereinstimmung zu Seebach und Rotenbach zeigen dagegen die Konzentrationen von Chlorid und den Kationen, wobei Kalium gegenüber dem Rotenbach ebenfalls etwas erniedrigt ist. Dementsprechend liegt die Leitfähigkeit im Bestandesniederschlag mit durchschnittlich $41,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ deutlich unter den Werten der anderen, höher belasteten Gebiete. Im Freiland wurden dagegen etwas erhöhte Leitfähigkeitswerte festgestellt. Hier fallen vor allem die stark erhöhten Ca-Konzentrationen zwischen 0,4 und 3,5 mg/l um einen Mittelwert von 0,9 mg/l auf. Diese Erhöhung gegenüber dem Freilandniederschlag der anderen

Gebiete dürfte auf die regelmäßig durchgeführte Ausbringung von Ca-Mg-Dünger im Bereich des Freilandtotalisators zurückzuführen sein, wodurch auch die Leitfähigkeit im Freilandniederschlag erhöht wird.

In allen Gebieten ist sowohl im Freiland- als auch im Bestandesniederschlag ein deutlicher Jahresgang der Stoffkonzentrationen mit erhöhten Werten in den Wintermonaten erkennbar (IROUSCHEK, 1989; SEEGER, 1986). Dies ist auf eine erhöhte trockene Deposition in den Winter- und Frühjahrsmonaten zurückzuführen. Ähnliche Beobachtungen machte EHMANN (1988), der die niedrigsten pH-Werte und somit den höchsten Protoneneintrag im Winter gemessen hat.

4.3 Oberflächennaher Abfluß (Q_0)

Am Seebach und Rotenbach wurde der oberflächennahe Abfluß mit Sickerplatten, die unmittelbar unterhalb des Oberbodens angebracht waren, beprobt (Abb. 10, SP1). Zusätzlich konnten in allen Gebieten während Niederschlagsereignissen Stichproben von oberflächennahem Abfluß aus Abflußrinnen entnommen werden, die nur während und unmittelbar nach dem Niederschlag wasserführend sind. An Weganschnitten im Bereich der Kleinen Kinzig drängt nach starken Niederschlägen an vielen Stellen Wasser unterhalb des Oberbodens aus dem Hang. Hier wurden weitere Proben zur Bestimmung des Stoffinhaltes im Q_0 entnommen.

Die in Tab. 14 aufgelisteten Werte geben jeweils die mittleren Stoffkonzentrationen des oberflächennahen Abflusses in den einzelnen Untersuchungsgebieten an. Insgesamt nimmt die Stoffkonzentration gegenüber dem Bestandesniederschlag geringfügig zu (Abb. 29-31). Nach EHMANN (1988) erfolgt die Anreicherung durch trockene Deposition auf Bodenvegetation und Streu, durch Auswaschung der in der Streu festgelegten Kationen, durch Pufferung mittels Kationenaustausch und Freisetzung von Aluminium aus Al-Hydroxiden im humosen Oberboden. Zusätzlich ist mit einer geringfügigen Aufkonzentrierung durch Verdunstung zu rechnen. Dennoch ist der Chemismus des oberflächennahen Abflusses gegenüber dem Bestandesniederschlag nur unwesentlich verändert (EINSELE et al., 1987). Die deutliche Zunahme der Leitfähigkeitswerte ist vor allem auf die Auswaschung von Huminstoffen zurückzuführen.

Die pH-Werte zeigen trotz der ausgewaschenen Huminstoffe praktisch keine Veränderung. Der Einfluß der Huminstoffe wird durch die Pufferung in der Streu und im Oberboden ausgeglichen.

Die Zunahme der Sulfat- und Nitratkonzentrationen vom Bestandesniederschlag zum oberflächennahen Abfluß ist vor allem auf die relative Stoffanreicherung durch den Wasserentzug der Pflanzen zurückzuführen.

Gebiet	Sb	Rb	KK
Meßzeitraum	85-88	87-88	87-88
pH	3,9	4,2	4,4
el. LF ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	94,0	82,0	79,0
K ⁺ (mg/l)	0,92	1,10	0,51
Na ⁺ "	0,48	0,93	1,22
Ca ⁺⁺ "	0,67	2,63	1,85
Mg ⁺⁺ "	0,19	0,70	0,65
Al ⁺⁺⁺ "	0,90	-	-
NO ₃ ⁻ "	6,21	7,11	5,51
SO ₄ ⁻⁻ "	7,00	7,57	5,10
Cl ⁻ "	2,10	2,44	2,43
HCO ₃ ⁻ "	0,00	0,00	0,00

Tab. 14: Mittelwerte der physikalisch-chemischen Parameter im oberflächennahen Abfluß Q₀ (pH-Werte über mittlere H⁺-Ionenkonzentrationen berechnet)

Die zurückgehenden Kationenkonzentrationen am Seebach werden durch erhöhte Al-Werte ausgeglichen (Abb. 29). Nach ULRICH (1981a) befinden sich die Oberböden an fast allen Standorten im Al-Pufferbereich. Zusätzlich weisen die zurückgehenden Ca- und Mg-Gehalte auf eine weitgehende Erschöpfung des Puffersystemes hin. Am Rotenbach scheint dagegen noch eine bessere Abpufferung im Boden gewährleistet zu sein. Hier steigen die Ca- und Mg-Konzentrationen gegenüber dem Bestandesniederschlag deutlich an (Abb. 30). Im Einzugsgebiet des Rotenbach wurden in den letzten Jahren wiederholt Ca-Mg-Dünger ausgebracht. Der deutliche Konzentrationsanstieg gegenüber dem Q₀ am Seebach könnte eine Auswirkung dieser Düngemaßnahmen sein. Im Bereich der Kleinen Kinzig, wo die Hochflächen zum Großteil vom karbonathaltigen Verwitterungsschutt des Oberen Buntsandsteines eingenommen werden (Abb.3c), konnte ebenfalls eine deutliche Zunahme der Erdalkaligehalte im oberflächennahen Abfluß gegenüber dem Bestandesniederschlag festgestellt werden (Abb.31). Die erhöhten Na-Gehalte sind auf die winterliche Salzstreuung auf der Straße, die das Einzugsgebiet der Kleinen Kinzig im oberen Teil durchschneidet, zurückzuführen. Die deutliche Abnahme der Kaliumkonzentrationen in allen Gebieten beruht auf der K-Fixierung der Böden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1984).

Einen Jahresgang zeigen lediglich die Nitratkonzentrationen, die neben dem Eintrag vor allem von der Nitrifikation abhängen. In kalten Perioden nehmen die NO_3 -Gehalte ständig ab, während sie vor allem in warmen Sommern ansteigen. Die Ganglinien der übrigen Ionen folgen den Konzentrationsschwankungen im Bestandesniederschlag.

4.4 Abfluß über dem Ortstein (Q_{dO})

Der Q_{dO} beschreibt den hangparallelen Abflußanteil über das Grobporensystem der oberen Deckschichten, der bevorzugt über die Ortsteinlagen mit geringer zeitlicher Verzögerung in Richtung Vorfluter abfließt (Kap.3.6). Am Seebach wurde der Q_{dO} mit Hilfe von Sickerplatten beprobt (Abb.10,Kap. 3.3). Dabei wurde der Abfluß über die unterhalb des Ortsteines liegende Sickerplatte SP3 ebenfalls dem Q_{dO} zugeordnet, da hier, wie über dem Ortstein, ein lateraler Hangwasserstrom über das Grobporensystem der oberen Deckschichten vorliegt. Am Rotenbach konnte der Q_{dO} ebenfalls mit einer Sickerplatte, die unmittelbar über dem Ortstein in die Deckschichten eingebunden wurde, beprobt werden. Zusätzlich ermöglichten mehrere, aus früheren Untersuchungen bestehende Schürfruben eine zusätzliche Beprobung des Q_{dO} nach stärkeren Niederschlägen. An der Kleinen Kinzig konnte der Q_{dO} -Abfluß an Weganschnitten, wo nach stärkeren Niederschlagsereignissen über dem Ortstein z.T. starke Wasseraustritte zu beobachten waren, erfaßt werden.

BENECKE et al. (1986) beschreiben das Grobporensystem der Deckschichten als spannungsfreies, "überkapillares" Hohlraumssystem, über das Schadstoffe und Säuren aufgrund der geringen Kontaktzeiten und -flächen mit der umgebenden Matrix ohne wirksame Pufferung bei insgesamt nur geringer Veränderung des Chemismus in den tieferen Untergrund gelangen können.

Die mittleren pH-Werte nehmen gegenüber dem Bestandesniederschlag und dem oberflächennahen Abfluß nur geringfügig zu. Lediglich am Seebach kann bei einem Anstieg von pH 3,9 im Q_O auf pH 4,3 im Q_{dO} von einer merklichen Veränderung gesprochen werden (Tab.15).

Die K-Konzentrationen nehmen im Q_{dO} weiter ab. Ein Großteil des über den Bestandesniederschlag verstärkt eingetragenen Kaliums wird im Boden fixiert und von den Pflanzen wieder aufgenommen. Die Na- und Cl-Konzentrationen werden weiter durch Verdunstung relativ angereichert. Die sehr hohen Na- und Cl-Konzentrationen an der Kleinen Kinzig sind auf eine starke Aufkonzentrierung des Sickerwassers vom Boden in die Deckschichten durch die winterliche Salzstreuung zurückzuführen.

Gebiet	Sb	Rb	KK
Meßzeitraum	85-88	87-88	87-88
pH	4,3	4,4	4,5
el. LF ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	38,7	50,0	55,3
K ⁺ (mg/l)	0,44	1,03	0,33
Na ⁺ "	0,59	1,29	3,38
Ca ⁺⁺ "	0,94	2,47	2,15
Mg ⁺⁺ "	0,29	0,60	0,82
Al ⁺⁺⁺ "	0,70	-	-
NO ₃ ⁻ "	4,93	5,32	5,12
SO ₄ ⁻⁻ "	4,58	6,15	4,78
Cl ⁻ "	2,20	2,83	6,39
HCO ₃ ⁻ "	0,00	0,00	0,00

Tab. 15: Mittelwerte der physikalisch-chemischen Parameter im Abfluß über den Ortstein Q_{d0} (pH-Werte über mittlere H^+ -Ionen-Konzentrationen berechnet)

Am Seebach und an der Kleinen Kinzig steigen die Erdalkali-Gehalte durch Kationenaustausch in den Deckschichten weiter an, während am Rotenbach die Ca- und Mg-Konzentrationen gegenüber dem Q_0 etwas zurückgehen. Dagegen nehmen die Al-Konzentrationen allmählich ab, was wahrscheinlich auf eine Ausfällung als AlOHSO_4 zurückzuführen ist (PRENZEL, 1983). Darauf deuten auch die abnehmenden SO_4 -Konzentrationen hin, wobei vor allem am Seebach eine starke Abnahme vom Q_0 zum Q_{d0} festzustellen ist. Offensichtlich wird SO_4 im Boden gespeichert. Auch ULRICH & PANKRATH (1983) geben dabei vor allem die Bildung von Aluminiumhydroxosulfat (AlOHSO_4) für die Aufspeicherung an. KREUTZER (1984) sieht als weitere Möglichkeit die Adsorption an den Oberflächen von neu gebildeten Alumosilikaten und Aluminiumhydroxiden. Nach BENECKE (1987) sind diese Arten der Speicherung bei Boden-pH-Werten zwischen 4,2 und 4,5 wirksam. Bei einer weiteren Absenkung des pH-Wertes können schlagartig große Säuremengen freigesetzt werden.

Die NO_3 -Konzentrationen gehen im Q_{d0} gegenüber dem oberflächennahen Abfluß deutlich zurück. Ein Großteil des über den Bestandesniederschlag eingetragenen Stickstoffes wird von der Vegetation aufgenommen.

Einen deutlichen Rückgang zeigen die Leitfähigkeitswerte. Dies ist vor allem auf die mit der Tiefe abnehmenden TOC-Konzentrationen zurückzuführen. MATTHESS (1973) beschreibt eine Abnahme der TOC-Konzentrationen mit der Tiefe aufgrund von Adsorption an Tonmineralen, Fällung, Ausflockung sowie Bildung von organomineralischen Verbindungen und unlöslichen Komplexen.

4.5 Deckschichtenabfluß (Q_d)

Der Deckschichtenabfluß konnte über flache Hangschuttquellen, die vorwiegend in den oberen Hangbereichen austreten, erfaßt werden. Am Seebach wurde vor allem die Hangschuttquelle Sb1 regelmäßig beprobt. Zusätzlich lieferte die Sickerplatte SP4 (Abb.10) noch tieferes Deckschichtenwasser, dessen Chemismus mit der Quelle Sb1 übereinstimmt. Am Rotenbach wurden nahe der Rotenbachquellen zwei 2 m lange Standrohre (S1 und S2) in die Deckschichten gesetzt, um den Q_d zu beproben (Abb. 7b). Desweiteren wurden Stichproben von Hangwasseraustritten im oberen Steilhang des Gebietes genommen. An der Kleinen Kinzig wird vor allem die Quelle Kq1 bei Hochwasser zu einem großen Teil aus Deckschichtenwasser gespeist. Sie zeigt nahezu denselben Chemismus wie die Quelle Wq4 am Weiherbach. Lediglich die Na- und Cl-Konzentrationen sind in Wq4 deutlich geringer, da im Einzugsgebiet des Weiherbaches keine Salzstreuung erfolgt. Auch hier konnten noch zusätzlich beprobte Hangwasseraustritte die Ergebnisse untermauern.

Die weiter ansteigenden pH-Werte zeigen eine zunehmende Pufferung des Sickerwassers in den tieferen Deckschichten an. In den engeren Porenräumen der tieferen Deckschichten laufen die Sickerwasserbewegungen verzögert ab. Es verbleibt eine längere Zeit zu Austauschvorgängen und somit zur Abpufferung der eingetragenen Säuren. Zudem ist die Kontaktfläche des Sickerwassers mit der Matrix höher als in den oberen, von Grobporen bestimmten Bereichen. Dementsprechend steigen auch die Ca- und Mg-Gehalte im Deckschichtenwasser gegenüber dem Q_{d0} deutlich an. Auch am Seebach werden jetzt höhere Erdalkali-Gehalte erreicht (Tab. 16). Dagegen nehmen an der Kleinen Kinzig die Ca- und Mg-Konzentrationen nur noch geringfügig zu. Die tieferen Deckschichten der Hanglagen, über die der größte Teil des Q_d abfließt, werden vorwiegend vom Verwitterungsschutt des karbonatarmen Mittleren Buntsandsteines gebildet. Dagegen beinhalten die oberen Bereiche meist einen Anteil an karbonatreicherem Schutt aus dem Oberen Buntsandstein. Infolgedessen kommt es im Q_d nur noch zu einer geringen Anreicherung von Erdalkalien. Dabei könnten allerdings auch die in diesem Gebiet durchgeführten Walddüngungen eine Rolle spielen, die sich auf die tieferen Bereiche nicht oder noch nicht auswirken. Der geringe Erdalkali-Gehalt zeigt aber auch, daß der tiefere Deckschichtenabfluß zumindest stellenweise ohne große Verzögerung direkt aus dem Niederschlag gebildet werden kann. Über bevorzugte Bahnen oder in blockreichen Abschnitten kann der Niederschlag sehr schnell in die tieferen Deckschichten infiltrieren. Hier besteht auch die Gefahr eines raschen Eintrages von Schadstoffen und Säuren in tiefere Bereiche und in Richtung Grundwasser.

Gebiet	Sb	Rb	KK
Meßzeitraum	85-88	87-88	87-88
pH	4,4	4,9	4,9
el. LF ($\mu\text{S/cm}$)	48,4	43,9	49,4
K ⁺ (mg/l)	0,97	1,65	0,89
Na ⁺ "	0,61	1,28	3,55
Ca ⁺⁺ "	1,62	2,88	2,30
Mg ⁺⁺ "	0,36	0,85	0,87
Al ⁺⁺⁺ "	0,50	-	-
NO ₃ ⁻ "	3,46	4,53	3,39
SO ₄ ⁻⁻ "	5,50	6,03	5,08
Cl ⁻ "	2,23	2,30	6,49
HCO ₃ ⁻ "	0,39	2,87	2,50

Tab. 16: Mittelwerte der physikalisch-chemischen Parameter im Deckschichtensabfluß Q_d (pH-Werte über mittlere H^+ -Ionen-Konzentrationen berechnet)

Ein deutlicher Konzentrationsanstieg durch den verstärkten Kationenaustausch ist auch beim Kalium in allen Gebieten festzustellen.

Die Na- und Cl-Konzentrationen zeigen gegenüber dem Q_{d0} keine starke Veränderung. An der Kleinen Kinzig wirkt sich die Salzstreuung bis in die tieferen Deckschichten aus.

Zum ersten Mal treten auch geringe Hydrogencarbonat-Gehalte auf, was eine zunehmende Pufferung anzeigt. Dem pH-Wert entsprechend ist die HCO_3^- -Konzentration im Deckschichtenwasser des Seebachgebietes am geringsten. Nur nach längeren Trockenperioden ist überhaupt ein HCO_3^- -Gehalt nachweisbar, während sich das Deckschichtenwasser ansonsten noch im Aluminiumpufferbereich befindet. Dagegen konnten am Rotenbach und der Kleinen Kinzig bei Trockenwetter HCO_3^- -Gehalte von 5 bis 6 mg/l bei maximalen pH-Werten von 5,2 bis 5,4 gemessen werden.

Die NO_3^- -Konzentrationen gehen mit zunehmender Tiefe weiter zurück, wobei am Seebach starke Schwankungen von 0,6 bis 7,4 mg/l um einen Mittelwert von 3,5 mg/l erfolgen. Ein Jahresgang der Nitratkonzentrationen im Q_d ist nach IROUSCHEK (1989) nur in trockenen Jahren erkennbar. So nehmen am Seebach die NO_3^- -Konzentrationen von 3,5 bis 4,8 mg/l nach der Schneeschmelze im Frühjahr 1985 im Verlauf des trockenen Spätsommers auf Werte von durchschnittlich 0,6 mg/l ab (SEBGER, 1986). Dies deutet auf einen direkten

Einfluß des Bestandesniederschlages auf den Chemismus des Deckschichtenabflusses hin. In den folgenden Jahren mit feuchten Sommermonaten ist der Jahresgang stark gedämpft, da durch die häufigen Niederschläge ständig Wasser zufließen, die an Nitrat höher konzentriert sind.

Dagegen ist bei den SO_4 -Gehalten keine große Veränderung festzustellen. Lediglich am Seebach zeigt sich wieder ein leichter Anstieg der SO_4 -Konzentrationen. Bei Aussagen über derart geringe Schwankungen kann allerdings die heterogene Ausbildung der Deckschichten nicht außer Betracht gelassen werden. Wie schon beschrieben können stellenweise auch in die tieferen Deckschichten Niederschlagswässer schnell infiltrieren und entsprechend hohe Schadstoffgehalte verursachen (vgl. EHMANN, 1988).

Sulfat und Nitrat sind in den oberflächennahen Wässern Q_0 bis Q_d die dominierenden Anionen. Bei den Kationen dominieren im Q_0 vor allem die Protonenkonzentrationen und Aluminium, während mit zunehmender Tiefe im Q_d die Erdalkalien einen wachsenden Anteil einnehmen. An der Kleinen Kinzig wird dieses Bild durch die Salzstreuung zugunsten von Chlorid und Natrium verfälscht (Abb. 29-31).

4.6 Grundwasserabfluß (Q_d)

Der Chemismus des Grundwasserabflusses konnte über die Beprobung der Basis- und Schichtquellen erfaßt werden. In jedem der drei Untersuchungsgebiete befinden sich ein oder zwei ergiebige Grundwasserquellen, die zu einem großen Teil den Grundwasserabfluß aus dem jeweiligen Gebiet bestreiten. Dabei werden sowohl die Fliegenlochquelle (Sb8) am Seebach, als auch die Rotenbachquellen (R1 und R2) und der Jägerbrunnen (Kq5) an der Kleinen Kinzig als Trinkwasserlieferanten genutzt.

4.6.1 Fliegenlochquelle (Sb8)

Die Fliegenlochquelle fließt an der Grenze vom Buntsandstein zum Grundgebirge als Basisquelle aus. Bei der Passage durch den Buntsandsteinaquifer und beim Kontakt mit dem Grundgebirge erfahren die Wässer die stärkste chemische Veränderung. Der Lösungsinhalt ist gegenüber dem Deckschichtenabfluß stark erhöht (Abb. 29). Infolge der höheren Pufferkapazität des Unteren Buntsandsteines und des Grundgebirges steigt der pH-Wert auf

Werte zwischen 5,3 und 6,5 bei einem Mittelwert von 5,9 an. Damit pendelt der Grundwasserabfluß am Seebach zwischen dem Silikat- und Hydrogencarbonatpufferbereich.

Typisch ist die deutliche Erhöhung der Ca- und Mg-Konzentrationen sowie der starke Konzentrationsanstieg des nun dominierenden Anions Hydrogencarbonat (Tab. 17).

