

Institut für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

Peter Matthias Kienzler

**Experimentelle Untersuchungen zur chemischen
Zusammensetzung oberflächennaher unterirdischer
Abflusskomponenten im Bruggaeinzugsgebiet**

**Diplomarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Ch. Leibundgut
Freiburg im Breisgau, Dezember 2001**

Institut für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

Peter Matthias Kienzler

**Experimentelle Untersuchungen zur chemischen
Zusammensetzung oberflächennaher unterirdischer
Abflusskomponenten im Bruggaeinzugsgebiet**

**Referent: Prof. Dr. Ch. Leibundgut
Koreferent: Dr. Stefan Uhlenbrook**

**Diplomarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Ch. Leibundgut
Freiburg im Breisgau, Dezember 2001**

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VI
Zusammenfassung.....	VII
Abstract.....	IX

1 Einleitung1

1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	3

2 Untersuchungsgebiet..... 5

2.1 Klima.....	5
2.2 Morphologie.....	6
2.3 Landnutzung und Vegetation.....	7
2.4 Hydrologie.....	8
2.5 Geologie.....	9

3 Methodik und theoretische Hintergründe.....17

3.1 Ganglinienseparation mit natürlichen Tracern.....	17
3.1.1 Grundlagen der Ganglinienseparation.....	17
3.1.2 Haptionen.....	19
3.1.3 Silikat.....	21
3.2 Feldmethoden.....	26
3.2.1 Auswahl der Probennahmestellen.....	26
3.2.2 Beschreibung der ausgewählten Probennahmestellen.....	27
3.2.3 Probenentnahme.....	35
3.3 Ereignisbeprobung.....	36
3.4 Labormethoden.....	37
3.4.1 Haptionen.....	37
3.4.2 Silikat.....	38
3.5 Lösungsversuch.....	39
3.6 Multivariate Clusteranalyse.....	42

4 Ergebnisse.....	43
4.1 Routinebeprobung.....	43
4.1.1 Witterungsverlauf und Abflussgeschehen.....	43
4.1.2 Zeitreihen.....	46
4.1.3 Einfluss der Abflussverhältnisse.....	53
4.1.4 Vergleich unterschiedlicher Hangpositionen.....	58
4.1.5 Vergleich unterschiedlicher Abfluss- und Tiefenkomponenten.....	65
4.1.5.1 Hangfuß des "Tote Mann-Hanges".....	65
4.1.5.2 Oberhang des "Tote Mann-Hanges".....	71
4.1.6 Vergleich verschiedener Deckschichtentypen.....	77
4.1.7 Zeitliche und räumliche Variabilität der einzelnen Parameter.....	82
4.1.8 Multivariate Clusteranalyse.....	87
4.2 Ereignisbeprobung.....	92
4.2.1 Verlauf von Niederschlag und Abfluss	92
4.2.2 Verlauf der hydrochemischen Parameter.....	93
4.3 Silikat-Lösungsversuch.....	100
4.3.1 Vergleich unterschiedlicher Substrate.....	100
4.3.2 Vergleich verschiedener Randbedingungen.....	103
 5 Schlussfolgerungen.....	 108
 6 Literatur.....	 112
 7 Anhang.....	 117

Abbildungsverzeichnis

Abb.1.1: Schema der Problemstellung, Vorgehensweise und Zielsetzung der Arbeit.....	3
Abb.2.1: Das Einzugsgebiet der Brugga und des St. Wilhelmer Talbach.....	6
Abb.2.2: Glazialrelikte im Naturschutzgebiet Feldberg: Alpentrodellblume <i>Soldanella alpina</i> und Sumpferzblatt <i>Parnassia palustris</i>	7
Abb. 2.3: Abflussregime von Brugga, Dreisam und St. Wilhelmer Talbach	8
Abb. 2.4: Geologische Karte des Untersuchungsgebietes 1:50000 (GLA 1981).....	9
Abb. 2.5: Stark idealisierte Darstellung der Deckschichten nach SEMMEL (1977) und einige Entstehungsprozesse, die zeigen, dass eine durchgängige Schichtung nicht zu erwarten ist: Lobenförmige Solifluktion, Frostmusterbodenentstehung und Würgeboden (aus WEISE 1983).....	15
Abb. 3.1: Stabilitätsdiagramm von Orthoklas (ver. nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1989).....	23
Abb. 3.2: Probennahmestellen der dreimonatigen Routinebeprobung innerhalb des Einzugsgebietes des St. Wilhelmer Talbachs.....	27
Abb. 3.3: Probennahmestelle „23“	29
Abb. 3.4: Vergleytes Bodenprofil an der Probennahmestelle „13“	31
Abb. 3.5: Blick auf das Wittenbachkar.....	33
Abb. 3.6: Schuttkegel am Hangfuß des „Tote Mann–Hangs“	33
Abb. 3.7: Aufschluss von Decklage auf Hauptlage am „Schmaleckhang“	34
Abb. 3.8: Probennahmestelle „06.2“	34
Abb. 3.9: Positionen der Automatischen Probenentnahmegerate (APEG).....	36
Abb. 3.10: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung.....	40

Abb. 4.1: Zusammenhang der Abflüsse von Brugga und St. Wilhelmer Talbach, basierend auf den stündlichen Abflusswerten von 1995 bis 2000.....	44
Abb. 4.2: Niederschlag und Abfluss im Untersuchungszeitraum, zusätzlich sind Lufttemperatur und langjähriger mittlerer Abfluss (MQ) eingezeichnet.....	45
Abb. 4.3: Mittels einfacher „Gefäßmessung“ ermittelter Abfluss (in [l/s]) an der Probennahmestelle „12“ (Punktlinie) verglichen mit dem Abfluss der Brugga (in [m³/s]).....	45
Abb. 4.4: Zeitreihen der Wasserinhaltsstoffe sowie von Niederschlag und Abfluss im Untersuchungszeitraum an der Probennahmestelle „02A“.....	47
Abb. 4.5: Zeitreihen der Wasserinhaltsstoffe sowie von Niederschlag und Abfluss im Untersuchungszeitraum an der Probennahmestelle „04B“.....	49
Abb. 4.6: Ganglinien von Silikat (Si) und Abfluss (Q) an der Probennahmestelle „12“.....	54
Abb. 4.7: Regressionsanalyse der Silikatkonzentrationen der Messstelle „12“ mit den Abflüssen von Brugga und der Messstelle selbst korreliert.....	55
Abb. 4.8: Bestimmtheitsmaße der Regressionen von gemessenen Silikatanalysen aller Probennahmestellen mit den Abflüssen der Brugga.....	55
Abb. 4.9: Lage der Hangprofile mit den Probennahmestellen.....	58
Abb. 4.10: Topographischer Schnitt der untersuchten Hangprofile mit den Höhenlagen der Probennahmestellen.....	59
Abb. 4.11: Darstellung der Ergebnisse mittels „box-plots“.....	59
Abb. 4.12 Hangabfolgen der Silikatkonzentrationen.....	60
Abb. 4.13 bis 4.19: Hangabfolgen der gemessenen Hauptionen.....	62
Abb. 4.20: Ganglinien der Silikat- und Anionen-Konzentrationen.....	67
Abb.4.21: Ganglinien der Kationenkonzentrationen.....	68
Abb. 4.22: Ganglinien der Silikat- und Anionenkonzentrationen.....	73
Abb.4.23: Ganglinien der Kationenkonzentrationen.....	74

Abb. 4.24: Stark schematisierte und überhöhte Darstellung der Deckschichtensituation im Bereich zwischen Schmaleck und Wittenbach.....	78
Abb.4.25: Vergleich der Konzentrationen und von den Probennahmestellen „08“ und „14“.	78
Abb. 4.26: Räumliche und zeitliche Variabilität der Silikatkonzentrationen aller untersuchten Deckschichtenabflüsse.....	81
Abb. 4.27: Räumliche und zeitliche Variabilität der Anionenkonzentrationen.....	82
Abb. 4.28: Räumliche und zeitliche Variabilität der Kationenkonzentrationen.....	83
Abb. 4.29: Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse im Dendrogramm.....	87
Abb. 4.30: Verteilung der Cluster aus der hierarchischen Clusteranalyse im Piper-Diagramm, Angaben in meq – Anteilen.....	88
Abb. 4.31: Darstellung der Cluster aus der hierarchischen Clusteranalyse in einem kombinierten Anionen – Kationen – Silikat – Diagramm, Angaben der Hauptionen in meq- Anteilen, von Silikat in mg/l.....	89
Abb. 4.32: Verlauf von Niederschlag und Abfluss während der Ereignisbeprobung.....	92
Abb. 4.33: Ganglinien von Niederschlag, Abfluss und Hauptionen im St. Wilhelmer Talbach (APEG 1) während der Ereignisbeprobung.....	93
Abb. 4.34: Ganglinien von Niederschlag, Abfluss und Hauptionen an der Probennahmestelle „23“ (APEG 2) während der Ereignisbeprobung	94
Abb. 4.35: Ganglinien von Niederschlag, Abfluss und Hauptionen an der Probennahmestelle „07“ (APEG 3) während der Ereignisbeprobung	95
Abb. 4.36: Ganglinien von Niederschlag, Abfluss und Hauptionen an der Probennahmestelle „12“ (APEG 4) während der Ereignisbeprobung	96
Abb. 4.36: Verlauf der Silikatkonzentrationen mit zunehmender Laugungszeit.....	101
Abb. 4.37: Verlauf der Lösungsraten mit der zunehmenden Laugungszeit.....	102
Abb. 4.38: Verlauf der Lösungskurven bei unterschiedlichen Versuchsansätzen.....	103

Tabellenverzeichnis

Tab.2.1: Mineralbestand der häufigsten Gesteine im Untersuchungsgebiet (GLA 1981).....	9
Tab. 3.1: Absolute und prozentuale Messfehler bei der Bestimmung der Hauptionen.....	37
Tab. 3.2: Absolute und prozentuale Fehlerbetrachtung der Silikatmessung (n=162).....	38
Tab. 3.4: Chemismus des verwendeten Niederschlagwassers (Angaben in [mg/l]).....	40
Tab. 3.5: Beschreibung der Substrate, die für den Si-Lösungsversuch verwendet wurden....	40
Tab. 4.1: Bestimmtheitsmaße r^2 und Steigungen der Regressionsgeraden aus den Korrelationsanalysen der Abflüsse und Konzentrationen der Inhaltsstoffe, mit jeweils 19 Messwerten an 69 Messstellen bestimmt.....	56
Tab.A: Lage und geschätzte Fläche der EZG der Probennahmestellen	Anhang

Abkürzungen & Symbole

DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
EZG	Einzugsgebiet
GK	Geologische Karte
GLA	Geologisches Landesamt
MQ	Langjähriger mittlerer Abfluss
MHQ	langjähriger mittlerer Hochwasserabfluss
N-A-Modell	Niederschlag – Abfluss – Modell
S,W ,N , O	Himmelsrichtungen

Zusammenfassung

Diese Diplomarbeit wurde im Rahmen des DFG-Bündelprojektes „Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung“ durchgeführt. Dabei wird mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen versucht, ein verbessertes Verständnis der Abflussbildungsprozesse zu erreichen, um verbesserte prozessorientierte Modellierungen durchführen zu können.

Ausgehend von der Zielsetzung, die hydrochemische Signatur der oberflächennahen unterirdischen Abflusskomponenten in ihrer räumlichen und zeitlichen Variabilität, so umfassend wie möglich zu untersuchen und darüber hinaus die Aussagekraft dieser hydrochemischen Signatur zu überprüfen und zu präzisieren, wurden im Verlauf dieser Arbeit verschiedene experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Hauptteil der Arbeit war eine dreimonatige Routinebeprobung an 69 Probennahmestellen. Zusätzlich wurde die zeitliche Variabilität der Abflusskomponente mittels zeitlich hochaufgelöster Beprobung an ausgewählten Standorten untersucht. Anhand eines Lösungsexperiments im Labor wurde versucht, die Aussagekraft von Silikat als wichtigstem hydrochemischen Wasserinhaltsstoff für Ganglinienseparationen zu überprüfen und zu präzisieren.

Die experimentellen Untersuchungen wurden auf einen relativ kleinen Raum im Einzugsgebiet des St. Wilhelmer Talbachs beschränkt. Der geologische Untergrund wird in diesem Bereich von den Gneisen und Diatexiten des kristallinen Grundgebirges geprägt. Diesen lagern als Folge periglazialer Prozesse während der Würmeiszeit z.T. mehrere Meter mächtige Schuttdecken auf. Diese periglazialen Deckschichten stellen den Umsatzraum der untersuchten oberflächennahen unterirdischen Abflusskomponenten dar.

Die Ergebnisse der hydrochemischen Analysen aus der dreimonatigen Routinebeprobung zeigten beim Vergleich mit anderen Abflusskomponenten eine deutliche Abgrenzbarkeit der chemischen Zusammensetzung der Deckschichtenabflüsse gegen andere Abflusskomponenten. Die durchgeführte hierarchische Clusteranalyse bestätigte dieses Ergebnis.

Aus den untersuchten Deckschichtenabflüssen wurde für gelöstes Silikat ein repräsentativer Mittelwert von 3,2 mg/l gefunden. Einschränkung für die Benutzung dieses Werts muss die große räumliche Variabilität mit einer Schwankungsbreite zwischen 2 und 4,5 mg/l angeführt werden. Zeitlich hingegen waren die Variabilitäten auch während der durchgeführten Ereignisbeprobung so gering, dass von quasi konstanten Silikat-Konzentrationen der einzelnen Deckschichtenabflüsse ausgegangen werden kann.

Aus dem Vergleich verschiedener Tiefenkomponenten ergab sich, dass das sog. Fließsystem-2, die Abflusskomponente der periglazialen und holozänen Schuttdecken, auf der Basis der hydrochemischen Signatur vertikal nicht weiter zu untergliedern ist. Die verschiedenen Schichten der Schuttdecken, wie z.B. Basislage, Hauptlage, etc. bilden hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung zusammen eine Abflusskomponente. Darüber hinaus wurde

durch Literaturvergleich und eigene Geländebeobachtungen klar, dass eine Schichtung der Schuttdecken keinesfalls überbewertet werden darf. Charakteristisch ist vielmehr ein sehr kleinräumiger Wechsel und unklar ausgeprägte Schichtgrenzen, so dass der Abfluss zur ständigen Durchmischung gezwungen wird.

Ein genereller Zusammenhang zwischen der hydrochemischen Signatur der verschiedenen beprobten Deckschichtenabflüsse und verschiedenen Faktoren wie Hangposition, Einzugsgebietsgröße oder Exposition konnte nicht bestätigt werden. Beprobte Hangabfolgen widerlegten einen signifikanten Einfluss der Hangposition. Die Überprüfung der clusteranalytisch durchgeführten Gruppierung ergab, dass die beprobten Abflüsse insgesamt einen sehr ähnlichen Chemismus aufweisen und sich nicht in klar voneinander abgegrenzte Gruppen aufteilen lassen.

Durch die Untersuchungen wurden die Grenzen der Methode der herkunftsraumorientierten Abflusskomponententrennung mittels hydrochemischer Signaturen klar. Es konnte gezeigt werden, dass hydrochemische Parameter schon auf kurzer Fließstrecke signifikant verändert werden können. Daraus ergibt sich, dass hydrochemische Signaturen maskiert werden können. Flächen, die nicht direkt ans Gewässernetz angeschlossen sind, dürfen nicht mit eigenen hydrochemischen Signaturen ausgewiesen werden.

Aus dem Laborexperiment zur Lösungskinetik von Silikat ergab sich eine Einschränkung für die Nutzung dieses hydrochemischen Tracers. Auch für Abflüsse, die nur sehr kurz in Kontakt mit mineralischen Oberflächen standen, muss von einer signifikanten Grundkonzentration von mindestens 0,5 bis 0,8 mg/l schon nach wenigen Stunden und von mindestens 2 bis 2,5 mg/l nach etwa zwei Tagen ausgegangen werden. Erst von dieser Grundkonzentration ausgehend zeigt das Lösungsverhalten von Silikat dann eine lineare, sehr langsame Zunahme der Konzentrationen, so dass sehr hohe Konzentrationen in Abflüssen lange Aufenthaltszeiten anzeigen.

Verbesserte Erkenntnisse über Abflussbildungsprozesse innerhalb der Deckschichten könnten durch weitere Ereignisbeprobungen bei kombinierter Analyse der isotopischen und der chemischen Zusammensetzung der Abflüsse gewonnen werden. Die Ergebnisse der einfachen Laborexperimente sind in quantitativer Hinsicht nur sehr eingeschränkt auf natürliche Verhältnisse übertragbar. Genauere Daten zur Lösungskinetik von Silikat könnten durch Säulenversuche mit natürlich gelagerten Bodenproben oder idealerweise mittels Lysimetern im Untersuchungsgebiet gewonnen werden. Zur Überprüfung der Repräsentativität der Ergebnisse wäre es nötig, die Beprobung der Deckschichten-Kleinquellen großräumiger auszudehnen. Durch eine hydrochemische Kartierung könnte einzelnen Teilflächen bestimmte Silikatkonzentrationen zugewiesen werden.

Abstract

This thesis was carried out in the framework of the DFG-project „Runoff Generation and Catchment Modelling“. The purpose of this project is to improve the understanding of runoff generation processes with the help of field experiments. This is necessary in order to be able to carry out better process-orientated, physically based catchment-modelling.

The aim of this work was to investigate the hydrochemical composition of surfacenear, subterranean runoff-components in their spatial and temporal variability and furthermore to check and render more precisely the expressiveness of this hydrochemical composition. Different experimental investigations were carried out. The main part of the experimental work was the routine sampling at 69 different places for a period of three months. Additionally, samples were taken at short time intervals at some selected representative places during a storm event. By the application of a laboratory experiment the dissolution kinetics of dissolved silica in natural systems were investigated more closely.

The experimental investigations were restricted to a small area inside the St. Wilhelmer Talbach – catchment in southern Germany. The geological formations in this area are dominated by gneisses and diatexites. This crystalline bedrock is covered by glacial moraines and periglacial debris cover. In these periglacial deposits, which build up the aquifers of the slopes, the surfacenear, subterranean runoff-components are generated

The hydrochemical analysis of the routine sampling for a period of three months showed a significantly different chemical composition compared to other runoff components. A hierarchical cluster analysis confirmed this result.

The investigated seepage of the debris cover showed a representative mean value of 3,2 mg/l for dissolved silica. This mean value has to be qualified by the large spatial variability of the concentrations of dissolved silicate between 2 and 4,5 mg/l. The temporal variability on the other hand was even for the samples taken at short time intervals during a storm event so very small, that the silica-concentrations can be regarded as remaining constant.

The comparison of different components from different depths of the debris cover revealed the impossibility to divide the runoff component of the debris cover in different vertical components on the basis of the hydrochemical composition. The different layers of the debris cover, e.g. base layer, main layer, etc. build up together only one runoff component with regard to the chemical composition. Above that it's necessary not to overvalue the importance of the layering of the debris cover. This was shown by studying the processes that lead to periglacial debris cover and by own observations in the catchment area. Even it is characteristically for debris cover to change significantly within a few meters, so the seepage is urged to mix permanently.

A general correlation between hydrochemical composition of the seepage at different sampling points and particular factors like hillslope-position, catchment area, type of debris cover or hill slope-orientation couldn't be confirmed. Samples taken along hillslope-successions disproved a significant influence of the hillslope position. The results of the hierarchical cluster analysis showed that the clustered groups marked no clearly visible boundaries. On the contrary the debris cover seepage samples showed a more or less similar chemical composition.

The findings of the experimental investigations also showed the limits of the method to separate different runoff components with hydrochemical tracers. The results showed, that significant changes of hydrochemical parameters are possible within short distances. That result leads to the conclusion, that hydrochemical signatures can be disguised. Therefore it is important to give zones which are not directly drained by the channel system no „own“ hydrochemical signature, but to observe the fluid lines very detailed.

The laboratory experiment on the dissolution kinetics of dissolved silica showed the limited use of silica as a hydrochemical tracer. All water that was in contact with mineral surfaces is assumed to have a silica background concentration of at least 0,5 to 0,8 mg/l after a few hours and at least 2 to 2,5 mg/l after some days. After reaching this background concentration the dissolution dynamics of silica gets linear. The increase in dissolved silica is in this second phase of silica dissolution only very slow. That draws the conclusion that water with very high silica concentrations had a very long time contact with mineral surfaces for a long time, whereas water with concentrations between 2 and 4 mg/l can either be very young or middle old water.

Knowledge of runoff generation processes in debris covers could be increased through more investigations in short time interval sampling during storm events with a combined analysis of hydrochemical and isotopical analysis afterwards. The results of the simple laboratory experiments are only limited transferable to natural conditions in regard with the absolute number of the results. More accurate data of the dissolution kinetics of silica could be received by column experiments or even lysimeters without destroying the natural deposit of the debris cover samples. To check the representativity of the results, it would be necessary to sample debris cover seepage all over the Brugga catchment. A hydrochemical mapping of silica-concentrations could help to identify zones with same silica-concentrations.

Keywords: periglacial, debris cover, silica dissolution, hydrograph separation with hydrochemical tracers, surfacenear subterranean runoff-components, hill slope aquifer

1 Einleitung

Die Vorstellungen der Prozesse, die zur Abflussbildung führen, haben in den letzten Jahrzehnten durch Anwendung von Tracermethoden und N-A-Modellen eine wesentliche Vertiefung und Erweiterung erfahren (UHLENBROOK 1999). Die bis dahin übliche Einteilung in Oberflächen-, Zwischen- und Grundwasserabfluss reichte für viele Aufgabenstellungen nicht mehr aus. Besonders für Fragestellungen des Stofftransports und Stoffhaushalts, aber auch der Hochwasserentstehung wurden räumlich differenzierte Prozesskenntnisse immer wichtiger. So beschäftigt sich die aktuelle Abflussbildungsforschung auch mit der Quantifizierung der einzelnen Abflussbildungsprozesse in der Bodenskala, auf Teilflächen und auf Einzugsgebietsebene. In jeder dieser Raumskalen sind verschiedene Abflussbildungsprozesse wirksam, die aufeinander aufbauen und sich gegenseitig beeinflussen. Detaillierte Kenntnisse in der Bodenskala und auf Teilflächen sind dabei schon vorhanden, v.a. auf Einzugsgebietsebene ist weitere Forschung nötig.

Die Diplomarbeit wurde im Rahmen des DFG-Bündelprojektes „Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung“ durchgeführt. Dabei wird mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen versucht, Niederschlag-Abfluss-Modellierungen zu verbessern. Das Ziel des Projekts ist, eine verbesserte prozessorientierte, physikalisch basierte Modellierung zu erreichen. Dazu ist ein verbessertes Verständnis der Abflussbildungsprozesse nötig, das im Freiburger Forschungsvorhaben innerhalb des Projekts v.a. durch Tracermethoden erreicht werden soll. Neben Fortschritten bei der N-A-Modellierung ist ein verbessertes Prozessverständnis auch für ökologische Fragestellungen wichtig. Mit Informationen über Herkunftsräume und Verweildauern können Fragen der Stoffdynamik und des Stoffhaushalts beantwortet werden, die z.B. bei der Problematik der Gewässerversauerung eine große Rolle spielen.

1.1 Problemstellung

Eine zentrale Rolle bei den Tracermethoden spielt die Ganglinienseparation (SKLASH & FARVOLDEN 1979). Dabei wird die Abflussganglinie bei einzelnen Hochwasserereignissen und über längere Zeiträume hinweg mit Hilfe der Konzentrationen von natürlichen Tracern in zwei oder mehr Abflusskomponenten getrennt. Die Grundvoraussetzung zur Durchführung einer Abflusskomponententrennung ist, dass die Tracerkonzentrationen der einzelnen Komponenten, die sog. „end member“-Konzentrationen, sich signifikant voneinander unterscheiden und v.a. bekannt sein müssen. Sie sind für den Niederschlag und das tiefere Grundwasser recht genau zu bestimmen, während die Tracerkonzentrationen der oberflächennahen unterirdischen end-members mit größeren Unsicherheiten behaftet sind. Gründe dafür sind die sehr unterschiedlichen Verweilzeiten, verschiedenste Fließpfade und die heterogene Beschaffenheit des Untergrunds. So wechseln z.B. oft schon auf kleinstem Raum Schichtung, Mächtigkeiten, Skelettanteile, Verwitterungsgrad, Hangneigung und Vegetation. Fließpfade

sind sehr komplex, sehr häufig sind Versickerung und Wiederaustritt im Hangverlauf zu beobachten. Räumlich und zeitlich sehr variable Gehalte der natürlichen Tracer kennzeichnen daher diese Umsatzräume.

Im Bruggagebiet wurden bei bisherigen Ganglinienseparationen zur Modellierung drei verschiedene Abflusskomponenten unterschieden und verschiedenen Herkunftsräumen zugeordnet (UHLENBROOK 1999, LINDENLAUB 1998):

Direktabfluss

Herkunftsräume: Sättigungsflächen und Blockschutthalden (Ereigniswasser und Wasser aus oberflächennahen Schichten), mittlere Verweilzeit: einige Stunden bis wenige Tage, Anteil am Gesamtabfluss: ca. 10%, bei Hochwasser-Ereignissen bis zu 50%, durchschnittlicher Si - Gehalt: 0,3 mg/l

Fließsystem-2

Herkunftsräume: periglaziale Deckschichten (Piston Flow, Groundwater Ridging, Basisabfluss), mittlere Verweilzeit: zwei bis drei Jahre, Anteil am Gesamtabfluss: ca. 70%, durchschnittlicher Si - Gehalt: 4,2 mg/l

Fließsystem-1

Herkunftsräume: Hochlagenbereiche und Kluftgrundwasserleiter (v.a. Basisabfluss), mittlere Verweilzeit: sechs bis neun Jahre, Anteil am Gesamtabfluss: ca. 20%, durchschnittlicher Si - Gehalt: 6,0 mg/l

Deutlich wird der hohe Anteil am Gesamtabfluss auch bei Hochwasserereignissen aus den periglazialen Deckschichten. Herkunftsraumorientierte Abflusskomponententrennungen führten jedoch bisher nur zu stark unsicheren Ergebnissen, da gerade diesem Umsatzraum keine näher belegten end member-Konzentrationen zugewiesen werden konnten. Als Tracer zur Auftrennung der unterschiedlichen Herkunftsräume wurde dabei bisher v.a. gelöstes Silikat verwendet, da es im Gegensatz zu den anderen hydrochemischen Wasserinhaltsstoffen nicht über den Niederschlag eingetragen wird und am wenigsten Wechselwirkungen mit der Bodenzone ausgesetzt ist. Über das genaue Lösungsverhalten von Silikat in natürlichen Systemen gibt es jedoch bisher nur wenige Untersuchungen und widersprüchliche Aussagen, so dass eine Zuweisung von diskreten Silikat-Konzentrationen zu den einzelnen Herkunftsräumen nur mit großen Unsicherheiten geschehen konnte.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der Diplomarbeit ist eine nähere Untersuchung der chemischen Zusammensetzung des Boden- und oberflächennahen Grundwassers der periglazialen Deckschichten im Bruggaeinzugsgebiet. Näher erkundet wird die räumlich und zeitlich variable Zusammensetzung der oberflächennahen Abflusskomponenten an verschiedenen Hangpositionen, verschiedenen Deckschichtentypen und verschiedenen Deckschichtengliedern. Dafür wird eine Routinebeprobung an verschiedenen Standorten über mehrere Wochen vorgenommen und die Proben auf ihre hydrochemischen Inhaltsstoffe analysiert.