Ein deutlicher Anstieg ist auch bei den K- und Na-Gehalten festzustellen. Nach IROUSCHEK (1989) sind die erhöhten Kationengehalte im Bereich der karbonatarmen Horizonte des Mittleren Buntsandsteines in erster Linie auf Ionenaustauschvorgänge an Tonmineralen und eine erhöhte Feldspatverwitterung zurückzuführen.

Gebiet	Sb	Rb		KK
	(Sb8)	(R1)	(R2)	(Kq5)
Meßzeitraum	85-88	87-88		87-88
pH	5,9	5,8	6,2	5,5
el. LF ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	43,2	45,3	55,0	36,3
K ⁺ (mg/l)	1,33	1,56	1,47	0,96
Na ⁺ "	0,88	0,76	0,78	1,60
Ca ⁺⁺ "	3,85	3,87	5,24	2,85
Mg ⁺⁺ "	1,27	1,33	1,98	0,95
Al ⁺⁺⁺ "	n.n.	-	-	-
NO ₃ ⁻ "	4,02	5,05	4,69	3,84
SO ₄ ⁻⁻ "	5,11	3,63	3,54	3,05
Cl ⁻ "	2,04	1,93	1,80	3,22
HCO ₃ ⁻ "	10,80	11,45	20,62	7,42

Tab. 17: Mittelwerte der physikalisch-chemischen Parameter im Grundwasserabfluß Q_g (pH-Werte über mittlere H^+ -Ionenkonzentrationen berechnet)

Die durchschnittlichen Sulfatkonzentrationen liegen mit 5,1 mg/l bei Schwankungen von 4,1 bis 8,1 mg/l etwas niedriger als im Deckschichtenabfluß. Etwas niedrigere Werte erreichen auch die Cl-Konzentrationen mit 2,0 mg/l. Die Nitratkonzentrationen sind dagegen mit 4,0 mg/l im Mittel etwas erhöht, schwanken aber bei Werten zwischen 2,2 und 5,0 mg/l deutlich weniger als im Q_d .

Die geringe Leitfähigkeit des Grundwassers mit geringfügig schwankenden Werten um $43,2 \mu\text{S}/\text{cm}$ zeigen dessen geringe Mineralisierung an. Aufgrund der weiter zurückgehenden TOC-Gehalte wurden im Grundwasserabfluß die niedrigsten Leitfähigkeitswerte gemessen (Abb. 29).

Ein Jahresgang im Gesamtlösungsinhalt ist wie beim Q_d nur in trockenen Jahren in stark abgeschwächter Form zu erkennen. Infolge der etwas geringeren Grundwasserneubildungsrate in trockenen Sommermonaten und dem damit geringeren Zufluß von kurzfristigem Wasser aus den Deckschichten können die Erdalkali- und Hydrogencarbonat-Gehalte im Herbst etwas erhöht sein (SEEGER, 1986). Die SO_4 - und NO_3 -Konzentrationen zeigen unabhängig von der Jahreszeit nach starken Niederschlägen durch Einspülung von oberflächennahem Wasser etwas erhöhte Konzentrationen.

4.6.2 Rotenbachquellen (R1,R2)

Über 90% des Grundwasserabflusses am Rotenbach stammt aus den beiden Quellen R1 und R2 (Kap. 3.7). Sie bilden wie Sb8 Basisquellen, wobei im Rotenbachgebiet im Liegenden des Buntsandsteines das Rotliegende ansteht (Kap. 2.2). Während die Quelle R2 fast ausschließlich aus dem Grundwasseraquifer gespeist wird, enthält R1 besonders nach starken Niederschlägen oder während der Schneeschmelze einen erhöhten Anteil an oberflächennaheren Abflußkomponenten (Abb. 26, Kap. 3.7).

Die Wässer beider Quellen zeigen gegenüber dem Q_d deutlich erhöhte pH-Werte von durchschnittlich 5,8 (R1) und 6,2 (R2). Dabei unterliegt R1 mit Werten zwischen 4,6 und 6,3 stärkeren Schwankungen als R2 mit Werten von 5,7 bis 6,5. Die Ca- und Mg-Konzentrationen nehmen in den Basisquellen nochmals stark zu. Vor allem R2 erreicht mit einem Mittelwert von 5,2 mg/l Ca und 2,0 mg/l Mg hohe Werte. Auch beim Hydrogencarbonat zeigt sich der größere Zufluß von kurzfristigem Wasser in die Quelle R1. Während R1 mit durchschnittlich 11,5 mg/l HCO_3 ähnlich hohe Werte erreicht wie Sb8 am Seebach, wurden an R2 mit 20,6 mg/l im Mittel die höchsten HCO_3 -Konzentrationen aller untersuchten Quellen gemessen. Vor allem der Kontakt mit dem Rotliegenden dürfte hier für eine gute Pufferung eingetragener Säuren sorgen.

Die K- und Na-Konzentrationen sowie die Cl-Gehalte sind gegenüber dem Deckschichtenabfluß etwas erniedrigt. Ein starker Rückgang ist bei den SO_4 -Konzentrationen festzustellen. Das Sulfat ist ausschließlich atmosphärischen Ursprungs und wird mit zunehmender Kontaktzeit und -fläche durch Speicherung im Untergrund dem Wasser verstärkt entzogen (Kap. 4.4; EINSELE et al., 1988).

Den Anschluß von R1 an oberflächennahe Bereiche spiegelt auch der gegenüber R2 erhöhte NO_3 -Gehalt wider. Dennoch sind die Konzentrationen auch in R1 im Vergleich zum Bestandesniederschlag deutlich geringer.

Ein Jahresgang ist auch bei den beiden Rotenbachquellen kaum ausgebildet. Dabei zeigen allerdings Sulfat und Nitrat eine enge Korrelation zur Schüttung. Nach starken Niederschlägen und somit höherem Anteil an kurzfristigem Wasser, steigen vor allem in R1 die NO_3^- und SO_4^- -Konzentrationen merklich an (vgl. KLAIBER, 1987).

Infolge der starken Zunahme der Erdalkali- und Hydrogencarbonatgehalte ist der Gesamtlösungsinhalt im Grundwasser der Rotenbachquellen gegenüber dem Deckschichtenwasser stark erhöht (Abb. 30, den Grundwasserchemismus beschreibt der Lösungsinhalt der Quelle R2). Dies wirkt sich auch auf die Leitfähigkeitswerte aus, die hier im Grundwasser, im Gegensatz zu den anderen Gebieten, ansteigen.

4.6.3 Jägerbrunnen (Kq5)

Der Grundwasserchemismus im Gebiet der Kleinen Kinzig konnte an der Schichtquelle Kq5 beprobt werden. Sie gehört zu dem weitverbreiteten Quellhorizont an der Grenze vom Bausandstein (sm) zum Eck'schen Konglomerat. Somit hat in diesem Gebiet das Grundwasser keinen Kontakt zum Unteren Buntsandstein und dem Grundgebirge. Dementsprechend ist der pH-Anstieg gegenüber dem Deckschichtenwasser auch nicht so markant wie in den anderen Gebieten. Die pH-Werte schwanken um einen Mittelwert von 5,5 im Bereich von 4,8 bis 5,9. Dementsprechend erreichen die HCO_3^- -Konzentrationen mit durchschnittlich 7,4 mg/l nicht die hohen Werte wie das Grundwasser in den anderen Gebieten. Die Ca- und Mg-Konzentrationen steigen ebenfalls nur geringfügig auf 2,9 bzw. 0,95 mg/l an.

In Übereinstimmung mit den anderen Gebieten sind auch an der Kleinen Kinzig die Sulfatgehalte im Grundwasser deutlich geringer als im Q_d, während Nitrat einen geringen Anstieg aufweist.

Einen signifikanten Rückgang auf etwa die Hälfte der Gehalte im Q_d verzeichnen die Na- und Cl-Konzentrationen. Dennoch ist auch im Grundwasser beim Vergleich der Gebiete untereinander immer noch ein starker Einfluß der winterlichen Salzstreuung zu erkennen. Dabei zeigt Kq5 einen deutlichen Jahresgang in Bezug auf Natrium und Chlorid mit hohen Gehalten nach der Schneeschmelze, die zum Herbst hin abnehmen (vgl. PREUB, 1986).

Auf einen Anschluß an oberflächennahere Bereiche weist auch der deutliche Rückgang der Erdalkali- und Hydrogencarbonatgehalte bei hoher Schüttung hin. So wird ähnlich der Quelle R2 auch der Jägerbrunnen nur bei Trockenwetter ausschließlich von relativ tief zirkulierendem Grundwasser versorgt.

Infolge des starken Rückgangs der Na- und Cl-Konzentrationen an der Kleinen Kinzig geht der Gesamtlösungsinhalt im Grundwasser gegenüber dem Deckschichtenabfluß trotz der erhöhten Erdalkali- und Hydrogencarbonatgehalte zurück (Abb. 31). Dementsprechend sind auch die Leitfähigkeitswerte im Q_g am geringsten.

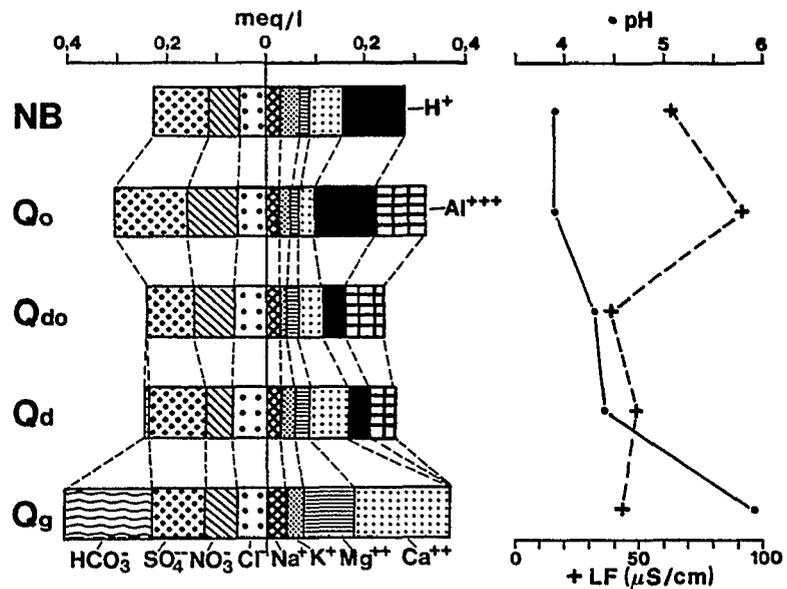


Abb. 29: Veränderung der Lösungsinhalte vom Bestandesniederschlag NB bis zum Grundwasserabfluß Q_g am Seebach

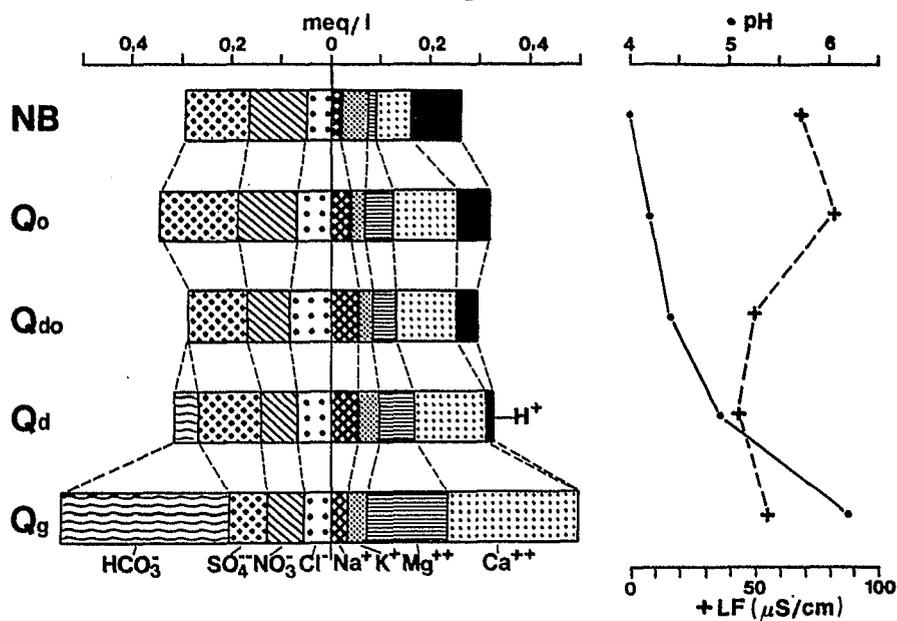


Abb. 30: Veränderung der Lösungsinhalte vom Bestandesniederschlag NB bis zum Grundwasserabfluß Q_g am Rotenbach

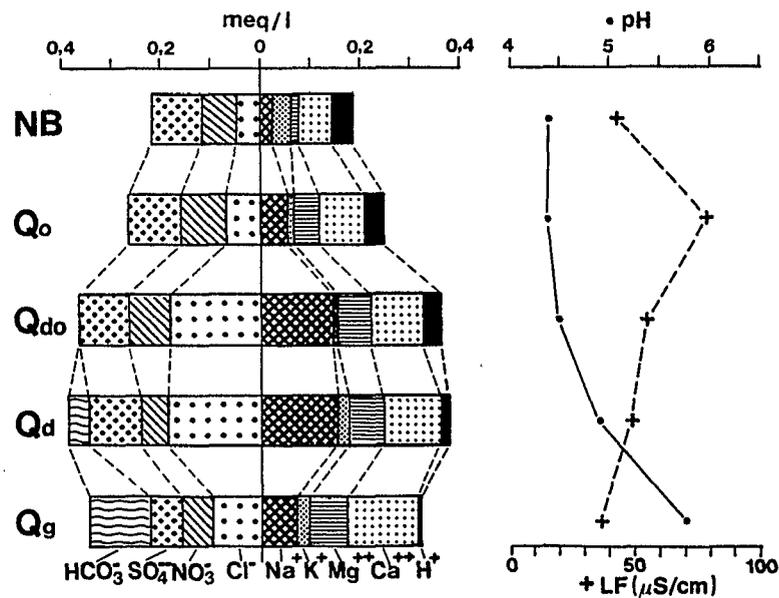


Abb. 31: Veränderung der Lösungsinhalte vom Bestandesniederschlag NB bis zum Grundwasserabfluß Q_g an der Kleinen Kinzig

4.7 Vorfluter

Der Chemismus der Vorfluter Seebach, Rotenbach und im Bereich der Kleinen Kinzig wurde während des Meßzeitraumes durch regelmäßige, 2-wöchentliche Beprobungen, sowie durch Probennahme mit automatischen Probennehmern bei Niederschlag-Abfluß-Ereignissen intensiv untersucht.

Stoffinhalt, Leitfähigkeit und pH-Wert der Vorfluter hängen vom jeweiligen Anteil der Abflußkomponenten Q_o , Q_{do} , Q_d und Q_g ab. Dabei ist die chemische Zusammensetzung der oberflächennaheren Komponenten Q_o bis Q_d vor allem vom Chemismus des Niederschlages, von der Vegetation, den Böden und vom Grad der anthropogenen Belastungen abhängig. Der Chemismus des Grundwasserabflusses Q_g wird dagegen stärker von der Geologie des jeweiligen Einzugsgebietes bestimmt.

Die Oberflächengewässer in Buntsandstein-Gebieten des Schwarzwaldes sind nur gering mineralisiert. Sie reagieren somit schon bei geringen Mengen von über den Niederschlag eingetragenen Mineralsäuren sehr empfindlich durch pH-Absenkung. Die Zunahme säurebildender Schadstoffe wie SO_4 und NO_3 in der Atmosphäre und im Niederschlag hat eine verstärkte Versauerung der Böden zur Folge (REUSS & JOHNSON, 1986). Nach BENECKE (1987) sind pH-Werte < 3 im Oberboden heute keine Seltenheit mehr. Allerdings zeigen staunasse Böden, wie sie im Nordschwarzwald weit verbreitet sind (vor allem auf den Hochflächen der

Kammlagen), von Natur aus durch die von organischen Säuren (Huminsäuren, Fulvosäuren) ausgelöste intensive Mineralzersetzung und der damit verbundenen Entbasung des Oberbodens niedrige pH-Werte (LEHNHARDT et al., 1984). Zusätzlich verstärken die Nadelbaummonokulturen der Mittelgebirge durch Anreicherung schwer zersetzbarer Nadelstreu die Versauerung des Bodens (KLÖS, 1984). Jedoch spielt nach SCHOEN & KOHLER (1984) die natürliche Versauerung durch die relativ schwachen organischen Säuren heute eine untergeordnete Rolle. Vor allem der erhöhte Eintrag anthropogener Schadstoffe und die damit verbundene höhere Protonenbelastung der karbonatarmer Böden führt durch verstärkte Silikatverwitterung zu einem zunehmenden Basenverlust (IROUSCHEK, 1989).

Der Chemismus der Oberflächengewässer wird von der zunehmenden Entbasung der Böden beeinflusst. Besonders die Oberläufe kleiner Fließgewässer im Einzugsgebiet karbonatarmer Gesteine zeigen deutliche Versauerungserscheinungen (DIETZE, 1985). Nach LEHNHARDT et al. (1984) haben die aus Waldgebieten fließenden Gewässer in den vergangenen Jahren erhebliche Veränderungen im Wasserchemismus erfahren. Eine pH-Wert-Absenkung von 1 bis 2 Stufen auch in natürlich sauren Gewässern ist keine Seltenheit (UBA, 1984).

4.7.1 Seebach

Der Chemismus des Seebaches wurde sowohl am Seebachpegel (Sb13) als auch oberhalb der Grenze Buntsandstein/Granit an der Meßstelle Sb6 regelmäßig beprobt (Abb. 3a).

Oberhalb des Grundgebirges wird der Vorfluter fast ausschließlich durch oberflächennahen Abfluß (Q_o) und Deckschichtenabfluß (Q_{do} , Q_d) gespeist. Der Chemismus schwankt demzufolge zwischen den Werten von Q_o , Q_{do} und Q_d (vgl. Tab. 14 bis 16 und Tab. 18). Dabei erfolgt bei hoher Schüttung nach Niederschlägen mit steigendem Q_o -Anteil eine Annäherung an diese Abflußkomponente, während mit andauernder Trockenperiode der Chemismus in Sb6 zunehmend Q_d gleicht.

Die pH-Werte schwanken um ein Mittel von 4,2 zwischen 3,6 und 4,8. Somit liegt der Oberlauf des Seebaches im Aluminium-Pufferbereich. Die Aluminiumgehalte liegen zwischen 0,3 und 0,9 mg/l bei durchschnittlich 0,5 mg/l.

Meßstelle Meßzeitraum	Sb6 85-88			Sb13 85-88		
	min	max	Mittel	min	max	Mittel
pH	3,6	4,8	4,2	3,6	7,7	5,2
el. LF ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	35,2	81,1	52,2	13,4	57,6	39,7
K ⁺ (mg/l)	0,23	1,35	0,79	0,21	2,73	1,08
Na ⁺ "	0,14	1,50	0,59	0,19	1,75	0,82
Ca ⁺⁺ "	1,12	3,30	1,70	1,58	6,62	3,38
Mg ⁺⁺ "	0,26	0,59	0,35	0,32	2,24	1,08
Al ⁺⁺⁺ "	0,30	0,90	0,50	0,00	0,62	0,11
NO ₃ ⁻ "	0,97	6,27	2,76	1,31	7,27	3,53
SO ₄ ⁻⁻ "	4,55	8,76	6,34	3,85	8,71	5,34
Cl ⁻ "	1,01	4,81	1,88	1,12	5,05	1,57
HCO ₃ ⁻ "	0,00	1,80	0,10	0,00	24,40	8,09

Tab. 18: Mittel- und Rahmenwerte der physikalisch-chemischen Parameter im Seebach (mittlere pH-Werte über mittlere H⁺-Ionen-Konzentrationen berechnet)

Die K- und Na-Konzentrationen zeigen deutliche Schwankungen um Mittelwerte zwischen den oberflächennahen Abflußkomponenten. Dagegen spiegeln die Ca- und Mg-Gehalte den Chemismus des Q_d wieder. Hohe Sulfatgehalte um 6,3 mg/l zeigen, daß der Chemismus des Oberlaufes eng mit dem Bestandesniederschlag korreliert. Die NO₃-Konzentrationen schwanken ebenfalls stark zwischen 1,0 und 6,3 mg/l bei einem Mittelwert von 2,8 mg/l. Hydrogencarbonat kommt nur bei Trockenwetter in geringen Konzentrationen vor, während bei Hochwasser und entsprechend niedrigen pH-Werten kein HCO₃ mehr im Wasser vorhanden ist. Demgegenüber steht ein nicht unbeträchtlicher Anteil der Protonen am Gesamtlösungsinhalt (Abb. 32). Charakteristisch für den Oberlauf sind hohe Leitfähigkeitswerte nach starken Niederschlägen. Bei Hochwasser wird ein Großteil des Abflusses aus oberflächennahem, huminstoffreichem Abfluß mit hoher Leitfähigkeit gebildet.