Um die zeitliche Varianz und die Reaktion der Abflusskomponenten auf Niederschlagsereignisse besser auflösen zu können, ist zusätzlich eine ergänzende, zeitlich hochaufgelöste Beprobung mit automatischen Probenentnahme an ausgewählten Standorten geplant.

Um die Aussagekraft des Tracers Silikat zu überprüfen und zu präzisieren, wird mit unterschiedlichen Substraten aus den Deckschichten ein Laborversuch zur Silikatlösung durchgeführt.

Als Ergebnisse werden genauere Daten der hydrochemischen Signatur von unterirdischen schnellen Abflusskomponenten und eine genauere Kenntnis der Aussagekraft des Tracers Silikat für künftige Ganglinienseparationen erwartet.

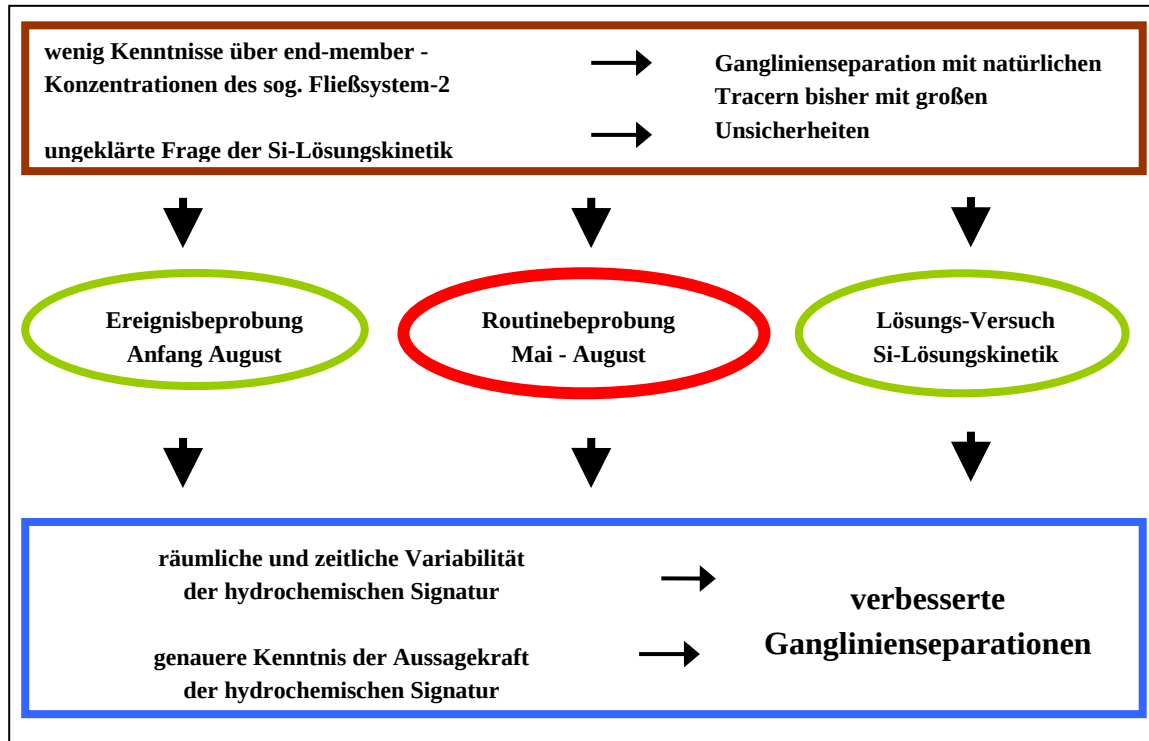


Abb.1.1: Schema der Problemstellung, Vorgehensweise und Zielsetzung der Arbeit

2 Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen fanden im Brugga-Einzugsgebiets (EZG) statt, das im Rahmen des DFG-Projekts „Tracerhydrologisch gestützte Ausweisung und Modellierung von Abflusskomponenten im mesoskaligen Bereich“ schon mehrfach detailliert hinsichtlich seiner naturräumlichen Gegebenheiten beschrieben wurde. An dieser Stelle soll deshalb nur eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Daten aus den Arbeiten von LINDENLAUB (1998) und UHLENBROOK (1999) widergegeben werden, in denen sich ausführliche Darstellungen finden. Lediglich zu den quartärgeologischen Bildungen der periglazialen und holozänen Schuttdecken sollen einige genauere Informationen gegeben werden, da sie den Herkunftsraum der untersuchten oberflächennahen, unterirdischen Abflusskomponenten darstellen.

2.1 Klima

Das Klima im Einzugsgebiet wird v.a. von der zyklonalen Westwinddrift gesteuert. Der Austausch zwischen dem subtropisch-randtropischen Hochdruckgürtel (Azorenhoch) und der subpolaren Tiefdruckfurche (Islandtief) sorgt für häufigen Frontendurchzug mit Niederschlägen und bestimmt das kühl-gemäßigte, atlantisch getönte Übergangsklima mit Jahresmitteltemperaturen zwischen 10,3 °C in Freiburg und 3,2 °C am Feldberggipfel. Die starke Variabilität von Exposition und Meereshöhe bedingt eine starke räumliche Heterogenität aller Klimaelemente. Neben der Temperatur ist auch der Niederschlag stark von der Meereshöhe und expositionsbedingten Luv-Lee-Effekten abhängig. Im langjährigen Mittel fallen in Freiburg 944 mm und am Feldberg 1732 mm (gemessener) Niederschlag, die mittlere Zunahme mit der Höhe beträgt dementsprechend 66,5 mm / 100 m. Der Anteil des Schneeniederschlags am Gesamtniederschlag liegt zwischen einem Drittel in den tieferen Lagen und zwei Dritteln in den höheren Lagen. Oberhalb 900m kann man deshalb im Mittel an 60 Tagen im Jahr mit einer geschlossenen Schneedecke >30 cm rechnen. Das Niederschlagsregime zeigt generell ein Maximum im Juni – August, mit zunehmender Höhenlage tritt ein sekundäres Maximum im Januar/Februar auf, das zum primären Maximum werden kann. Die Verdunstung wird als Restgröße im Wasserhaushalt zu 550 mm im langjährigen Mittel berechnet, maximale Tageswerte der aktuellen Verdunstung können auf südexponierten Hängen bis zu 8 mm betragen.

2.2 Morphologie

Das Einzugsgebiet der Brugga im Südschwarzwald weist eine Größe von ca. 40 km² auf. Höchster Punkt ist der Feldberggipfel (1493 müNN). Der Gebietsauslass (Pegel Oberried) befindet sich auf 434 m ü NN, die mittlere Höhe beträgt 986 müNN. Die Untersuchung beschränkte sich auf ein wichtiges Teileinzugsgebiet der Brugga, das EZG des St. Wilhelmer Talbachs, das knapp 40% der Gesamtfläche einnimmt. Morphologisch charakteristisch ist das steile rhenanische Relief mit einer mittleren Hangneigung von 17,5°. 75% der Fläche werden von steilen Hangbereichen gebildet, kuppig verflachte Hochlagen (20%) und schwach entwickelte Talböden (5%) mit geringerer Neigung bilden die restliche Fläche. Die Entstehung der übersteilten Hänge kann durch den formenden Einfluss der Würmvereisung (Kare und Trogtäler), sowie mit der sehr großen Reliefenergie am Schwarzwaldwestrand durch die Oberrheingrabenbildung (Sprunghöhe an der Hauptverwerfung insgesamt ca. 1500 m auf ca. 10 km Distanz) erklärt werden.

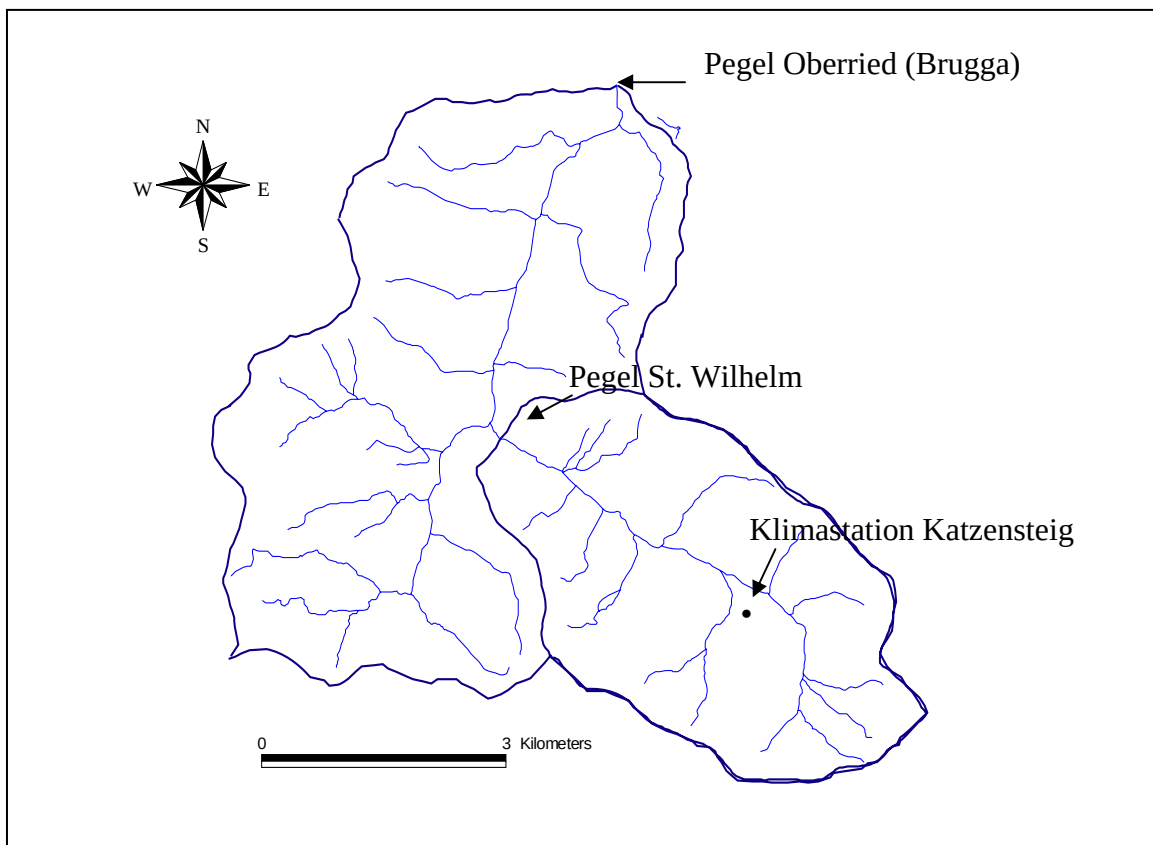


Abb.2.1: Das Einzugsgebiet der Brugga und des St. Wilhelmer Talbach

2.3 Landnutzung und Vegetation

75% des Brugga-Einzugsgebietes sind bewaldet, v.a. die Hochflächen und Talböden werden als Weiden benutzt (22%), Ackerbau wird nicht betrieben, einen geringen Flächenanteil (3%) nehmen die Siedlungsflächen ein.

Die dominierenden Pflanzengesellschaften sind Waldschwingel- bzw. Hainsimsen-Tannen-Buchen-Mischwälder (Galio-Fagetum bzw. Luzulo-Fagetum), in den höheren Lagen dominieren Hainsimsen-Tannenwälder (Luzulo-Abietetum), Peitschenmoos-Fichtenwälder (Bazzanio-Piceetum) und hochstaudenreiche Bergahorn-Buchenmischwälder (Aceri-Fagetum). Galerieartige Bachauen-Eschenwälder (Carici-Fraxinetum) begleiten sowohl kleinere Hanggerinne, als auch unterirdisch, aber oberflächennah abfließendes Hangwasser. Große Waldflächen werden allerdings stark forstlich genutzt und sind von Fichten dominiert.

Die schwächer geneigten Hochflächen und Talböden werden als Weiden genutzt. Hier finden sich in den tieferen Lagen Goldhafer-Wiesen (Trisetetum flavescens) und in den Hochlagen Flügelginster-Weiden (Festuco-Genistetum sagittalis) und Borstgrasrasen (Leontodonto-Nardetum).

Teile des Untersuchungsgebiets gehören zum Naturschutzgebiet Feldberg, dessen Besonderheit u.a. das glazialreliktische Vorkommen vieler arktisch-alpiner Pflanzen ist.



Abb.2.2: Glazialrelikte im Naturschutzgebiet Feldberg: Alpentrodelblume *Soldanella alpina* und Sumpferzblatt *Parnassia palustris*

2.4 Hydrologie

Das jährliche Abflussregime der Brugga zeigt ein Maximum durch die Schneeschmelze im April und ein Minimum in den Sommermonaten infolge des höheren Wasserbedarfs der Pflanzen, was zu höherer Verdunstung führt. Die generell hohen Abflusskoeffizienten im Winter werden v.a. durch die regelmäßig auftretenden Winterhochwasser verursacht, die immer wieder beim Durchzug von warm-feuchten atlantischen Luftmassen auftreten, wenn flüssiger Niederschlag mit Schneeschmelze gleichzeitig vorkommt. Die große Differenz zwischen MQ und MHQ bei den Gewässerkundlichen Hauptzahlen weist auf die geringe Speicherfähigkeit des Gesteins und auf den großen Einfluss schneller Abflusskomponenten hin. Dies ist typisch für Einzugsgebiete, die im kristallinen Grundgebirge liegen.

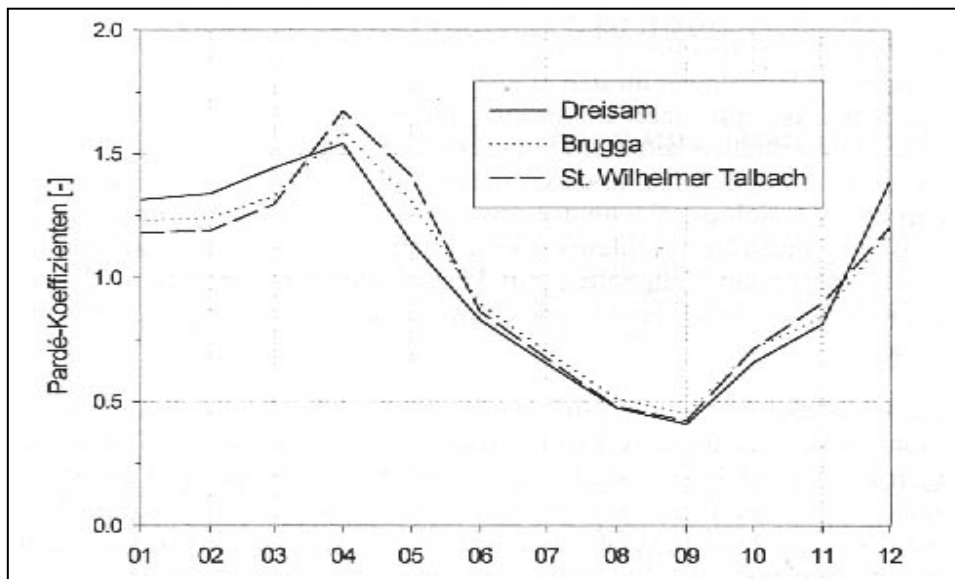


Abb. 2.3: Abflussregime von Brugga, Dreisam und St. Wilhelmer Talbach

2.5 Geologie

Die wechselvolle geologische Geschichte des kristallinen Grundgebirges beginnt mit der Ablagerung zahlreicher mariner Sedimentschichten im Präkambrium, die insgesamt mehrere tausend Meter Mächtigkeit erreichten. In diese Sedimente drangen im Kambrium vorwiegend saure Eruptivgesteine ein. Bis zum Oberdevon erfolgten mehrere Metamorphosen, wobei bei ca. 550°-650°C und einigen kbar Druck die Sedimentgesteine zu Paragneisen, die Eruptivgesteine zu Orthogneisen, diese wiederum durch weitere metamorphe Prozesse teilweise zu Meta- und Diatexiten umgewandelt wurden. Ab dem mittleren Devon bis zum unteren Karbon (vor 360-325 Millionen Jahren) bildeten sich nach einer Erosionsphase marine klastische Sedimente. Diese Phase endete mit der variscischen Gebirgsbildung, die u.a. das Eindringen von Graniten zur Folge hatte. Der Bärhaldegranit, welcher erst im Oberkarbon vor 290 Millionen Jahren aufstieg, wurde von der tektonischen Durchbewegung nicht mehr erfaßt, drang also erst nach der variscischen Gebirgsbildung ein.

Im Perm erfolgte die Abtragung des Grundgebirges bis fast auf das heutige Niveau der Gipfel. diese „Rumpfflächen“ wurden im Trias bis Jungtertiär wieder von mächtigen terrestrischen und marinen Sedimentfolgen bedeckt, welche aber durch die ab Ende Jura anhaltende Erosion vollständig abgetragen wurden, so dass diese ehemaligen Landoberflächen wieder freigelegt wurden (GLA 1981).

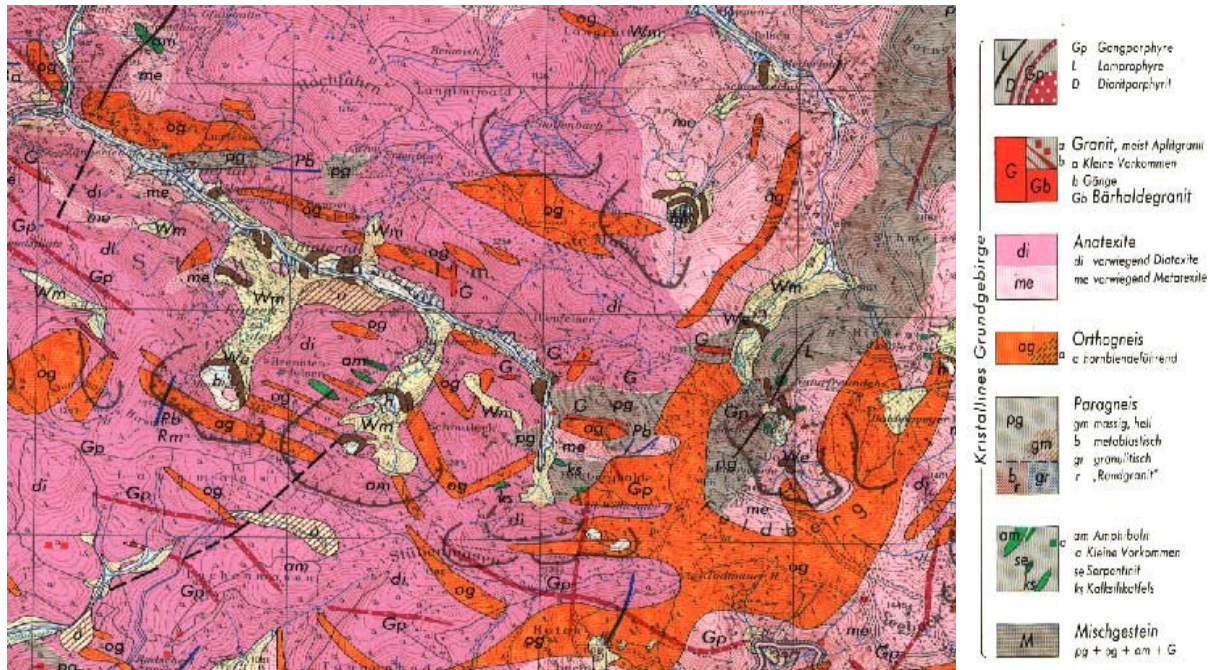


Abb. 2.4: Geologische Karte des Untersuchungsgebietes 1:50000 (GLA 1981)

Trotz des Vorkommens unterschiedlicher Gesteine kann das kristalline Grundgebirge als hydrogeologische Einheit angesehen werden, für das ein mehr oder weniger homogenes Kluftnetz angenommen wird. Dieses bildet die Hauptfließwege des Wassers im Gegensatz zu einer wesentlich geringer durchlässigen Gesteinsmatrix. Generell schwanken die Durchlässigkeiten zwischen 10^{-10} und 10^{-5} m/s. Erhöhte Werte können entlang von Störungen, Erzgängen, mylonitisierten Zonen und im Grenzbereich unterschiedlicher Gesteine auftreten (BIEHLER 1995, STÖBER 1995). Das Kluftgrundwasser aus dem Kristallin ist neben Wasser aus den tieferen Zonen der Schuttdecken hauptsächlich für die Bildung des Basisabflusses verantwortlich (LINDENLAUB 1998).

Tab.2.1: Mineralbestand der häufigsten Gesteine im Untersuchungsgebiet (GLA 1981)

	Orthogneise	Paragneise	Metatexite	Diatexite
Quarz	28,3	34,3	27,0	29,0
Orthoklas	8,5	2,9	4,6	7,8
Plagioklas	51,2	44,4	27,6	47,7
Biotit	11,4	17,1	21,5	15,2
Cordierit	-	3,4	18,0	-
Hornblende	-	0,4	-	-
Akzessorien	0,6	0,5	1,3	0,5

Während der pleistozänen Kaltzeiten wurde die Morphologie des Untersuchungsgebiets grundlegend modifiziert. Das St. Wilhelmer Tal wurde durch die Gletscherbedeckung zum typischen Trogtal überformt, mehrere Kare bildeten sich an den nordexponierten Hängen. In den nicht vom Eis bedeckten Bereichen kam es zur Ausbildung periglazialer Schuttdecken, die das kristalline Grundgebirge in wechselnder Mächtigkeit überlagern. Immer wieder wurde in den bisherigen Untersuchungen zu Abflussbildungsprozessen im Brugga-Einzugsgebiet diesen periglazialen und holozänen Schuttdecken eine große Bedeutung zugesprochen, da sie den Hauptumsatzraum des Wassers und v.a. der schnellen unterirdischen Abflusskomponenten darstellen. In der vorliegenden Arbeit wird dieser Umsatzraum und die chemische Zusammensetzung des daraus abfließenden Wassers untersucht. Aus diesem Grund werden im Folgenden einige Vorinformationen zu Entstehungsprozessen und Forschungsstand v.a. der periglazialen Schuttdecken gegeben.

LOZINSKI (1969) prägte als erster den Begriff „Periglazial“, wobei er damit v.a. das Klima und die klimatisch geprägten Formen in der unmittelbaren Umgebung der pleistozänen Eismassen bezeichnete. Diese ursprüngliche Definition wurde räumlich und zeitlich stark erweitert, so dass „Periglazial“ heute als Oberbegriff für die klimatischen, morphodynamischen und faziellen Verhältnisse in den Periglazialgebieten verwendet wird. Diese sind nun nicht mehr gebunden an die Nähe zu Eis oder Gletschern, sondern sind vielmehr durch die Dominanz von frostgesteuerten Prozessen und Erscheinungen wie Frostsprengung, Permafrostböden und Solifluktion charakterisiert. Der Begriff ist auch zeitlich nicht mehr festgelegt und wird für rezente wie für fossile Verhältnisse gleichermaßen verwendet (WEISE 1983). Rezente Periglazialgebiete finden sich in den Polar- und Subpolargebieten sowie in Hochgebirgsregionen. Die dort beobachtbaren Prozesse liefern Hinweise zur Erklärung pleistozäner, reliktscher Erscheinungsformen außerhalb der rezenten Periglazialgebiete, wobei abweichende Geofaktoren beachtet werden müssen (BÜDEL 1959). So lassen sich u.a. auch die Entstehungsprozesse ableiten, die zur Bildung von periglazialen Schuttdecken in Mitteleuropa während der Würmvereisung geführt haben. Sie überlagern weiträumig als skelettreiche, z.T. mehrschichtige, allochthone Sedimentkörper das anstehende Gestein (SCHILLING & WIEFEL 1962).

Das Schuttmaterial wurde durch intensive Frostverwitterung bereitgestellt. Dabei spielt nicht nur die Volumenzunahme von Wasser beim Gefrieren eine Rolle, sondern mehr noch das gerichtete Wachsen von Eiskristallen, das hohe Hydratationspotential von Eis und Kluftbildung infolge von Schrumpfungen durch Hydratation (WEISE 1983). Verstärkend wirken eine große Zahl von Frost-Tau-Wechseln, klüftige Ausgangsgesteine und großes Wasserangebot. Die Frostsprengung erzeugt eckigen Schutt aller Größenklassen und Feinmaterial bis inklusive Schluff.

Dieser unsortierte Schutt gerät durch weitere Frost-Tau-Zyklen, gesteuert von Kryoturbations, Abspülungs- und Solifluktionsprozessen an geneigten Hängen in Bewegung. Als Solifluktion bezeichnet wird allgemein das Hangabbewegen von wassergesättigtem Material mit sehr langsamer Geschwindigkeit bezeichnet (ANDERSSON 1906). Solifluktionsprozesse sind in

Periglazialgebieten besonders intensiv, weil dort während der sommerlichen Auftauphase eine wassergesättigte, getaute Schicht („active layer“) über dem gefrorenen, wasserundurchlässigen Unterboden entsteht. Solifluktion wird neben der Hangneigung stark von der vorhandenen Bodenfeuchtigkeit und „schmierenden“ Korngrößen (Schluff und Ton) gesteuert. Verstärkt werden die solifluidalen Massenbewegungen durch subkutane Abspülprozesse von abfließendem Schmelzwasser. Die Abspülung wird nach WEISE (1983) ab 12° Hangneigung quantitativ wichtiger als die Solifluktion. Eine Sortierung des Ausgangsmaterials entsteht infolge der sog. Kryoturbationsprozesse. Durch Auffrieren und Frostgleiten großer Korngrößen entstehen Frostmusterböden, bzw. Steinstreifen an geneigten Hängen mit engräumigem Wechsel von Grob- und Feinmaterial. Unregelmäßige Verformungen wie z.B. Würgeböden entstehen in inhomogenem Material beim unterschiedlich schnellen Eindringen der Frostfront durch Froststauchung.

Die Erforschung der fossilen periglazialen Schuttdecken in Europa begann in den 50'er Jahren z.B. mit FITZPATRICK (1956) in Schottland und FEZER (1953) in Süddeutschland. Zahlreiche Bearbeiter, u.a. auch STAHR (1979) im Schwarzwald, gliederten die Schuttdecken in verschiedene Schichten, allerdings je nach Bearbeiter mit unterschiedlichen Klassifikationskriterien und Benennungen. Die Angaben zum Bildungszeitraum der Schuttdecken sind sehr unterschiedlich: SCHILLING & WIEFEL gehen von einem Zeitraum von ca. 100000 Jahren (Riß-Eiszeit bis Hauptwürm) aus, während z.B. ROHDENBURG (1968) nur wenige tausend Jahre im Präalleröd als ausreichend zur Deckschichtenbildung ansieht. Auch FEZER (1953) betrachtet die Schuttdecken nicht als Zeugnis für den Ablauf des Pleistozäns, sondern eher als eine Momentaufnahme für den Übergang vom Spätglazial zum Holozän. Ein kurzer Bildungszeitraum wird auch gestützt durch Untersuchungen in rezenten Periglazialgebieten, die ergaben, dass sich mehrere übereinanderliegende Schichten gleichzeitig und recht schnell bilden können, z.B. durch ein eher laminares Bodenfließen in der unteren, halbgetauten Auftauzone und turbulente Massenbewegung bzw. Abspülung in der eigentlichen Auftauzone (active layer) (BÜDEL 1960, BIBUS, NAGEL & SEMMEL 1976). Dies bedeutet, dass die periglazialen Deckschichtenglieder als fazielle Einheiten anzusehen sind, die in kurzen Zeiträumen z.T. auseinander, oder durch verschiedene, gleichzeitig ablaufende Prozesse entstanden sind (FRÜHAUF 1990) und nicht stratigraphische Einheiten, die gleichförmig über längere Zeiträume mit dazwischenliegenden Abtragungsphasen.

Zur Gliederung der periglazialen Deckschichten wurden von verschiedenen Autoren uneinheitliche Kriterien und Benennungen benutzt. Bei GASSMANN (1999) findet sich ein umfassender Vergleich der uneinheitlichen Nomenklatur. In Anlehnung an STAHR (1979) u.a. unterscheidet er folgende Deckschichtenglieder im Höllental bei Freiburg:

Zerfalls- oder Zersatzzone: Hangender, aufgelockerter Bereich des Anstehenden mit noch erkennbarem ursprünglichen Gesteinsverband, ein hangabwärtsgerichteter Transport hat nicht stattgefunden, stark schwankende Skelettgehalte, unscharfe Abgrenzung zu Haupt- und Basislagen, auffallendstes Merkmal ist die starke Verwitterung des Skeletts, die in der Zerfallszone so weit fortgeschritten ist, dass das Material grabbar ist

Schwemmsand: sandiges Substrat mit mittlerem Grus- bis Steingehalt, geringer Lagerungsdichte und nicht eingeregelter Skelett in erosionsgeschützten Muldenlagen, markant sind zwischengelagerte Bänder aus Schluff bis Feingrus

Basislage: Substrat mit hoher Lagerungsdichte, 40 bis 80% Skelettgehalt und hangparalleler Einregelung des Skeletts in erosionsgeschützten Hangmulden, Feinmaterial: lehmiger Sand, Übergang zur Hauptlage oft unscharf durch erhöhten Skelettgehalt

Mittellage: ausschließlich in konkaven Hangfußbereichen vorkommend, Merkmale zwischen Haupt- und Basislage

Hauptlage: am weitesten verbreitetes Substrat mit mittlerer Lagerungsdichte, Skelett regellos angeordnet, ca. 40% Skelettanteil aus Grobgrus, Steinen und vereinzelt Blöcken, Feinmaterial: stark toniger Lehm bis stark lehmiger Sand, unscharfe Übergänge in liegende und hangende Deckschichtenglieder

Oberlage: hoher Skelettgehalt von 60 – 80%, Skelettgröße von stark grusig bis mittel blockig, geringe Lagerungsdichte, Feinmaterial: humoser, stark sandiger Lehm, verbreitet in Muldenlagen und unter Felsauftragungen, häufig als Restit durch Ausspülung von Haupt- oder Basislage entstanden, fließende Übergänge, v. a. zur Hauptlage

Auf Grundlage dieser Schichtglieder unterscheidet Gassmann für eine Kartierung im Maßstab 1:5000 im Höllental 18 verschiedene Deckschichtentypen, die im folgenden nur kurz aufgezählt werden sollen:

- 1 Geringmächtige Hauptlage oder Zerfallszone
- 2 Hauptlage über Zerfalls- oder Zersatzzone oder Anstehendem
- 3 Hauptlage über Basislage auf Zerfalls- oder Zersatzzone oder Anstehendem
- 4 Hauptlage über Mittellage auf Basislage über Schwemmsand auf Zerfalls- oder Zersatzzone oder Anstehendem
- 5 Hauptlage über Schwemmsand
- 6 Oberlage über Zerfalls- oder Zersatzzone oder Anstehendem
- 7 Oberlage über geringmächtiger Hauptlage oder Zerfallszone
- 8 Oberlage über Hauptlage auf Zerfalls- oder Zersatzzone oder Anstehendem
- 9 Oberlage über Hauptlage auf Basislage über Zerfalls- oder Zersatzzone oder Anstehendem
- 10 Hauptlage mit Kristallinschutt der Hänge über Niederterasse
- 11 Hauptlage auf oberer Niederterasse
- 12 Hauptlage auf unterer Niederterasse
- 13 Steinschutthalde
- 14 Felsen und extrem felsige Lagen, z.T. mit Schuttbedeckung
- 15 Junge Talfüllungen
- 16 Schwemmkegel
- 17 Böschung der Niederterasse
- 18 Holozän übersteilte Rinnen

WIMMENAUER (1967) fasst diese Deckschichtentypen in der GK 1 : 25 000 zu drei Einheiten zusammen:

- I. lehmig-steiniger Hangschutt
weit verbreitet, entspricht periglazialen Deckschichten mit unterschiedlichen Mächtigkeiten und Schichtungstypen
- II. steiniger Schutt, Blockschutt und Schuttkegel
Halden unterhalb von Felswänden, feinerdefreie, ausgewaschene Bereiche, ungeschichtete Schwemmkegel an Hangfüßen
- III. schluffig-sandiger Hanglehm
<10% Skelettanteil, v.a. an Hangfüßen, z.T. überlagert durch lehmig-steinigen Schutt

Diese Einteilung wurde verändert für die NA-Modellierung im Brugga-Gebiet übernommen, bei der eine Raumgliederung in Flächen mit gleichen Abflussbildungsprozessen vorgenommen wurde: Auf der Grundlage von unterschiedlichem Abflussverhalten der verschiedenen Deckschichtentypen teilte RUTENBERG (1998) die Deckschichtenbereiche in „Blockschuttlagen“, „periglazialen Hangschutt mit Deckfolge“ und „nicht weiter differenzierte periglaziale Deckschichten“ ein, wobei die Zuweisung auf der Grundlage der forstlichen Standortskartierung basierte. FREY (1999) und DIDSZUN (2000) untersuchten und verglichen zwei Quellen im Brugga-EZG, deren EZG aufgrund dieser Raumgliederung zum Einen den periglazialen Deckschichten und zum anderen dem periglazialen Hangschutt mit Deckfolge zugeordnet werden konnten. Deutlich konnte dabei das unterschiedliche Abflussverhalten und die unterschiedliche Reaktion der hydrochemischen Zusammensetzung des Quellwassers auf Niederschlagsereignisse nachgewiesen werden.

Ausgehend von diesen Ergebnissen und den oben genannten geologischen Voraussetzungen sollte im Rahmen dieser Arbeit u.a. überprüft werden, ob es möglich ist, den einzelnen Deckschichtentypen bzw. den einzelnen Schichtgliedern eine bestimmte hydrochemische Signatur zuzuweisen. Die Schichtung der Schuttdecken darf allerdings keinesfalls überbewertet werden. Vollständige Abfolgen, wie sie idealisiert von SEMMEL (1977, zit. in REHFUESS 1990, siehe Abb. 2.4) dargestellt werden, sind eher selten zu finden. Nach STAHR (1979) sind reduzierte Typen mit nur ein bis zwei Deckschichtengliedern viel häufiger anzutreffen. Die Schichtung ist oft unklar ausgeprägt, häufiger als scharfe Schichtgrenzen sind fließende Übergänge belegt (STAHR 1979, GASSMANN 1995). Im Hangverlauf werden die Schuttdecken immer wieder von Felsdurchragungen unterbrochen, im Hangprofil durchgängige Schichten sind ohnehin nur an sehr gleichmäßig und schwach geneigten Hängen denkbar.

Auch viele Beobachtungen aus rezenten Periglazialgebieten sprechen gegen einen gleichförmigen Verlauf der periglazialen Morphodynamik über große Räume oder ganze Hänge hinweg. Nach Büdel beginnt Solifluktion bei 1,5 - 1,8° Hangneigung, steigert sich dann bis ca. 24° und verschwindet dann bei weiter steigendem Hangwinkel zugunsten der Abspülung: Feinmaterial und Feuchtigkeit werden in steigendem Maße entfernt und erhöhen die

Viskosität der Auftauzone bis keine solifluidale Bewegung mehr möglich ist. Das bedeutet, dass Mächtigkeiten und Korngrößenzusammensetzung im Hangverlauf stark variieren. Tatsächlich beobachtete FEZER (1957) bei fossilen Schuttdecken einen starken Zusammenhang zwischen der Mächtigkeit der Schuttdecken und der Hangneigung. SHARP (1942) berichtet von Solifluktion in einzelnen Loben mit unterschiedlicher Dynamik. Diese solifluidalen Bewegungsstrukturen kollabierten teilweise an Steilhängen und hinterließen dann Gleitbahnen und Ausbruchsnischen (SEMMELE 1969). Durch Frostschrundspalten entstehen sog. Eiskeilpseudomorphosen, die tiefgründig mit verschwemmtem Sand oder Lehm verfüllt werden (WEISE 1983). Kryoturbate Frostmusterböden bewirken horizontal engräumige starke Wechsel von Fein- und Grobmaterial (BÜDEL 1961). Froststauchungen in Würgeböden wirken einer Schichtung entgegen, bzw. heben diese auf.

All diese Beobachtungen bestätigen die Mehrzahl der Feldbeobachtungen an den fossilen periglazialen Deckschichten, nämlich einen engräumigen Wechsel, starke horizontale und vertikale Verzahnung und Über- und Unterlagerung verschiedener periglazialer Deckschichtentypen. SEMMELE (1985) erklärt dies durch auf kurzer Distanz variierende Hangneigung mit einem Neben- und Übereinander unterschiedlicher Prozesse.

Für Wasserbewegungen in den Schuttdecken ergibt sich aus diesen Tatsachen, dass höchstens sehr kleinräumig ein Fließen in getrennten Schichten möglich ist, während in der Hangskale betrachtet, das Wasser ständig vertikal und horizontal zum Übertritt in Nachbarschichten, bzw. ganz zum oberflächlichen Austritt, auf jeden Fall aber zur ständigen Durchmischung gezwungen wird und ein durchgehendes Fließen entlang eines ganzen Hanges in diskreten Schichten mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten nicht möglich ist.

Die Durchlässigkeiten der Hangschuttaquifere insgesamt betrachtet können sehr variabel sein, was sich aufgrund der unterschiedlichen Korngrößenzusammensetzung ergibt (SAUTER 1967). In einer Schutthalde mit relativ grobem Material konnten Durchlässigkeitsbeiwerte von ca. 10^{-2} m/s mit Hilfe von Tracerversuchen ermittelt werden (MEHLHORN 1998). Hingegen sind in dicht gelagerten Basislagen Werte von etwa 10^{-7} bis 10^{-5} m/s zu erwarten, wobei berücksichtigt werden muss, dass Makroporen diese Durchlässigkeiten signifikant erhöhen können.

Die Ausbildung und Mächtigkeit der Schuttdecken hat entscheidenden Einfluss auf die Bodenbildung. Am häufigsten sind Mull-Braunerden anzutreffen, Syrosete finden sich an den seltenen Stellen, an denen das Grundgebirge direkt ansteht, Podsolierung tritt im Untersuchungsgebiet nur ganz kleinräumig auf und ist im Bereich des kristallinen Grundgebirges im Wesentlichen nur über Granit zu finden. Vergleyung tritt selten an ständig staunassen Standorten auf, Moder und Rohhumusaufgaben sind ebenfalls nur kleinräumig an naß-kalten Sonderstandorten anzutreffen, da die Streu sehr wirkungsvoll von dem Riesenregenwurm *Lumbricus badensis* zersetzt wird (LAMPARSKI 1985).

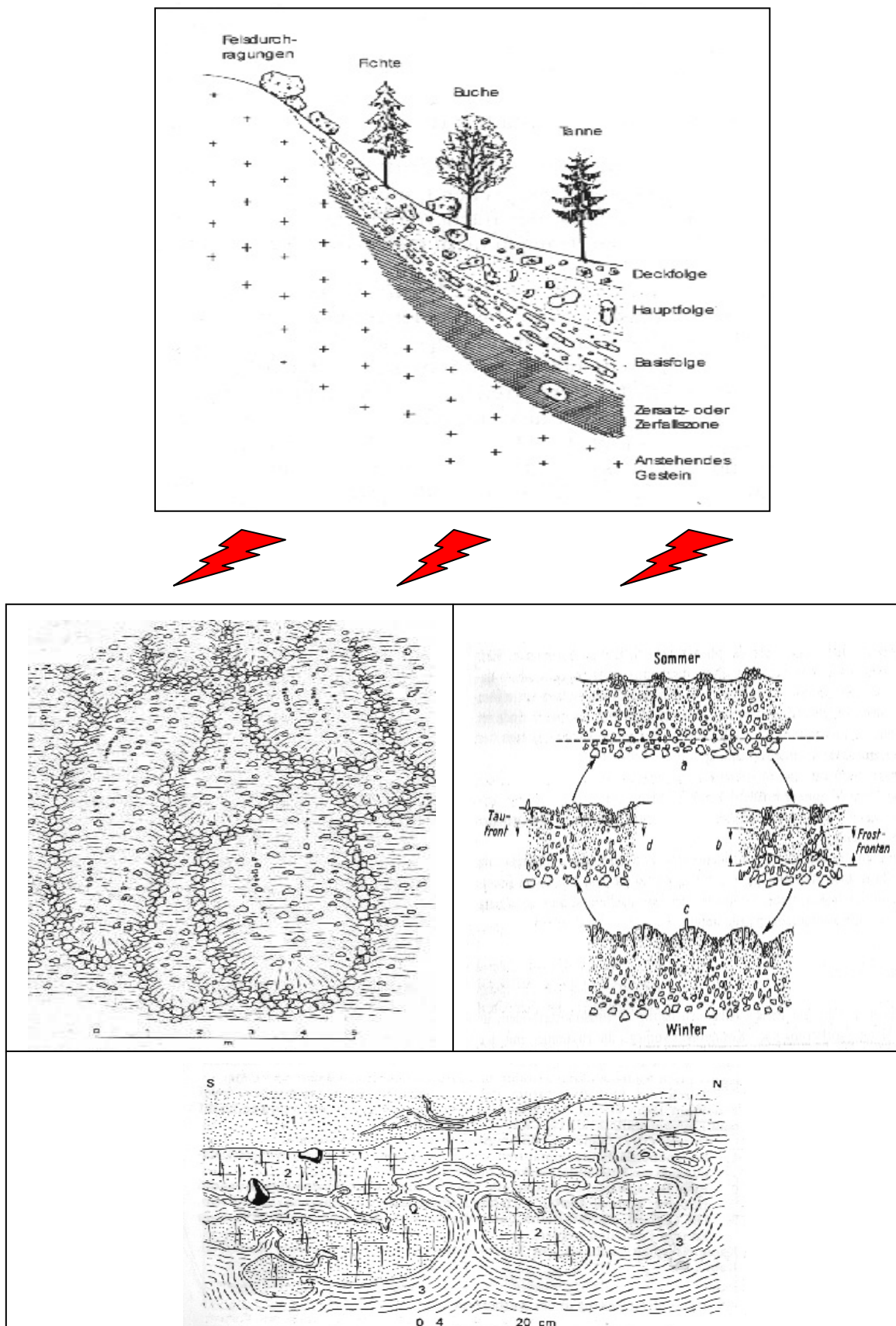


Abb. 2.5: Stark idealisierte Darstellung der Deckschichten nach SEMMEL (1977) und einige Entstehungsprozesse, die zeigen, dass eine durchgängige Schichtung nicht zu erwarten ist: Lobenförmige Solifluktion, Frostmusterbodenentstehung und Würgeboden (aus WEISE 1983)

3 Methodik und theoretische Hintergründe

Zur experimentellen Untersuchung der oberflächennahen unterirdischen Abflusskomponenten wurden im Verlauf dieser Arbeit verschiedene Feld-, Labor- und Auswertemethoden verwendet, die im Folgenden erläutert werden. Zum Teil schien es sinnvoll, zusätzlich theoretische Hintergründe darzustellen.

3.1 Ganglinienseparation mit natürlichen Tracern

In dieser Arbeit wurden keine Ganglinienseparationen durchgeführt, die Untersuchungen zielen aber hauptsächlich darauf ab, verbesserte Datengrundlagen und Interpretationsmöglichkeiten für Ganglinienseparationen mit hydrochemischen Tracern zu erhalten. Aus diesem Grund werden im folgenden Kapitel kurz die Grundlagen der Ganglinienseparation und die Eigenschaften der verwendeten hydrochemischen Tracer vorgestellt.

3.1.1 Grundlagen der Ganglinienseparation

Eine zentrale Rolle bei der Auswertung von Untersuchungen mittels Tracermethoden spielt die Ganglinienseparation (SKLASH & FARVOLDEN 1979). Dabei wird die Abflussganglinie einzelner Hochwasserereignisse und über längerer Zeiträume mit Hilfe der Konzentrationen von natürlichen Tracern in zwei oder mehr Abflusskomponenten getrennt. Genutzt werden dabei die Unterschiede in der chemischen bzw. isotopischen Zusammensetzung der einzelnen Abflusskomponenten. Verschiedene Abflusskomponenten können dabei verschiedene Herkunftsräume, verschiedene Verweilzeiten oder auch verschiedene Prozesse repräsentieren.

Grundlage der Abflusskomponententrennung ist die Massenerhaltung der Wasser- und Tracerströme des sich im „steady state“ befindenden Systems „Einzugsgebiet“, d.h. der Abfluss und alle in ihm enthaltenen Informationen (physikalische, hydrochemische und isotopische Eigenschaften des Wassers, sowie Abflussdynamik) konvergieren am Gebietsauslass (sog. Konvergenzansatz nach LEIBUNDGUT 1984). Im Idealfall gelingen dadurch mit relativ einfachen Analysen des Abflusses am Gebietsauslass Rückschlüsse auf mittlere Verweilzeiten, Herkunftsräume und dominierende Abflussbildungsprozesse bei unterschiedlichen Abflussbedingungen. Über einfache lineare Mischungsgleichungen lassen sich bei der Beobachtung von $n-1$ Tracern n Abflusskomponenten trennen:

$$Q_{\text{ges}} = \sum Q_n$$

$$c_{\text{ges}} Q_{\text{ges}} = \sum c_n Q_n$$

Als Tracer kommen dabei verschiedene Stoffe, meist natürlichen Ursprungs, wie gelöste Ionen, Silikat und stabile Isotope von Sauerstoff und Wasserstoff zum Einsatz. Prinzipiell wird dabei zwischen herkunftsraumorientierter und verweilzeitenorientierter Ganglinien-separation unterschieden.

Dem als Orthokieselsäure H_4SiO_4 vorliegenden gelösten Silikat kommt dabei eine besondere Eignung zur herkunftsraumorientierten Komponententrennung zu, da es sich am wenigsten variabel im Vergleich mit allen anderen Hauptbestandteilen des Wassers verhält und nicht über den Niederschlag ins Einzugsgebiet eingetragen wird. Kieselsäure entsteht bei der Verwitterung der Gesteinsmatrix. Generell wird angenommen, dass die Silikatlösung sehr langsam vonstatten geht und ein Lösungsgleichgewicht praktisch nie erreicht wird. Somit wird Wasser, das lange in Kontakt mit Gesteinsoberflächen war, eine sehr viel höhere Silikat-konzentration zugeordnet, als Wasser, das nach nur geringer Kontaktzeit wenig Silikat lösen konnte. Wird nun von unterschiedlich langen Aufenthaltszeiten in unterschiedlichen Herkunftsräumen ausgegangen, können mit der Silikat-Konzentration diese verschiedenen Komponenten im Abfluss aufgetrennt werden.

Die Hauptionen werden ohne Ausnahme über den Niederschlag eingetragen und unterliegen starken Wechselwirkungen mit der belebten und unbelebten Bodenzone. Sie dienen v.a. einer Überprüfung der Ergebnisse und liefern bei Ereignisbeprobungen wertvolle ergänzende Hinweise auf Wasserherkunftsräume.

Im Gegensatz zu diesen hydrochemischen Tracern sind die stabilen Isotope des Wassermoleküls, ^{18}O und ^2H , verweilzeitenorientierte Tracer, die es möglich machen, Ereignis- und Vorereigniswasser zu unterscheiden. Beachtet werden muss im Vergleich zu Silikat die wesentlich stärker ausgeprägte Variabilität der Konzentrationen in den jeweiligen Abflusskomponenten, sowie die räumlich und zeitlich variablen Gehalte im Niederschlag, ausgelöst durch Isotopenfraktionierung (z.B. Höheneffekt, Jahreszeiteneffekt, u.a., siehe MOSER & RAUERT 1980).

Die Grundvoraussetzung zur Durchführung einer Abflusskomponententrennung ist, daß die Tracerkonzentrationen $c_1 - c_n$ der einzelnen Komponenten, die sog. „end member“-Konzentrationen, sich signifikant voneinander unterscheiden und v.a. bekannt sein müssen. Die Genauigkeit der Abflusskomponententrennung sinkt erheblich, falls die räumliche und zeitliche Verteilung der jeweiligen end-member - Konzentrationen nicht konstant bleibt bzw. falls sich die Komponenten gegenseitig beeinflussen (HOOPER & SHOEMAKER 1986). Ausführliche Darstellungen zu Ganglinienseparationen im Brugga-EZG finden sich z.B. in UHLENBROOK (1999).

3.1.2 Hauptionen

Zu den sog. Hauptbestandteilen oder Hauptionen natürlicher Wässer gehören die Kationen Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} und die Anionen HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} und NO_3^- . Mit diesen Ionen ist, mit Ausnahme von Wässern besonderer Herkunft, meist über 98% des gesamten Ionengehalts erfasst (MÜLLER 1998). Die Dynamik der Hauptionen ist vor allem für Untersuchungen zum Stoffhaushalt wichtig, z.B. bei Einflüssen verschiedener Landnutzungen. Dies ist nicht Ziel der Arbeit, doch kann die Untersuchung ihres Verhaltens v.a. während Hochwasserereignissen bei der Untersuchung der Abflussbildung hilfreich sein, z.B. bei der Identifikation von Wasserherkunftsräumen. Durch den Vergleich mit anderen natürlichen Tracern können die jeweiligen Ergebnisse überprüft werden. Außerdem lassen sich Aussagen über die Eignung bestimmter Ionen für die Abflussbildungsforschung treffen (DIDSZUN 2000).

Sämtliche Hauptionen werden atmosphärisch als nasse oder trockene Deposition in das EZG eingetragen. Zusätzliche Quellen sind anthropogene Düngung, Ausbringen von Streusalz im Winter und Kalkungen von Waldböden, um der Versauerung entgegenzuwirken. Natürliche Quellen sind Boden und Gestein, wo Ionen infolge von Verwitterungsvorgängen freigesetzt werden. Meist finden während der Bodenpassage intensive Wechselwirkungen mit Tonmineralen und Mikroorganismen statt, so dass bei den meisten Hauptionen nicht von einem konservativen Verhalten ausgegangen werden kann. Der Einfluss der anthropogenen Düngung kann im vorliegenden Untersuchungsgebiet vernachlässigt werden und wird deshalb jeweils nicht einzeln erwähnt.

Natrium (Na^+)

Natrium wird v.a. bei der Hydrolyse von Plagioklasen (Albit: $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) freigesetzt, aber auch durch den Niederschlag eingebracht: In der BRD wurden 1-10kg/(ha*Jahr) ermittelt, in Meeresnähe kann dieser Wert ein Vielfaches betragen. Natrium wird nur sehr schwach gebunden und daher sehr leicht ausgewaschen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1989). In einem EZG in Georgia, USA wurde Natrium zur qualitativen Abschätzung der Wasserherkunft verwendet. (PETERS et al. 1998).