Mit dem Zufluß von Grundwasser aus den Basisquellen verändert sich der Lösungsinhalt des Vorfluterwassers erheblich (Abb. 32). Der pH-Wert nimmt im Mittel sprunghaft um mehr als 2 Stufen auf 6,4 zu. Dagegen sinkt die Leitfähigkeit aufgrund abnehmender Huminstoffgehalte deutlich auf Werte um 39,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ab. Der Gesamtlösungsinhalt steigt vor allem durch die stark zunehmenden Erdalkali- und Hydrogencarbonatgehalte gegenüber dem Oberlauf an (Abb. 32). Mit 8,1 mg/l bildet HCO₃ im Unterlauf das Hauption auf der Anionenseite. Sulfat wird

mit wachsendem Grundwasseranteil zunehmend verdünnt, während die Nitratwerte wieder etwas ansteigen.

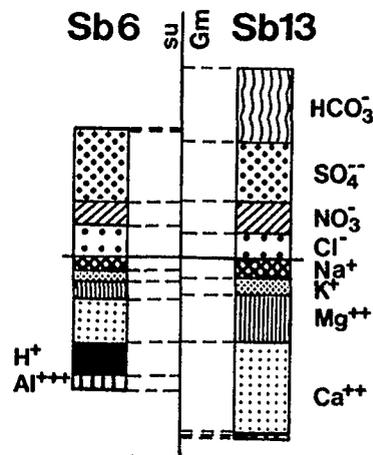


Abb. 32: Lösungsinhalte im Seebach oberhalb und unterhalb der Grenze Buntsandstein/Granit

Die Änderung der physikalisch-chemischen Parameter vom Ursprung bis zum Unterlauf des Seebaches wurden in den Arbeiten von IROUSCHEK (1989) und SEEGER (1986) genauer untersucht.

4.7.1.1 Beziehung Schüttung-Lösungsinhalt im Vorfluter

Bei hoher Schüttung nach Niederschlägen sind die Anteile des oberflächennahen Abflusses und Deckschichtenabflusses am Gesamtabfluß im Vorfluter stets hoch. In Trockenzeiten wird dagegen nahezu der gesamte Abfluß vom Grundwasser gebildet. Diesen Beziehungen folgend wird sich auch der Chemismus entsprechend ändern.

Tabelle 18 zeigt, daß der Chemismus des Seebaches im Unterlauf sehr starken Schwankungen unterliegt. Aus den Abb. 33 bis 35 wird ersichtlich wie der Lösungsinhalt am Pegel Sb13 den Schüttungsschwankungen folgt (Werte aus dem Trockenjahr 1985, SEEGER, 1986).

Die pH-Werte nehmen mit steigender Schüttung bzw. mit steigendem Q_o , Q_{do} und Q_d -Anteil stark ab, während die Leitfähigkeitswerte zunehmen. Dabei wurden im Meßzeitraum 1985 bis 1988 pH-Werte zwischen 3,6 und 7,7 gemessen (Tab. 18). Vor allem während der starken Schneeschmelze im Frühjahr 1988 war der Unterlauf des Seebaches stark versauert (Abb. 37).

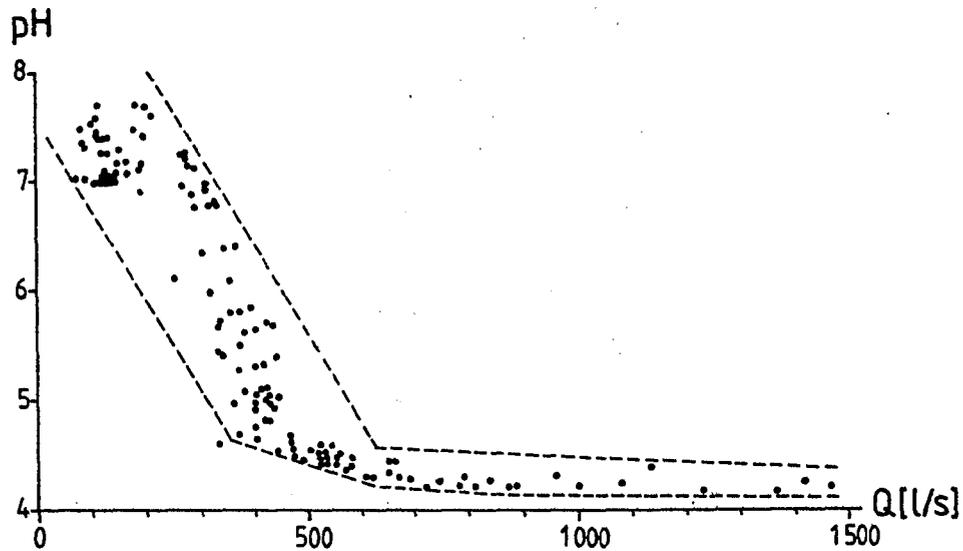


Abb. 33: pH-Wert in Abhängigkeit von der Schüttung im Seebach

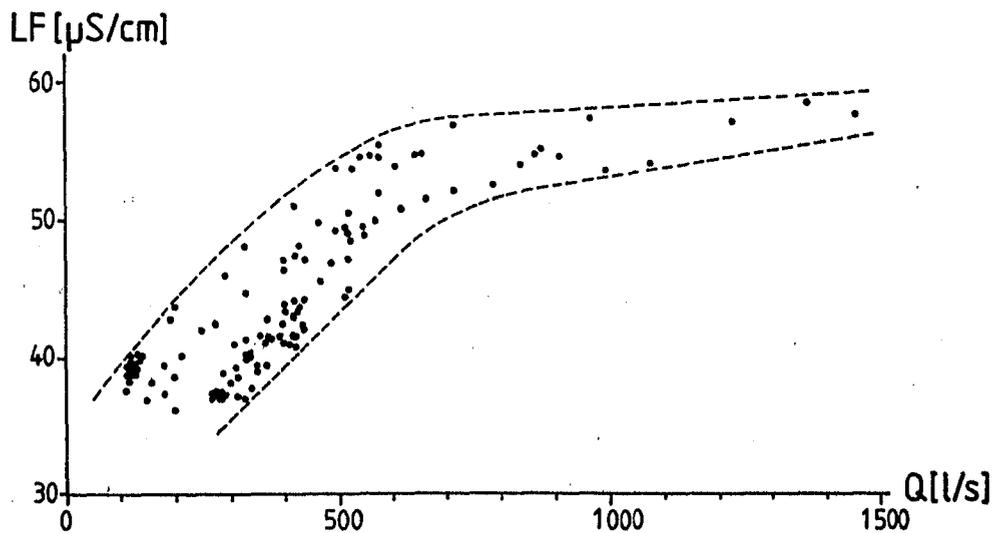


Abb. 34: Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$) in Abhängigkeit von der Schüttung im Seebach

Die Ioneninhalte entwickeln sich entsprechend (Abb. 35). Die höchsten SO_4 - und NO_3 -Gehalte werden bei Hochwasser erreicht, während die Kationenkonzentrationen abnehmen. Ausgeglichen wird diese Entwicklung durch

abnehmende HCO_3^- -Gehalte auf der Anionenseite und zunehmende Protonenkonzentrationen bei den Kationen.

Bei Niedrigwasser ist HCO_3^- mit Konzentrationen bis 24,4 mg/l das dominierende Anion. Durch Niederschläge wird die geogene Komponente HCO_3^- verdünnt, kann aber auch durch den Eintrag starker Säuren wie H_2SO_4 und HNO_3 "titriert" werden (EHMANN, 1988).

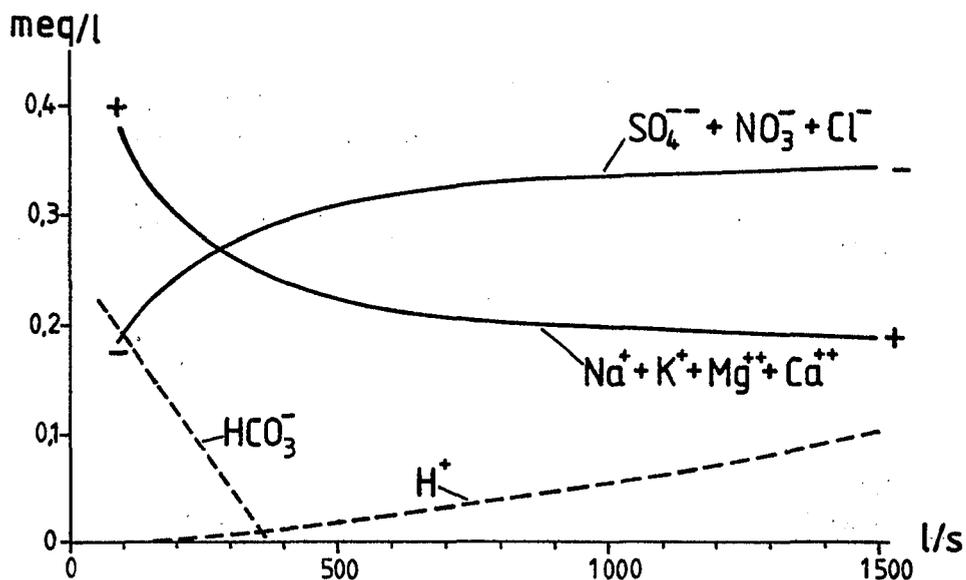


Abb. 35: Lösungsinhalt in Abhängigkeit von der Schüttung im Seebach

Über die Beprobung von Niederschlags-Abfluß-Ereignissen mit automatischen Probennehmern konnten die schüttungsabhängigen Veränderungen im Vorfluter genauer erfaßt werden. Dabei sei auf die Arbeiten von IROUSCHEK (1989), SEEGER (1986) sowie EINSELE et. al. (1986) verwiesen in denen verschiedene, am Seebach durchgeführte Ereignisbeprobungen vorgestellt wurden.

In den Abb. 36 und 37 sind die Jahresgänge des Trockenjahres 1985 und des Naßjahres 1988 dargestellt. Ein eventueller Jahresgang wird von kurzfristigen Schwankungen durch Niederschlagsereignisse überdeckt. In Anlehnung an die Abflußganglinien zeigt auch der Stoffinhalt im Jahr 1988 einen deutlich unruhigeren Verlauf als im Trockenjahr 1985. Besonders niedrige pH-Werte werden vor allem während den Schneeschmelzen im März und April erreicht, während die Leitfähigkeitswerte ansteigen. Dementsprechend hoch ist die Protonenkonzentration bei zurückgehenden HCO_3^- -Gehalten. Ansonsten zeigen vor allem SO_4 und NO_3 einen parallelen Verlauf zur Abflußganglinie. Dagegen reagieren die Erdalkalien und in abgeschwächter Form auch die Alkalien auf einen Schüttungsanstieg jeweils mit abnehmenden Konzentrationen.

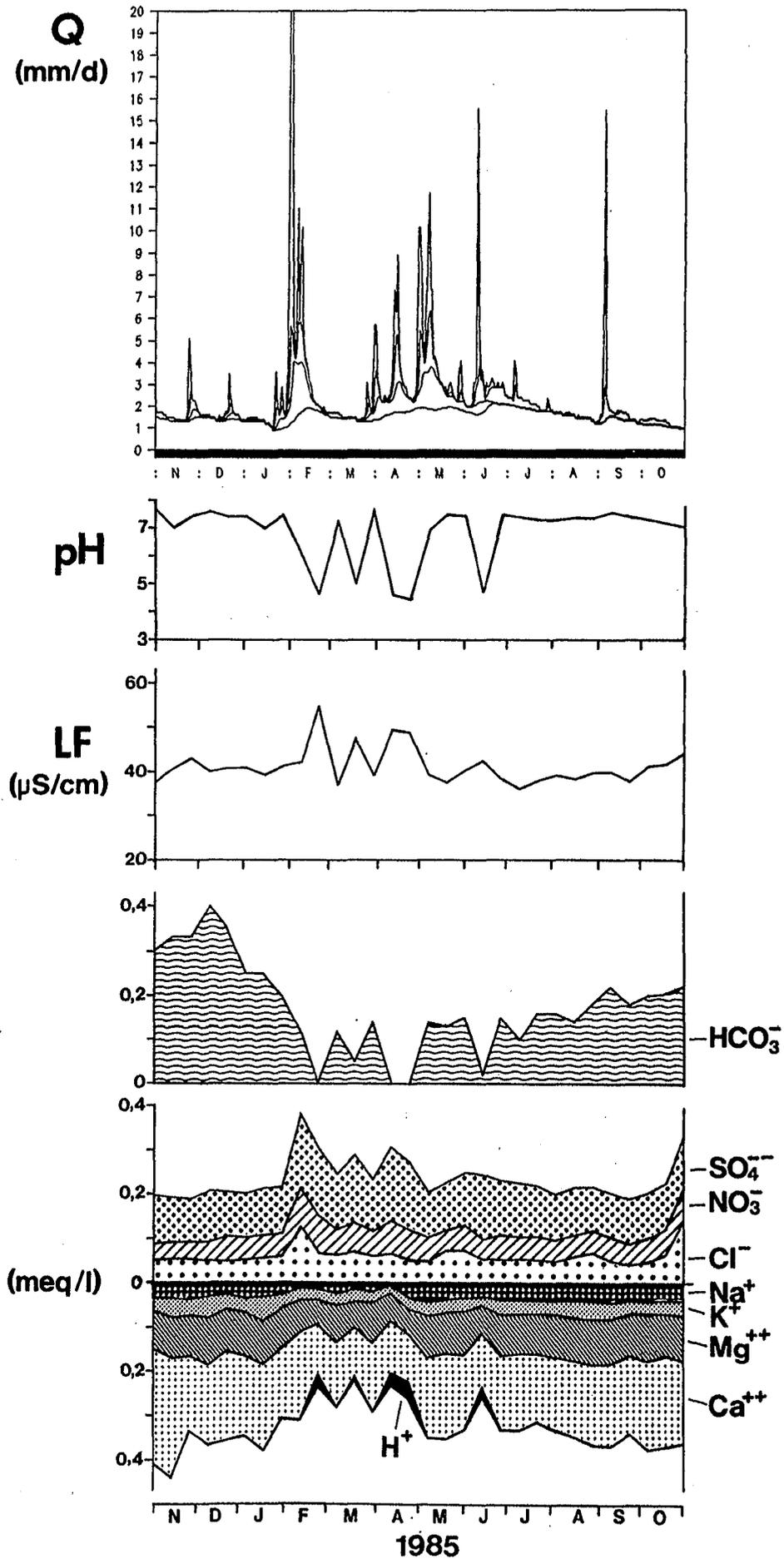


Abb. 36: Jahrgang im Seebach 1985

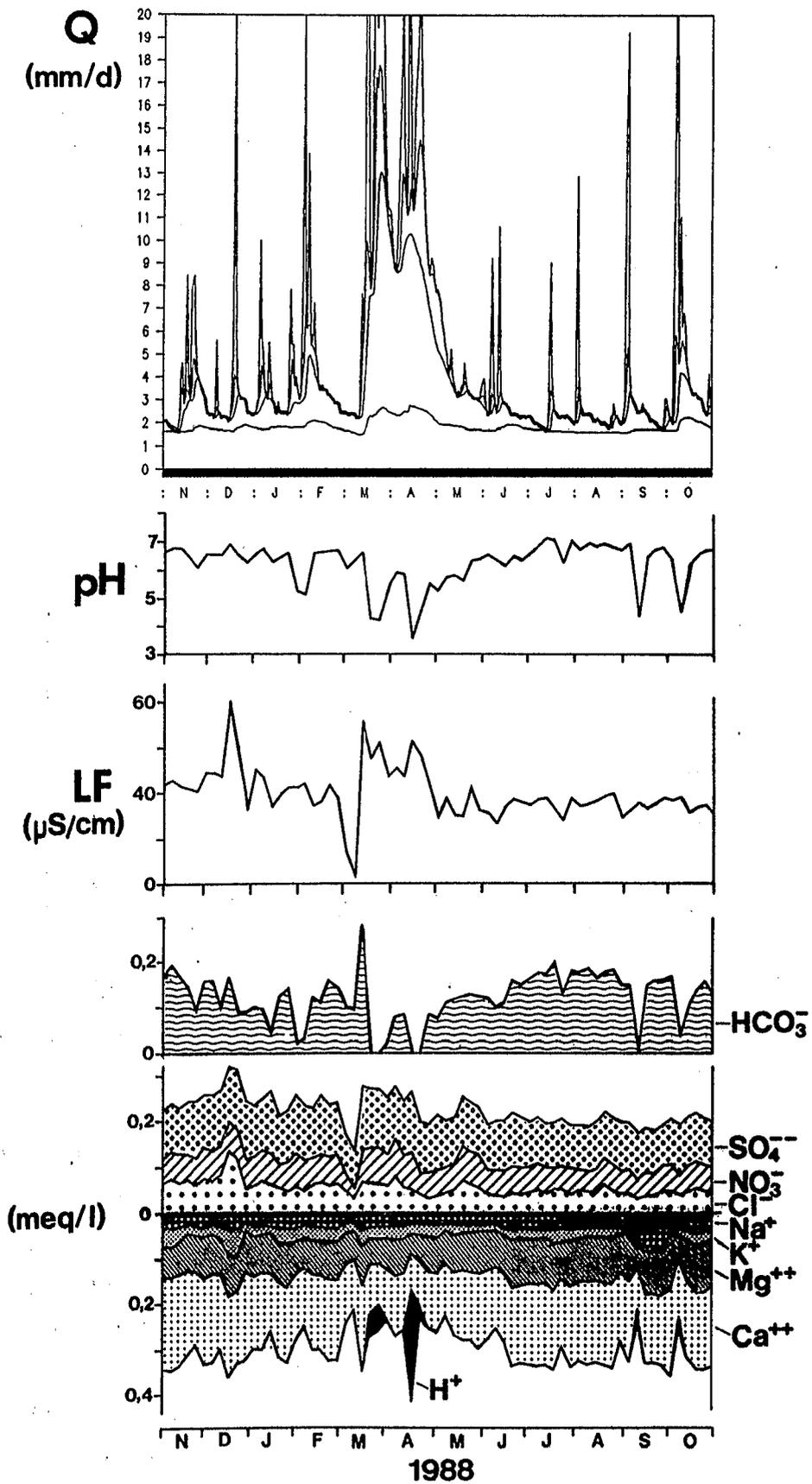


Abb. 37: Jahresgang im Seebach 1988

4.7.2 Rotenbach

Der Lösungsinhalt des Rotenbaches unterliegt weit geringeren Schwankungen als am Seebach (Tab. 19, Abb. 38). Der Grundwasseranteil am Gesamtabfluß ist infolge der hohen Schüttung aus den Rotenbachquellen R1 und R2 mit ihrem starken, unterirdischen Grundwasserzustrom in das Gebiet (Kap. 3.7) auch nach Niederschlagsereignissen noch beträchtlich. Nur nach sehr starken Niederschlägen, oder während einer intensiven Schneeschmelze wie im Frühjahr 1988, sind deutliche Schwankungen im Chemismus des Vorfluters zu erkennen (Abb. 38).

Meßstelle Meßzeitraum	Rp 87-88		
	min	max	Mittel
pH	5,9	7,8	6,6
el. LF ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	43,9	63,1	54,0
K ⁺ (mg/l)	0,90	2,22	1,45
Na ⁺ "	0,75	1,73	0,85
Ca ⁺⁺ "	3,50	6,82	5,13
Mg ⁺⁺ "	1,16	2,08	1,70
NO ₃ ⁻ "	3,98	8,52	5,67
SO ₄ ⁻⁻ "	3,41	8,66	4,87
Cl ⁻ "	1,42	3,01	1,94
HCO ₃ ⁻ "	1,00	28,10	18,00

Tab. 19: Mittel- und Rahmenwerte der physikalisch-chemischen Parameter am Rotenbach (mittlere pH-Werte über mittlere H⁺-Ionen-Konzentrationen berechnet)

Im Meßzeitraum 1987/88 wurden pH-Schwankungen von 5,9 bis 7,8 um ein Mittel von 6,6 registriert. Im steilen Oberlauf des Rotenbaches wird durch Austreibung von CO₂ der pH-Wert gegenüber den Basisquellen nochmals erhöht. Bei einem Minimum von pH 5,9 verbleibt der Rotenbach im Gegensatz zum Seebach auch während hohem Q₀-Anteil ganzjährig im Hydrogencarbonat-Pufferbereich. Hier zeigt sich der geringere Einfluß der etwas besser abgepufferten, oberflächennahen Abflußkomponenten (Tab. 14 bis 16).

Das dominierende Anion ist das Hydrogencarbonat mit Konzentrationen von bis zu 28,1 mg/l bei 18,0 mg/l im Mittel. Lediglich während der Schneeschmelze 1988 gehen die HCO₃-Konzentrationen bis auf 1 mg/l zurück, bei gleichzeitigem

Anstieg der SO_4 - und NO_3 -Gehalte. Sulfat zeigt bei Werten zwischen 3,4 und 8,7 mg/l dieselben Schwankungen wie am Seebach, wobei sich im Mittel mit 4,9 mg/l etwas geringere Konzentrationen einstellen. Dagegen liegen die Nitratgehalte mit durchschnittlich 5,7 mg/l über 2 mg/l höher als am Seebach, was vor allem auf den deutlich höheren Nitratreintrag über den Bestandesniederschlag zurückzuführen ist (Tab. 13). Die ermittelten Chloridkonzentrationen um 1,9 mg/l liegen zwischen den Konzentrationen im Boden- und Deckschichtenwasser und dem Grundwasserabfluß bei deutlicher Annäherung an Q_g . Es sind keine großen Veränderungen der Chloridkonzentrationen in Bezug auf die Tiefenzirkulation des Wassers festzustellen, sodaß sich im Vorfluter weitgehend der Eintrag über den Bestandesniederschlag widerspiegelt.

Auf der Kationenseite überwiegen die Erdalkalien Ca und Mg (Abb. 38). Es werden mit Gehalten von durchschnittlich 5,1 mg/l Ca und 1,7 mg/l Mg deutlich höhere Werte erreicht als am Seebach. Dabei stimmen die gemessenen Spitzenwerte nahezu überein. Dagegen ist am Rotenbach keine so enge Korrelation mit der Schüttung gegeben. Die Erdalkaligehalte gehen zwar auch mit steigender Schüttung zurück, erreichen aber lange nicht so starke Schwankungen wie am Seebach. Mit Minimalwerten von 3,5 mg/l Ca und 1,2 mg/l Mg bleiben die Erdalkalien auch während der starken Schneeschmelze 1988 die dominierenden Kationen. Die Alkalien K und Na zeigen ähnliche Schwankungen bei etwas gedämpfter Amplitude.

Ein ausgesprochener Jahresgang ist nicht zu erkennen. Den leicht zunehmenden Erdalkali- und Hydrogencarbonatgehalten im Verlauf des Sommers stehen abnehmende Sulfat- und Nitratkonzentrationen gegenüber. Dieser Verlauf ist auf die geringere Gesamtschüttung bei steigendem Q_g -Anteil im Sommerhalbjahr zurückzuführen. Je nach Niederschlagsverteilung wird sich jedes Jahr ein anderer Verlauf einstellen. Schwankungen im Lösungsinhalt sind in erster Linie auf einzelne Ereignisse zurückzuführen.

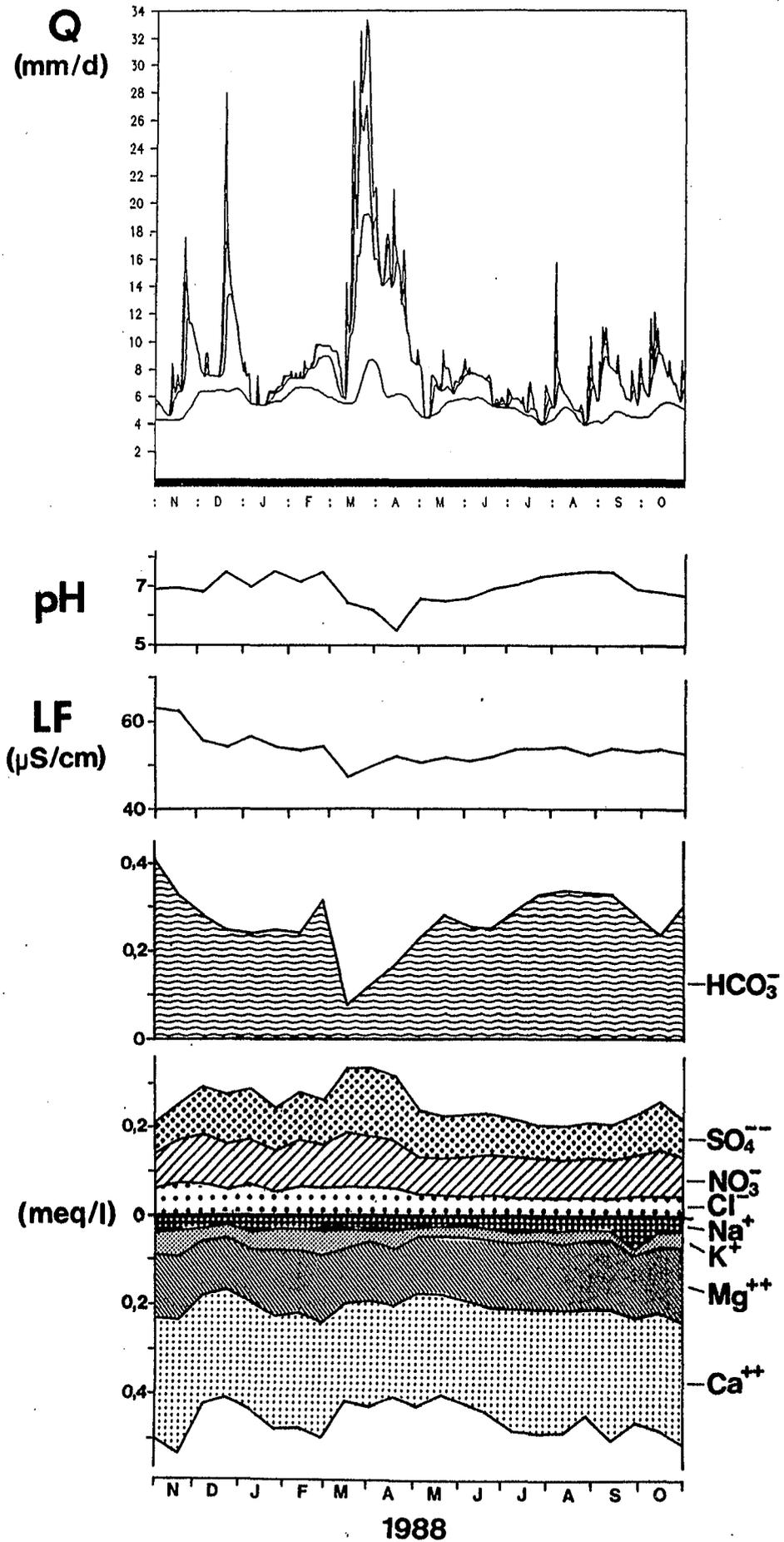


Abb. 38: Jahrgang im Rotenbach 1988

4.7.3 Kleine Kinzig

Etwas deutlichere Schwankungen im Chemismus zeigten wiederum die Oberflächenwässer im Gebiet Kleine Kinzig (Tab. 20). Am Pegel Kp schwankten die pH-Werte zwischen 5,1 und 7,6 um einen Mittelwert von 6,2. Somit befindet sich auch die Kleine Kinzig nahezu ganzjährig im Hydrogencarbonat-Pufferbereich. Nur während der Schneeschmelze im Frühjahr konnten bei Hochwasser geringe Protonenkonzentrationen ermittelt werden (Abb. 39).

Die Schwankungen im Lösungsinhalt folgen denselben Beziehungen wie in den anderen Untersuchungsgebieten. Mit zunehmender Schüttung nehmen die HCO_3^- -Konzentrationen bis auf 0,9 mg/l ab. Somit ist wie am Rotenbach auch bei höchstem Q_0 -Anteil immer noch eine Abpufferung über das Hydrogencarbonat gegeben. Bei einem Mittelwert von 8,0 mg/l HCO_3^- zeigt sich eine gute Übereinstimmung zum Seebach, wo allerdings ungleich größere Schwankungsbreiten vorliegen. Dasselbe gilt für die atmogen eingetragenen Schadstoffe Sulfat und Nitrat. Bei ähnlich hohen Mittelwerten sind ihre Schwankungen gegenüber dem Seebach deutlich gedämpft. Wie in Kap. 3.7 beschrieben unterliegt der Abfluß an der Kleinen Kinzig weit geringeren Schwankungen als der Seebach. Dementsprechend wird auch der überwiegend von der Schüttung abhängige Lösungsinhalt geringere Veränderungen aufweisen.

Meßstelle Meßzeitraum	Kp 85-88			Hp 85-88		
	min	max	Mittel	min	max	Mittel
pH	5,1	7,6	6,2	5,7	7,3	6,3
el. LF ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	35,8	45,6	40,1	29,3	41,0	37,0
K^+ (mg/l)	0,37	1,18	0,97	0,45	1,15	0,87
Na^+ "	1,28	2,35	1,80	0,50	1,64	0,64
Ca^{++} "	2,02	6,38	3,28	2,56	5,13	3,57
Mg^{++} "	0,62	1,26	0,89	0,70	1,40	1,04
NO_3^- "	2,67	5,28	3,62	2,66	4,72	3,75
SO_4^{--} "	3,16	5,39	4,07	3,31	5,97	4,28
Cl^- "	2,41	4,87	3,79	1,16	2,33	1,62
HCO_3^- "	0,90	15,90	8,00	0,90	23,20	10,80

Tab. 20: Mittel- und Rahmenwerte der physikalischen-chemischen Parameter an der Kleinen Kinzig und am Huttenbächle (mittlere pH-Werte über mittlere H^+ -Ionen-Konzentrationen berechnet)

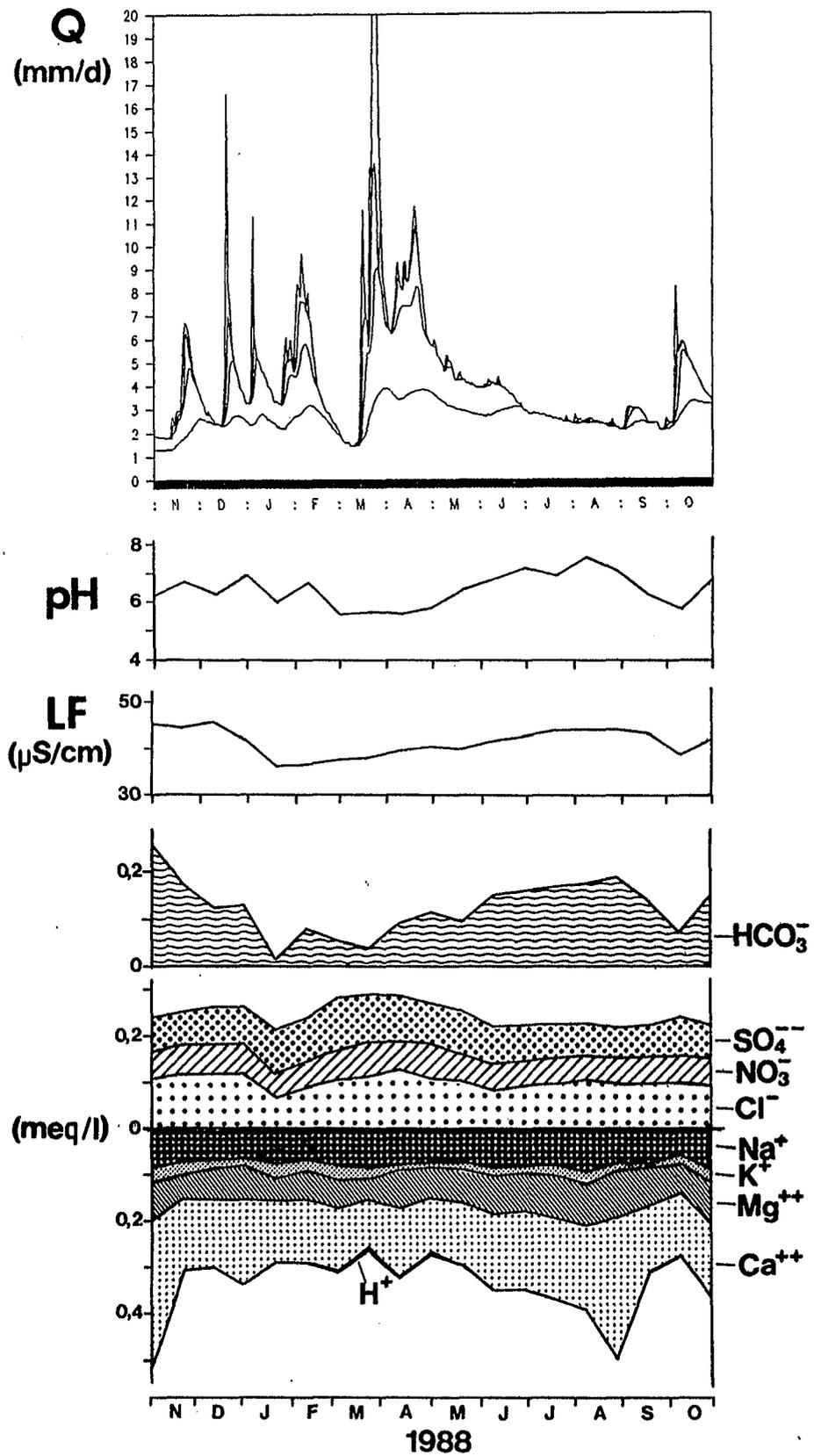


Abb. 39: Jahrgang an der Kleinen Kinzig 1988

Die Ca- und Mg-Konzentrationen sind trotz des Oberen Buntsandsteines im Einzugsgebiet nicht höher als am Seebach und sogar deutlich geringer als am Rotenbach. Dazu bemerkt PYKA (1986), daß eine Beeinflussung der Quellchemie durch den Oberen Buntsandstein von untergeordneter Bedeutung ist, da im Einzugsgebiet der Kleinen Kinzig in weiten Bereichen nur noch weitgehend entkalkter Verwitterungsschutt vorliegt.

Dagegen sind die Na- und Cl-Gehalte infolge der winterlichen Salzstreuung stark erhöht. Dies zeigt auch ein Vergleich mit dem Huttenbächle, in dessen Einzugsgebiet keine Salzstreuung erfolgt. Während die Konzentrationen der meisten Ionen gegenüber der Kleinen Kinzig etwas erhöht sind, zeigen die Na- und Cl-Gehalte ähnlich niedrige Werte wie am Seebach und Rotenbach (Tab. 20). Die etwas höheren pH-Werte, sowie Erdalkali- und Hydrogencarbonatgehalte gegenüber dem benachbarten Vorfluter Kleine Kinzig dürften auf den größeren Anteil an noch unverwittertem Oberen Buntsandstein im Bereich des Huttenbächles zurückzuführen sein.

5. Stoffbilanzen

5.1 Stoffeintrag

Die eingetragenen Stoffmengen errechnen sich aus der Niederschlagshöhe und den im Meßzeitraum ermittelten Stoffkonzentrationen. Einen Überblick über die ermittelten Eintragungsmengen im Freiland und im Fichtenbestand geben die Tab. 21 und 22.

Aufgrund der hohen Niederschlagsmengen in den Mittelgebirgsregionen ist der Schadstoffeintrag gegenüber dem Flachland stark erhöht. Zusätzlich wird der Eintrag durch die Filterwirkung der großen zusammenhängenden Waldgebiete verstärkt, wovon der Schwarzwald besonders stark betroffen ist (BREHLOH & KIRCH, 1984).

Trotz geringerer Niederschlagshöhen sind die Depositionsraten im Bestand deutlich höher als im Freiland. Bei der Passage durch den Kronenraum kommt es durch Interzeptions-Deposition und durch Kronenauswaschung zu einer Aufkonzentrierung des Niederschlages.

Im Trockenjahr 1985 wurde im Seebachgebiet über den Freilandniederschlag ein Gesamteintrag von 119,6 kg/ha ermittelt. Im Fichtenbestand erhöhte sich der Eintrag auf 209,8 kg/ha. In den Naßjahren 1986 bis 1988 nahm die Gesamtdeposition durch die erhöhten Niederschlagsmengen auf durchschnittlich 175 kg/ha·a im Freiland und 312 kg/ha·a im Bestand zu. Unabhängig von den Niederschlagsschwankungen in den vier Meßjahren verzeichnet das Sulfat die höchsten Depositionsraten. Im Freiland liegt der Sulfatanteil im gesamten Meßzeitraum bei 33-34% und erhöht sich im Bestand auf 42% des Gesamteintrages. Nach EHMANN (1988) ist die Zunahme vom Freiland in den Bestand bei den Anionen vor allem auf die Interzeptions-Deposition bzw. Trockene Deposition zurückzuführen. Darauf weist auch IROUSCHEK (1989) hider den Anteil der Trockenen Deposition und der Kronenauswaschung am Gesamteintrag nach dem Verfahren von ULRICH et al. (1986) und EINSELE (1985) ermittelt hat. Demnach ist nahezu der gesamte Sulfatzuwachs vom Freiland in den Bestand auf die Interzeptions-Deposition zurückzuführen. Dasselbe gilt für Natrium und Chlorid, bei denen die Kronenauswaschung ebenfalls vernachlässigbar gering ist.

Die Kronenauswaschung spielt vor allem bei den Kationen K, Ca und Mg eine wesentliche Rolle. Besonders der Kaliumeintrag nimmt gegenüber den Freilandwerten (6,7 bis 10,1 kg/ha·a) im Bestand sehr stark auf Werte von 18,3 bis 28,0 kg/ha·a zu. In Übereinstimmung mit IROUSCHEK (1989) stammen über 60% des im Bestand deponierten Kaliums aus der Kronenauswaschung. Dabei

muß bei der Bilanzierung Eintrag - Austrag die Stoffspeicherung im jährlichen Biomassezuwachs berücksichtigt werden. Nach Berechnungen von EINSELE et. al (1988) entspricht der Nährstoffbedarf in etwa dem Zuwachs durch die Kronenauswaschung, sodaß der effektive Eintrag mit der im Freiland deponierten Kaliummenge gleichzusetzen ist. Dasselbe gilt für die Zunahme des Eintrages bei den Erdalkalien Calcium und Magnesium, wovon ein Großteil wieder durch Nährstoffaufnahme über die Vegetation entzogen wird.

	N (mm)	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	H ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻
Gebiet Sb									
1985	1624	6,7	4,5	10,2	1,8	0,6	35,1	40,4	20,3
1986	2412	9,9	6,8	15,2	2,7	1,0	52,1	60,1	30,2
1987	2226	9,1	6,2	14,0	2,4	0,9	48,1	55,4	27,8
1988	2471	10,1	6,9	15,6	2,7	1,0	53,4	61,5	30,9
Gebiet Rb									
1987	2012	12,7	6,6	11,9	2,4	0,6	39,8	46,5	24,5
1988	2251	14,2	7,4	13,3	2,7	0,7	44,6	52,0	27,5
Gebiet KK									
1987	1850	9,1	7,0	16,7	1,6	0,3	40,7	44,4	27,4
1988	2154	10,6	8,2	19,4	2,0	0,3	47,4	51,7	31,9

Tab. 21: Stoffeinträge (kg/ha · a) im Freiland

	N (mm)	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	H ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻
Gebiet Sb									
1985	1245	18,3	7,2	16,9	3,2	1,6	50,3	89,1	23,2
1986	1908	28,0	11,1	25,9	5,0	2,4	77,1	136,7	35,5
1987	1771	26,0	10,3	24,1	4,6	2,2	71,5	126,8	32,9
1988	1881	27,7	10,9	25,6	4,9	2,4	76,0	134,7	35,0
Gebiet Rb									
1987	1431	29,2	6,6	20,5	3,0	1,4	101,0	117,2	25,5
1988	1555	31,7	7,2	22,2	3,3	1,6	109,8	127,4	28,3
Gebiet KK									
1987	1324	19,2	7,4	18,5	2,4	0,5	57,2	76,2	21,8
1988	1643	23,8	9,2	23,0	3,0	0,7	71,0	94,6	27,1

Tab. 22: Stoffeinträge (kg/ha · a) im Bestand

Ein deutlicher Eintragszuwachs von 35,1 bis 53,4 kg/ha·a im Freiland auf 50,3 bis 77,1 kg/ha·a ist auch bei Nitrat festzustellen. Die komplizierte Stickstoffdynamik hat allerdings zur Folge, daß die Nitratbilanzierung nur einen orientierenden Charakter haben kann.

Während am Rotenbach die Depositionsraten im Freiland den geringeren Niederschlagsmengen entsprechend etwas geringer sind als am Seebach, werden im Bestand in den Jahren 1987 und 1988 mit 304,4 und 331,5 kg/ha·a höhere Gesamteinträge erreicht. In dem westexponierten Gebiet kommt es im Kronenraum zu einer verstärkten Ausfilterung von Schadstoffen aus den aufsteigenden Luftmassen. Besonders aus dem häufig über die Westhänge aufsteigenden Nebel und Wolken werden Schadstoffe im Kronenraum aufgenommen. Nach KAMINSKI & WINKLER (1983) kann die Protonendeposition durch Nebel nahezu die Hälfte der Gesamtdosition ausmachen.

Auffallend sind vor allem die hohen Nitrateinträge von 101,0 und 109,8 kg/ha·a, die nach ULRICH (1975) ohne anthropogene Emissionen nur sehr gering wären. Die erhöhten Kaliumeinträge weisen auf eine verstärkte Auswaschung des Kronenraumes hin. Hier zeigt sich die zunehmende Auslaugung der auf Westhängen stärker geschädigten Bestände. Die übrigen Ionen zeigen entsprechend den geringeren Niederschlagsmengen auch etwas geringere Eintragsmengen als am Seebach. Dies gilt auch für Sulfat, das aber mit 117,2 und 127,4 kg/ha·a immer noch beträchtliche Einträge erreicht.

An der Kleinen Kinzig liegen die Gesamteinträge im Freiland mit 147,2 und 171,5 kg/ha·a in den beiden Meßjahren 1987 und 1988 etwa im Bereich des Rotenbaches. Dagegen werden im Bestand in dem östlich des Schwarzwaldkammes gelegenen Gebiet mit 203,2 und 252,4 kg/ha·a weit geringere Gesamteinträge erreicht. Besonders die atmogenen Schadstoffe Sulfat und Nitrat sind gegenüber den exponierteren Gebieten stark reduziert. Dies zeigt sich auch anhand des geringeren Protoneneintrages der mit 0,5 und 0,7 kg/ha·a nur etwa 1/3 des Eintrages der anderen Gebiete erreicht.