Kalium (K^+)

Kalium wird hauptsächlich bei der Verwitterung von Orthoklasen ($\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) und Biotit ($\text{K}(\text{Mg,Fe})_3[\text{Si}_5\text{AlO}_{18}]$) freigesetzt. Es ist ein wichtiger Pflanzennährstoff und wird von diesen selektiv stark aufgenommen. Gleichzeitig wird Kalium stark an Tonmineralen adsorbiert, weshalb maximale Konzentrationen von mobilem Kalium im humosen Oberboden vorliegen. Vermehrte Auswaschung während eines Niederschlagsereignisses lässt deshalb auf Fließwege im Oberboden schließen.

Magnesium (Mg^{2+})

Magnesium entstammt der Verwitterung von Biotit ($\text{K}(\text{Mg,Fe})_3[\text{Si}_5\text{AlO}_{18}]$) und Cordierit ($\text{Al}_3(\text{Mg,Fe})_2[\text{Si}_3\text{AlO}_8]$). Die Mg-Auswaschung ist abhängig von der Sickerwassermenge, der Mg-Konzentration der Bodenlösung, der Mg-Sättigung des Bodens und der Zufuhr anderer Salze. In der Regel steigt der Gehalt an austauschbarem Mg mit zunehmendem Schluff- und Tongehalt und sinkt mit abnehmendem pH-Wert und Sandanteil. Mg wird ähnlich leicht wie Ca ausgewaschen.

Calcium (Ca^{2+})

Ca wird im untersuchten EZG v.a. bei Verwitterung von Plagioklasen (Anorthit: $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$) frei (Carbonatgesteine und Gips fehlen). Von den Kationen werden in Böden humider Klimate Ca-Ionen am stärksten ausgewaschen.

Chlorid (Cl^-)

Im Brugga-EZG findet nur ein geringer Eintrag von Chlorid durch im Niederschlag gelöste Seesalzaerosole über die Atmosphäre statt. Messungen der UBA an der Klimastation Schauinsland ergaben einen mittleren Chloridgehalt von 0,3 mg/l im Niederschlag. Dabei traten allerdings einzelne Spitzen bis zu 8 mg/l und generell erhöhte Konzentrationen im Winterhalbjahr auf. Ebenso muss eine Aufkonzentrierung der gemessenen Werte durch Verdunstung in Betracht gezogen werden. Auch geogen wird kaum Chlorid in die Abflüsse eingetragen. Das einzige stark chloridhaltige Mineral ist Pyromorphit, das nur im Bereich der Schauinsland-Erzgänge vorkommt (SCHWEGLER 1995). Chlorid wurde bei verschiedenen Untersuchungen im Brugga-EZG trotz der geringen Mengen, die aus den anstehenden Gesteinen gelöst werden als geogener Tracer betrachtet, da bei Niederschlagsereignissen deutliche Verdünnungseffekte (in der Brugga) auftreten. Anthropogene Einträge durch Streusalz und Abwässer spielen im Napfgebiet keine Rolle. Cl^- ist ein sehr mobiles Ion. Durch die hohe Löslichkeit, den kleinen Ionenradius und die negative Ladung wird es kaum adsorbiert und kann als nahezu konservativer Tracer betrachtet werden. Aus diesem Grund wurde es auch schon mehrfach zur Ganglinienseparation benutzt (z.B. LEANEY et al. 1993, FREY 1998).

Nitrat (NO_3^-)

Nitrat ist Teil des stark durch mikrobielle und Mineralisierungsprozesse gesteuerten Stickstoffkreislaufes. Der überwiegende Teil des Bodenstickstoffs liegt in organischer Bindung vor, der N-Gehalt der Ausgangsgesteine ist sehr gering, ein Eintrag erfolgt v.a. durch atmosphärische Deposition. Anorganisch und pflanzenverfügbar liegt der Stickstoff weitgehend in Form des leicht löslichen und leicht auswaschbaren Nitrat vor. Die Auswaschung von Nitrat weist starke Konzentrationsschwankungen und einen jahreszeitlichen Verlauf auf, mit hoher Auswaschung im Winter und nach Trockenperioden im Sommer. Die Ursache dafür sind Nitrifikationsschübe, die im Spätwinter bei wiederholtem Gefrieren und Auftauen des Bodens und im Spätsommer nach Durchfeuchtung nach längerer Trockenheit auftreten (MEESBURG 1997). Erhöhte Nitratkonzentrationen weisen bei Niederschlagsereignissen im Sommer auf den Einfluss von oberflächennahem Abfluss hin.

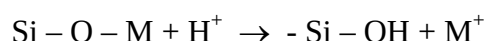
Sulfat (SO_4^{2-})

Sulfat wird dem Sickerwasser v.a. durch atmosphärische Deposition und nach Mineralisation von organischem Material zugeführt. Starke Anstiege der Sulfatkonzentrationen können nach Perioden mit anaeroben (nassen) Bodenverhältnissen entstehen, in denen Sulfide im Boden nach Reduzierung zu FeS angereichert werden, die beim Übergang zu aeroben Verhältnissen reoxidiert und dann durch Starkregen massiv ausgewaschen werden. Dieser Effekt führt immer wieder zu starken Sulfat- und Versauerungsschüben bei Winterhochwässern (MEESENBURG 1997). Generell nehmen die Sulfatgehalte im Bodenprofil nach unten hin zu, können aber durch anaerobe Verhältnisse in tieferen Schichten zum Ausfällen gebracht werden (SCHWEGLER 1995).

3.1.3 Silikat

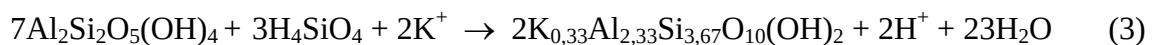
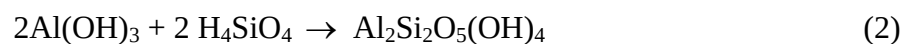
Dem als Orthokieselsäure H_4SiO_4 vorliegenden Silikat kommt unter den Wasserinhaltsstoffen eine besondere Eignung zur herkunftsraumorientierten Komponententrennung zu, da es sich am wenigsten variabel im Vergleich mit allen anderen Hauptbestandteilen des Wassers verhält. Aus diesem Grund wurde gelöstes Silikat schon vielfach zur Abflusskomponententrennung verwendet (UHLENBROOK 1999). Die schwach dissoziierte Kieselsäure entsteht bei der Verwitterung der Gesteinsmatrix. Hauptlieferanten sind die wenig verwitterungsbeständigen Plagioklase und Biotit, während Quarz trotz hoher Anteile in den vorliegenden Para- und Orthogneisen durch die hohe Verwitterungsbeständigkeit nur eine untergeordnete Rolle spielt. Generell wird angenommen, daß die Silikatlösung sehr langsam vonstatten geht und ein Lösungsgleichgewicht praktisch nie erreicht wird. Somit wird Wasser aus tiefen Schichten, das lange in Kontakt mit dem Gestein war, eine sehr viel höhere Silikatkonzentration zugeordnet, als Wasser aus oberflächennahen Bereichen, das nach nur geringer Kontaktzeit wenig Silikat lösen konnte. Zu dieser Frage der Lösungskinetik liegen jedoch unterschiedliche Meinungen vor. Verschiedentlich wird ein sehr schnelles Ansteigen der Silikatkonzentration schon im Stundenbereich postuliert, das zum einen durch ein rasches Einstellen eines Lösungsgleichgewichtes zum anderen durch eine Mobilisierung hochangereicherten Bodenwassers erklärt wird (UHLENBROOK 1999).

Die Verwitterung von silikatischen Mineralen findet vor allem über Hydrolyse statt. Damit bezeichnet man die Reaktion von H^+ - und OH^- -Ionen des dissoziierten Wassers mit Mineralbestandteilen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1989). Am intensivsten ist die Hydrolyse bei niedrigen pH-Werten und unter feuchtheißem (tropischen) Klima, während sie ihre geringste Wirkung unter kalt-ariden Bedingungen zeigt (KUGLER & SCHAUB 1997). In der Regel sind dabei die H^+ -Ionen der Bodenlösung die eigentliche Triebkraft der dieser chemischen Verwitterungsart: Sie sprengen Sauerstoffbrückenbindungen zwischen Metallen (M) und Silikaten (Si) (oder Carbonaten).



Obwohl die Gneise und Anatexite im Untersuchungsgebiet auch sehr hohe Anteile an Quarz aufweisen, sind hauptsächlich Feldspäte für Gehalte an gelöster Kieselsäure (H_4SiO_4) in Grund- und Bodenwasser verantwortlich. Beide weisen zwar die gleiche Kristallstruktur (Gerüstsilikate) auf, bei Feldspäten sind jedoch die einzelnen Tetraeder über Al- Ionen verbunden, die einen größeren Ionenradius aufweisen als Si, wodurch sich eine niedrigere Verwitterungsstabilität ergibt. Generell lässt sich in Bezug auf die Verwitterungsstabilität folgende Reihenfolge der Silikatminerale aufstellen: Quarz > Muskovit > Orthoklas > Plagioklase (Albit > Anorthit) > Biotit > Amphibole > Pyroxene > Granate > Olivine (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1989).

Durch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen wurde deutlich, dass die Hydrolyse an der Oberfläche der Feldspäte angreift und diese mit der Zeit vollständig auflöst. Dieser Lösungsprozeß ist jedoch inkongruent (STUMM & MORGAN 1981), d.h. es laufen gleichzeitig verschiedene Auflösungs- und Ausfällungsprozesse, sowie mit zunehmender H_4SiO_4 -Konzentration verschiedene Reaktionen ab, die im Folgenden am Beispiel von Orthoklas dargestellt werden.



Als Endprodukte entstehen neben der gelösten Kieselsäure also auch Gibbsit (1) und Tonminerale wie Kaolinit (2) oder Montmorillonit (3). Die Art der entstehenden Sekundärminerale hängt dabei von den Konzentrationen der in der Lösung vorhandenen Komponenten ab, wie im Stabilitätsdiagramm in Abb. 3.1 ersichtlich wird. Die eingetragenen Bereiche der einzelnen Minerale stellen dabei Stabilitätsbereiche bzw. Gleichgewichtsbereiche dar, d.h. eine Wasserprobe, die aufgrund der chemischen Zusammensetzung im Stabilitätsdiagramm z.B. im Gibbsitbereich plottet, ist mit Gibbsit im Gleichgewicht (Reaktion (1) läuft ab), wandert aber mit zunehmender Silikatkonzentration immer weiter nach rechts, bis schließlich die Grenze zum Kaolinit-Bereich erreicht ist. Nun steht die betrachtete Lösung im Gleichgewicht mit Kaolinit und die weiteren chemischen Reaktionen laufen nach dem Schema (2) ab. Nicht nur die Si-Konzentration legt allerdings den Stabilitätsbereich fest, sondern auch andere Inhaltsstoffe, pH-Wert und Temperatur. Im Beispieldiagramm wurde zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts das K^+/H^+ -Verhältnis auf der Abszisse aufgetragen. Eine Lösung durchläuft also mit zunehmender Reaktionszeit mehrere Stabilitätsbereiche von unterschiedlichen Sekundärmineralen.

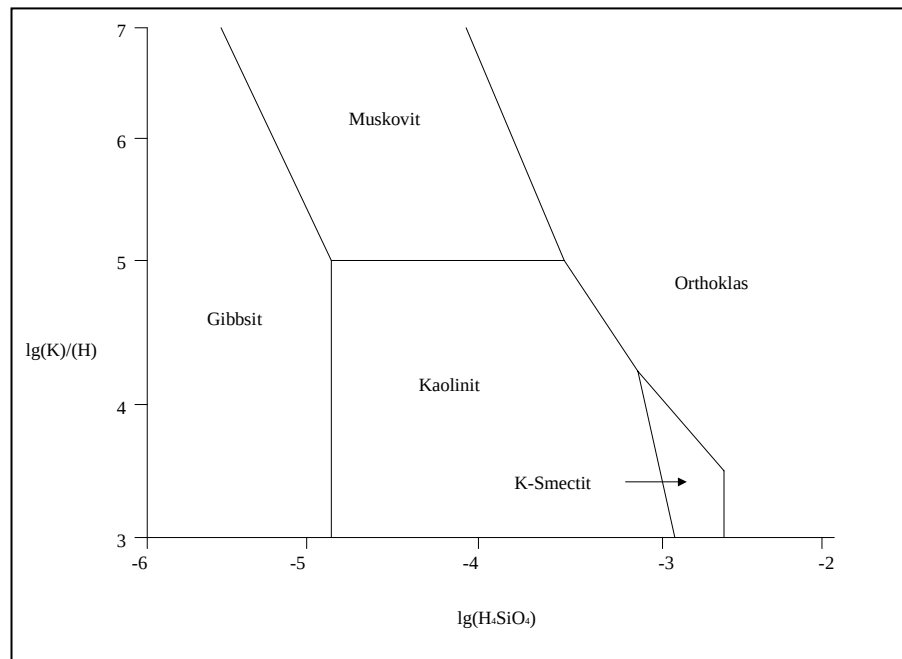
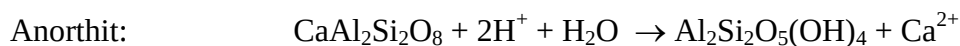
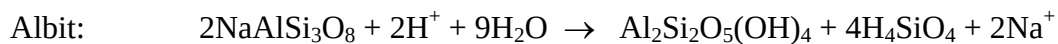


Abb. 3.1: Stabilitätsdiagramm von Orthoklas (ver. nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1989)

Generell gilt, dass bei relativ niedrigen pH-Werten, Silikat-, Alkali- und Erdalkali-Konzentrationen, wie sie überwiegend in den offenen Systemen des gemäßigt-humiden Klimabereiches verbreitet sind, sich vorwiegend Zweischicht-Tonminerale wie Kaolinit bilden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1989). Diese Reaktion läuft nach dem gleichen Muster auch für Plagioklase und andere Silikate ab:



Laborexperimente zur Silikatlösung ergaben einen charakteristischen zuerst parabolischen, später linearen Verlauf der Konzentrationszunahme mit der Zeit (MATTHESS 1990). Obwohl die Hydrolyse von Feldspäten schon seit mehr als 100 Jahren experimentell und theoretisch erforscht wird (siehe Literaturzusammenstellung bei DAHMKE 1988), sind die Mechanismen der Lösung, sowie v.a. die Teilreaktionen, die die anfängliche parabolische Reaktionskinetik bestimmen, ungeklärt. Verschiedene Hypothesen zu dieser Frage können mit der Ausbildung einer das Mineralkorn zusammenhängend umschließenden (Verarmungs-) Schicht („Präzipitat-Schutzschicht-Hypothese“, „Residuallagen-Hypothese“) zusammengefasst werden. HOLDREN & ADAMS (1982) konnten allerdings zeigen, dass durch die Fällungskinetik der Sekundärphasen ebenfalls ein parabolischer Verlauf der Konzentrationszunahme in der wässrigen Lösung bedingt werden kann. Dies wird auch durch Untersuchungen mittels Raster-Elektronenmikroskopie gestützt, die keine durchgehenden Präzipitats- bzw. Residuallagen auf den Feldspatoberflächen nachweisen konnten (z.B. BERNER & HOLDREN 1977). Die

anfänglich sehr hohen Lösungsraten werden deshalb z.T. auch durch die Auflösung von an der Oberfläche anhaftenden Mikrokristallen erklärt.

Während also die Lösungsmechanismen von reinen Mineralen wie Feldspäte, Quarz, Calcit, usw. bereits umfassend untersucht sind, gibt es vergleichsweise nur sehr wenige experimentelle Untersuchungen zu Gesteins-Wasser-Wechselwirkungen und der Kinetik natürlicher Silikat-Verwitterungssysteme. Bekannt ist allerdings, dass die Auflösung von einem Silikatmineral die Lösung anderer Silikatminerale stark beeinflussen kann. Dementsprechend gibt es in der hydrologischen Literatur unterschiedliche Aussagen zur Aussagekraft von Silikat als herkunftsraumorientierten Tracer (siehe UHLENBROOK 1999). Allgemein wird anerkannt, dass im Niederschlagsinput kein Silikat in das System Einzugsgebiet eingetragen wird, so dass das sog. "event water" im Gegensatz zum „pre-event water“ zunächst kein Silikat enthält. Auch dass dann beim Kontakt mit dem Mineralboden schnell messbare Konzentrationen gelöst werden, steht außer Frage. Unterschiedliche Handhabungen gibt es aber bei der Ganglinienseparation bzw. N-A-Modellierung, wo verschiedenen Abflusskomponenten bzw. Herkunftsräumen konkrete Konzentrationen zugeteilt werden.

Viele Bearbeiter gehen von einer schnellen Einstellung des Lösungsgleichgewichts nach Kontakt mit dem Mineralboden aus und unterscheiden mittels Silikat nur direkten Oberflächenabfluss von anderen Abflusskomponenten (z.B. WELS 1991, KENNEDY ET AL. 1986). HAINES & LLOYD (1985) untersuchten verschieden alte Grundwässer und stellten fest, dass von einer „input concentration“ nach Durchsickern der ungesättigten Bodenzone ausgehend, die Silikatgehalte das jeweilige Stadium der Gleichgewichtsreaktion zwischen Grundwasser und Silikatmineralen der Aquifermatrix anzeigen. Nur bei sehr altem Grundwasser (>12000 Jahre) konnten sie ein Gleichgewicht gegenüber den silikathaltigen Mineralen im Stabilitätsdiagramm ablesen. Deshalb trennen andere Bearbeiter aufgrund unterschiedlich hoher Silikatkonzentrationen altes, langsam und tief fließendes Grundwasser von jüngeren, schnell und oberflächennah abfließenden Komponenten (UHLENBROOK 1999).

Laborexperimente ergaben ebenfalls, daß sich lediglich Teilgleichgewichte in Bezug zu einzelnen Sekundärmineralen in kürzerer Zeit einstellen können. So fand DAHMKE (1988) in Säulenversuchen mit relativ hohen Fließgeschwindigkeiten in sehr kurzer Zeit ein Gleichgewicht der wässrigen Phase gegenüber Kaolinit, das zeitlich im Zusammenhang mit dem Übergang von der parabolischen zur linearen Konzentrationszunahme stand.

Organische Säuren und Komplexbildner, wie sie in A-Horizonten zu finden sind, führen zu einer signifikanten Zunahme der Lösungsraten. Die Lösung ist stark pH-abhängig (MATTHESS 1990), wobei ein Minimum bei pH6 durchlaufen wird. Die Lösungsraten sind stark korngößenabhängig, wobei generell mit abnehmender Korngröße (zunehmende Reaktionsoberfläche) die Lösungsraten ansteigen, bei sehr kleinen Korngrößen allerdings wieder abnehmen (YINIAN 2001, HOLDREN & SPEYER 1985).

Zur Frage der Übertragbarkeit von Laborexperimenten auf natürliche Geländebedingungen stellte BRANTLEY (1992) fest, dass sich die Ergebnisse um bis zu drei Zehnerpotenzen unterscheiden können. Als Gründe hierfür benennt er:

Labor-Messfehler: Um die Lösungsraten genau wiedergeben zu können, müssen sie über lange Zeiträume beobachtet werden, wobei es meist unmöglich ist gleichbleibende Bedingungen zu gewährleisten. So unterscheiden sich Laborergebnisse untereinander um den Faktor 30, eine Reproduzierbarkeit von Ergebnissen bei gleichem Versuchsaufbau scheint nicht besser als mit einem Faktor 5 möglich.

Organische Säuren und weitere Inhaltsstoffe: Die inkongruenten Lösungsmechanismen der Silikatminerale bringen es mit sich, dass die Lösung nicht nur von der Silikatkonzentration selbst, sondern auch von weiteren Wasserinhaltsstoffen und komplexbildenden organischen Säuren stark abhängig ist.

Gesamte, benetzte und reaktive Oberfläche: Während im Laborexperiment meist so gearbeitet wird, dass die gesamte Substratoberfläche mit Wasser in Kontakt tritt, ist dies in natürlichen Systemen meist nicht der Fall, da der Abfluss hauptsächlich in wenigen bevorzugten Fließwegen geschieht. Zusätzlich ist zwar bekannt, dass jeweils nur Teile der Mineraloberflächen überhaupt in die Lösungsreaktionen eingebunden sind, es gibt jedoch nur ein begrenztes Verständnis dieses Verhältnisses von reaktiver zu benetzter Oberfläche.

Temperaturunterschiede: Fehler bei der Übertragung der Ergebnisse entstehen auch durch die Temperaturunterschiede zwischen kontrollierten Laborbedingungen und den variablen Geländebedingungen. VELBEL (1990) geht von einem Fehler von bis zu 500% aufgrund der unterschiedlichen Temperatureinwirkungen aus.

Zur Frage, ob tiefere oder oberflächennahe Schichten mehr zur Silikatlösung beitragen, bemerkt OHSE (1983), dass Feldspäte aus tieferen Horizonten weniger angewittert sind und damit eine kleinere Kontaktfläche bieten. Umgekehrt sind die Mineraloberflächen der humosen Horizonte durch die oben erwähnten organischen Komplexbildner z.T. blockiert.

3.2 Feldmethoden

Ausgangspunkt für die experimentellen Untersuchungen war eine intensive Geländebegehung und sorgfältige Auswahl der Probennahmestellen. Aufgrund der mangelhaften Aufschlussverhältnisse und der schwierigen Ansprache der Deckschichtentypen war es nicht einfach, repräsentative Probennahmestellen zu finden. Im Folgenden werden die letztendlich ausgewählten Stellen, die Auswahlkriterien und die Beprobungsmethoden beschrieben.

3.2.1 Auswahl der Probenahmestellen

Die Probenentnahmestellen wurden in einer intensiven Geländebegehung nach folgenden Kriterien ausgesucht:

- Sind unterschiedliche **Hangpositionen** vertreten?:
Ziel ist, herauszufinden, ob ein Zusammenhang zwischen Hangposition und hydrochemischer Signatur besteht, bzw. ob längs eines Hangs unterschiedliche oder gleiche Bedingungen erwartet werden können. Erwartet wird z.B. eine Zunahme der Silikat-Konzentration, da mit zunehmender Hanglänge die jeweiligen Einzugsgebiete der untersuchten Kleinquellen größer und damit die Aufenthaltszeiten des Wassers länger werden.
- Sind unterschiedliche **Deckschichtentypen** vertreten?:
Ziel ist, herauszufinden, ob ein Zusammenhang zwischen Deckschichtentypen und Tracer-konzentrationen besteht. Schon mehrfach wurde in bisherigen Arbeiten z.B. vermutet, dass immer wieder die Basislage als Stauer und Hauptumsatzraum fungiert. Bei einer vergleichenden Quellbeprobung wurden signifikante Unterschiede zwischen Quellen aus unterschiedlichen Deckschichtentypen gefunden.
- Sind unterschiedliche **Tiefenkomponenten** vertreten?:
Eine richtige Interpretation der Ergebnisse kann nur mit der möglichst genauen Kenntnis der Umsatzräume auch im vertikalen Sinne erfolgen. Generell kann erwartet werden, dass in tieferen Schichten fließendes Wasser älter ist, als sehr oberflächennaher Abfluss.
- Sind unterschiedliche **Abflussbildungsprozesse und Herkunftsräume** vertreten?:
Erwartet wird eine große Variabilität der hydrochemischen Signaturen, die aber im Idealfall durch die ablaufenden Prozesse und Herkunftsräume (z.B. Sättigungsflächenabfluss) erklärt werden können.
- Wie ist der **Standort im Gewässernetz** eingebettet?:
Wird lediglich zuvor versickertes Quell- oder Bachwasser beobachtet oder kann von gesuchtem, autochthon in den Schuttdecken entstandenem Abfluss ausgegangen werden?
- Ist überhaupt ein **Wasseraustritt** zu beobachten bzw. im Hochwasserfall zu erwarten?
- Gute **Erreichbarkeit** mit dem PKW?:
zur angestrebten routinemäßigen Beprobung sollten alle Proben jeweils an einem Tag genommen werden können

3.2.2 Beschreibung der ausgewählten Probennahmestellen

Ausgewählt wurden insgesamt 69 Probennahmestellen für die dreimonatige Routinebeprobung. Nahe beieinander liegende Punkte auf gleicher Hangposition wurden mit .. A, .. B, usw. bezeichnet, wenn vermeintlich unterschiedliche Tiefenkomponenten beprobt wurden – und mit .. .1, .. .2, usw., wenn vermeintlich gleiche Tiefenkomponenten an der gleichen Hangposition beprobt wurden.

Die Probennahmestellen konzentrierten sich auf einen relativ kleinen Bereich im Napf-Gebiet innerhalb des Einzugsgebiets des St. Wilhelmer Talbaches. Dies erschien der Fragestellung besser angepasst, als wenige, über das ganze Einzugsgebiet verteilte Probenahmestellen, denn somit konnten engräumige Hangabfolgen bzw. Schichtwechsel besser erfasst werden. Zudem konnten somit wesentlich mehr Probenahmestellen beprobt werden, da die Anfahrtszeiten in dem stark bewaldeten und gebirgigen Brugga-EZG erheblich sind. Zum Vergleich wurden neben den meist sehr schwach schüttenden Kleinquellen des diffusen Abflusses auch immer wieder in der Nähe fließende Gerinne, stark schüttende Quellen und auch der Hauptvorfluter selbst beprobt.