Vor allem in den westlichen Gebieten Seebach und Rotenbach weist der Stoffeintrag eine deutliche Saisonalität mit erhöhten Einträgen in den Wintermonaten auf. Dies gilt insbesondere für die Sulfat- und Nitratfrachten, die während der Heizperiode erhöht sind (SEEGER, 1986). Erhöhte Natrium- und Chlorideinträge im Winter sind nach ULRICH et al. (1986) darauf zurückzuführen, daß durch die geringere Verdunstungsleistung der Erdoberfläche in dieser Jahreszeit der Niederschlag vorwiegend aus den Ozeanen stammt. Dagegen sind die Kaliumfrachten im Bestand aufgrund erniedrigter Auslaugungsraten im Winter eher rückläufig (vgl. IROUSCHEK, 1989).

5.2 Stoffaustrag über die verschiedenen Abflußkomponenten - Stofffrachtseparation

Bisher wurden die Stoffausträge über die Vorfluter mit Hilfe von Frachtkurven ermittelt, in denen die Fracht (g/s) in Beziehung zu der Schüttung (l/s) steht. Dieses Verfahren ist bei HOHBERGER (1977), HOLZWARTH (1980) und KREBS (1979) detailliert beschrieben. IROUSCHEK (1989), PREUß (1986), PYKA (1986) und SEEGER (1986) haben nach diesem Verfahren über die berechneten Regressionsgeraden für die mittleren Tagesabflüsse die zugehörigen Stoffausträge in den jeweiligen Vorflutern bestimmt.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Stoffaustrag für jede Abflußkomponente separat betrachtet. Voraussetzung für diese Stofffrachtseparation im Vorfluter ist die vorab durchgeführte Abflußseparation in die vier Abflußkomponenten Q_g , Q_d , Q_{do} und Q_o (Kap. 3.7). Innerhalb der einzelnen Abflußanteile kommt es zu keinen großen Schwankungen der Stoffinhalte. So konnten über die mittleren Stoffkonzentrationen und die Tagesabflüsse Jahresganglinien für den Stoffaustrag über die Abflußanteile in $\text{kg/ha} \cdot \text{d}$ konstruiert werden (Abb. 40).

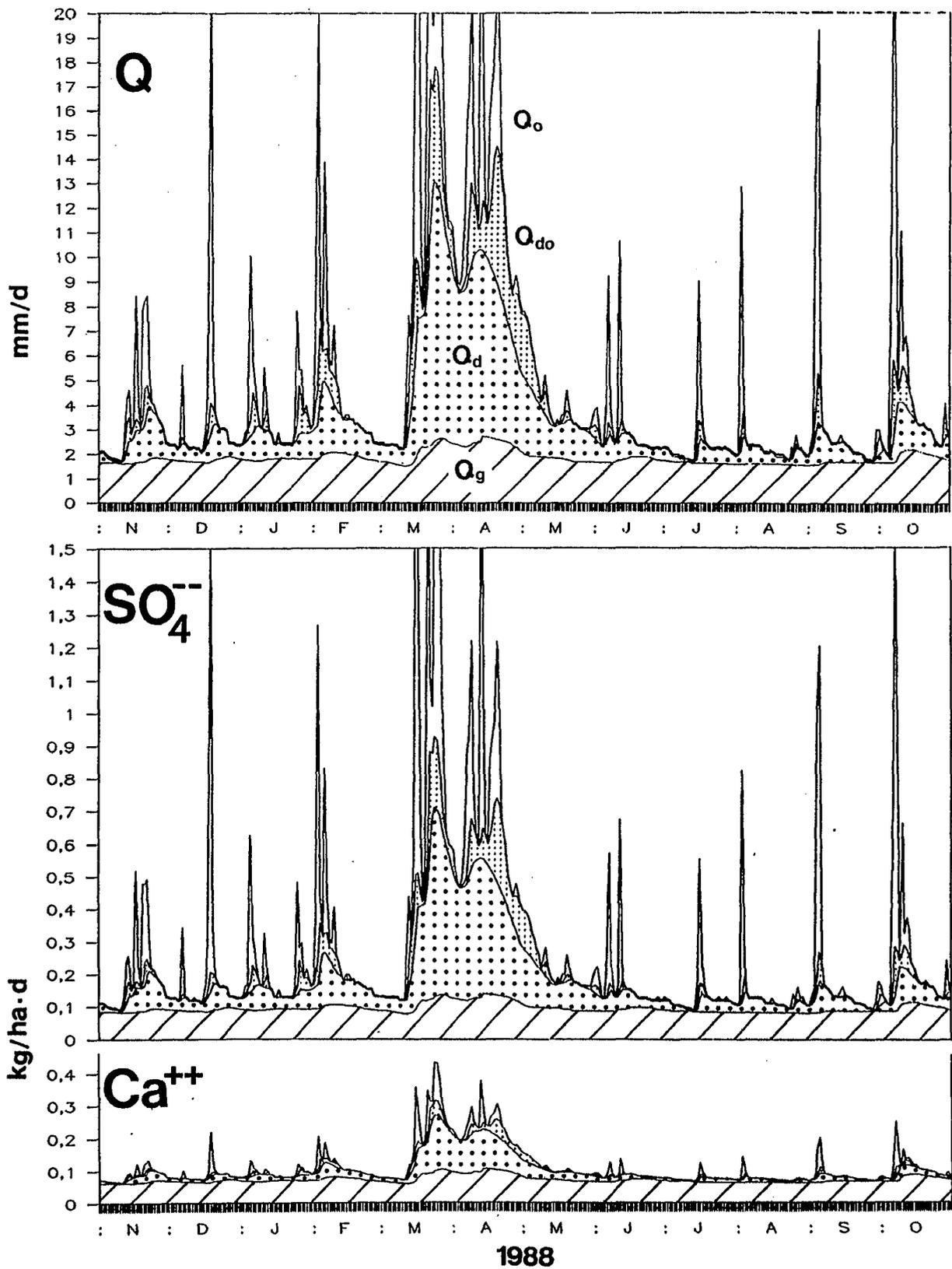


Abb. 40: Abfluß- und Stoffaustragsganglinie für Calcium und Sulfat am Seebach 1988

Die qualitativen Unterschiede der einzelnen Abflußkomponenten spiegeln sich im Stoffaustrag wieder. Dies zeigt sich besonders beim Vergleich der Ganglinien vom Calcium- zum Sulfataustrag (Abb. 40).

Im Jahr 1988 wurden am Seebach 64% der Ca-Fracht über das Grundwasser ausgetragen, obwohl der Anteil des Grundwasserabflusses Q_g am Gesamtabfluß nur 35% beträgt. Im Trockenjahr 1985 erreichte der Ca-Austrag über Q_g sogar 85% wobei der Q_g -Abflußanteil mit 58% auch entsprechend höher war als in den Naßjahren 1986 bis 1988 (Abb. 41). Infolge der Abpufferung der eingetragenen Säuren kommt es auf dem Weg des Wassers durch den Buntsandsteinaquifer, sowie beim Kontakt mit der liegenden Abrasionsfläche des Grundgebirges zu verstärktem Kationenaustausch und Silikatverwitterung (EINSELE et al., 1988). Der Gehalt an Erdalkalien wird erhöht und der Frachtanteil der flacheren Wässer am Gesamtaustrag geht auf ein Minimum zurück. Die Magnesium-Frachtkurve zeigt einen entsprechenden Verlauf bei noch etwas höherem Frachtanteil über das Grundwasser von max. 89% im Trockenjahr 1985.

Am Rotenbach ist der Frachtanteil über das Grundwasser aufgrund des starken unterirdischen Grundwasserzustromes noch höher als am Seebach. Auch in den Naßjahren 1987 und 1988 wurden im Mittel ca. 75% der Ca- und über 80% der Mg-Fracht über das Grundwasser ausgetragen (Abb. 42). An der Kleinen Kinzig ist dieser Trend nur abgeschwächt ausgebildet. Bei durchschnittlich 60% Q_g -Anteil in den beiden Meßjahren beträgt die Ca- und Mg-Fracht über das Grundwasser 67 bzw. 65% am Gesamtaustrag (Abb. 43). Durch Auswaschung des oberen Buntsandsteines sind an der Kleinen Kinzig schon die flacheren Wässer an Erdalkalien angereichert. Zudem kommt das Grundwasser in diesem Gebiet nicht mit dem Grundgebirge in Kontakt. Der Grundwasseranteil stammt überwiegend aus den Schichtquellen an der Grenze vom Eck'schen Konglomerat zum Unteren Buntsandstein (Kap. 3.5.1.3). So unterliegt das Wasser bei der Passage durch den karbonatarmen Buntsandstein nur noch einer geringfügigen Zunahme der Erdalkali-Gehalte. Dementsprechend folgen die Frachtganglinien weitgehend der Abflußganglinie.

Einen entgegengesetzten Verlauf zeigt der Sulfataustrag (Abb. 40). Über Stoffspeicherungsprozesse wird das infiltrierte Niederschlagswasser zunehmend an Sulfat abgereichert (vgl. EHMANN, 1988). In den Jahren 1986 bis 1988 erfolgten am Seebach 65 bis 70% des Sulfataustrages über die flacheren Abflußkomponenten Q_o , Q_{do} und Q_d bei einem Abflußanteil von 59 bis 65% (Abb. 41). Am Rotenbach und an der Kleinen Kinzig wird dieser Trend bestätigt.

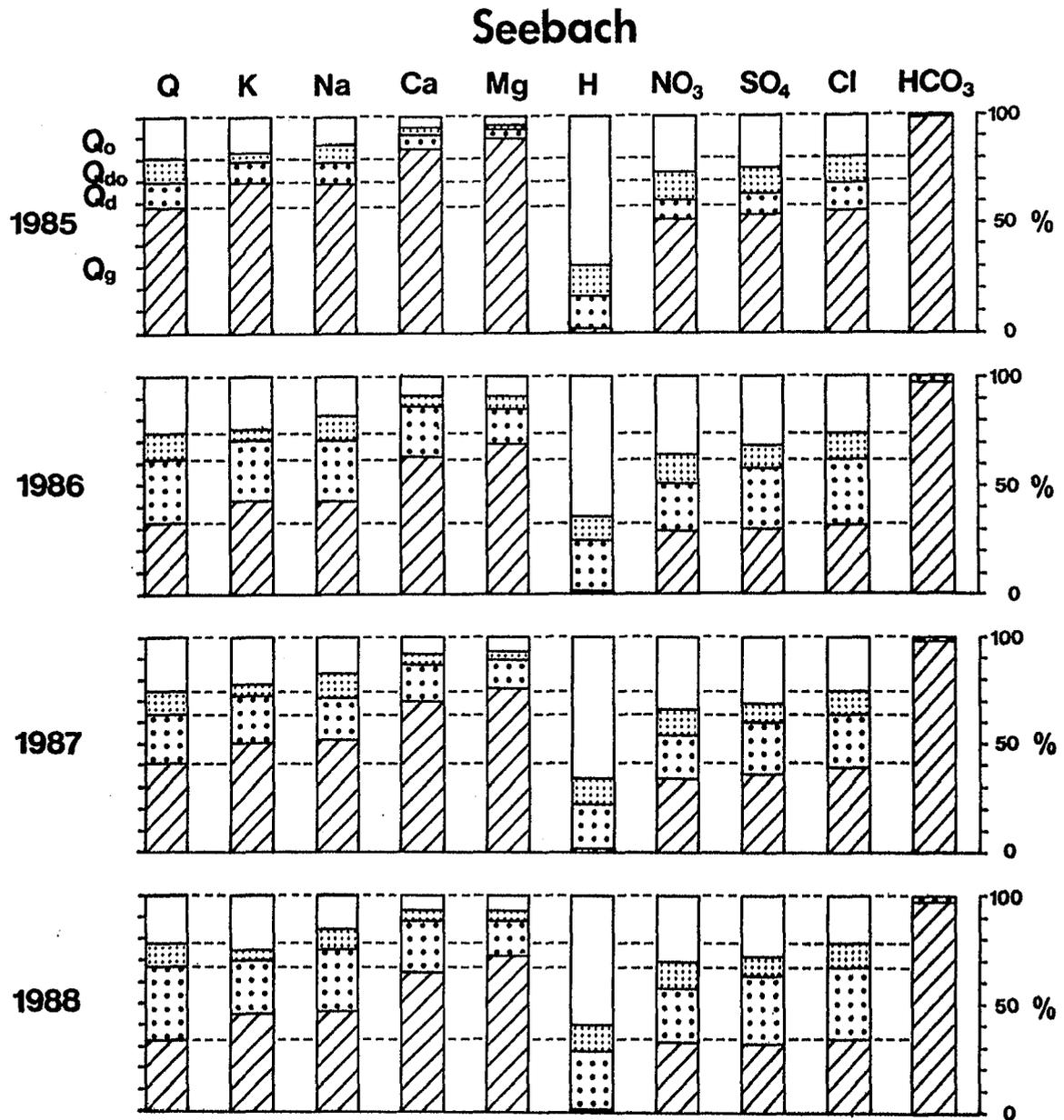


Abb. 41: Prozentuale Verteilung der Stoffausträge über die verschiedenen Abflußkomponenten am Seebach

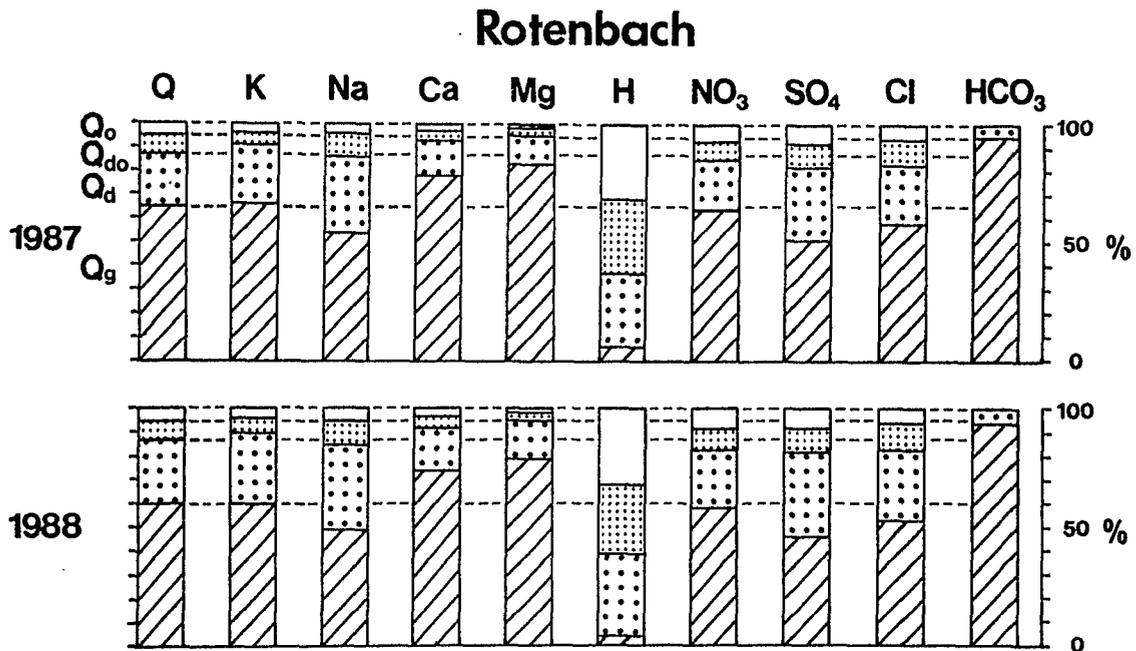


Abb. 42: Prozentuale Verteilung der Stoffausträge über die verschiedenen Abflußkomponenten am Rotenbach

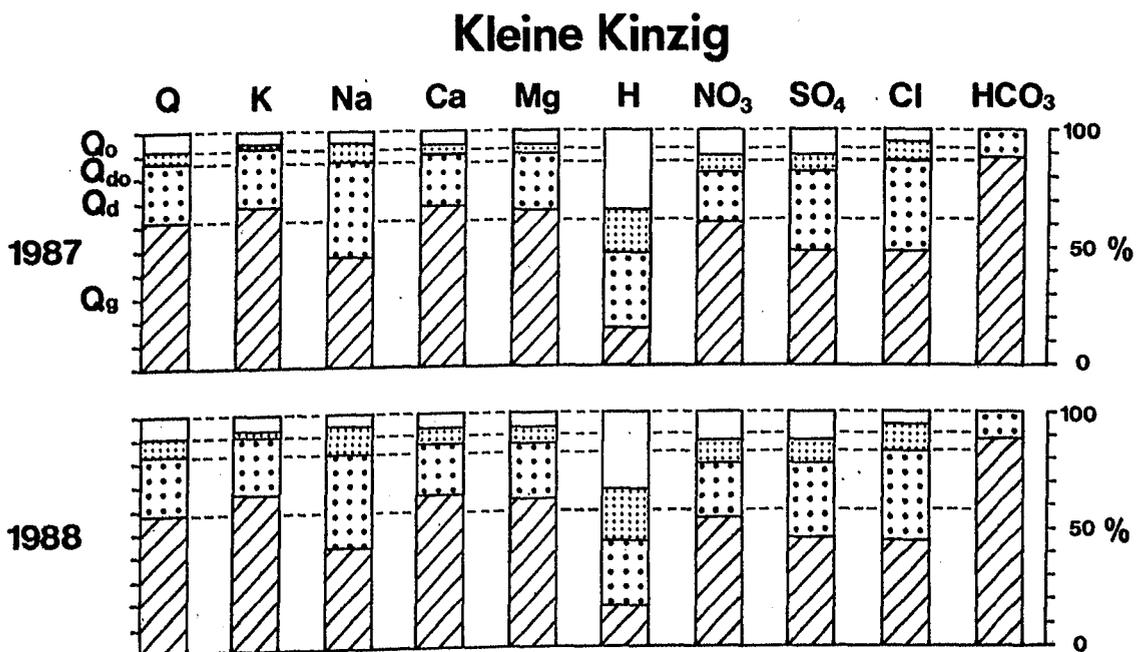


Abb. 43: Prozentuale Verteilung der Stoffausträge über die verschiedenen Abflußkomponenten an der Kleinen Kinzig

Nitrat zeigt dieselbe Austragsverteilung zwischen dem Grundwasser und den flacheren Abflußkomponenten. Dabei fällt am Seebach der hohe Frachtanteil des oberflächennahen Abflusses Q_o auf. Vor allem in regenreichen Jahren kann über

1/3 des NO_3 -Austrages über den Q_0 erfolgen, während der Austrag über den Deckschichtenabfluß deutlich unter dem Abflußanteil liegt. Die Pflanzen entziehen dem tiefer sickernenden Wasser auf seinem Weg vom Boden in die Deckschichten Nitrat, sodaß das Deckschichtenwasser an Nitrat abgereichert ist (Kap. 4.3 bis 4.5). Dementsprechend wird auch der Austrag über das Deckschichtenwasser verringert.

Infolge des weitaus geringeren Q_0 -Anteils am Rotenbach und der Kleinen Kinzig ist auch der NO_3 -Frachtanteil über den oberflächennahen Abfluß am Gesamtaustrag viel geringer als am Seebach. Dennoch ist auch hier dieselbe Tendenz festzustellen, mit einer Anreicherung im Q_0 und Q_{d0} gegenüber Q_d und Q_g .

Geringere Konzentrationsschwankungen zeigen die Na- und Cl-Gehalte (Kap. 4.3 bis 4.6). Hier sind die Stofffrachten lediglich eine Funktion der momentanen Schüttungsmenge im Vorfluter. Nur an der streusalzbeeinflussten Kleinen Kinzig sind deutliche Abweichungen festzustellen. Ähnlich dem Sulfat geht die Na- und Cl-Fracht im Grundwasser gegenüber dem Abflußanteil zurück. Vor allem die Deckschichtenwässer Q_d und Q_{d0} bringen einen erhöhten Austrag, während der oberflächennahe Abfluß weniger beeinflusst ist. Nahe der Straße auf der Hochfläche kommt es kaum zur Bildung von Q_0 . Das Streusalz wird mit dem Sickerwasser in die tieferen Deckschichtenbereiche eingetragen und bei verstärktem Deckschichtenabfluß nach der Schneeschmelze oder intensiven Niederschlägen ausgespült.

Der Kaliumaustrag folgt ebenfalls weitgehend der Abflußverteilung. Die etwas erhöhten Kaliumfrachten über das Grundwasser am Seebach sind auf verstärkte Kationenaustauschvorgänge und Silikatverwitterung beim Kontakt mit dem Grundgebirge zurückzuführen.

Hydrogencarbonat wird fast ausschließlich über das Grundwasser ausgetragen. Lediglich in Naßjahren bei sehr hohem Q_d -Anteil am Gesamtabfluß gelangt auch ein nennenswerter Frachtanteil über den Deckschichtenabfluß in den Vorfluter. Dies gilt vor allem für die besser abgepufferten Wässer am Rotenbach und der Kleinen Kinzig.