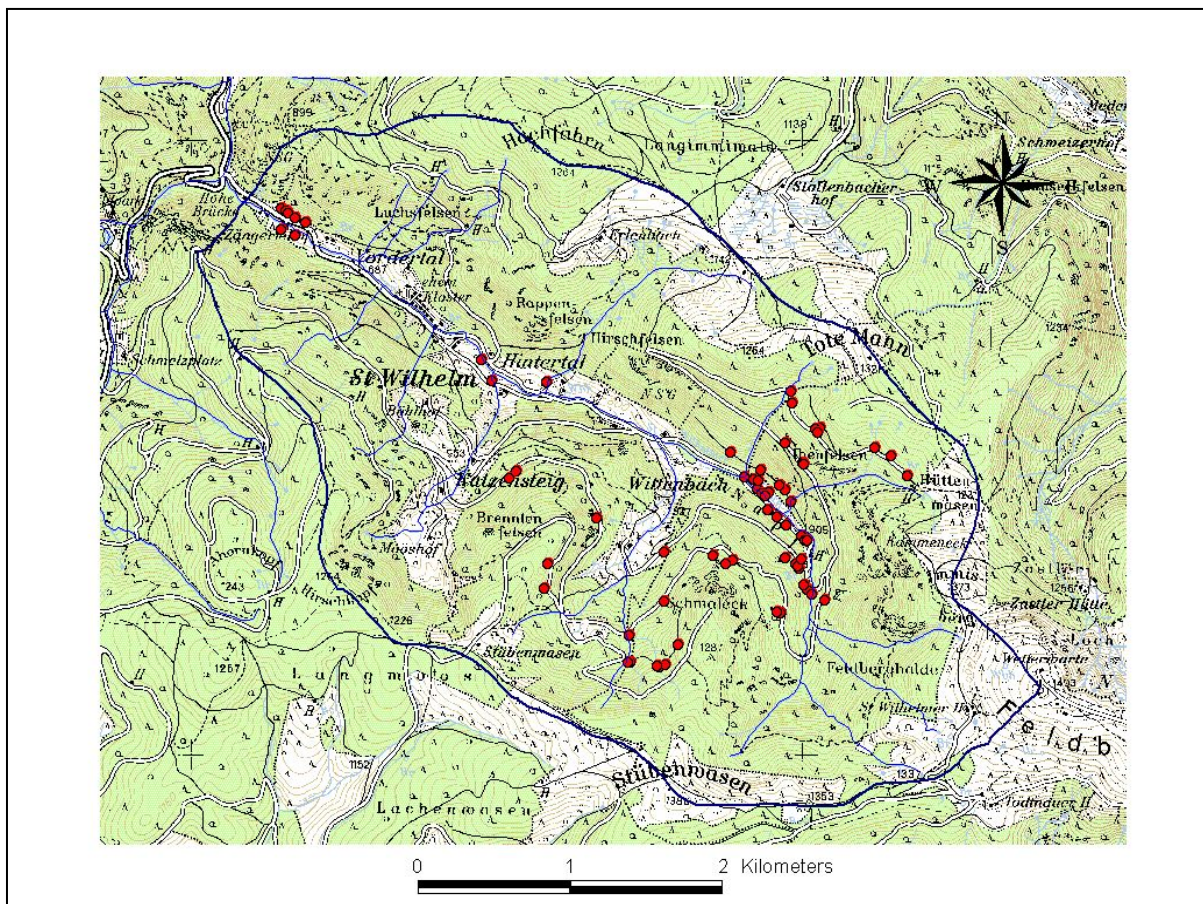


Abb. 3.2: Probennahmestellen der dreimonatigen Routinebeprobung innerhalb des Einzugsgebietes des St. Wilhelmer Talbaches

Eine tabellarische Zusammenstellung aller Probennahmestellen mit Höhenlage, Rechts- und Hochwerten und geschätzter EZG - Größe befindet sich im Anhang. Die Einzugsgebiete der beprobten Hangschutt-Kleinquellen abzugrenzen, gestaltete sich als sehr schwierig bis unmöglich. Selbst mit den DGK 1:5000 war die Topographie nicht genau genug aus dem Kartenmaterial abzulesen und auch im Gelände direkt stimmte das aus der Oberflächentopographie bestimmte EZG meist offensichtlich nicht mit der tatsächlichen EZG - Grenze überein. Die abgeschätzten Grenzen wurden deshalb nur z.T. aus topographischen Beobachtungen, aber auch aus anderen Geländebeobachtungen wie Schüttung, Vegetation und kleinräumigem, nicht in den Karten verzeichnetem Gewässernetz bestimmt.

Probennahmestellen am SSW-exponierten Hang zwischen Napf u. Tote Mann („Tote Mann-Hang“) (22, 23, 24, 24.1, 05, 05.1, 05.2, 04.0, 04.1, 04A-D, 04.2, Alluv01-06)

Hier konnte eine Vielzahl von Probennahmestellen eingerichtet werden, da das Wasser relativ oberflächennah abfließt und an Weganschnitten und Felsdurchragungen immer wieder zum Austritt gezwungen ist. So war es auch möglich, eine Hangabfolge sowie jeweils mehrere Stellen in gleicher Hangposition zu beproben. Ein Vergleich des diffusen Abflusses in den Schuttdecken mit stark schüttenden Quellen, die die Hochlagenbereiche entwässern, war an diesem Hang durch die besondere Morphologie sehr gut möglich: Die Quellen von Hüttenwasenbach und Schwarzenbach entwässern die gering geneigten Hochlagenbereiche seitlich zu den Gerinnen, während an dem sehr steilen Ibenfelsenhang selbst keine stärker schüttende Quelle existiert.

Probennahmestellen „04.0, 04.1“: Lage am Oberhang, stark schüttende Hochlagenquellen zum Vergleich mit den die Schuttdecken entwässernden Kleinquellen

Probennahmestellen „04A-D“: Vermeintlich unterschiedliche Tiefenkomponenten innerhalb der Deckschichten an fast gleicher Hangposition am Oberhang, entwässertes Substrat: ungeschichtet (bis ca. 1,5m durch Forstweg aufgeschlossen), Lagerungsdichte 1-2, Bodenart: sandiger Lehm, hier wurde Substrat für die Laborversuche zur Silikatlösung entnommen.

Probennahmestelle „04.2“: gleiche Hangposition wie 04A-D, ca. 300 m von 04A-D entfernt

Probennahmestellen „05, 05.1, 05.2“: Messstellen in gleicher Hangposition am Mittelhang, gleiche Tiefenkomponenten: sehr oberflächennaher Abfluss.

Probennahmestellen „22, 23, 24“: Unterhangbereich, ca. 10 cm mächtige Decklage auf stark verdichteter Basislage (Lagerungsdichte 4, Bodenart: toniger Lehm, bis ca. 1,80 m aufgeschlossen, bildet steilwandige Böschungen), Wasseraustritt an der Schichtgrenze, Abb. 3.3 zeigt die Probennahmestelle „23“, an der auch Substrat für den Laborversuch entnommen wurde. Die Stelle „23“ war auch eine der vier Ereignis-Probennahmestellen.

Probennahmestellen „A03-05“: Am Hangfuß sind Schuttkegel zu beobachten, an deren Füßen stark schüttende Quellen zu finden sind (Abb. 3.6). Diese entwässern den ganzen darüberliegenden Hang, fließen zu einem kleinen Gerinne zusammen in den St.Wilhelmer Talbach, der als „A02“ zum Vergleich jeweils mitbeprobt wurde. Offensichtlich bestehen die Schuttkegel aus einem sehr viel durchlässigeren Substrat als das Alluvium, so dass das zuvor unterirdisch in den Schuttdecken fließende Hangwasser zum Austritt gezwungen wird. Um zu überprüfen, ob ein Teil des Wassers unterirdisch direkt durch das holozäne Bachsediment in den Vorfluter gelangt, ohne zuvor in einem Gerinne geflossen zu sein, wurde im Abstand von

ca. 5 m zum St. Wilhelmer Talbach eine Bohrung in die Aue abgeteuft, mit einem Filterrohr versehen und regelmäßig mitbeprobt: „A01“.

Probennahmestellen „HüB, HüB.1, SchB, SchB.1“: Hüttenwasenbach und Schwarzenbach jeweils am Hangfuß (HüB, SchB) und am Oberhang (HüB.1, SchB.1) zum Vergleich beprobt.



Abb. 3.3: Probennahmestelle “23

Probennahmestellen am NNO-exponierten Hang zwischen Napf und Schmaleckgipfel (02A, 02A.1, 02B, 03A-C, NB, 06, 06.1, 06.2, 07A, 07B, 09A, 09B, B02, 11A, 11B, 12A, 12B, 13): Im Gegensatz zum gegenüberliegenden Hang gibt es hier keinen klar abzugrenzenden Hochlagenbereich und dementsprechend auch keine Hochlagenquellen. Der ganze Hang macht insgesamt einen sehr trockenen Eindruck, lediglich im Übergang vom Oberhang- zum Mittelhangbereich gibt es durch eine Verebnung mehrere Wasseraustritte zu beobachten (12, 13), die jedoch nach wenigen Metern wieder versickern. Auch z.T. tiefgründige Weganschnitte bis >2m reichen nicht aus, die wasserführende Schicht anzuschneiden. Erst am Hangfuß wird der gesamte Hang durch die rapide abnehmende Hangneigung zum St. Wilhelmer Talbach hin in zahlreichen Kleinquellen entwässert (02, 03, 06, 07, 09). Die Beobachtungen deuten darauf hin, daß die Fließpfade an diesem Hang insgesamt tiefer liegen als am Gegenhang. Eine direkte Hangabfolge ließ sich aus diesem Grund auch lediglich für die Probennahmestellen 12, 13 im Oberhangbereich und direkt darunter im Hangfußbereich an den Stellen 02, 03 aufstellen, ansonsten war es erst kurz

oberhalb des Talbachs an den jeweiligen Hangfüßen der Teilhänge möglich, den Abfluß in den zahlreichen Kleinquellen zu beproben.

Probennahmestellen „02A, 02A.1, 02B“: Am Hangfuß gegenüber der Napfmatte, Teil einer langgezogenen schmalen Sättigungsfläche infolge des großflächigen Wasseraustritts beim Übergang des Hanges in den Talgrund: Durch den Geländeknick wird das Wasser zum Austritt gezwungen. An der Stelle „02.1“ wurde zum Einen direkt am Weganschnitt beprobt („02A“), zum Anderen ca. 3 m hangaufwärts am Beginn der Wasseraustritte, um den möglichen Einfluß der kurzen Fließstrecke durch den wassergesättigten A_h -Horizont zu untersuchen („02A.1“).

Probennahmestellen „03A-C“: Nahe zusammenliegende Probennahmestellen gegenüber dem oberen Ende der Napfmatte, gleiche hydrologische Situation wie bei „02“, Wasser tritt vermeintlich in verschiedenen Tiefenkomponenten aus: A&C: tiefere Komponenten, B: eher oberflächennahe Komponente.

Probennahmestellen „NB“: „Napfbach“ zum Vergleich, zwischen den Probenahmestellen „02“ und „03“ münden mehrere kleinere Gerinne, deren Quellen ca. 50m oberhalb am Hang liegen.

Probennahmestellen „06, 06.1, 06.2“: Gleiche hydrologische Situation wie bei 02 und 03 (Hangfuß), auf kurzer Distanz mehrere relativ kräftig schüttende Wasseraustritte, „06.1“ ist als Brunnen gefasst.

Probennahmestellen „07A&B“: In direkter Nachbarschaft zu „06“: relativ kräftige und großflächige Schüttung einerseits ca. 20m oberhalb des Forstweges (Unterer Wittenbachweg), die zu einer typischen Quellmulde bzw. Sättigungsfläche führt (A); B: vermeintlich tiefere Komponente, die erst einige Meter unterhalb des Forstwegs austritt. „07A“ war eine der APEG-Positionen für die zeitlich hochaufgelöste Ereignisbeprobung.

Probennahmestellen „09A&B, B02“: Gleiche Situation, noch weiter hinten im Napfgebiet (Talschluss), Wasseraustritt sorgt für zahlreiche Quellen und ausgedehnte Sättigungsflächen, mit B02 ist der Oberlauf des St.Wilhelmer Talbachs bezeichnet, der hier zum Vergleich mitbeprobte wurde.

Probennahmestellen „11A&B“: Stark schüttende Quelle unterhalb eines sehr stark durch Blockschutt geprägten EZG im Talschluss des Napfgebietes ca. 50 m hangaufwärts der Stelle „09“: Die zuerst als unterschiedliche Tiefenkomponenten angesprochenen Probennahmestellen entpuppten sich nach genauerer Geländebegehung als Return Flow des zuvor versickerten Wassers.

Probennahmestellen „12A&B“: zwei Stellen, einmal im oberen Bereich, einmal unterhalb einer ausgedehnten Sättigungsfläche im Übergangsbereich von Oberhang zu Mittelhang direkt ca. 250 m Höhenmeter hangaufwärts der Stellen 02 und 03, das Wasser versickert nach einer sehr kurzen Fließstrecke von ca. 30 m vollständig wieder im Hangschutt und ist erst wieder im Hangfußbereich (02, 03) oberflächlich zu beobachten. Durch die Verdohlung des kleinen Gerinnes zum Schutz des Forstweges (Oberer Wittenbachweg) war es an dieser Stelle möglich, jeweils parallel zur Probenahme den Abfluss mit einer einfachen Gefäßmessung zu bestimmen. „12B“ war eine der APEG-Positionen für die zeitlich hochaufgelöste Ereignisbeprobung. Am Rand der Sättigungsfläche wurde eine Substratprobe aus dem A_h -Horizont für den Si-Lösungsversuch entnommen.

Probennahmestelle „13“: gleiche Hangposition wie bei „12“, sehr schwach aber konstant schüttende Feuchtfläche, kleinräumig verbreitetes stark toniges und dadurch stauendes Material führt hier zum Austritt des Hangwassers und zu einer kleinräumigen vegetationsfreien Hangrutschung, im angelegten Profil ist schon in 15 cm Tiefe eine Vergleyung anzeigende typische Graufärbung des Substrats zu beobachten, die auf dauerhaft wasserstauende Verhältnisse schließen lässt. Abb. 3.4 zeigt ein Profilfoto dieser Stelle.



Abb. 3.4: Vergleytes Bodenprofil an der Probennahmestelle „13“

Probenahmestellen rund um das Wittenbachkar (08, 14, 15, 16A, 16B, 17, 18, 19, B01, B01.1, B01.2)

Durch die Vereisung während Wurm und Riß entstanden an der nordostexponierten Talseite des St. Wilhelmer Talbachs die tiefeingeschnittenen und mehrtreppigen Katzensteig- und Wittenbach-Kare, die zu den größten und schönsten des Südschwarzwalds zählen. Typisch ist der Aufbau mit den übersteilten Seiten- und Rückwänden, die den verflachten Karboden umgeben. An diesen nordost-, ost- und nordwestexponierten Seitenwänden, sowie am Übergang zum Karboden wurden die Hangschutt-Kleinquellen an mehreren Stellen beprobt. Wiederum war ein prinzipieller Unterschied in den verschiedenen Teilhängen zu beobachten. Am NW-exponierten Hang zwischen Schmaleckgipfel und Karboden konnte im Oberhangbereich sehr oberflächennah fließendes Wasser an zahlreichen Stellen an Weganschnitten und Hangverflachungen beprobt werden, während im Unterhangbereich nur eine geeignete Probennahmestelle an einem Weganschnitt aufgefunden wurde. Am ost- bis nordostexponierten Gegenhang zwischen Wittenbach- und Katzensteigkar sind auch an sehr

tiefgründigen Weganschnitten keine Wasseraustritte zu beobachten, die Fließwege liegen offensichtlich recht tief. Lediglich wenige Quellmulden konnten beprobt werden..

Probennahmestelle „14“: An der NW-exponierten Kar-Seitenwand im oberen Hangbereich gelegen. Die unregelmäßige Schüttung mit regelmäßigem Trockenfallen, sowie Geländebeobachtungen weisen diese Kleinquelle als typischen Blockschuttabfluß aus, das Wasser fließt sehr oberflächennah, während einer Begehung im EZG konnte im Blockschutt abfließendes Wasser gehört werden, nach dem Austritt am Weganschnitt versickert das beprobte Wasser unterhalb des Wegs sehr schnell und kann erst wieder am Hangfuß im Übergang zum Karboden (08) oberflächlich beobachtet werden.

Probennahmestelle „08“: Probenahmestelle in direkter Hangabfolge ca. 100 m unterhalb der Stelle „14“, in der Nähe der Wittenbacher Höfe, direkt am Übergang von übersteilter Kar-Seitenwand zu verflachtem Karboden, das EZG umfasst offensichtlich den gesamten Teilhang bis zum Schmaleckgipfel, die Schüttung war im Gegensatz zu 14 recht konstant

Probennahmestellen „15, 16A&B, 17“: Befinden sich unterhalb des Sattels zwischen Schmaleck und Stübenwasen an einem NNW-exponierten Teilhang mit sehr großer Neigung, der Abfluss ist in diesem Bereich generell sehr oberflächennah und immer wieder an Weganschnitten beprobbar . „16A“ erschien aufgrund der stärkeren Schüttung und der tieferen Austrittsstelle des Wassers im Profil eine tiefere Abflusskomponente zu repräsentieren als die nur wenige Meter entfernte Stelle „16B“, an der sehr oberflächennaher Wasseraustritt zu beobachten ist. Ebenso ist bei „15“ sehr oberflächennaher Abfluss mit starken Schwankungen zu beobachten, während der Abfluss bei „17“ wesentlich konstanter und vermeintlich tiefer ist.

Probennahmestellen „B01, B01.1, B01.2“: Gerinne in der Nähe der Probennahmestellen zum Vergleich und um auszuschließen, dass zuvor versickertes Bachwasser beprobt wird, „B01“ entsteht aus dem Zusammenfluss von „B01.1“ (Nähe „15“, Schüttung ca. 1 l/s) und „B01.2“ (Nähe „16A“, Schüttung ca.3l/s)

Probennahmestellen „18, 19, 20“: Probennahmestellen am ost-nordost-exponierten Kar-Seitenhang, dieser Hang ist oberflächlich insgesamt viel trockener, die Abflüsse scheinen in größerer Tiefe abzufließen. Beprobte werden konnten zwei unterschiedlich große Quellmulden am Forstweg Richtung Stübenwasenhütte: „18“: kleinflächige (ca. 5 m²) Quellmulde, geringe, aber konstante Schüttung von im Mittel ca. 0,01 l/s, Bewuchs v.a. mit Chrysosplenium oppositifolium, „19“: großflächige Quellmulde (ca. 100 m²) mit starker, konstanter Schüttung von ca.0,5 l/s, Bewuchs: Bärlauch, Alpenmilchlattich, Alpendost, „20“: Quellaustritt unterhalb einer größeren Felsnase an der Straße Richtung Katzensteig, hier konnte vermeintlich aus dem Festgestein austretendes Kluftwasser beprobt werden, Schüttung relativ konstant im Mittel ca. 0,1 l/s, im durchnässten Bereich unterhalb der Felsnase stark humoser, anmooriger Oberboden.

Probennahmestelle „21, B03“: Schon zum Einzugsgebiet des Katzensteigbaches gehörende Messstellen an der NW-exponierten Kar-Seitenwand unterhalb des Brenntenfelsen. „21“: oberflächennahe Abflusskomponente aus der „Deckschicht“, geringe, aber konstante Schüttung (ca. 0,1 l/s), „B03“: kleines Hanggerinne (ca. 3 l/s) in der Nähe und zum Vergleich der Stelle 21.

Abb. 3.5: Blick auf das Wittenbachkar

Abb. 3.6: Schuttkegel am Hangfuß des „Tote Mann–Hangs“

Abb. 3.7: Aufschluss von Decklage auf Hauptlage am „Schmaleckhang“

Abb. 3.8: Probennahmestelle“06.2“

Probenahmestellen rund um den Zängerlehof (01, Zä, Zä_alt, Zä_A, Zä_B, Zä_C, Zä_unt)

Zum Vergleich der im Napfgebiet gemessenen hydrochemischen Kennwerte wurde im vorderen St.Wilhelmer Tal rund um den Zängerlehof an sieben verschiedenen Stellen der Hangfüße von NNO-exponiertem Hang, sowie gegenüber dem Zängerlehof am SSW-exponierten Hang beprobt. Im Rahmen des DFG-Projektes fanden hier bereits mehrere Quelluntersuchungen an beiden Hangfüßen statt. Die sog. „Zängerlehof II“ - Quelle wird schon seit Jahren intensiv untersucht und wurde im Rahmen einer Untersuchung gefasst und mit einer kontinuierlichen Schüttungsmessung ausgestattet (DIDSZUN 2000).

Probenahmestelle „01“ NNO-exponierter Hang, nahe Zängerlehof, durch extrem starke Subrosion entstandenes Erdloch im Schuttkegel mit insgesamt ca. 2,5 m Tiefe. Hier bestand die Möglichkeit, direkt perkolierendes Bodenwasser nach ca. 2 m Bodenpassage zu beproben. In der unmittelbaren Umgebung des Subrosionsloches befindet sich eine Viehweide, die auch im Untersuchungsjahr ab Mitte Juni beweidet wurde. Das Loch entstand bei Mäharbeiten durch das unfallartige Einstürzen des Zängerlehofbauers mitsamt Traktor. Die Schüttung (Auffangen von Tropfen) schwankte stark zwischen ca. 0,002 l/s und 0,0001 l/s.

Probenahmestelle „Zä“: „Zängerlehof II“-Quelle, wurde durch DIDSZUN (2000) gefasst und mit einer Möglichkeit zur Schüttungsmessung ausgestattet, um eine typische Hangschuttquelle mit „periglazialen Hangschutt mit Deckfolge“ im Quell-EZG (RUTENBERG 1998) im Vergleich zu einer Quelle mit periglazialen Deckschichten im Quell-EZG zu untersuchen

Probenahmestelle „Zä_alt“: Durch SCHWEGLER (1995) untersuchte Quelle am Hangfuß des SSW-exponierten Hanges, wurde von ihm als typische Hangschutt-Quelle klassifiziert.

Probenahmestellen „Zä_A, Zä_B, Zä_C, Zä_unt“: Neben der Zängerlehof-Quelle (Zä_alt) entspringen in kleinem Abstand mehrere kleine Quellen in unterschiedlicher Höhenlage, die den Hang entwässern. Die unterschiedlichen Positionen am Hang ließen vermuten, dass hier unterschiedliche Tiefenkomponenten des Deckschichtenabflusses vorliegen könnten.

Probennahmen im St.Wilhelmer Talbach, Erlenbach und Katzensteigbach (LA, AL, KSB)

Zum Vergleich der Messungen mit den im Vorfluter gemessenen Werten, sowie zur Ankopplung der Arbeit an die gleichzeitig stattfindenden Untersuchungen von DIDSZUN, wurden an jedem Probenahmestichtag auch der St. Wilhelmer Talbach auf Höhe des „Lagerplatzes“ (LA) und die kurz oberhalb einmündenden Seitengerinne Erlenbach (AL, Messstelle Albrechtenhof) und Katzensteigbach (KSB) mitbeprobt.

3.2.3 Probenentnahme

Die Probenentnahme gestaltete sich relativ einfach. Bei den Vorbegehungen wurde die jeweilige Stelle meist etwas mit dem Spaten abgegraben, so dass sich das Wasser bündelte und die direkte Probenahmestelle freispülte. Bei den Stichtagsbeprobungen wurde ein Kunststofftrichter verwendet, um das Probenwasser noch weiter zu bündeln. Nach einer Freispülzeit wurde die Probe in eine 150 ml-Polyethylenflasche gefüllt.

3.3 Ereignisbeprobung

Im Rahmen der dreimonatigen Routinebeprobung variierte der Gebietszustand zwar erheblich, letztendlich wurde aber nur jeweils Basisabfluss beprobt. Um die zeitliche Varianz und die Reaktion der Abflusskomponente aus dem Deckschutt auf Niederschlagsereignisse besser auflösen zu können, wurde Anfang August mit automatischen Probeentnahmegeräten (APEG) ein typisches Sommergewitter beprobt. Um den Probenumfang nicht allzu groß werden zu lassen, wurde die Ereignisbeprobung auf drei Hangschutt-Kleinquellen aus der Routinebeprobung beschränkt. Zusätzlich wurde gleichzeitig zum Vergleich der St. Wilhelmer Talbach beprobt. Die Entnahmegeräte können insgesamt 42 Proben automatisch über eine Zeitschaltuhr gesteuert entnehmen. Die Entnahme wurde so eingestellt, dass alle zwei Stunden eine 150 ml - Polyethylenflasche mit Probenwasser abgefüllt wurde. Glasflaschen durften nicht benützt werden, da sich aus ihnen Silikat lösen kann, das die Analysenergebnisse verfälscht (SIEDER 2000).

Um möglichst repräsentative Ergebnisse zu erhalten, wurden die drei Ereignisbeprobungen an den zwei unterschiedlich exponierten Hängen südlich und nördlich der Napfmatte durchgeführt. Per APEG wurden dabei jeweils eine Stelle am Hangfuß (Benennung aus der Routinebeprobung: „23“ bzw. „07A“), sowie eine Stelle im Oberhang des NNO-exponierten Hanges („12B“) beprobt. Der St. Wilhelmer Talbach wurde kurz vor der Einmündung des Schwarzenbachs beprobt. Diese Stelle wurde ausgewählt, da hier die hangaufwärts positionierten Kleinquellen mit erfasst werden konnten.