Die H^+ -Frachten wurden aus den gemessenen pH-Werten und den jeweiligen Abflußhöhen errechnet. Dementsprechend stammt die Protonenfracht nahezu vollständig aus den flacheren Abflußanteilen, wobei der Q_0 am Seebach mit 60 bis 68% an der Gesamtfracht den größten Anteil bringt. So ist besonders bei Hochwasser mit großem Q_0 -Anteil mit Versauerungsschüben und hoher Schadstofffracht (z.B. SO_4 und Al) im Vorfluter zu rechnen. Am Rotenbach ist der H^+ -Austrag infolge des geringeren Q_0 -Anteils am Gesamtabfluß gleichmäßig auf die flachen Abflußkomponenten Q_0 bis Q_d verteilt.

In den Tab. 23 bis 25 sind die ermittelten Stoffausträge aus den verschiedenen Gebieten aufgelistet. Die über die Stofffrachtseparation erhaltenen Werte zeigen eine gute Übereinstimmung mit den von IROUSCHEK (1989) berechneten Werten. Dies bestätigt sowohl die durchgeführte Abflußseparation (Kap. 3.7) als auch die ermittelten Austragswerte anhand der Stofffrachtseparation.

Am Seebach wurden im Trockenjahr 1985 ca. 226 kg/ha·a an gelösten Stoffen ausgetragen. In den folgenden niederschlagsreichen Jahren wurden deutlich höhere Frachten zwischen 351 und 392 kg/ha·a erreicht. In Trockenjahren dominiert das Hydrogencarbonat, während in Naßjahren Nitrat und Sulfat ca. die Hälfte der Gesamtfracht bilden.

Am Rotenbach ist in den beiden Meßjahren mit 1024 und 1081 kg/ha·a die Lösungsfracht infolge des starken unterirdischen Grundwasserzustromes weitaus größer. Über den Q_{GW} werden mit 667 und 652 kg/ha·a nahezu 2/3 der Gesamtfracht ausgetragen. Nach Abzug von Q_{GW} erreicht der Stoffaustrag über das oberirdische Einzugsgebiet des Rotenbachs ähnliche Werte wie am Seebach. Dabei verschiebt sich allerdings das Austragsverhältnis vom Grundwasser Q_{GRb} zum Deckschichtenabfluß Q_{d} deutlich zugunsten des Q_{d} , wodurch sich der höhere Deckschichtenabfluß am Rotenbach bemerkbar macht. Bei der Gesamtfracht ist das HCO_3 aufgrund des hohen Grundwasserabflusses mit 40% Anteil klar dominierend. Entsprechend hoch sind auch die Erdalkaliausträge mit durchschnittlich 138 kg Ca und 49 kg Mg/ha·a.

An der Kleinen Kinzig werden mit 356 und 389 kg/ha·a trotz weit geringerer Einträge nahezu dieselben Austragsraten erreicht wie am Seebach. Dies ist wiederum auf die Beeinflussung durch Streusalz zurückzuführen. Die deutlich niedrigeren Frachten an Nitrat, Sulfat und auch Kalium werden durch stark erhöhte Natrium- und Chloridausträge ausgeglichen. Im von Streusalz unbeeinflussten Nachbargebiet des Huttenbächle hat IROUSCHEK (1989) mit 22 kg Cl und 9,5 kg Na/ha·a etwa dreifach geringere Na- und Cl-Austragswerte ermittelt als an der Kleinen Kinzig. Die übrigen Ionen zeigen ähnliche Austragsmengen wie am Seebach.

Seebach		K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	H ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
1985	Q _o	1,7	0,9	1,2	0,3	0,23	11,2	12,7	3,8	0,0
	Q _{do}	0,5	0,6	0,7	0,2	0,05	5,4	5,0	2,4	0,0
	Q _d	1,1	0,7	1,8	0,4	0,05	3,9	6,3	2,5	0,4
	Q _g	7,4	4,9	21,3	7,0	0,01	22,2	28,3	11,3	59,7
	Q _{ges}	10,6	7,1	25,1	7,9	0,34	42,8	52,2	20,0	60,1
1986	Q _o	4,1	2,1	3,0	0,9	0,56	27,8	31,3	9,4	0,0
	Q _{do}	0,9	1,2	1,9	0,6	0,10	10,2	9,4	4,5	0,0
	Q _d	4,8	3,0	8,1	1,8	0,20	17,3	27,5	11,1	1,9
	Q _g	7,6	5,0	21,9	7,2	0,01	22,8	29,0	11,6	61,4
	Q _{ges}	17,4	11,4	34,9	10,5	0,88	78,0	97,2	36,6	63,3
1987	Q _o	3,9	2,0	2,8	0,8	0,53	26,3	29,7	8,9	0,0
	Q _{do}	0,8	1,1	1,8	0,5	0,09	9,2	8,5	4,1	0,0
	Q _d	3,9	2,4	6,6	1,5	0,16	14,1	22,4	9,1	1,6
	Q _g	9,0	6,0	26,1	8,6	0,01	27,2	34,6	13,8	73,1
	Q _{ges}	17,7	11,6	37,3	11,4	0,80	76,8	95,2	35,9	74,7
1988	Q _o	3,9	2,0	2,8	0,8	0,53	26,1	29,5	8,8	0,0
	Q _{do}	0,9	1,2	2,0	0,6	0,11	10,4	9,6	4,6	0,0
	Q _d	5,9	3,7	9,9	2,2	0,25	21,2	33,7	13,7	2,4
	Q _g	8,9	5,9	25,8	8,7	0,01	26,9	34,2	13,7	72,4
	Q _{ges}	19,7	12,9	40,5	12,1	0,89	84,7	107,1	40,8	74,8

Tab. 23: Stoffausträge (kg/ha·a) über die verschiedenen Abflußkomponenten aus dem Gebiet Seebach

Rotenbach		K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	H ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
1987	Q _o	1,6	1,3	3,8	1,0	0,09	10,2	10,8	3,5	0,0
	Q _{do}	2,4	3,0	5,8	1,4	0,09	12,4	14,3	6,6	0,0
	Q _d	11,4	8,8	19,9	5,9	0,09	31,3	41,7	15,9	19,8
	Q _{gRb}	5,3	2,8	18,9	7,1	0,01	16,9	12,7	6,5	74,2
	Q _{gW}	24,4	13,0	87,1	33,0	0,01	78,0	58,9	29,9	342,9
	Q _{ges}	45,1	29,0	135,4	48,3	0,29	148,7	138,4	62,4	417,1
1988	Q _o	1,9	1,6	4,5	1,2	0,11	12,2	12,9	4,2	0,0
	Q _{do}	2,7	3,3	6,4	1,5	0,10	13,7	15,8	7,3	0,0
	Q _d	14,6	11,3	25,5	7,5	0,12	40,1	53,4	20,4	25,4
	Q _{gRb}	5,2	2,7	18,4	7,0	0,01	16,5	12,5	6,3	72,5
	Q _{gW}	23,9	12,7	85,1	32,1	0,01	76,2	57,5	29,3	335,0
	Q _{ges}	48,2	31,7	139,9	49,4	0,34	158,7	152,1	67,4	432,9

Tab. 24: Stoffausträge (kg/ha·a) über die verschiedenen Abflußkomponenten aus dem Gebiet Rotenbach

Kl. Kinzig		K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	H ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
1987	Q _o	0,6	1,5	2,2	0,8	0,05	6,5	6,1	2,9	0,0
	Q _{d o}	0,3	2,7	1,7	0,6	0,03	4,0	3,8	5,0	0,0
	Q _d	3,3	13,2	8,5	3,2	0,05	12,6	18,8	24,1	9,3
	Q _g	9,0	15,0	26,7	8,9	0,03	36,0	28,6	30,2	69,5
	Q _{g e s}	13,2	32,2	39,1	13,5	0,15	59,1	57,2	62,1	78,8
1988	Q _o	0,8	1,8	2,7	1,0	0,06	8,2	7,6	3,6	0,0
	Q _{d o}	0,4	4,4	2,8	1,1	0,04	6,7	6,3	8,4	0,0
	Q _d	3,6	14,5	9,4	3,6	0,05	13,8	20,7	26,5	10,2
	Q _g	9,3	15,4	27,5	9,6	0,03	37,0	29,4	31,0	71,5
	Q _{g e s}	14,1	36,1	42,4	15,2	0,18	65,7	63,9	69,5	81,7

Tab. 25: Stoffausträge (kg/ha·a) über die verschiedenen Abflußkomponenten aus dem Gebiet Kleine Kinzig

5.3 Stoffumsatz

5.3.1 Einzugsgebiet Seebach

Bei der Bilanzierung der Stoffumsätze muß beim Eintrag in den Bestand die Kronenauswaschung und die Speicherung im Biomassezuwachs berücksichtigt werden. Dazu wurden die aus langjährigen Meßreihen im Fichtenbestand des Solling ermittelten Werte für den internen Stoffkreislauf übernommen (ULRICH et al., 1979; ULRICH et al., 1976). Die Kronenauswaschung und die Speicherung im Biomassezuwachs ergeben zusammen den pflanzlichen Nährstoffbedarf (PfN). Durch Abzug vom Stoffeintrag im Bestand (NB - PfN) erhält man einen Netto-Stoffeintrag (NS), der dem Austrag gegenübergestellt werden kann (Tab. 26).

Bei den meisten Ionen steht dem Stoffeintrag ein höherer Stoffaustrag gegenüber. Besonders die Erdalkalien Ca und Mg weisen eine negative Stoffbilanz auf. Im Trockenjahr 1985 wird praktisch der gesamte Ca-Eintrag vom pflanzlichen Nährstoffbedarf verbraucht, sodaß der gesamte Austrag auf die Auswaschung geogenen Calciums zurückzuführen ist. Bei größerem Stoffeintrag in Jahren höherer Niederschläge stammt ein Teil der ausgetragenen Erdalkalien aus der Atmosphäre. Dies bestätigt auch der deutlich zunehmende Anteil der flacheren Abflußkomponenten Q_o bis Q_d am Austrag (Abb. 44).

Seebach		K	Na	Ca	Mg	NO ₃	SO ₄	Cl
1985	PfN	15,7	0,9	16,9	1,3	-	12,0	2,2
	NB	18,3	7,2	16,9	3,2	50,3	89,1	23,2
	NS	2,6	6,3	0,0	1,9	-	77,1	21,0
	A	10,6	7,1	25,1	7,9	42,8	52,2	20,0
	NS-A	-8,0	-0,8	-25,1	-6,0	(7,5)	24,9	-1,0
1986	NB	28,0	11,1	25,9	5,0	77,1	136,7	35,5
	NS	12,3	10,2	9,0	3,7	-	124,7	33,3
	A	17,4	11,4	34,9	10,5	78,0	97,2	36,6
	NS-A	-5,1	-1,2	-25,9	-6,8	(-0,9)	19,6	-5,2
	1987	NB	26,0	10,3	24,1	4,6	71,5	126,8
NS		10,3	9,4	7,2	3,3	-	114,8	30,7
A		17,7	11,6	37,3	11,4	76,8	95,2	35,9
NS-A		-7,4	-2,2	-30,1	-8,1	(-5,3)	19,6	-5,2
1988		NB	27,7	10,9	25,6	4,9	76,0	134,7
	NS	12,0	10,0	8,7	3,6	-	122,7	32,8
	A	19,7	12,9	40,5	12,1	84,7	107,1	40,8
	NS-A	-7,7	-2,9	-31,8	-8,5	(-8,7)	15,6	-8,0

Tab. 26: Stoffbilanz (kg/ha · a) im Gebiet Seebach

PfN = Kronenauswaschung + Speicherung im Biomassezuwachs
 NB = Stoffeintrag durch Bestandesniederschlag
 NS = Netto-Stoffeintrag (NB - PfN)
 A = Stoffaustrag durch Vorfluter
 NS-A = Stoffspeicherung bzw. Lösung

Durch die intensive Kaliumauswaschung in den Baumkronen ist der Nährstoffbedarf mit ca. 16 kg/ha · a entsprechend hoch. Es verbleiben Nettoeinträge von 2,6 kg/ha im Trockenjahr 1985 und durchschnittlich 11,5 kg/ha in den Naßjahren 1986 bis 1988. Dem stehen Austräge von 10,6 (1985) bis 19,7 kg/ha · a gegenüber. Der Austragsüberschuß ist auf Kationenaustauschvorgänge und die Verwitterung von Silikaten zurückzuführen. Nähere Untersuchungen zu der Lösungsgeschwindigkeit von Silikaten führt SCHLÖSER (1990) durch.

Die Natrium- und Chloridbilanz erscheint in Trockenjahren nahezu ausgeglichen. In feuchten Jahren kommt es zu Mehrausträgen, die auf einen verstärkten Kationenaustausch bzw. Silikatverwitterung hinweisen.

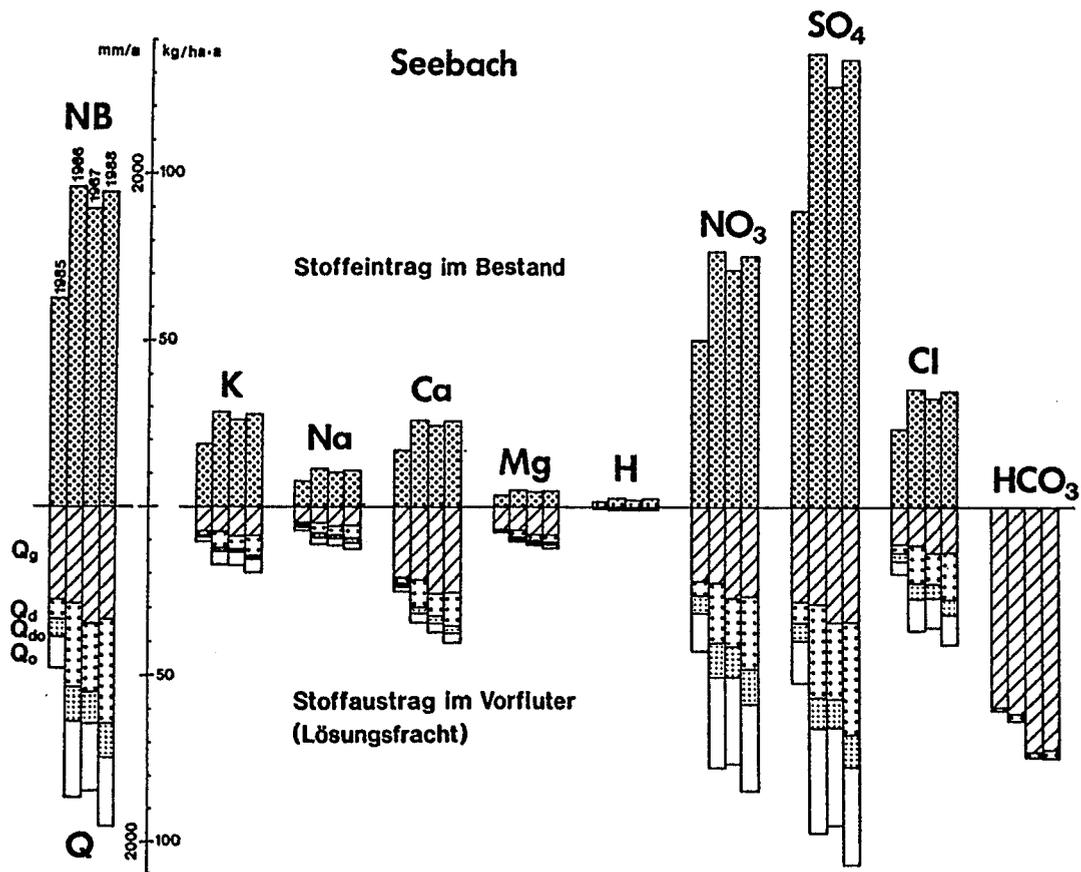


Abb. 44: Stoffbilanz mit Stofffrachtseparation am Seebach

Nennenswerte Speicherungsprozesse sind lediglich beim Sulfat festzustellen. Dabei scheinen vor allem in Trockenjahren größere Mengen an Sulfat im Untergrund gespeichert zu werden. 1985 überstieg der Nettoeintrag den Austrag um ca. 25 kg/ha, während in den folgenden Meßjahren zwischen 16 und 20 kg $\text{SO}_4/\text{ha} \cdot \text{a}$ im Untergrund verblieben. Nach PRENZEL (1983) ist für SO_4 neben der Anionenadsorption eine Ausfällung zusammen mit Al als AlOHSO_4 denkbar. Der deutliche Anstieg des Gesamtaustrages in niederschlagsreichen Jahren ist vor allem auf einen erhöhten Austrag über die flacheren Abflußkomponenten zurückzuführen (Abb. 44), was letztendlich nur auf die veränderten Abflußanteile zurückzuführen ist (Kap. 5.2.1).

Aufgrund der komplizierten Stickstoffdynamik kann die Nitratbilanzierung nur abgeschätzt werden. Zusätzlich ist eine Flüßbilanz nach MATZNER (1985) mit Unsicherheiten verbunden, da ein wesentlicher Teil der Stickstoffdeposition im Kronenraum assimiliert werden kann.

Aus welchen Horizonten die Stoffe ausgetragen bzw. in welchen Bereichen sie gespeichert werden kann aus der Stofffrachtseparation in Abb. 44 nicht abgelesen werden. Nur ein Teil der aus dem Boden und den Deckschichten

ausgewaschenen Stoffe wird über die flachen Abflußkomponenten ausgetragen. Der Hauptanteil gelangt mit dem Sickerwasser in den tiefer gelegenen Aquifer und wird über die Basisquellen (Q_g) ausgetragen. Über die bekannten Konzentrationen in den verschiedenen Abflußkomponenten und nach Berücksichtigung der atmosphären eingetragenen Stoffe kann die Auswaschung oder Speicherung in den verschiedenen Kompartimenten berechnet werden (Tab. 27, Abb. 45) (EINSELE et al. (1988)).

Abb. 45 zeigt die Auswaschungs- und Speicherungsprozesse für Calcium und Sulfat. Calcium erfährt in allen Horizonten eine Auswaschung. Mit 3 bis 6 kg/ha · a wurde schon ein nicht unerheblicher Teil des Calciums aus dem Oberboden ausgewaschen (Tab. 27). Vor allem in Naßjahren stammt ein Großteil der Calciumfracht im Vorfluter aus den Deckschichten. Aus dem Aquifer selbst werden zwischen 11 und 18 kg/ha · a Ca ausgewaschen. Magnesium wird ebenfalls aus allen Horizonten ausgewaschen, wobei der Großteil aus dem Aquifer stammt. Gleiche Ergebnisse erhielt EHMANN (1988), nachdem alle Horizonte für die Erdalkalien eine Quelle darstellen. Der gesamte Untergrund verarmt zunehmend an pufferfähigen Erdalkalien (EINSELE et al, 1988). Nach IROUSCHEK (1989) scheint die Pufferfähigkeit vieler Waldböden heute nicht mehr auszureichen, um die eingetragenen Protonen zu neutralisieren. In sauren Waldböden besitzen die Silikate die größte Kapazität zur Abpufferung von Protonen (ULRICH, 1983).

Seebach		K	Na	Ca	Mg	SO ₄	Cl
1985	Boden	-6,2	1,7	-6,4	-0,1	10,4	1,0
	Deckschichten	-0,4	-1,0	-7,3	-1,3	11,5	2,9
	Aquifer	-1,5	-1,5	-11,3	-4,8	2,9	-1,0
	Gesamt	-8,1	-0,8	-25,0	-6,2	24,8	-1,0
1986	Boden	-3,5	1,9	-2,5	0,5	4,2	-2,4
	Deckschichten	-0,7	-1,6	-12,2	-2,3	19,1	-1,1
	Aquifer	-0,9	-1,4	-11,2	-5,0	4,2	-0,8
	Gesamt	-5,1	-1,1	-25,9	-6,8	27,5	-3,3
1987	Boden	-5,3	1,3	-4,1	0,1	-4,8	-4,8
	Deckschichten	1,2	-0,5	-9,1	-1,5	23,6	1,8
	Aquifer	-3,4	-3,0	-17,6	-6,9	0,8	-3,2
	Gesamt	-7,4	-2,2	-30,8	-8,3	19,6	-6,2
1988	Boden	-5,6	0,8	-4,1	0,0	-11,4	-7,4
	Deckschichten	-0,8	-1,9	-14,2	-2,6	22,4	-1,9
	Aquifer	-1,2	-1,7	-13,5	-5,9	4,7	1,3
	Gesamt	-7,6	-2,8	-31,8	-8,5	15,7	-8,0

Tab. 27: Stoffaustrag und -speicherung (kg/ha·a) aus Böden, Deckschichten und Aquifer am Seebach

Obwohl Kalium im Oberboden leicht an Tonmineralen und Bodenkolloiden gebunden wird, ist die K-Bilanz für die obersten Bereiche negativ (Tab. 27). Hier zeigt sich wiederum die verstärkte Silikatverwitterung durch den Eintrag mineralischer Säuren. Dieser Trend setzt sich bis in den Aquifer fort, sodaß die Kaliumbilanz insgesamt einen 5 bis 8 kg/ha·a höheren Austrag als Eintrag aufweist.

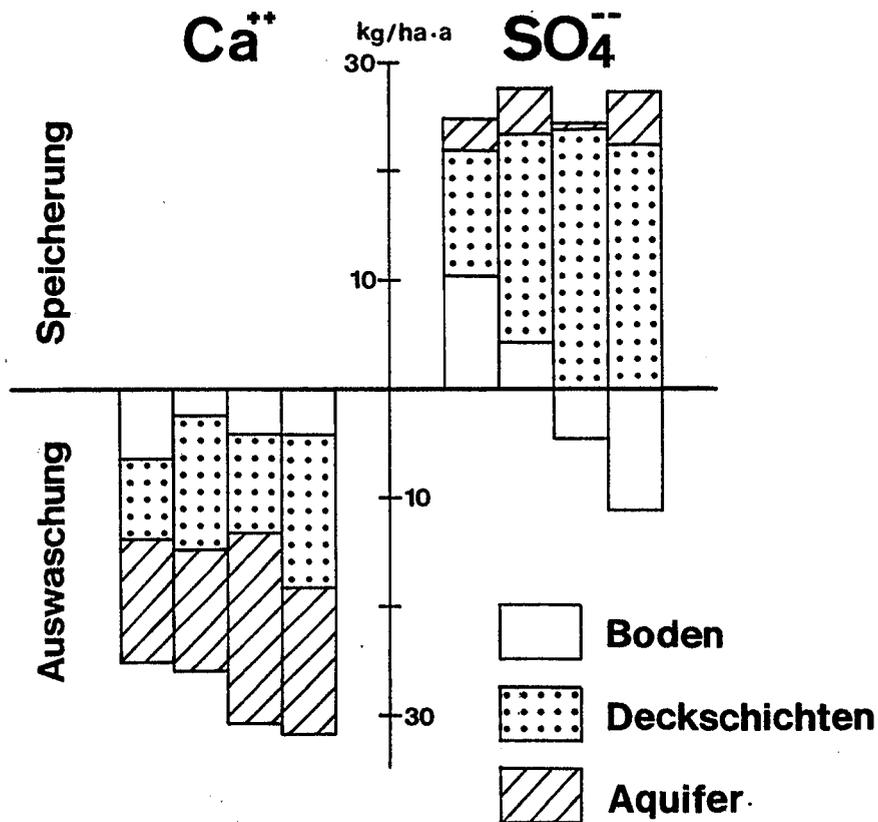


Abb. 45: Stoffaustrag und -speicherung für Calcium und Sulfat aus Böden, Deckschichten und Aquifer am Seebach

Das über den Vorfluter ausgetragene Sulfat ist ausschließlich atmosphärischen Ursprungs. Abnehmende Sulfatkonzentrationen von den flachen Abflußkomponenten bis zum tieferen Grundwasser zeigen, daß dem Sickerwasser auf seinem Weg vom Boden bis in den Aquifer SO_4 entzogen wird (REHFUESS & FISCHER, 1986; FASSBENDER & MATZNER, 1977). So können analog zur Berechnung der Auswaschungsraten auch die Speicherraten berechnet werden. Im Trockenjahr 1985 werden ca. 25 kg/ha·a SO_4 im Untergrund gespeichert. Davon werden mit ca. 10 kg/ha·a schon im geringmächtigen Oberboden etwa 40% abgelagert, während im Aquifer nur noch geringe

Speicherungsprozesse ablaufen. Nach HAUHS (1985) erfolgt die Sulfatdeposition im Harz zu ca. 50% schon im Boden. Die Deckschichten nehmen vor allem in Naßjahren den größten Teil des Sulfates auf, wobei eine verstärkte Ausfällung im Bereich der Ortsteinhorizonte wahrscheinlich ist. In Naßjahren scheint die Speicherrate im Oberboden zurückzugehen. In den Jahren 1987 und 1988 wurde sogar eine Auswaschung von Sulfat aus dem Oberboden festgestellt. Hier ist eine Remobilisierung von zuvor abgelagertem Sulfat durch einen höheren Protoneneintrag und eine daraus resultierende pH-Absenkung in niederschlagsreichen Jahren denkbar. IROUSCHEK (1989) führt den SO_4 -Eintrag übersteigenden Mehraustrag aus dem Boden auf einen Austrag von früher zusammen mit Aluminium im Boden als AlOHSO_4 gespeichertem Sulfat zurück. Nach PRENZEL (1983) kann bei fortgesetzter Zufuhr von Säure-Ionen zuvor im Boden gespeichertes AlOHSO_4 wieder in Lösung gehen. Durch das geringe Angebot an pufferenden Substanzen im Boden sind nur geringe Mengen an eingetragenen Mineralsäuren nötig um den pH-Wert deutlich zu erniedrigen. Mit Erreichen des Aluminiumpufferbereiches gehen zuvor ausgefällte Al-Verbindungen wieder in Lösung und werden ausgewaschen. In den Deckschichten wird das mobilisierte Sulfat dem Sickerwasser wieder entzogen, was die hohen Speicherungsdaten anzeigen (Abb. 45, Tab. 27).

5.3.2 Einzugsgebiet Rotenbach

Infolge des starken Grundwasserzustromes stehen am Rotenbach dem Eintrag weit höhere Austräge gegenüber (Abb. 46). Dies gilt vor allem für die Stoffe geogener Herkunft wie Calcium und Magnesium. Auffallend hoch ist auch der Hydrogencarbonat-Austrag, der zum größten Teil über den Grundwasserzuström erfolgt.

Rotenbach		K	Na	Ca	Mg	NO_3	SO_4	Cl
	PfN	15,7	0,9	16,9	1,3	-	12,0	2,2
1987	NB	29,2	6,6	20,5	3,0	101,0	117,2	25,5
	NS	13,5	5,7	3,6	1,7	-	105,2	23,3
	A-Q _{gw}	20,7	16,0	48,3	15,3	70,7	79,5	32,5
	NS-A	-7,2	-10,3	-44,7	-13,6	(30,3)	25,7	-9,2
1988	NB	31,7	7,2	22,2	3,3	109,8	127,4	28,3
	NS	16,0	6,3	5,3	2,0	-	115,4	26,1
	A-Q _{gw}	24,3	19,0	54,8	17,3	82,5	94,6	38,1
	NS-A	-8,3	-12,7	-49,5	-15,3	(27,3)	20,8	-12,0

Tab. 28: Stoffbilanz (kg/ha · a) im Gebiet Rotenbach

Für eine Stoffbilanz im Gebiet Rotenbach muß der Austrag ohne die Fracht über den Grundwasserzustrom dem Eintrag gegenübergestellt werden (Tab. 28).

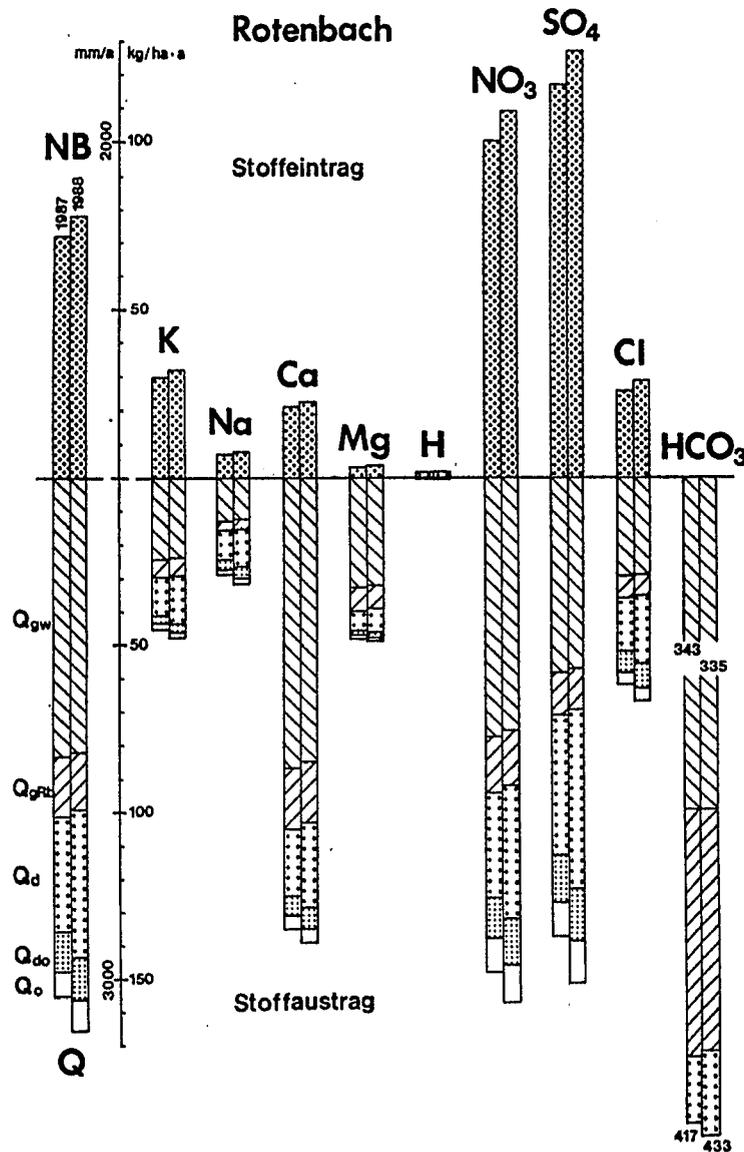


Abb. 46: Stoffbilanz mit Stofffrachtseparation am Rotenbach

Einem Nettoeintrag an Calcium von 3,6 (1987) und 5,3 kg/ha·a (1988) stehen Austräge von 48,3 und 54,8 kg/ha·a gegenüber. Somit wurden insgesamt 44,7 bzw. 49,5 kg Ca/ha·a aus dem Untergrund ausgetragen. Dabei stammt der größte Teil des ausgetragenen Calciums aus den Böden (Tab. 29). Wie in Kap. 4.3 beschrieben, wird der eingetragene Niederschlag im Gegensatz zum Seebach durch ein erhöhtes Ca-Mg-Angebot schon im Boden besser abgepuffert. Hier könnten sich allerdings auch die in den letzten Jahren durchgeführten Düngemaßnahmen auf den Erdalkaliaustrag durch erhöhte Frachten auswirken.

Das tiefer gelangende Sickerwasser ist dementsprechend weniger kalkaggressiv als am Seebach. Dies kommt durch die geringeren Ca-Frachten aus den Deckschichten zum Ausdruck (Tab. 29). Der mit 7,5 bis 7,8 kg/ha·a geringere Aquiferanteil ist vor allem auf den geringeren Grundwasseranteil (Q_{gRb}) aus dem oberirdischen Einzugsgebiet des Rotenbachs zurückzuführen (Kap. 3.7).

Die Magnesiumbilanz entspricht in ihrer Verteilung weitgehend der Calciumbilanz. Einem Nettoeintrag von durchschnittlich 1,9 kg/ha·a steht ein Austrag von 16 kg/ha·a gegenüber, wobei der Großteil des Austrages ebenfalls aus den Böden stammt.

Eine mit dem Seebach übereinstimmende Bilanz zeigt das Kalium bei einem Mehraustrag von 7,2 bis 8,3 kg/ha·a. Dabei wird aus den Deckschichten der größte Teil ausgewaschen, während im Aquifer sich sogar geringe Speicherungsraten andeuten. Allerdings ist zu bemerken, daß eine Stoffbilanz infolge der zahlreichen, zu berücksichtigenden Faktoren nur eine Abschätzung der Stoffflüsse darstellt. Bei diesen Einschränkungen ist ein rechnerischer Unterschied von 2 kg/ha·a unbedeutend.

Rotenbach		K	Na	Ca	Mg	SO ₄	Cl
1987	Boden	-2,2	-7,6	-33,9	-8,3	-2,8	-11,5
	Deckschichten	-7,1	-4,4	-3,3	-1,9	19,8	1,8
	Aquifer	2,1	1,7	-7,5	-3,4	8,7	0,5
	Gesamt	-7,2	-10,3	-44,7	-13,6	25,7	-9,2
1988	Boden	-2,1	-9,0	-38,0	-9,5	-8,7	-14,1
	Deckschichten	-8,2	-5,2	-3,7	-2,7	22,9	1,1
	Aquifer	2,0	1,5	-7,8	-3,1	8,0	0,2
	Gesamt	-8,3	-12,7	-49,5	-14,3	22,2	-12,8

Tab. 29: Stoffaustrag und -speicherung (kg/ha·a) aus Böden, Deckschichten und Aquifer am Rotenbach

Bei der Natriumbilanz steht einem Nettoeintrag von durchschnittlich 6 kg/ha·a ein Austrag von 11 kg/ha·a gegenüber. Der Mehraustrag stammt aus den Böden und den Deckschichten, während aus dem Aquifer kein Austrag zu verzeichnen ist. Der Mehraustrag an Chlorid wurde ausschließlich aus den Böden ausgetragen. Die hohen Na- und Cl-Austräge aus den Böden weisen auf eine Streusalzbeeinflussung durch die an der Obergrenze des Gebietes verlaufenden Schwarzwaldhochstraße hin.

Der Sulfateintrag von 105 und 115 kg/ha·a liegt 26 bzw. 21 kg/ha·a über dem Austrag. Der größte Teil des Sulfates wird in den Deckschichten gespeichert.

Die berechneten Austräge aus dem Boden sind angesichts der obigen Einschränkungen unbedeutend, da vor allem auch der Nettoeintrag mit Hilfe der aus dem Solling übertragenen Werte (ULRICH et al., 1979) nur abgeschätzt werden konnte.

5.3.3 Einzugsgebiet Kleine Kinzig

Bei insgesamt geringeren Stoffeinträgen und -austrägen ergaben sich für den Stoffumsatz im Gebiet der Kleinen Kinzig ähnliche Werte wie am Seebach. Starke Abweichungen verzeichnen lediglich Natrium und Chlorid aufgrund der Streusalzbeeinflussung (Kap. 4). Einem Na-Nettoeintrag von durchschnittlich 7,5 kg/ha·a steht ein sehr hoher Austrag von 34 kg/ha·a gegenüber (Tab. 30, Abb. 47). Beim Chlorid werden in den beiden Meßjahren im Mittel 22 kg/ha·a eingetragen, bei einem Austrag von 66 kg/ha·a. Sowohl die Natrium- als auch die Chloridausträge stammen vorwiegend aus den Deckschichten (Tab. 31, vgl. Kap. 5.2). Am benachbarten, nicht von Streusalz beeinflussten Huttenbächle berechnete IROUSCHEK (1989) für Na und Cl einen weit geringeren Mehraustrag von 4,1 bzw. 8,4 kg/ha·a, während die Austräge an der Kleinen Kinzig gut mit den eigenen Werten übereinstimmen.

Kleine Kinzig		K	Na	Ca	Mg	NO ₃	SO ₄	Cl
	PfN	15,7	0,9	16,9	1,3	-	12,0	2,2
1987	NB	19,2	7,4	18,5	2,4	57,2	76,2	21,8
	NS	3,5	6,5	1,6	1,1	-	64,2	19,6
	A	13,2	32,2	39,1	13,5	59,1	57,2	62,1
	NS-A	-9,7	-25,7	-37,5	-12,4	(-1,9)	7,0	-42,5
1988	NB	23,8	9,2	23,0	3,0	71,0	94,6	27,1
	NS	8,1	8,3	6,1	1,7	-	82,6	24,9
	A	14,1	36,1	42,4	15,2	65,7	63,9	69,5
	NS-A	-6,0	-27,8	-36,3	-13,5	(5,3)	18,7	-44,6

Tab. 30: Stoffbilanz (kg/ha·a) im Gebiet Kleine Kinzig

Dem Sulfateintrag von ca. 73 kg/ha·a steht ein Austrag von ca. 60 kg/ha·a gegenüber. Dabei scheinen in dem von geringmächtigeren Deckschichten bedeckten Gebiet Kleine Kinzig vor allem im Aquifer Speicherungsprozesse abzulaufen, während im Boden kein Sulfat abgelagert wird.

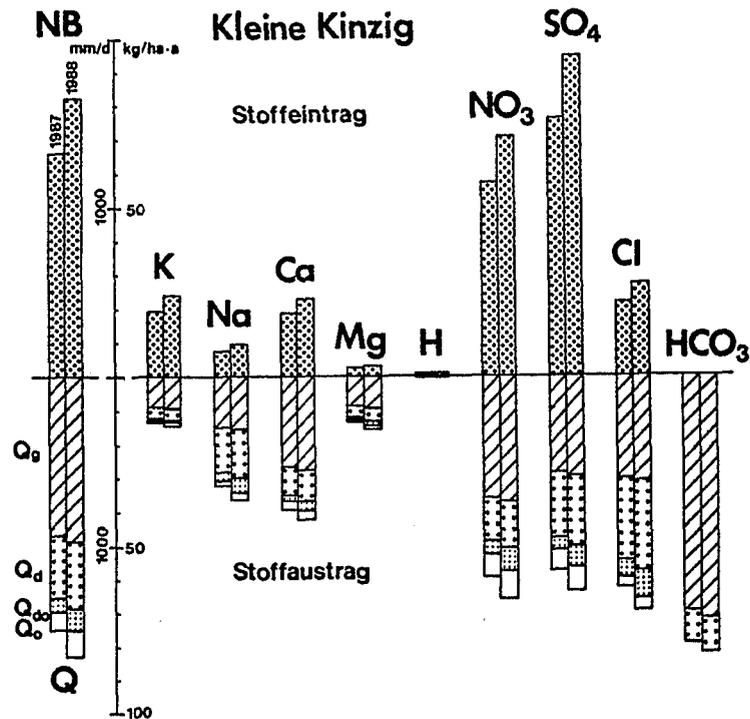


Abb. 47: Stoffbilanz mit Stofffrachtseparation an der Kleinen Kinzig

Kleine Kinzig		K	Na	Ca	Mg	SO ₄	Cl
1987	Boden	-4,2	-6,9	-26,3	-8,7	-12,7	-12,0
	Deckschichten	-5,2	-20,0	-6,2	-3,1	4,5	-32,5
	Aquifer	-0,3	1,0	-5,0	-0,6	15,2	2,0
	Gesamt	-9,7	-25,9	-37,5	-12,4	7,0	-42,5
1988	Boden	-0,3	-6,8	-24,4	-9,0	-1,6	-10,2
	Deckschichten	-5,8	-22,0	-6,7	-3,4	4,8	-36,9
	Aquifer	0,2	1,0	-5,1	-0,7	15,4	2,5
	Gesamt	-5,9	-27,8	-36,2	-13,1	18,6	-44,6

Tab. 31: Stoffaustrag und -speicherung (kg/ha.a) aus Böden, Deckschichten und Aquifer an der Kleinen Kinzig

Die Erdalkalibilanz ist mit dem Seebach vergleichbar, bei etwas höheren Mehrausträgen aufgrund des Anteils an Oberem Buntsandstein. Die Austragsverteilung unterscheidet sich dagegen stark von der des Seebaches. An der Kleinen Kinzig erfolgt der Hauptausttrag an Erdalkalien aus den so-Böden (Tab. 31). Aus dem karbonatarmen Hauptbuntsandsteinaquifer werden dagegen trotz hohem Grundwasseranteil (Tab. 10, Kap. 3.7) nur geringe Mengen an Ca und

Mg ausgewaschen. Hier macht sich der fehlende Kontakt des Schichtquellenswassers mit den liegenden, karbonatreicheren Schichten des Unteren Buntsandsteines und vor allem mit dem Grundgebirge bemerkbar (Kap. 3.5).

Der Mehraustrag an Kalium zeigt auch in diesem Gebiet die verstärkten Kationenaustauschvorgänge und Silikatverwitterung an. Dabei wird wie am Seebach ein Großteil des Kaliums aus den Böden und Deckschichten ausgetragen.

Literaturverzeichnis

- AGSTER, G. (1983): Wasserhaushalt und Stoffumsatz in den bewaldeten Keuper-Lias-Gebieten des Schönbuchs bei Tübingen. - Diss., Geol.-Pal. Institut Univ. Tübingen, 192 S., 46 Abb., 29 Tab.; Tübingen.
- AGSTER, G. (1986): Wasser- und Grundwasserhaushalt der Einzugsgebiete des Schönbuchs in Abhängigkeit von Waldbestand und Untergrund. - Deut. Forschungsgem. - Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbuch, Beitrag 7, S. 85-112, 8 Abb., 5 Tab.; Herausgeber G. Einsele, Tübingen.
- BENECKE, P. (1987): Zur Versauerung bewaldeter Wassereinzugsgebiete. - DVWK-Nachrichten 93, S. 17-18; Bonn.
- BENECKE, P., LINKERSDÖRFER, S. & THÖNMIßEN, J. (1986): Auswirkungen der Waldschäden auf den Wasserhaushalt aus der Sicht der Wasserbeschaffenheit. - Literaturstudie i.A. der LfU Baden-Württemberg, 79 S., 9 Abb.; Karlsruhe.
- BREHLOH, P. & KIRCH, C. (1984): Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland. - AFZ 39, S. 1265-1273.
- BROWN, R.H., KONOPLYANTSEY, J., INESON, J. & KOVALEVSKY, V. (1975): Groundwater studies. - Studies and reports in hydrology 7; Paris (UNESCO).
- CHOW, V.T. (1964): Handbook of Applied Hydrology. - Mc Graw -Hill Book Co.; New York 1964.
- DIETZE, G. (1985): Bindungsformen und Gleichgewichte von Aluminium im Sickerwasser saurer Böden. - Berichte d. Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben 16; Göttingen.
- EBHARDT, G. (1983): Geohydrologische Charakterisierung nordbadischer Einzugsgebiete durch einfache Niederschlag-Abfluß-Modelle. - Zt. d. Deut. Geol. Ges., Bd. 134 Teil 3, S. 687-699, 10 Abb., 1 Tab.; Hannover.