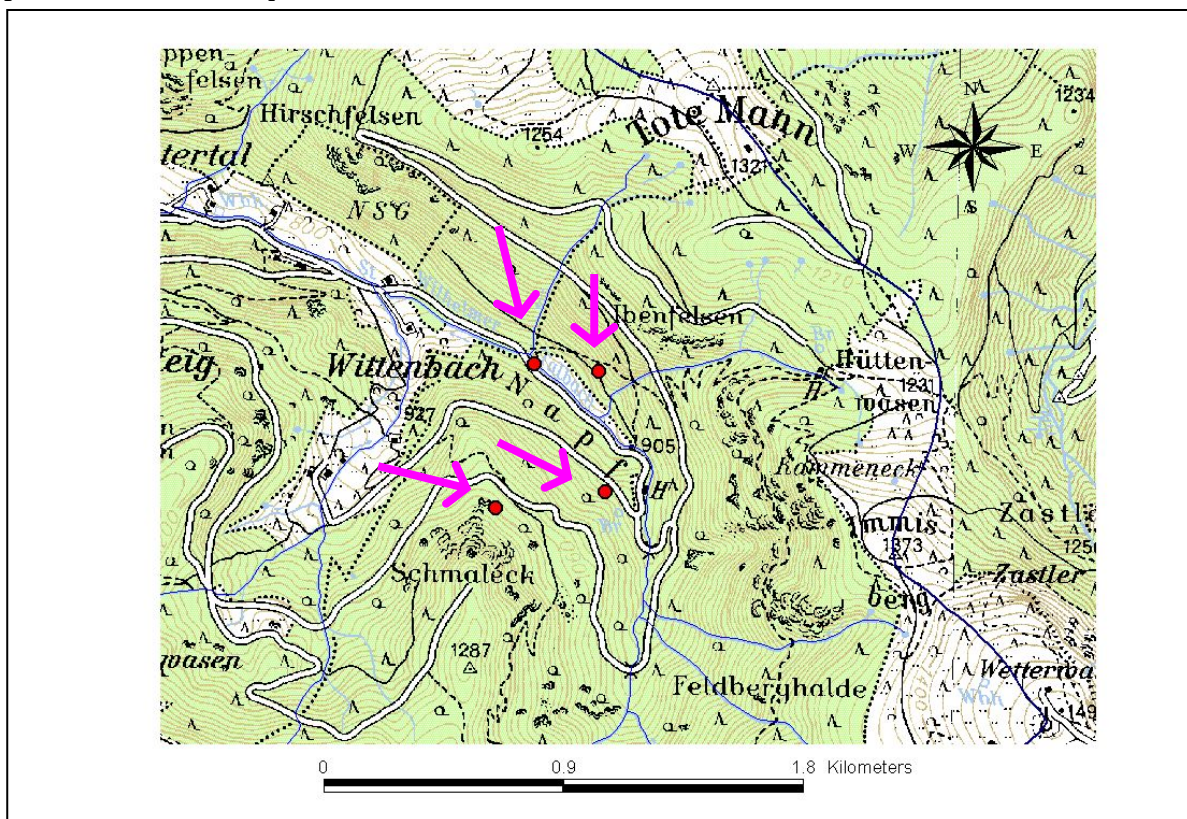


Abb. 3.5: Positionen der Automatischen Probenentnahmegeräte (APEG)

3.4 Labormethoden

Sämtliche Wasseranalysen wurden im Hydrochemie-Labor des Institut für Hydrologie in Freiburg vom Bearbeiter selbst durchgeführt. Die Proben konnten jeweils bis zur Messung der Anionen im Kühlschrank aufbewahrt werden, danach wurden die Proben im Dunkeln bei Zimmertemperatur gelagert und so bald als möglich analysiert, so dass maximal ca. sechs Wochen zwischen Probennahme und Abschluss der Analysen lagen.

3.4.1 Hauptionen

Die Anionen (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) und Kationen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) wurden mit der Methode der Ionenaustauschchromatographie mit dem Chromatographen „DIONEX DX 500“ mittels Leitfähigkeitsdetektion bestimmt. Zur Verwendung kamen dabei für die Kationen die CS12A(4*250mm)(10-32) – Säule mit Vorsäule und selbstregenerierendem Mikromembran-suppressor-System CSRS_ULTRA 4mm, sowie 0,011molare H_2SO_4 als Elutionsmittel und für die Anionen die AS4A-SC(4mm)(10-32) – Säule mit Vorsäule und selbstregenerierendem Mikromembransuppressor-System ASRS_ULTRA 4mm, sowie ein Natriumcarbonat / Natriumhydrogencarbonat - Gemisch als Elutionsmittel.

Zur Messung der Ionen wurden jeweils 5ml Probenwasser abgefüllt und durch ein $40\mu\text{m}$ -Filter gepresst. Die Probe durchläuft gemeinsam mit dem Elutionsmittel die Trennsäule, in der die Ionen der Adsorption unterliegen. Aufgrund unterschiedlicher Verweilzeiten verlassen sie die Säule getrennt voneinander und können mittels Leitfähigkeitsmessung quantitativ bestimmt werden. Dazu werden kontinuierlich Leitfähigkeits-Chromatogramme digital aufgezeichnet, in denen sich für jedes Ion ein „Peak“ über die Grundleitfähigkeit des Elutionsmittels erhebt. Die Berechnung der gemessenen Konzentrationen erfolgt anschließend mit dem Programm „PeakNet“, das die einzelnen Peaks über die Zeit integriert. Das Gerät wurde vor jedem Messdurchgang (ca. 100 Proben) neu kalibriert, wobei für die Kationen 10 Standards im Bereich von 2 bis 20mg/l und für die Anionen 13 Standards im Bereich von 0,5 bis 20 mg/l verwendet wurden. Generell wiesen die Eichkurven gute Anpassungen an die Standards auf ($R^2 \geq 0,996652$). Zur Überprüfung der Messgenauigkeit wurden jeweils verschiedene Standards mit den Proben zusammen gemessen. Die daraus ermittelten Fehlerbereiche sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

Tab. 3.1: Absolute und prozentuale Messfehler bei der Bestimmung der Hauptionen

Anionen (n=33)	Chlorid	Nitrat	Sulfat	
Max. absolute Abw. [mg/l]	-0,22 bzw. +0,61	-0,07 bzw. +0,23	-0,15 bzw. +0,33	
Mittelw. [mg/l]	0,00	0,00	0,00	
Stdabw. [mg/l]	0,16	0,06	0,09	
Mittlere Proz. Abw. [%]	5,79	2,21	2,90	

Kationen (n=88)	Natrium	Kalium	Magnesium	Calcium
Max. absolute Abw. [mg/l]	-0,72 bzw. +0,64	-0,83 bzw. 0,50	-1,16 bzw. +0,55	-1,03 bzw. +0,58
Mittelw. [mg/l]	0,01	-0,05	-0,11	-0,09
Stdabw. [mg/l]	0,22	0,25	0,28	0,28
Mittlere Proz. Abw. [%]	3,59	5,39	2,94	4,34

3.4.2 Silikat

Die Analyse von Silikat erfolgte über die Molybdänblau-Methode mit einem Photometer der Firma Spectronic-Unicam, Modell Aqua Mate. Gemessen wird dabei die Extinktion bei 820nm durch die blaugefärbte Probenlösung, welche proportional zur Silikat-Konzentration ist. Durch die Reaktion von Silikat mit Ammoniumheptamolybdat entsteht zunächst ein gelbgefärbter Molybdato-Kieselsäure-Komplex. Nach Reduktion mit PhotoRex bilden sich die Molybdänblau-Komplexe. Phosphationen bilden bei dieser Reaktion ebenfalls Molybdänblau-Komplexe und wurden daher durch Zugabe von Oxalsäure maskiert.

Jeweils 12,5ml Probenlösung wurden mit dem gleichen Volumen dest. Wasser verdünnt, um den begrenzten Messbereich bis 8mg/l nicht zu überschreiten. Die Genauigkeit der Messungen hängt stark davon ab, ob die Reaktionszeiten zwischen der Zugabe der einzelnen Reagenzien genau eingehalten werden. Um die Messgenauigkeit zu überprüfen, wurden bei jedem Messdurchgang (10 Proben) Standards mitgemessen. Der ermittelte Fehlerbereich wird in Tabelle 3 dargestellt.

Tab. 3.2: Absolute und prozentuale Fehlerbetrachtung der Silikatmessung (n=162)

Max. abs. Abw. [mg/l]	Mittelw. [mg/l]	Stdabw. [mg/l]	mittlere Proz. Abw. [%]
-0,06 bzw. +0,25	0,08	0,06	2,99

Die Kalibrierung des Photometers erfolgte mit sieben Standards im Bereich von 1 bis 7mg/l. Die quadratische Kurvenanpassung ($0,003924x^2 + 0,3554x + 0,003886$) ergab ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,9999$. Diese Eichkurve wurde während des gesamten Messzeitraums beibehalten.

3.5 Lösungsversuch

Um verbesserte Aussagen über die Aussagekraft von Silikat als herkunftsraumorientierten Tracer und allgemein zum Lösungsverhalten von Silikat machen zu können, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit ein Experiment zur Wechselwirkung von Wasser mit Material aus oberflächennahen Lockergesteins- bzw. Bodenschichten durchgeführt.

Die Versuchsanordnung bestand aus einem einfachen „Batch-Reaktor“- (bzw. Steh-Versuch-, Lösungs-Versuch-) System, um die Zunahme der Silikatkonzentration mit der Zeit zu verfolgen. Im Untersuchungsgebiet wurde an verschiedenen Hängen unterschiedliche Materialien mit Pickel & Spaten aus den Schuttdecken und Böden entnommen. Anschließend wurden die Substrate bei 50 °C 55 Stunden getrocknet, nachdem zuvor Korngrößen > 3 cm Kantenlänge aussortiert wurden. Ansonsten fand keine Sortierung des Materials statt.

Mit den verschiedenen Substraten wurde ein mehrwöchiger Lösungs- (Laugungs-) Versuch angesetzt. Dazu wurden jeweils 150 g Substrat mit 750 ml deionisiertes Wasser (bzw. Niederschlagswasser) in einer 1 l - Polyethylenflasche angesetzt (siehe Abb. 3.10) und kontinuierlich geschüttelt (nach jeder Probenahme, spätestens alle 48 h). Insgesamt wurden acht verschiedene Substrate miteinander verglichen, die in Tab. 3.5 näher beschrieben sind. Die Korngrößen wurden mit der Fingerprobe nach der bodenkundlichen Kartieranleitung bestimmt. Die Benennung der Entnahmestellen erfolgte nach den Probenahmestellen der Routinebeprobung. Bei vier Substraten („01“, „04“, „13“, „23“) wurde je dreimal bei Zimmertemperatur und mit deionisiertem Wasser angesetzt, je einmal wurde mit Niederschlagswasser und Zimmertemperatur bzw. deion. Wasser und im Kühlschrank (4°C) angesetzt. Die restlichen vier Substrate („05“, „12“, „16“, „18“) wurden je zweimal mit deion. Wasser und bei Zimmertemperatur angesetzt, so dass insgesamt 28 Polyethylenflaschen befüllt wurden. Nach Start des Experiments am 3.Sep. 2001 wurde in unterschiedlichen Zeitabständen aus jedem Gefäß 12,5 ml Probenwasser zur Silikatanalyse entnommen und anschließend durch das gleiche Volumen deion. Wassers ersetzt, um so das Volumen der Kontaktflüssigkeit während des Versuchs nicht zu verändern. Im Anschluss an jede Probenahme, spätestens aber nach 48 h wurde das Wasser-Substrat-Gemisch kurz und kräftig geschüttelt.

Das Niederschlagswasser wurde in gleicher Weise wie die Routine - Proben analysiert. Die Ergebnisse finden sich in Tab. 3.4. Die Proben wurden direkt jeweils im Anschluss an die Entnahme gemessen. Ein Vergleich zwischen gefiltertem und ungefiltertem Probenwasser ergab keine signifikanten Unterschiede in der Analyse, so dass auf eine weitere Filterung der Proben verzichtet wurde.

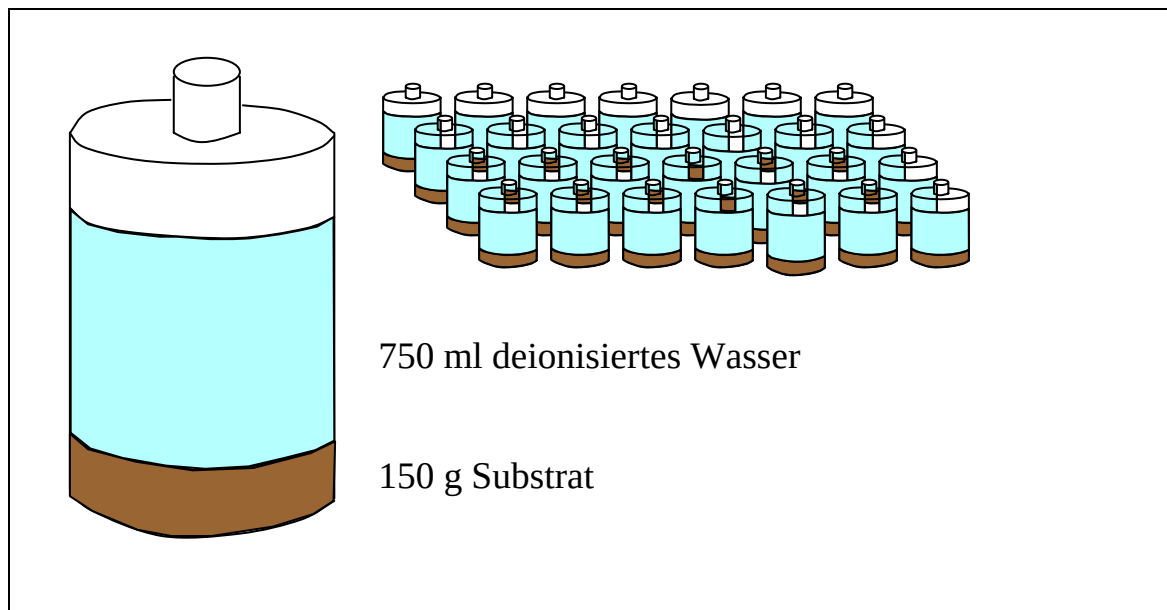


Abb. 3.10: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung

Tab. 3.4: Chemismus des verwendeten Niederschlagwassers (Angaben in [mg/l])

Silikat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Natrium	Kalium	Magnesium	Calcium	pH
0,01	0,30	1,97	1,57	0,13	0	0,15	1,08	5,6

Tab. 3.5: Beschreibung der Substrate, die für den Si-Lösungsversuch verwendet wurden

Substrat	Beschreibung von Substrat und Entnahmeposition
01	Hangschuttmaterial, entnommen aus einem Schuttkegel am Hangfuß des NNO-exponierten Hanges oberhalb des Zängerlehof, durch extreme Subrosion kam es hier zum Einsturz des Oberbodens, so dass ein ca. 2,5 m tiefes Loch entstand, aus dem die Probe in ca. 2 m Tiefe entnommen wurde: ungeschichteter, holozäner Hangschutt Substrat: Skelettanteil ca. 40%, einzelne Blöcke bis >1m Durchmesser, Feinmaterial: stark lehmiger Sand, Lagerungsdichte: 4 (hoch)
04	Entnahme: Weganschnitt oberhalb des Ibenfelsen, Hauptlage, in ca. 1m Tiefe Substrat: Skelett: ca. 20%, ca. 5 – 10 cm Durchmesser, Feinmaterial: sandiger Lehm, Lagerungsdichte 2 (gering)
13	Entnahme: Oberhangbereich unterhalb Schmaleck, stark staunasser Bereich mit vergleytem Horizont ab 10 cm, in ca. 30 cm Tiefe Substrat: Skelett: ca. 10%, auffallend geringer Durchmesser von ca. 1-2cm, Feinmaterial: toniger Lehm, Lagerungsdichte 2 (gering)

23	Entnahme: Weganschnitt unterhalb des Ibenfelsens, Basislage, Substrat: Skelett: ca. 30%, ca. 5 – 10cm Durchmesser, Feinmaterial: sandiger Lehm, Lagerungsdichte 5 (sehr hoch)
16	Entnahme: Hauptlage, Weganschnitt unterhalb Schmaleckgipfel, 1,5m Entnahmetiefe, Substrat: Skelett: ca. 30%, ca. 5-10cm Durchmesser, Feinmaterial: tonig-sandiger Lehm, Lagerungsdichte 3 (mittel)
18	Entnahme: Weganschnitt zwischen Schmaleck und Stübenwasenhütte, Hauptlage, 1,5m Entnahmetiefe Substrat: Skelett: ca. 40%, ca. 5-15cm und vereinzelte größere Blöcke, Feinmaterial: lehmiger Sand, Lagerungsdichte 2 (gering)
05	Entnahme: oberhalb Ibenfelsens, Bodenaufgabe (0-2cm Entnahmetiefe) Substrat: auffällig gutschortiertes Skelett, kaum kantengerundet, 1-2cm Durchmesser, ohne Feinmaterial, Lagerungsdichte 1 (sehr gering)
12	Entnahme: Oberhangbereich unterhalb Schmaleck, 10cm Entnahmetiefe, aus dem tiefgründigen A _h -Horizont, kein Skelett, Lagerungsdichte 1 (sehr gering)

3.6 Multivariate Clusteranalyse

Zur Ermittlung von Gruppen, bzw. Wassertypen in einem mehrdimensionalen Datensatz kann das Verfahren der Clusteranalyse verwendet werden (HÖLTING 1996). Durch dieses multivariate statistische Verfahren werden im mehrdimensionalen System der hydrochemischen Parameter die Wasseranalysen sortiert und zu Gruppen zusammengefasst. Die Wasseranalysen einer Gruppe sollen sich dabei möglichst ähnlich sein, während zwischen den Gruppen möglichst geringe Ähnlichkeit bestehen soll. Charakteristisch für die Clusteranalyse ist die gleichzeitige Heranziehung aller eingegebenen Parameter zur Gruppenbildung. Der Bearbeiter muss überprüfen, ob die Gruppen interpretierbar sind bzw. welche hydrochemischen Zusammenhänge bestehen.

Für diese Arbeit wurde die sog. hierarchische Clusteranalyse durchgeführt, um die hydrochemische Ähnlichkeit der einzelnen Probennahmestellen zu untersuchen (Q-Technik). Interessant war v.a. herauszufinden, ob die Gruppen bestimmte Hangpositionen, Deckschichtentypen o.ä. wiedergeben. Der benutzte Algorithmus beginnt mit jeder Probenahmestelle als einzelнем Cluster. Nun werden jene beiden Cluster ausgewählt, die die größte Übereinstimmung erkennen lassen und zu einem neuen Cluster zusammengefasst. Dadurch verringert sich die Anzahl der bisherigen Cluster um 1. Nun werden nach dem vorgegebenen Algorithmus die Ähnlichkeitskoeffizienten der neuen und der übrigen Gruppen berechnet und dann in der Ähnlichkeitsmatrix eingesetzt. Aus ihr werden wieder je zwei Cluster mit der größten Ähnlichkeit ausgewählt und zu einem neuen Cluster vereinigt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis sich Schritt für Schritt die Gruppenzahl auf einen übergeordneten Cluster reduziert hat, in dem alle Elemente enthalten sind. Das Ergebnis wird mittels eines Dendrogramms dargestellt, dem Bearbeiter bleibt die Bestimmung des Ähnlichkeits- bzw. Distanzniveaus überlassen, bei dem sich die sinnvollste Gruppenaufteilung ergibt. (HÖTZL 1982).

Die clusteranalytische Auswertung erfolgte mit dem Programm *SPSS 10.0*. Zur Berechnung wurden die Daten standardisiert. Für die Kombination der Cluster wurde in einem ersten Durchlauf das Single-Linkage-Verfahren verwendet, um einzelne Ausreißer identifizieren und ausschließen zu können und dann das Ward-Verfahren zur eigentlichen Gruppenbildung benutzt, da es weder zur Bildung vieler gleich großer, noch zur Bildung einzelner großer und vieler kleiner Gruppen neigt (HÖTZL 1999).

4 Ergebnisse

Ausgehend von der Zielsetzung, die hydrochemische Signatur der oberflächennahen unterirdischen Abflusskomponenten in ihrer räumlichen und zeitlichen Variabilität, so umfassend wie möglich zu untersuchen und darüber hinaus die Aussagekraft dieser hydrochemischen Signatur zu überprüfen und zu präzisieren, wurde im Verlauf dieser Arbeit eine dreimonatige Routinebeprobung durchgeführt. Zusätzlich wurde die zeitliche Variabilität der Abflusskomponente mittels zeitlich hochaufgelöster Beprobung an ausgewählten Standorten untersucht. Anhand eines Lösungsexperiments im Labor wurde versucht, die Aussagekraft von Silikat als wichtigem hydrochemischem Wasserinhaltsstoff für Ganglinienseparationen zu überprüfen und zu präzisieren. Die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse dieser Untersuchungen findet sich im folgenden Kapitel.

4.1 Routinebeprobung

Für die dreimonatige Routinebeprobung von Mai bis August 2001 wurden insgesamt 69 verschiedene Probennahmestellen ausgewählt, die an 19 Stichtagen beprobt wurden. Anschließend fand eine Laboranalyse dieser Proben auf Silikat und die Hauptionen statt. Die so erhaltene recht große Datenmenge wird im Folgenden exemplarisch unter verschiedenen Aspekten dargestellt und jeweils interpretiert.

4.1.1 Witterungsverlauf und Abflussgeschehen

Sämtliche Klimadaten für den gesamten Untersuchungszeitraum konnten an der Klimastation Katzensteig im St. Wilhelmer Tal verfolgt werden. Die Station wird seit 1995 vom Institut für Hydrologie Freiburg betrieben und zeichnet kontinuierlich alle zehn Minuten Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung mittels Datalogger auf. Mit 765 m ü NN befindet sich die Station wesentlich niedriger als die meisten Probennahmestellen (ca. 850 m bis 1200 m, siehe auch Tabelle im Anhang), die gemessenen Daten können aber aufgrund der geringen räumlichen Distanz (ca. 500 m bis 3 km) zumindest qualitativ als sehr gut übertragbar angesehen werden.

Abflussmessungen an den beprobten Kleinquellen selbst vorzunehmen, hätte den Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Wichtiger war es, die hydrochemische Signatur der schnellen unterirdischen Abflusskomponenten möglichst umfassend aufzunehmen. Lediglich an einer Probennahmestelle („12“) war es möglich, den Abfluss mit einer einfachen „Eimermessung“ jeweils parallel zur Probennahme zu bestimmen. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.3 dargestellt. Ansonsten wurde auf den kontinuierlich gemessenen Abfluss des Hauptvorfluters Brugga zurückgegriffen, der die stark wechselnden Verhältnisse qualitativ sehr gut widerspiegelt.

Die dargestellten Abflussdaten wurden am Einzugsgebietsauslass der Brugga am Pegel in Oberried mittels eines ebenfalls vom Institut für Hydrologie betriebenen Radarpegels digital aufgezeichnet. Die verwendete P-Q-Beziehung konnte durch langjährige Messungen der LfU an diesem Pegel verifiziert werden. Auch am Gebietsauslass des St. Wilhelmer Talbachs betreibt die LfU einen Pegel. Diese Daten konnten jedoch leider nicht rechtzeitig zur Verfügung gestellt werden, allerdings reagieren Brugga und St. Wilhelmer Talbach sehr ähnlich auf Niederschlagsereignisse, so dass wiederum die Daten in qualitativer Hinsicht sehr gut verwendet werden konnten. Abb. 4.1 zeigt den engen Zusammenhang zwischen den Abflüssen der beiden Gewässer mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,91$, ermittelt mit den stündlichen Abflüssen der Periode 1995 bis 2000.

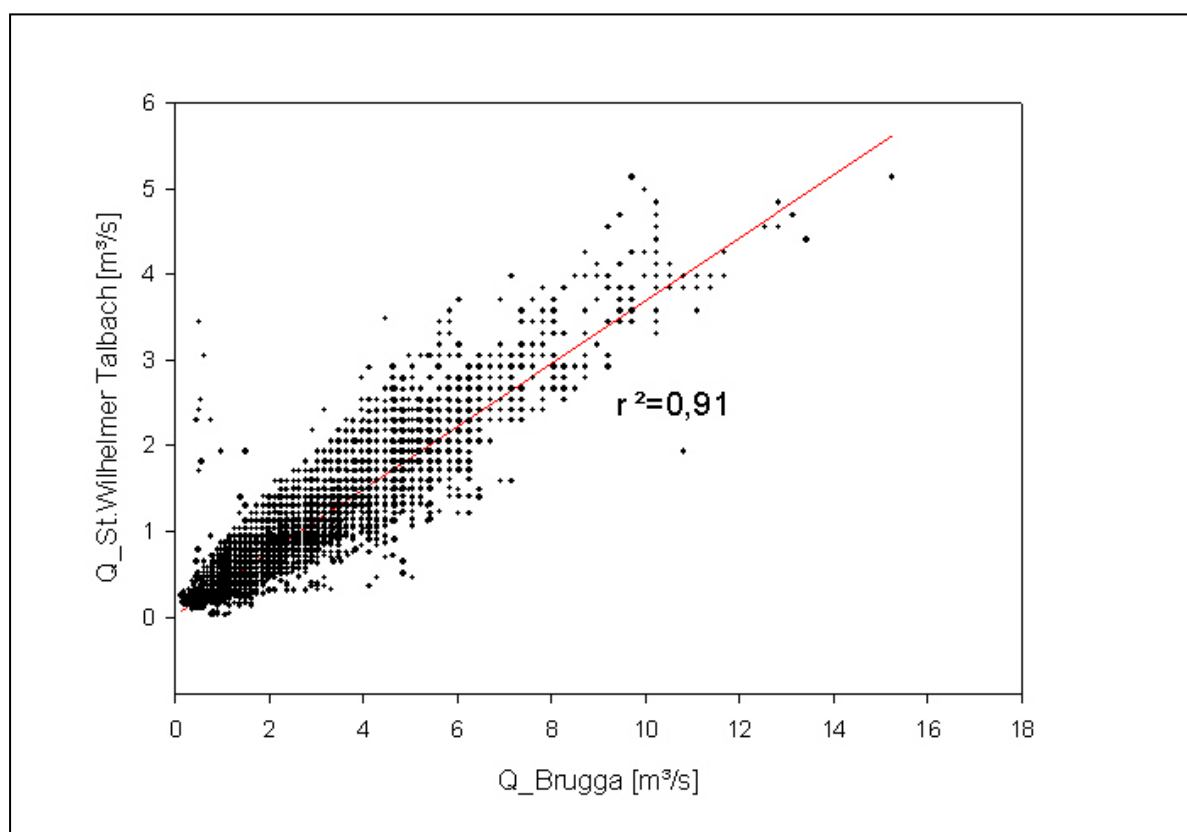


Abb. 4.1: Zusammenhang der Abflüsse von Brugga und St. Wilhelmer Talbach, basierend auf den stündlichen Abflusswerten von 1995 bis 2000

Der Verlauf von Niederschlag, Abfluss und Lufttemperatur im Untersuchungszeitraum ist in Abb. 4.2 dargestellt. Während des gesamten Zeitraumes fielen Niederschläge unterschiedlicher Intensität und Menge mit trockeneren Perioden Ende Mai, Mitte Juli und Anfang August. Auch in der Abflussganglinie und der Ganglinie der Lufttemperatur kommen deutlich die sehr nassen und kühlen Verhältnisse im Frühjahr und Frühsommer und der rasche Übergang zum sehr trockenen und warmen Sommer des Untersuchungsjahres zum Ausdruck. Nach insgesamt relativ trockenen und warmen Bedingungen Ende Mai kehrten sich die Verhältnisse für die Dauer fast des gesamten Juni noch einmal komplett um. Erst Anfang Juli

sank die Abflussganglinie der Brugga dauerhaft unter den langjährigen mittleren Abfluss (MQ). Deutlich wird die große Differenz der unterschiedlichen Abflussverhältnisse, die sich auch in der langjährigen Abflussganglinie zeigt und in der geringen Speicherfähigkeit des Einzugsgebiets begründet ist. Die Abflussverhältnisse wurden ebenso, in ihrer Wechselhaftigkeit noch verstärkt, in den untersuchten Kleinquellen aufgefunden.

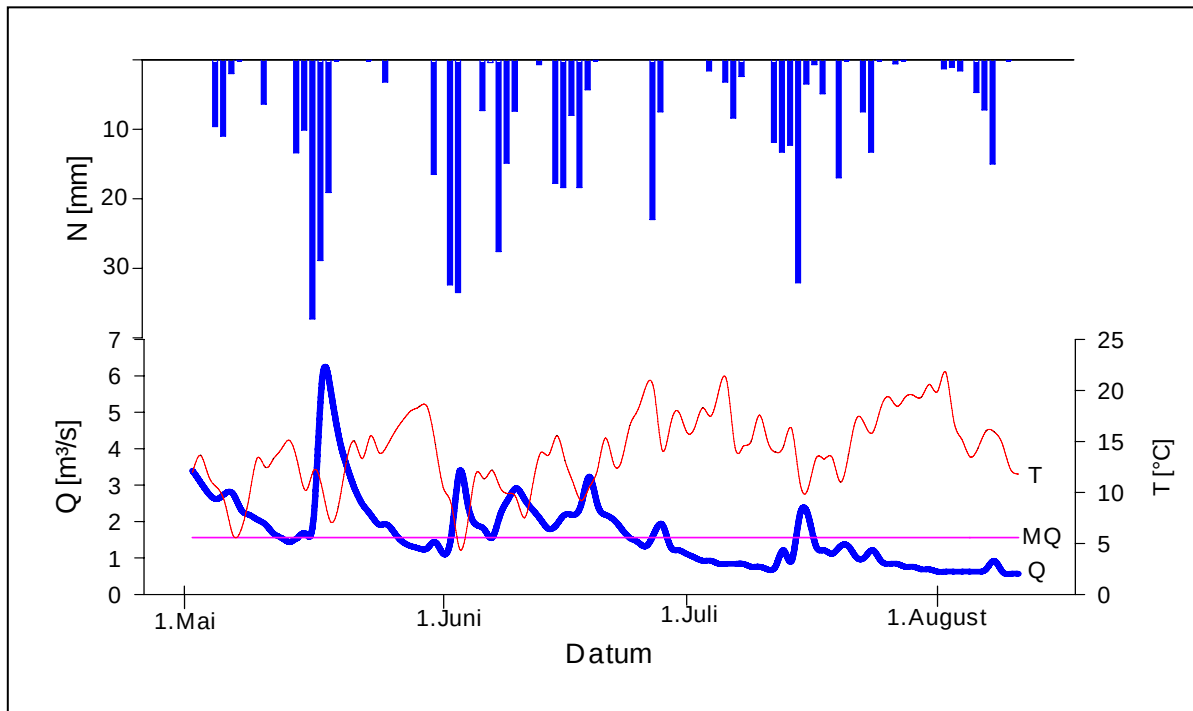


Abb. 4.2: Niederschlag und Abfluss im Untersuchungszeitraum, zusätzlich sind Lufttemperatur und langjähriger mittlerer Abfluss (MQ) eingezeichnet

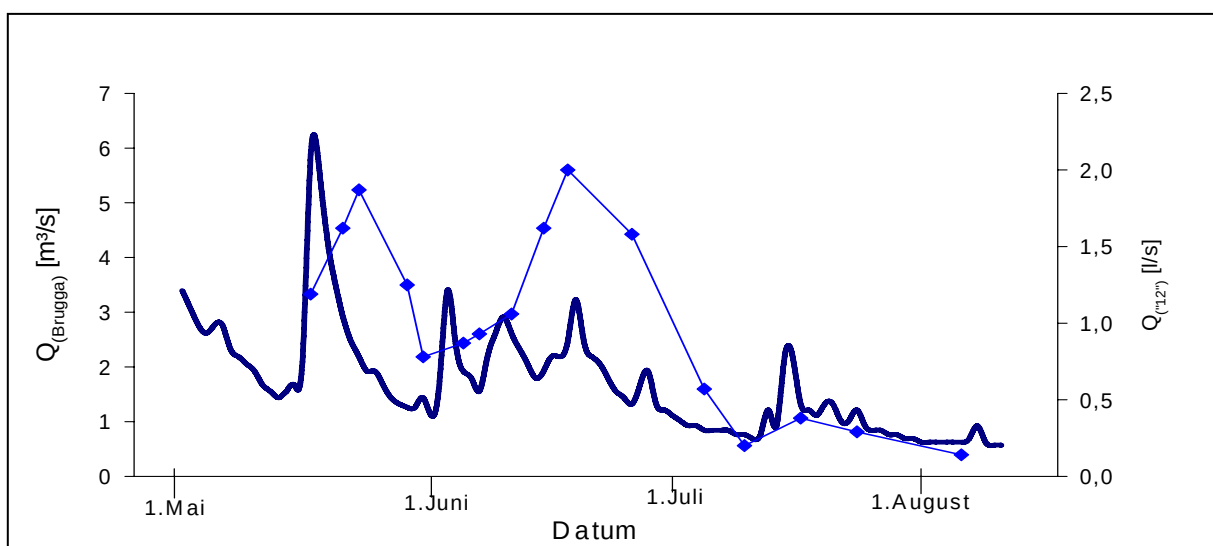


Abb. 4.3: Mittels einfacher „Gefäßmessung“ ermittelter Abfluss (in [l/s]) an der Probennahmestelle „12“ (Punktlinie) verglichen mit dem Abfluss der Brugga (in [m³/s])

4.1.2 Zeitreihen

Ein Teilziel dieser Untersuchung war, die zeitliche Variabilität der hydrochemischen Zusammensetzung der oberflächennahen unterirdischen Abflusskomponenten unter dem Einfluss wechselnder Feuchte- bzw. Abflussverhältnisse aufzulösen. Dazu wurde eine dreimonatige Routinebeprobung an 69 Probennahmestellen an jeweils insgesamt 19 Probetagen durchgeführt. Dabei wurde zunächst zweimal die Woche und später einmal die Woche an unterschiedlichen Wochentagen beprobt. Der Zeitraum dieser Routinebeprobung fiel dabei, aufgrund der langanhaltenden sehr feuchten Verhältnisse, länger aus als ursprünglich geplant, da v.a. der Übergang vom „nassen“ Frühjahr zum „trockenen“ Sommer interessant war.

Die erhaltenen Proben wurden anschließend im Labor des Instituts für Hydrologie in Freiburg auf Haptionen und Silikat analysiert und danach die Analysenergebnisse zusammen mit den Niederschlags- und Abflussdaten als Zeitreihen für jede Probennahmestelle aufgetragen, so dass die zeitliche Variabilität jedes einzelnen Inhaltsstoffs in Abhängigkeit der Feuchteverhältnisse direkt abgelesen werden kann. Durch diese Darstellungsweise konnten auch die einzelnen Parameter untereinander in Beziehung gesetzt und verglichen werden.

Ergebnisse

In den Abb. 4.4 und 4.5 werden exemplarisch für die 69 Probennahmestellen die erhaltenen Zeitreihen der Probennahmestellen „02A“ und „04B“ vergleichend vorgestellt. Die Probennahmestelle „02A“ befindet sich am Hangfuß des NNO-exponierten Hanges zwischen Napfmatte und Schmaleckgipfel auf 880 m Höhe. Dieser gesamte Hang wird durch einen Geländeknick am Übergang zur Talsohle in zahlreichen Kleinquellen, wie z.B. an der Stelle „02A“ entwässert. Das EZG der dort beprobten Abflüsse muss deshalb als schmal-bandartig, die ganze Hanglänge bis fast zum Schmaleckgipfel umfassend, angenommen werden. Die EZG-Größe wurde dementsprechend auf 3,4 ha geschätzt (siehe Anhang und 4.2). Die Schüttung schwankte zwischen ca. 0,01 und 0,001 l/s.

Auf den ersten Blick wird deutlich, dass die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe nicht sehr ausgeprägt auf die wechselnden Feuchteverhältnisse im EZG, d.h. auf die Zu- und Abnahme der Abflüsse reagieren. So kann während des Übergangs von den sehr nassen Verhältnissen bis Mitte Juni, zu den sehr trockenen Verhältnissen ab Mitte Juli nur eine sehr geringe Zunahme der Werte beobachtet werden. Dabei verhalten sich die einzelnen Inhaltsstoffe durchaus unterschiedlich: Während bei Calcium tatsächlich von einer signifikanten Zunahme zum Ende der Messperiode gesprochen werden kann, ist bei allen anderen Inhaltstoffen lediglich eine leicht zunehmende Tendenz zu beobachten.

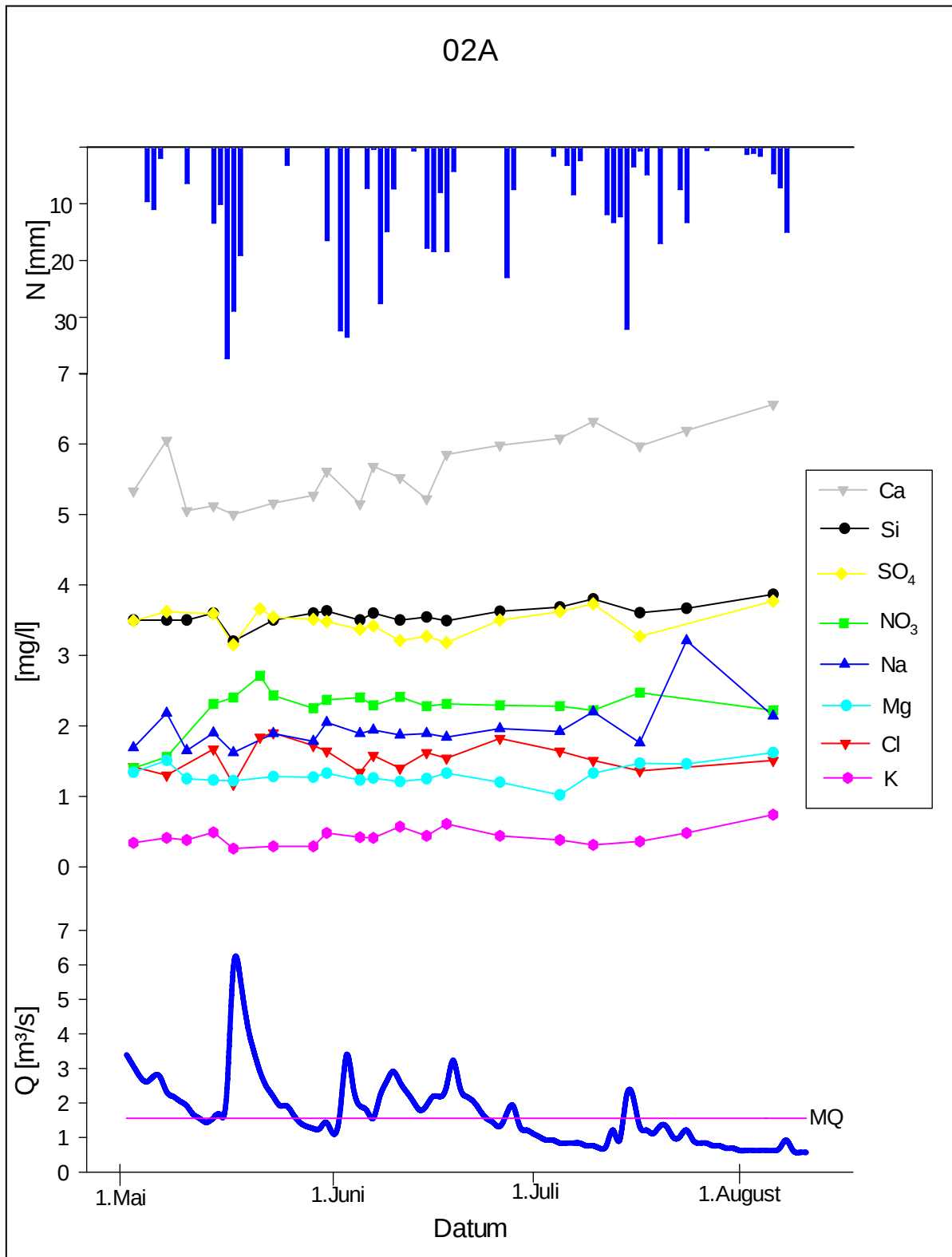


Abb. 4.4: Zeitreihen der Wasserinhaltsstoffe sowie von Niederschlag und Abfluss im Untersuchungszeitraum an der Probennahmestelle „02A“

Auch die Schwankungen der Konzentrationen sind generell sehr gering. Insgesamt zeigen v.a. die Ganglinien der Silikat-, Magnesium-, Kalium- und Sulfatkonzentrationen einen sehr ausgeglichenen Verlauf, während die Konzentrationen von Calcium, Nitrat, Chlorid und Natrium stärker schwanken. Interessant ist die Reaktion der Ca-, Na- und Cl-Konzentrationen, die am Anfang der Messperiode relativ stark schwanken, später aber eine gleichmäßigere Ganglinie aufweisen. Dabei ist bei der zweitletzten Probennahme ein stark „ausreißender“ Na-Wert auffällig. Die Ganglinie der Nitratkonzentrationen fällt insofern aus dem Rahmen, als dass sie am Anfang der Messperiode ansteigt, dann wieder leicht abnimmt und dann relativ konstant bleibt. Chlorid ist der einzige Inhaltsstoff, dessen Konzentrationen zum Ende des Untersuchungszeitraums eine leicht abnehmende Tendenz zeigen.

Beim Vergleich der einzelnen Parameter untereinander sind auch signifikante Unterschiede bezüglich der absoluten Höhe der gemessenen Konzentrationen zu beobachten. Die höchsten Konzentrationen wurden mit ca. 5 bis 6 mg/l bei Calcium gemessen. Silikat und Sulfat traten mit Werten zwischen 3 bis 3,5 mg/l auf. Mit sukzessive abnehmenden Konzentrationen von 2,5 bis 1 mg/l folgen dann Nitrat, Natrium, Magnesium und Chlorid, während Kalium mit extrem niedrigen Werten von ca. 0,2 bis 0,3 mg/l auffällt.

Im Gegensatz zur Probennahmestelle „02A“ befindet sich die andere dargestellte Probennahmestelle „04B“ am Oberhang des SSW-exponierten Hanges zwischen Napfmatte und Tote Mann-Gipfel auf 1180 m Höhe. An diesem Hang ist insgesamt viel oberflächennäherer Abfluss zu beobachten, der immer wieder an Weganschnitten und Felsdurchragungen zum Austritt gezwungen wird. Die EZG-Größe wurde auf 0,7 ha geschätzt, die Schüttung ist etwa doppelt so hoch wie bei „02A“.

Auch hier fällt auf, dass die Ganglinien der gemessenen Konzentrationen kaum auf die Feuchteverhältnisse im EZG reagieren. Wiederum ist lediglich eine leicht zunehmende Tendenz zum Ende der Messperiode hin zu beobachten. Die Ganglinien zeigen auch bei dieser Messstelle einen sehr ausgeglichenen Verlauf, wobei wieder auffällt, dass Schwankungen am Anfang der Messperiode stärker ausgeprägt sind als gegen Ende. Die Ganglinie der Nitratkonzentrationen verhält sich grundsätzlich anders als alle anderen gemessenen Inhaltsstoffe. Die Konzentrationen nehmen über den gesamten Untersuchungszeitraum ab, wobei ab Ende Juni eine „Abnahme der Abnahme“ beobachtet werden konnte.

Die Höhen der Konzentrationen sind auch bei dieser Probennahmestelle sehr unterschiedlich, wenn auch nicht in gleicher Weise wie bei „02A“. Calcium und Sulfat schwanken in einem Bereich von ca. 3,5 bis 4,5 mg/l. Silikatwerte wurden in einer Spannbreite von 1,8 bis 2,3 mg/l gemessen. Nitratwerte lagen anfangs der Messperiode bei fast 3 mg/l und nahmen dann im Verlauf der Untersuchungen auf ca. 1 mg/l ab. Die Natriumkonzentrationen variierten zwischen 0,5 und 1,5 mg/l, während Magnesium, Chlorid und Kalium während des gesamten Untersuchungszeitraums sehr niedrige Werte von weniger als 0,5 mg/l aufwiesen.

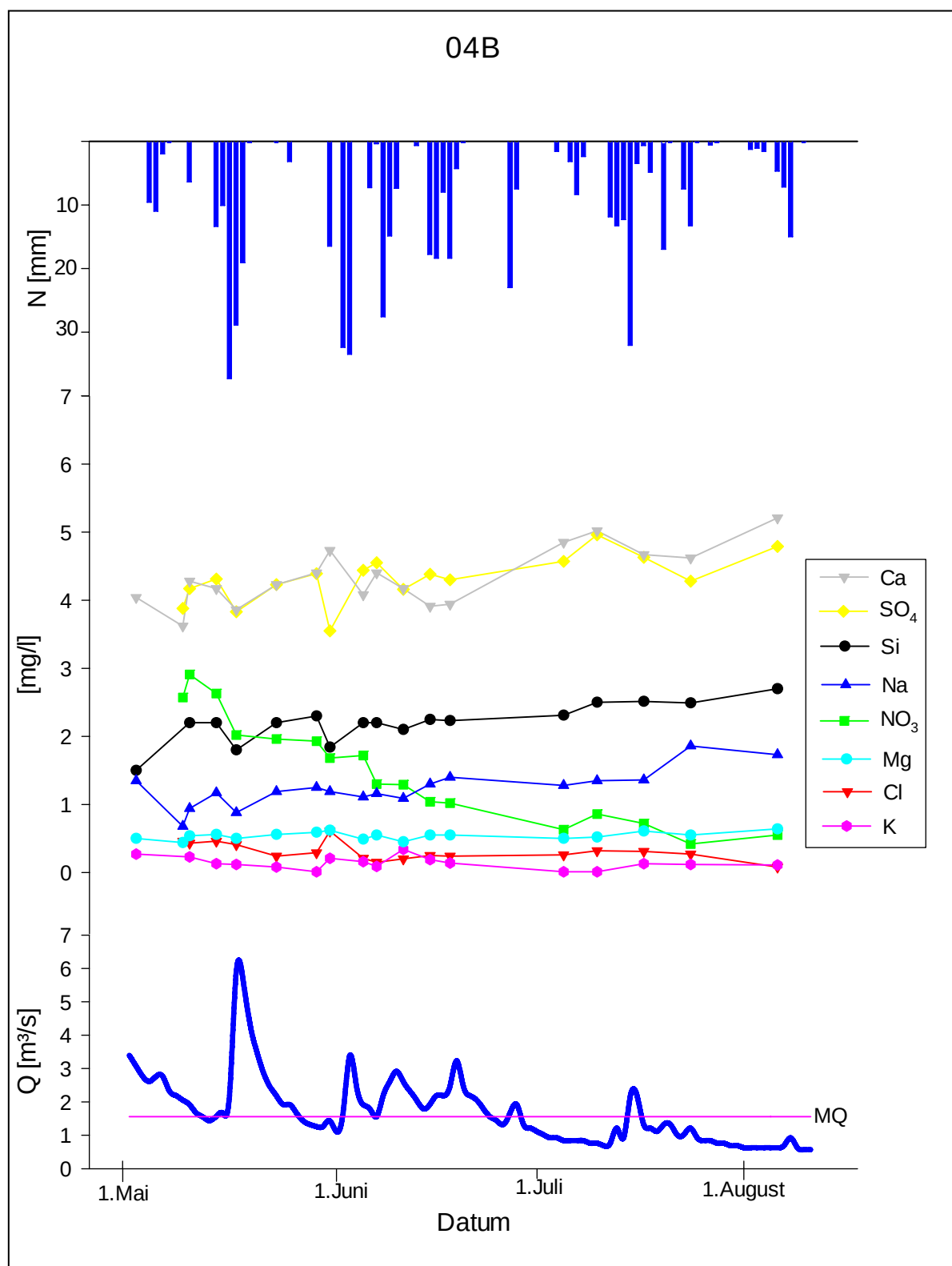


Abb. 4.5: Zeitreihen der Wasserinhaltsstoffe sowie von Niederschlag und Abfluss im Untersuchungszeitraum an der Probennahmestelle „04B“

in Vergleich der beiden Probennahmenstellen zeigt grundsätzlich ein ähnliches Erscheinungsbild bezüglich der zeitlichen Variabilität, die für fast alle Inhaltsstoffe sehr gering war. Die absoluten Konzentrationen der einzelnen Parameter unterscheiden sich jedoch z.T. erheblich. Generell weist die Stelle „02A“ im Vergleich die höheren Konzentrationen auf, was sich v.a. bei Chlorid, Magnesium und auch Silikat bemerkbar macht, bei denen die Konzentrationen fast doppelt so hoch sind. Auch Calcium, Natrium und Kalium weisen leicht erhöhte Werte auf, während die Sulfatkonzentrationen im Gegensatz dazu bei „04B“ durchgehend um ca. 20% höher liegen als bei „02A“. Die Nitratkonzentrationen verhalten sich wie oben beschrieben grundsätzlich anders als die anderen Inhaltsstoffe, wobei ein extrem unterschiedliches Verhalten an den beiden Probenahmestellen an den Ganglinien abgelesen werden kann: An der Stelle „02A“ steigt die Nitrat-Ganglinie am Anfang der Messperiode kräftig an, um danach bis zum Ende der Messperiode gleichmäßig, leicht abzufallen. Ein kurzer anfänglicher Anstieg der Nitrat-Konzentration ist auch bei „04B“ zu sehen, wobei an dieser Stelle die Werte kontinuierlich stark abnahmen, bis am Ende des Untersuchungszeitraums nur noch etwa ein Fünftel der Ausgangskonzentration erreicht war.

Diskussion

Durch die Routinebeprobung während wechselnder Abflussverhältnisse wurde festgestellt, dass sich die untersuchte chemische Zusammensetzung der beprobten Abflüsse während des Untersuchungszeitraums kaum veränderte, obwohl enorm unterschiedliche Abflussverhältnisse vorlagen. Dies entsprach nicht den Erwartungen. V.a. für Silikat wurde im Vorfeld der Untersuchung eine bedeutende Aufkonzentrierung bei abnehmendem Abfluss erwartet.

Zum Teil wird das beobachtete hydrochemische Verhalten dadurch erklärt, dass durch die Routinebeprobung stets „Basisabflüsse“ entnommen wurden und Verdünnungserscheinungen möglicherweise nur bei zeitlich intensiv aufgelöster Beprobung während Niederschlagsereignissen zu beobachten sind. Die gleichförmigen Konzentrationsverläufe lassen auf längere, gleichförmige Fließwege des Wassers relativ unabhängig von wechselnden Abflussverhältnissen schließen. Aber auch eine rasch ablaufende Lösungskinetik würde den gleichen Effekt haben. Die gemessenen Konzentrationen sind allgemein sehr gering, so dass eine schnelle Aufkonzentrierung bis zu diesem Niveau durchaus im Bereich des Möglichen scheint.

Die Schwankungen der Konzentrationen während der Messperiode sind insgesamt sehr gering. Die Fehlerbetrachtungen der Laboranalysen ergaben zwar relativ geringe Streuungsbereiche, die Größenordnung der natürlichen Änderungen wird dabei aber erreicht oder sogar übertroffen, so dass nicht immer zwischen natürlicher und analytischer Ursache für Variabilitäten unterschieden werden kann, was die Auswertung der Ergebnisse erschwert.

Die unterschiedlich hohen Konzentrationen der einzelnen Wasserinhaltsstoffe sind hauptsächlich durch die unterschiedlich große geogene Freisetzung und unterschiedliche Sorptionseigenschaften zu erklären. Die hohen Werte bei Calcium sind beispielsweise durch die leichte Auswaschung und den hohen Anteil der calciumhaltigen Plagioklase (Anorthit) in den vorliegenden Gesteinen erklärbar (siehe Tab. 2.1).

Das ähnlich leicht auswaschbare Magnesium wird dagegen bei der Verwitterung der Minerale Biotit und Cordierit frei, die mit sehr viel geringeren Anteilen im Untersuchungsgebiet vorliegen. Dementsprechend wurden sehr viel geringere Mg-Konzentrationen in den Proben vorgefunden.

Kalium wird bei Verwitterung von Orthoklas und Biotit frei, die zusammen zwar z.T. beträchtliche Anteile in den vorliegenden Gneisen und Diatexiten erreichen, doch wird Kalium sehr stark an Tonmineralen adsorbiert und kann selektiv von Pflanzen aufgenommen werden, so dass die sehr geringen Konzentrationen im Probenwasser nicht außergewöhnlich sind.

Natrium wird leicht ausgewaschen, in geringen Konzentrationen vom Gestein freigesetzt und v.a. im Winter nennenswert mit dem Niederschlag eingetragen.

Gesteine mit höheren Chloridgehalten sind im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden, eingetragen wird Chlorid aber durch den Niederschlag sowie auch organisch durch Tierexkrementen. Nitrat und Sulfat werden ebenfalls atmogen eingetragen und unterliegen verstärkt Wechselwirkungen mit mikrobiellen Prozessen in der Bodenzone.

Im Vergleich der beiden Zeitreihen ergaben sich deutliche Unterschiede bei den einzelnen Wasserinhaltsstoffen. Die generell höheren Werte an der Stelle „02A“ können durch unterschiedlich tiefe Fließwege an den beiden Hängen verursacht sein. Ausführlich wird auf diese Thematik in 4.1.4 eingegangen.