- EDEN, D. & PRÖSL, K.H. (1985): Die Bedeutung der ungesättigten Bodenzone im nordalpinen Raum. - Zt. d. Deut. Geol. Ges., Bd. 136 Teil 2, S. 331-340, 7 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- EDEN, D., PRÖSL, K.H., STICHLER, W. & UDLUFT, P. (1983): Der Einfluß quartärer Deckschichten auf den Wasserhaushalt eines kalkalpinen Einzugsgebietes. - Zt. d. Deut. Geol. Ges., Bd. 134 Teil 3, S. 755-772, 1 Abb., 3 Tab. Hannover.
- EHMANN, M. (1988): 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., 56 Abb., 19 Tab.; Tübingen.
- EINSELE, G. (1970): Ober- und unterirdischer Abfluß im saarländischen Buntsandstein. - Zt. deutsch. geol. Ges., Sonderheft Hydrogeol. Hydrogeochem., S. 43-67, 10 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- EINSELE, G. (1985): Auswirkungen atmogener Schadstoffeinträge auf das Grund- und Bachwasser ausgewählter Waldeinzugsgebiete im Buntsandstein-Schwarzwald. - Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF), 1. Statuskolloquium März 1985, S. 303-312, 3 Abb.; Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- EINSELE, G., AGSTER, G. & ELGNER, M. (1986): Niederschlag-Bodenwasser-Abflußbeziehungen bei Hochwasserereignissen im Keuper-Lias-Bergland des Schönbuchs. - Deut. Forschungsgem. - Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbuch, Beitrag 12, S. 209-234, 10 Abb., 2 Tab.; Herausgeber G. Einsele, Tübingen.
- EINSELE, G., BOZOGARD-ARAB, D., HEITTELE, H., KLOCK, M. & SEILER, K.P. (1969): Hydrogeologische Untersuchungen in der Buntsandsteinzone des südlichen Saarlandes. Allgemeiner Teil. Neubildung und Speicherung von Grundwasser. - Geol. Mitt. 9, S. 1-74, 24 Abb., 15 Tab., Aachen.

- EINSELE, G., EHMANN, M. & IROUSCHEK, T. (1986): Kurz- und Langzeitwirkung atmogener Schadstoffeinträge auf das Boden und Grundwasser im Buntsandstein-Schwarzwald. - Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF), 2. Statuskolloquium März 1986, S. 453-463; 10 Abb; Kernforschungsz. Karlsruhe.
- EINSELE, G., EHMANN, M., IROUSCHEK, T. & SEEGER, T. (1987): Atmosphärische Einflüsse auf die Niederschlag-Abfluß-Stoffbilanzierung in acht bewaldeten Einzugsgebieten im Buntsandstein-Schwarzwald. - Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF), 3. Statuskolloquium März 1987, S. 257-267; 6 Abb.; Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- EINSELE, G., EHMANN, M., IROUSCHEK, T. & SEEGER, T. (1987): Kurz- und Langzeitwirkung atmogener Schadstoffeinträge auf flache und tiefere Grundwässer im Buntsandstein-Schwarzwald. - Zeitschr. Dt. Geol. Ges. 138, S. 463-475, 9 Abb.; Hannover.
- EINSELE, G., EHMANN, M., IROUSCHEK, T. & SEEGER, T. (1988): Boden- und Gewässerversauerung sowie Stoffbilanzierungen für verschiedene Abflußkomponenten und Einzugsgebiete im Buntsandstein-Schwarzwald. - Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF), 4. Statuskolloquium März 1988, 12 S., 10 Abb.; Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- EISSELE, K. (1966): Über Grundwasserbewegungen im klüftigen Sandstein. - Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg 8: S. 105-111, 2 Abb.; Freiburg/Breisgau.
- EISSELE, K. & LINK, G. (1981): Schichtdeformation im Buntsandstein des nördlichen Schwarzwaldes. - Jh. geol. La. Baden-Württemberg 10, S. 157-173; Freiburg/Breisgau.
- EMBLETON, C. & KING, C. (1975): Periglacial Geomorphology. - Edward Arnold (Publishers) Ltd, 573 S., 51 Abb., 10 Tab., 16 Taf.; London.
- FASSBENDER, H.W. (1977): Modellversuch mit jungen Fichten zur Erfassung des internen Nährstoffumsatzes. - Oecologia Plantarum 12, S. 263-272.

- FASSBENDER, H.W. & MATZNER, E. (1977): Zur Bildung von basischen Aluminium-Sulfaten im Boden. - Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges. 25, S. 175-182.
- FEZER, F. (1953): Studien über die Periglazialerscheinungen in Mitteleuropa, Studien aus Mittelgebirgen. - Teil I Schwarzwald, Göttinger geogr. Abh., H. 11-14, S. 45-77, 6 Abb., 1 Tab.; Göttingen.
- FEZER, F. (1957): Eiszeitliche Erscheinungen im Nordschwarzwald. - Forschungen zur deutschen Landeskunde, Bd. 87, S. 56-81; Remagen.
- FLECK, W. (1987): Einfluß des Bodenaufbaus und des Waldbestandes auf Verdunstung und Abflußbildung im Naturpark Schönbuch bei Tübingen. - Diss., Geol.-Pal. Institut Univ. Tübingen, 111 S., 31 Abb., 5 Tab.; Tübingen.
- FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. (1979): Groundwater. - 604 S.; Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs; New York.
- FRIED, G. (1984): Gesteine, Relief und Boden im Buntsandstein-Odenwald. - Frankf. geow. Arb. D4, 201 S., 57 Abb., 11 Tab., Frankfurt a. M.
- GEORGII, H.W. (1981): Luftchemische Umsetzungen und Verweildauer von Luftverunreinigungen beim regionalen und globalen Transport. - Hohe Schornsteine als Element der Luftreinhaltepolitik; Düsseldorf.
- GEYER, O.F. & GWINNER, M.B. (1968): Einführung in die Geologie von Baden-Württemberg. - 2. Aufl., 238 S.; Stuttgart.
- HAUHS, M. (1985a): Die Beziehung zwischen saurer Deposition, Bodenversauerung, Waldsterben und Gewässerversauerung im Einzugsgebiet der Langen Bramke (Harz). - Wald und Wasser II, S. 531-568; Grafenau.
- HAUHS, M. (1985b): Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Langen Bramke (Harz). - Diss. Forstl. Fakultät, Göttingen.
- HEITTELE, H. (1968): Versickerungsvorgänge in der Buntsandsteinzone des südlichen Saarlandes. - Diss. Geol.- Pal. Institut Univ. Tübingen, ; Tübingen.

- HOHBERGER, K. (1977): Grundwasserneubildung, Chemismus und Stoffaustrag im Einzugsgebiet der Tauber oberhalb von Bad Mergentheim. - Diss. Universität Tübingen, 165 S.; Tübingen.
- HÖLTING, B. (1984): Hydrogeologie. - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. - 2. Auflage, 340 S., 103 Abb., 26 Tab.; Enke Verlag, Stuttgart.
- HOLZWARTH, W. (1980): Wasserhaushalt und Stoffumsatz kleiner Einzugsgebiete im Keuper und Jura bei Reutlingen-Tübingen. - Diss. Univ. Tübingen, 201 S.; Tübingen.
- IROUSCHEK, T. (1989): Hydrogeologie und Stoffumsatz im Buntsandstein des Nord-schwarzwaldes. - Diss., Geol.-Pal. Institut Univ. Tübingen, 144 S., 44 Abb, 17 Tab.; Tübingen.
- KAMINSKI, U. & WINKLER, P. (1983): Saure Aerosolpartikel und Nebel und ihre Wirkung auf die Biosphäre. - Ann. d. Meteorologie 20.
- KILLE, K. (1970): Das Verfahren MoMNOQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. - Zt. d. Deut. Geol. Ges., Sh Hydrogeologie-Hydrochemie, S. 89-95; Hannover.
- KLAIBER, B. (1987): Deckschichtenkartierung und hydrogeologische Untersuchung im Einzugsgebiet der Rotenbachquellen (bei Oppenau, Buntsandstein-Schwarzwald). - Dipl.-Arb. Geol.-Pal. Institut Univ. Tübingen, 97 S., 34 Abb., 17 Tab.; Tübingen.
- KLÖS, W. (1984): Der Einfluß von Umweltfaktoren auf die Gewässergüte in den Quellbereichen hessischer Gewässer. - Umweltbundesamt Materialien 1/84, S. 53-95; Berlin.
- KOEHLER, W. (1971): Ermittlung maßgebender Abflußdaten für kleinere Vorfluter mit Hilfe kurzzeitiger Naturmessungen. - Mitt. d. Inst. f. Wasserwirtschaft H. 23; Hannover.

- KREBS, A. (1979): Grundwasserhaushalt und Vergleich zwischen Stoffeintrag und -austrag im Eyachtal (Buntsandstein-Schwarzwald). - Diss. Geol.-Pal. Institut Univ. Tübingen, 113 S.; Tübingen.
- KREUTZER, K. (1984): Veränderungen im Chemismus der Sickerwasserlösung bei der Bodenpassage unter dem Einfluß verstärkter Immissionsbelastung. - In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Gewässerversauerung in der BRD. Materialien 1/84, S. 240-252; Berlin.
- KRIELE, W. (1976): Hydrodeologische Untersuchungen im Muschelkalkkarst des westlichen unteren Gäus zwischen Pforzheim, Vaihingen/Enz und Sindelfingen. - Diss., Geol.-Pal. Institut Univ. Tübingen, 179 S., 38 Abb., 11 Tab.; Tübingen.
- LEHNHARDT, F., BRECHTEL, H.M. & BONESS, M. (1984): Ein Beitrag zur Quantifizierung der Versauerung ausgewählter Bäche im Bereich des nordhessischen Buntsandsteingebietes. - Umweltbundesamt Materialien 1/84, S. 76-92; Berlin.
- MAILLET, F. (1905): Mécanique et physique du globe. Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. - 218 S.; Paris.
- MATTHESS, G. (1973): Die Beschaffenheit des Grundwassers. - Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 2, 324 S., 89 Abb., 86 Tab., Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- MATTHESS, G. (1983): Allgemeine Hydrogeologie - Grundwasserhaushalt. - Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 1, 438 S., 214 Abb., 75 Tab., Borntraeger; Berlin, Stuttgart.
- MATZNER, E. (1985): Deposition and Turnover of chemical Elements in Forest canopies. - Wald und Wasser I, S. 119-144; Grafenau.
- MERKEL, B. (1983): Abschätzung der Grundwasserneubildung aus Saugspannungsmessungen. - Zt. d. Deut. Geol. Ges., Bd. 134 Teil 3, S. 641-656, 7 Abb., 2 Tab.; Hannover.
- METZ, R. (1971): Mineralogisch-landeskundliche Wanderungen im Nordschwarzwald. - 632 S.; Moritz Schauenberg Verlag, Lahr/Schwarzwald.

- NATERMANN, E. (1951): Die Linie des langfristigen Grundwassers (Au-Linie) und die Trockenwetterabflußlinie (TWL). - Die Wasserwirtschaft, Sonderh. 1951; München.
- NATERMANN, E. (1958): Der Wasserhaushalt des oberen Emsgebietes nach dem Au-Linien-Verfahren. - Min. für Ernährung., Landw. u. Forsten NRW, 44 S.; Düsseldorf.
- NEMETH, G., MERKEL, B. & UDLUFT, P. (1985): Ungesättigte quartäre Kiese und ihre Bodenaufgabe als Regelglieder der Grundwasserneubildung. - Zt. d. Deut. Geol. Ges., Bd. 136 Teil 2, S. 321-330, 6 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- PRENZEL, J. (1983): A mechanism for storage and retrieval of acid soils. - In: Ulrich, B. & Pankrath, J. (Eds.): Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems, S. 157-171, D. Reipel Publ. Comp.; Dordrecht.
- PREUSS, A. (1986): Kartierung und hydrogeologische Untersuchungen im Einzugsgebiet der Kleinen Kinzig. - Dipl.-Arbeit Geologisch-Pal. Institut Univ. Tübingen, 97 S., 30 Abb., 15 Tab.; Tübingen.
- PYKA, W. (1986): Geologische und hydrogeologische Untersuchungen über die Auswirkung atmogener Schadstoffeinträge auf die Wasserqualität in einem Teileinzugsgebiet der Kleinen Kinzig. - Dipl.-Arb. Geol.-Pal. Institut Univ. Tübingen, 84 S., 26 Abb., 11 Tab.; Tübingen.
- RADKE, G.J. (1973): Landschaftsgeschichte und Ökologie des Nordschwarzwaldes. - Hohenheimer Arbeiten 68, S. 1-121.
- REGELMANN, (1907): Erläuterungen zur geologischen Spezialkarte 1:25000, Blatt 7415 Seebach. - Neuauflage 1972, Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart.

- REHFUESS, K.E. & FISCHER, M. (1986): Schwefelvorräte und Bindungsformen süd-deutscher Waldböden in Abhängigkeit von der atmosphärischen Schwefeldeposition. - IMA-Statusseminar 2.-4.12.1985, S. 402-403; Kernforschungsanlage Jülich.
- REUSS, J.O. & JOHNSON, D.W. (1986): Acid Deposition and the acidification of soils and water. - *Ecological Studies* 59; Springer Verlag.
- RICHTER, W. & LILICH, W. (1975): Abriß der Hydrogeologie. -281 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- SAWATZI, G. & EISSELE, K. (1981): Ingenieurgeologische Voraussetzung zum Bau der Trinkwassertalsperre Kleine Kinzig bei Freudenstadt (Schwarzwald). - *Jh. geol. La. Baden-Württemberg* 22, S. 99-108; Freiburg/Breisgau.
- SCHAEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1984): Lehrbuch der Bodenkunde. - 11. Aufl, 442 S., Enke Verlag; Stuttgart.
- SCHLÖSER, H. (1990): Lösungsgeschwindigkeit und Pufferwirkung von Silikaten in der ungesättigten Bodenzone im Buntsandstein des Nordschwarzwaldes (Arbeitstitel). - Diss. Geol.-Pal. Institut Univ. Tübingen; (in Vorbereitung).
- SCHMIDT, M. & RAU, R. (1930): Erläuterungen zur geologischen Spezialkarte von Württemberg, Blatt Freudenstadt 1:25000, 107 S., 3 Abb.; Stuttgart.
- SCHOEN, R. & KOHLER, A. (1984): Gewässerversauerung in kleinen Fließgewässern des Nord-Schwarzwaldes während der Schneeschmelze 1982. - Umweltbundesamt Materialien 1/84, S. 58-69; Berlin.
- SCHOENEFELDT, O. (1963): Sturzregenabfluß und Abflußbeiwerte bei geneigtem Gelände. - *Deut. Geol. Mitteilungen*, Jg. 7, H. 3, S. 65-70, 7 Abb., 8 Tab.; Berlin.
- SCHULZ, G. (1957): Färb- und Salzungsversuche an unterirdischen Wässern in Südwestdeutschland. - *Jh. geol. La. Baden-Württemberg* 2, S. 333-412; Freiburg/Breisgau.

- SCHWARZ, O. (1986): Zum Abflußverhalten von Waldböden bei künstlicher Beregnung. - Deut. Forschungsgem. - Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbuch, Beitrag 10, S. 161-179, 7 Abb., 2 Tab.; Herausgeber G. Einsele, Tübingen.
- SEEGER, T. (1986): Geologische und Deckschichtenkartierung, sowie Wasserbilanz und Wasserchemie in einem Teileinzugsgebiet im Buntsandstein-Schwarzwald. - Dipl.-Arb. Geol.-Pal. Institut Univ. Tübingen, 157 S., 70 Abb., 20 Tab.; Tübingen
- SOKOLLEK, V. (1983): Einfluß der Bodennutzung auf den Wasserhaushalt kleiner Einzugsgebiete in unteren Mittelgebirgslagen. - Diss., Geowissenschaft Gießen, 296 S., 3 Karten; Gießen.
- STAHR, K. (1973): Die Stellung der Böden mit Fe-Bändchen-Horizont (thin-ironpan) in der Bodengesellschaft der nördlichen Schwarzwaldberge. - Inst. f. Geol. u. Pal. Univ. Stuttgart NF 69, S. 85-183, 52 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- STOBER, I. (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. - Geol. Jb. C Heft 42; Hannover.
- UBA (1980): Luftverschmutzung durch Schwefeldioxid. - Berichte Umweltbundesamt; Berlin.
- UBA (1984): Gewässerversauerung in der BRD. - Materialien 1/84, 462 S.; Berlin.
- UDLUFT, P. (1972): Bestimmung des entwässerbaren Kluftraumes mit Hilfe des Austrocknungskoeffizienten nach Maillet, dargestellt am Einzugsgebiet der Lohr (Nordost-Spessart). - Zt. d. Deutsch. Geol. Ges., Bd. 123, S. 53-63 5 Abb., 3 Tab.; Hannover.
- ULRICH, B. (1975): Die Umweltbeeinflussung des Nährstoffhaushaltes, eines bodensauren Buchenwaldes. - Forstw. Cbl. 94. Jg. Heft 6, S. 280-287.
- ULRICH, B. (1981a): Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. - Zt. Pflanzenernährung Bodenkunde 144, S. 289-305, Weinheim.

- ULRICH, B. (1983): Ökosystemare Aspekte der Emission von Anhydriden starker Säuren. - GSF-Bericht A3/83, S. 15-30; München.
- ULRICH, B., MAYER, R. & KHANNA, P.K. (1979): Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. - Schriftenr. Forstl Fak. Univ. Göttingen und Nieders. Forstl Versuchsanstalt, Bd. 58, 291 S.; Frankfurt.
- ULRICH, B., MAYER, R., KHANNA, P.K. & PRENZEL, J. (1978): Ausfilterung aus der Luft durch einen Buchenbestand. - Zeitsch. Pflanzenernährung, Bodenkunde 141, S. 319-325; Weinheim.
- ULRICH, B., MAYER, R., KHANNA, P.K., SEEKAMP, G. & FASSBENDER, H.W. (1976): Input, output und interner Umsatz von chemischen Elementen bei einem Buchen- und einem Fichtenbestand. - Sonderdruck: Verhandlungen der Ges. für Ökologie, S. 7-28, 11 Abb., 2 Tab.; Göttingen.
- ULRICH, B., MAYER, R. & MATZNER, E. (1986): Vorräte und Flüsse der chemischen Elemente. - In: Ellenberg, M., Mayer, R. & Schauerermann, J. (Hrsg): Ökosystemforschung, Ergebnisse des Sollingprojektes 1966-1986, S. 375-417; Ulmer, Stuttgart.
- ULRICH, B. & PANKRATH, J. (1983): Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems. - D. Reidel Comp. Publ.; Dordrecht.
- VDI (1983): VDI-Kommission "Reinhaltung der Luft". - Hrsg: Säurehaltige Niederschläge - Entstehung und Wirkungen auf terrestrische Ökosysteme. - Verein deutscher Ingenieure, 277 S.; Selbstverlag, Düsseldorf.
- WAGNER, M. (1964): Die Niederschlagsverhältnisse in Baden-Württemberg im Lichte der dynamischen Klimatologie. - Forschg. z. dt. Landeskd. 135; Bad Godesberg.
- WEYER, K.U. (1972): Ermittlung der Grundwassermengen in den Festgesteinen der Mittelgebirge aus Messungen des Trockenwetterabflusses. - Diss., Univ. Bonn, 142 S., 40. Abb., 11 Tab.; Bonn.

WILHELMY, H. (1958): Klimamorphologie der Massengesteine. - 238 S., 137 Abb.; Braunschweig (G. Westermann).

WUNDT, W. (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. - Forsch. z. dt. Landeskunde 104, S. 47-54; Remagen.

In Reihe C der Tübinger Geowissenschaftlichen Arbeiten erschienen bisher folgende Hefte:

- Nr. 1. Grathwohl, P. (1989): Verteilung unpolarer organischer Verbindungen in der wasserungesättigten Bodenzone am Beispiel der leichtflüchtigen aliphatischen Chlorkohlenwasserstoffe. 102 S.
- Nr. 2. Eisele, G. (1989): Labor- und Felduntersuchungen zur Ausbreitung und Verteilung leichtflüchtiger chlorierter Kohlenwasserstoffe (LCKW) im Übergangsbereich wasserungesättigte/wassergesättigte Zone. 84 S.
- Nr. 3. Ehmann, M. (1989): Auswirkungen atmogener Stoffeinträge auf Boden- und Grundwasser sowie Stoffbilanzierungen in drei bewaldeten Einzugsgebieten im Oberen Buntsandstein (Nordschwarzwald). 134 S.
- Nr. 4. Irouschek, T. (1990): Hydrogeologie and Stoffumsatz im Buntsandstein des Nordschwarzwaldes. 144 S.
- Nr. 5. Sanns, M. (1990): Experimentelle Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten von leichtflüchtigen Chlorkohlenwasserstoffen (LCKW) in der wassergesättigten Zone. 122 S.