Die extreme Abnahme der Nitratwerte im Verlauf der Untersuchung, die nur bei einer der hier verglichenen Probennahmestellen beobachtet wurde, kann nur durch verstärkte Pflanzenaufnahme nach Beginn der Vegetationsperiode erklärt werden. Das unterschiedliche Verhalten war wohl durch unterschiedliche Vegetation in der Umgebung der Probennahmestelle bedingt: Das EZG von „04B“ befindet sich in einer ausgedehnten Hochstaudenflur mit ausschließlich sommergrünen Pflanzen, die nach Beginn der Vegetationsperiode kräftig Nitrat aufnehmen, während das EZG von „02A“ von Buchen-Tannen-Mischwäldern mit wenig Unterwuchs dominiert wird, so dass Nitrat nicht im gleichen Umfang aufgenommen wird und leichter ausgespült werden kann.

Fazit

Die Ergebnisse der Routinebeprobung wurde exemplarisch anhand von zwei verschiedenen Messstellen in Form von Zeitreihen dargestellt. Im Vergleich der Ganglinien von Abfluss und chemischer Zusammensetzung ergaben sich nur geringe Zusammenhänge zwischen der chemischen Zusammensetzung und den unterschiedlichen Abflussverhältnissen. Dies kann mit längeren gleichförmigen Fließwegen in den Deckschichten oder mit einer sehr raschen Lösungskinetik erklärt werden.

Die Variabilität der Parameter war allgemein sehr gering und lag im Bereich der Messfehler, so dass die Ergebnisse mit Vorsicht zu beurteilen sind.

Für die gemessenen Silikat- und Haptionen-Konzentrationen ergaben sich signifikante Unterschiede untereinander bezüglich der Höhe der Konzentrationen. Diese konnten durch die unterschiedlichen Eintragsmechanismen und Sorptionseigenschaften der einzelnen Stoffe erklärt werden.

Im Vergleich der Zeitreihen der beiden Probennahmestellen ergaben sich deutliche Unterschiede hinsichtlich der Höhe und der Variabilität einzelner Parameter. Diese traten auch bei anderen Probennahmestellen der beiden Hänge in gleicher Weise auf und konnten mit hangspezifischen Charakteristika (ausführlich in 4.1.4) erklärt werden.

Die Zeitreihen der zwei Probennahmestellen „02A“ und „04B“ wurden ausgewählt, da sie das durchschnittliche Verhalten aller anderen Deckschichten-Abflüsse recht gut repräsentieren. Eine umfassende Übersicht der räumlichen und zeitlichen Variabilität aller Deckschichten-Abflüsse wird in 4.1.8 zu jedem der analysierten Inhaltstoffe vorgestellt. Zum Vergleich wurden während der Routine-Beprobung auch andere Abflusskomponenten untersucht, deren unterschiedliches Verhalten in den nächsten Kapiteln dargestellt wird.

5.1.2 Einfluss der Abflussverhältnisse

Besonderes Interesse im Zusammenhang der Routinebeprobung galt der Fragestellung nach Abhängigkeit der gemessenen Parameter von den wechselnden Feuchte- und Abflussverhältnissen. Eigens um den Übergang von den Hochwasserverhältnissen im Frühjahr zu den sommerlichen Niedrigwasserbedingungen aufzulösen, wurde die Probennahmeperiode verlängert. Erwartet wurde eine Aufkonzentrierung der einzelnen Wasserinhaltsstoffe bei abnehmendem Abfluss, da dann (bei einer Durchmischung verschiedener Komponenten), zunehmend höhere Anteile von älterem Wasser im Abfluss auftreten, denen bei angenommener linearer Lösungskinetik höhere Konzentrationen an geogen bereitgestellten Stoffen zugewiesen werden.

Schon im vorherigen Kapitel wurde allerdings an den beispielhaft dargestellten Zeitreihen deutlich, dass dieser Effekt zwar bei den meisten der beprobten Stellen tendenziell auftrat, aber nicht sehr ausgeprägt war und von anderen Prozessen offensichtlich überlagert wird. Mittels einfacher linearer Regressionen wurde überprüft, wie stark der Zusammenhang zwischen Abflusshöhe und Verdünnungseffekten nun tatsächlich einzuschätzen ist. Die dabei errechneten Bestimmtheitsmaße r^2 wurden (nach SCHLITTGEN 1993) folgendermaßen interpretiert:

$r^2 < 0.25$	schwacher Zusammenhang
$0.25 < r^2 < 0.64$	mittlerer Zusammenhang
$r^2 > 0.64$	starker Zusammenhang

Ergebnisse

Lediglich an der Probennahmestelle „12“ konnte der Abfluss direkt gemessen werden. Ein Vergleich der Ganglinien von Abfluss und Silikatkonzentration an dieser Probennahmestelle ist in Abb. 4.6 dargestellt. Deutlich ist das umgekehrt proportionale Verhalten der beiden Ganglinien zu erkennen: Bei hohen Abflüssen sind die Silikatkonzentrationen niedriger als bei niedrigen Abflüssen. Mit diesen Werten wurde eine einfach lineare Regression durchgeführt: In Abb. 4.7 sind die Silikatkonzentrationen zusammen mit der Regressionsgeraden gegen die Abflüsse aufgetragen. Die Regressionsanalyse ergab ein Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0.66$, d.h. es kann von einem starken Zusammenhang zwischen Silikatkonzentration und Abflusshöhe gesprochen werden.

Ob dieser Zusammenhang auch auf die anderen Probennahmestellen übertragbar ist, konnte nur bedingt überprüft werden, da nur für diese eine Probennahmestelle „in situ“ gemessene Abflusswerte vorlagen. Ansonsten wurde auf die Abflusswerte der Brugga zurückgegriffen, die zwar qualitativ gut für das gesamte Einzugsgebiet verwendet werden können (siehe 4.1.1), aber natürlich nicht uneingeschränkt übertragen werden dürfen. In Abb. 4.7 sind deshalb

zusätzlich die Silikatkonzentrationen der Probennahmestelle „12“ zusammen mit der Regressionsgeraden gegen die Abflüsse der Brugga aufgetragen. Das dabei ermittelte Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0.36$ zeigt einen zwar signifikanten, aber erheblich geringeren Zusammenhang an. Trotzdem schien es sinnvoll, die Korrelationsanalyse auf sämtliche Probennahmestellen auszuweiten, um das Ergebnis verallgemeinern zu können. In Abb. 4.8 sind die erhaltenen Bestimmtheitsmaße dieser Analysen der Größe nach angeordnet. Dabei zeigte sich für 60% der Probennahmestellen ein schwacher Zusammenhang, für 35% ein mittlerer Zusammenhang und nur für drei Probennahmestellen ein starker Zusammenhang der Silikatkonzentrationen mit den Abflüssen der Brugga. Dabei wiesen jedoch alle berechneten Regressionsgeraden eine negative Steigung auf, so dass insgesamt das umgekehrt proportionale Verhalten von Abfluss und Silikatkonzentration bestätigt wurde.

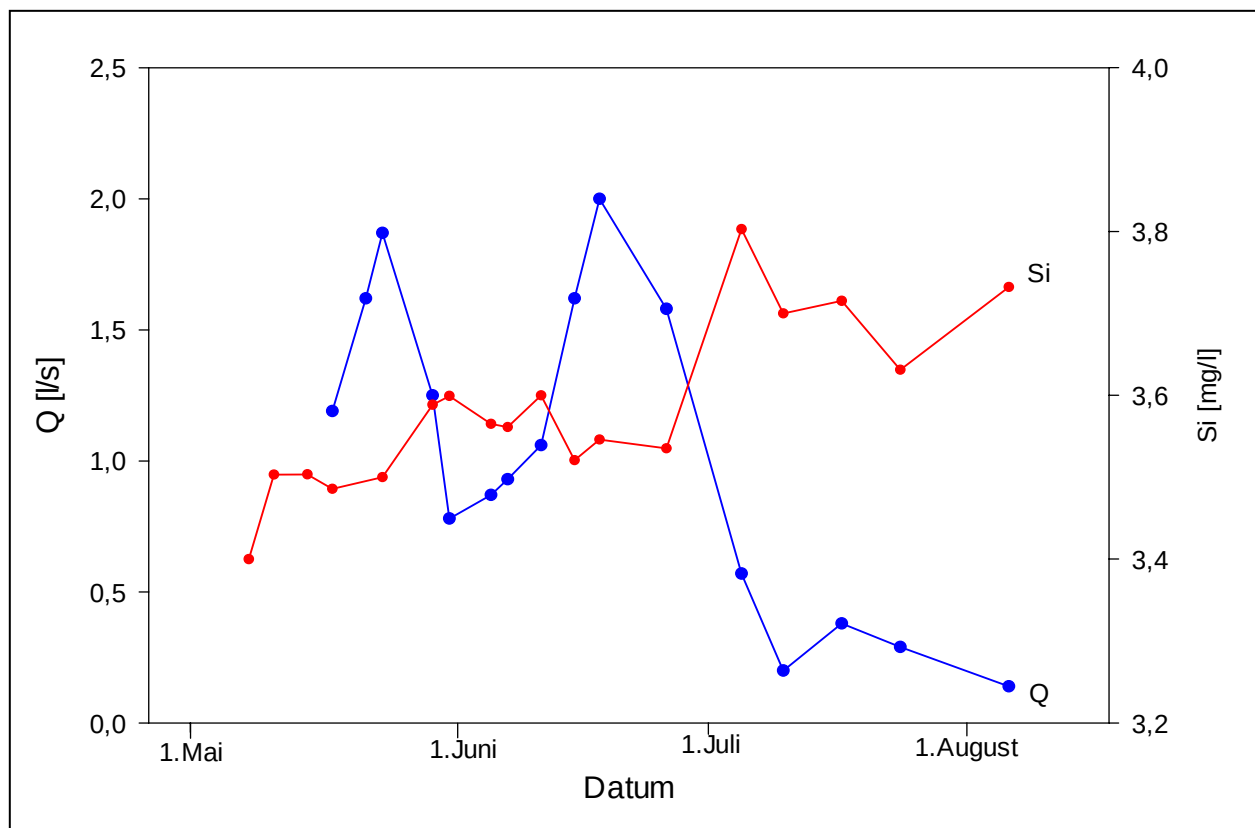


Abb. 4.6: Ganglinien von Silikat (Si) und Abfluss (Q) an der Probennahmestelle „12“

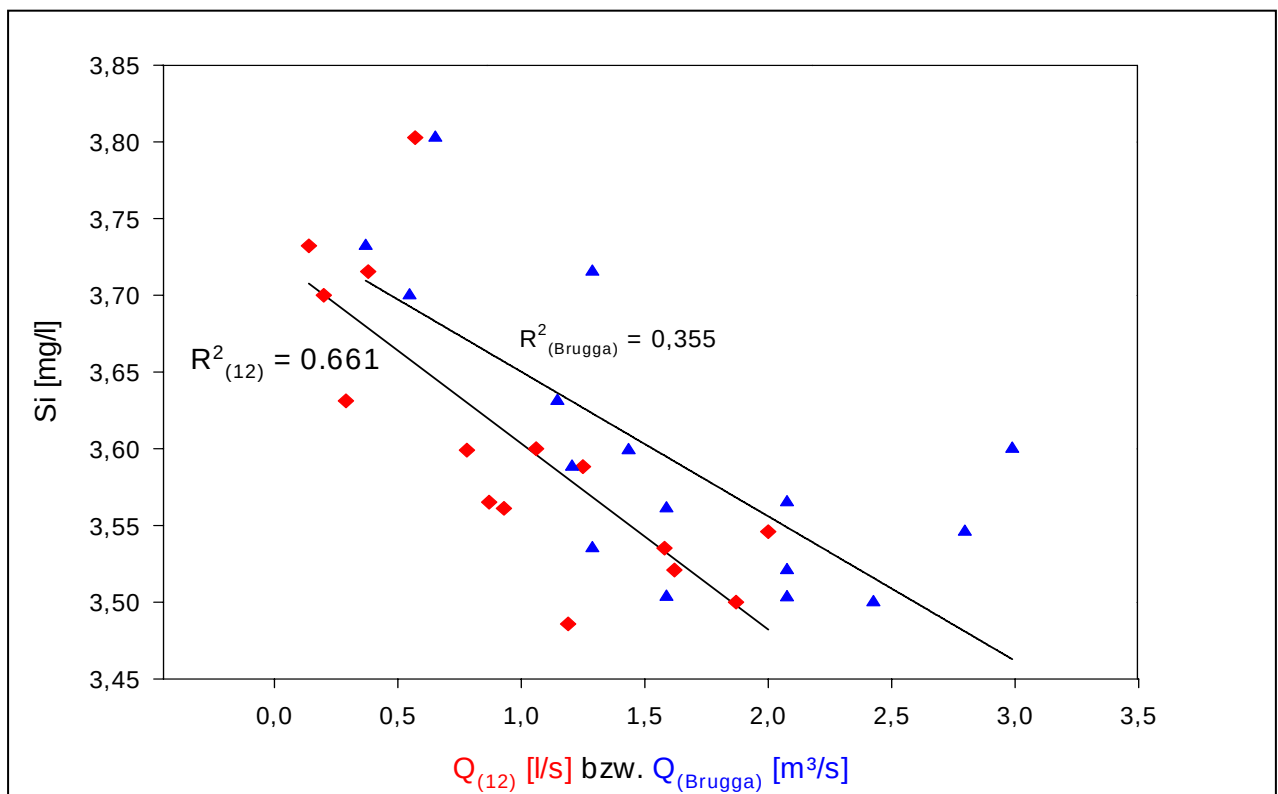


Abb. 4.7: Regressionsanalyse der Silikatkonzentrationen der Messstelle „12“ mit den Abflüssen von Brugga und der Messstelle selbst korreliert

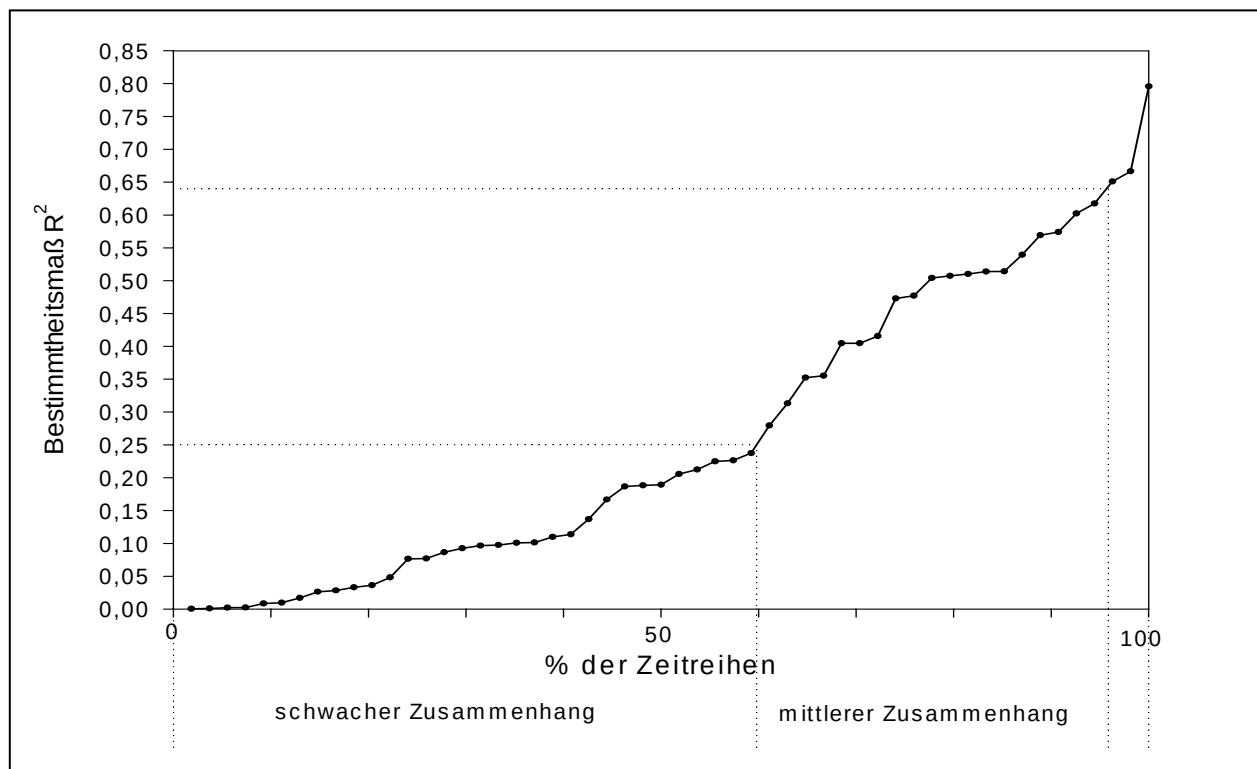


Abb. 4.8: Bestimmtheitsmaße der Regressionen von gemessenen Silikatanalysen aller Probennahmestellen mit den Abflüssen der Brugga

In der gleichen Weise wurden auch alle anderen Wasserinhaltsstoffe auf ihren Zusammenhang mit der Abflusshöhe untersucht. Dabei ergaben sich jedoch durchweg keine eindeutigen Zusammenhänge. Zum Einen waren die Bestimmtheitsmaße insgesamt niedriger, zum Anderen traten bei allen Hauptionen neben den negativen auch positive Korrelationskoeffizienten mit einem Anteil von ca. 20% auf, so dass nicht von einem eindeutigen allgemeinen Zusammenhang ausgegangen werden kann (siehe Tab. 4.1), z.B bei Ca weisen 16 der 69 Probennahmestellen positive Steigungen der Regressionsgeraden auf, bei Cl sind sämtliche Bestimmtheitsmaße $R^2 < 0.2$, die Steigungen der Regressionsgeraden schwanken um null, negative und positive Steigungen stehen im Verhältnis 41 : 28.

Tab. 4.1: Bestimmtheitsmaße r^2 und Steigungen der Regressionsgeraden aus den Korrelationsanalysen der Abflüsse und Konzentrationen der Inhaltsstoffe, mit jeweils 19 Messwerten an 69 Messstellen bestimmt

	Bestimmtheitsmaß r^2			Steigung der Regressionsgeraden	
	< 0.25	0.25 – 0.64	> 0.64	< 0	> 0
Silikat	60 %	35 %	5 %	100 %	0 %
Chlorid	100 %	0 %	0 %	59 %	41 %
Nitrat	44 %	51 %	5 %	32 %	68 %
Sulfat	86 %	14 %	0 %	68 %	32 %
Natrium	81 %	16 %	3 %	78 %	22 %
Kalium	99 %	1 %	0 %	17 %	83 %
Magnesium	81 %	18 %	1 %	78 %	32 %
Calcium	64 %	35 %	1 %	77 %	23 %

Diskussion

An der Probennahmestelle „12“ konnte mittels Regressionsanalyse ein eindeutiger negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der Silikatkonzentrationen und der Höhe des Abflusses nachgewiesen werden. Eine Übertragung dieses Zusammenhangs auf die anderen Probenahmestellen war nur bedingt möglich, da lediglich von dieser einen Stelle „in situ“ gemessene Abflussdaten vorlagen. Für die anderen Probennahmestellen wurde der Abfluss der Brugga zur Regressionsanalyse benutzt. Dies ergab für 60% der Probennahmestellen einen schwachen, für 35% einen mittleren und nur für 5% einen starken Zusammenhang. Trotzdem bestätigen die errechneten Regressionsgeraden einen eindeutigen, umgekehrt proportionalen Zusammenhang von Abfluss und Silikatkonzentration für alle Probenahmestellen, da alle Regressionsgeraden negative Steigungen aufweisen.

Die Ergebnisse bestätigen die Sonderrolle, die dem gelösten Silikat als hydrochemischem Tracer zugewiesen wird. Offensichtlich wird die Silikatkonzentration hauptsächlich von der Abflusshöhe bestimmt und weniger von mikrobiologischen und pedologischen Prozessen beeinflusst. Unbedingt müssen aber die engen Grenzen beachtet werden, in denen sich die Silikatkonzentrationen dabei bewegen: Bei Schwankungen in der Abflusshöhe an der Probennahmestelle „12“ um den Faktor 10, verändern sich die Silikatkonzentrationen lediglich um den Faktor 0,1 ! Dadurch wird gleichzeitig eine eingeschränkte Nutzung von Silikat als Tracer angezeigt. Diese geringen Konzentrationsunterschiede reichen nicht aus, um verschiedene Komponenten damit aufzutrennen.

Vergleichbare Ergebnisse konnten für die anderen Inhaltstoffe nicht ermittelt werden, obwohl sie sich z.B. für Calcium in den Zeitreihen durch den optischen Vergleich der Ganglinien von Abfluss und Konzentration in den Zeitreihen andeuteten. Die Ergebnisse ergaben aber weder für die Stelle „12“, noch insgesamt eindeutige Zusammenhänge. Zum großen Teil lagen die Bestimmtheitsmaße in einem sehr niedrigen Bereich und v.a. gab es keine durchgehend positiven bzw. negativen Steigungen der Regressionsgeraden. Interessant sind diese Ergebnisse v.a. im Hinblick auf die Nutzung von Chlorid als hydrochemischem Tracer zur Ganglinienseparation. Ein eindeutiger Zusammenhang mit der Abflusshöhe wie bei Silikat konnte in dieser Untersuchung nicht bestätigt werden., das bedeutet dass die Chloridkonzentrationen noch von anderen Prozessen, wie z.B. organische Einträge, gesteuert werden.

Fazit

Der starke Zusammenhang zwischen der Abflusshöhe und der Silikatkonzentration zeigt das sensible Verhalten des gelösten Silikats, das offensichtlich im Gegensatz zu den Hauptionen sehr wenig durch weitere Prozesse überdeckt wird. Gleichzeitig wurden die Grenzen der Nutzung von Silikat als Tracer aufgezeigt. Die gemessenen Werte wiesen zu geringe Differenzen auf, um verschiedene Komponenten damit aufzutrennen.

4.1.4 Vergleich unterschiedlicher Hangpositionen

Ziel der Untersuchung war neben der Ermittlung der Variabilität der hydrochemischen Signatur des schnellen Abflusses aus den Deckschichten auch festzustellen, welche Faktoren diese Variabilität bestimmen. Dazu wurden die Probennahmestellen z.B. entlang von Hangprofilen angeordnet, um herauszufinden, ob ein Zusammenhang zwischen Hangposition und hydrochemischer Signatur besteht. Erwartet wurde beispielsweise eine hangabwärts gerichtete Zunahme der Silikatkonzentrationen, da mit zunehmender Hanglänge die jeweiligen Einzugsgebiete größer und damit die Aufenthaltszeiten des Wassers länger werden.

Aussagekräftige Hangprofile in diesem Zusammenhang konnten an den zwei gegenüberliegenden SSW- und NNO-exponierten Hängen im Bereich der Napfmatte zwischen Tote Mann und Schmaleck eingerichtet werden. In Abb. 4.9 ist die Lage des Profils zusammen mit den Probennahmestellen dargestellt. Zur besseren Anschaulichkeit der unterschiedlichen Hangpositionen ist in Abb. 10 die Topographie zusammen mit den Messstellen maßstabsgetreu nachgezeichnet. Auf die Besonderheiten der beiden Hänge wurde bereits in 4.2.2 ausführlich eingegangen. Insgesamt ist v.a. der Unterschied der Fließwege bemerkenswert: Während am SSW-exponierten Hang zwischen Tote Mann und St. Wilhelmer Talbach das Wasser relativ oberflächennah abfließt und an zahlreichen Stellen beprobt werden kann, ist der NNO-exponierte Hang insgesamt viel trockener, so dass lediglich am Übergang von Ober- zu Mittelhang und dann erst wieder am Hangfuß das Wasser oberflächlich austritt und beprobt werden kann. Diese Beobachtungen lassen auf insgesamt tiefere Fließwege als am Gegenhang schließen.

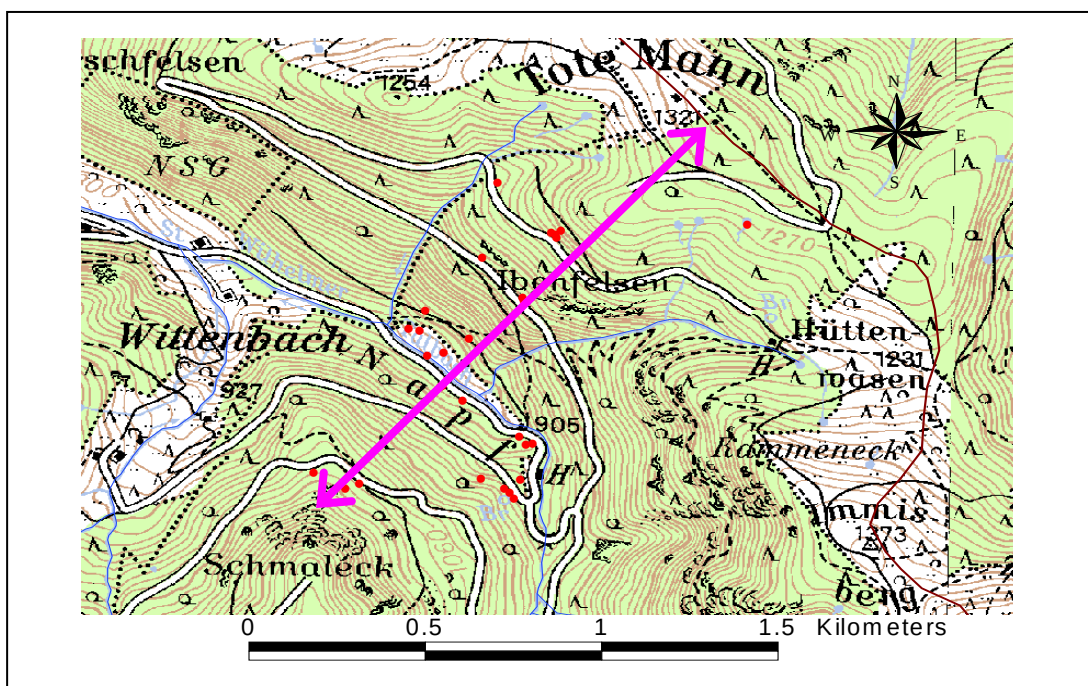


Abb. 4.9: Lage der Hangprofile mit den Probennahmestellen

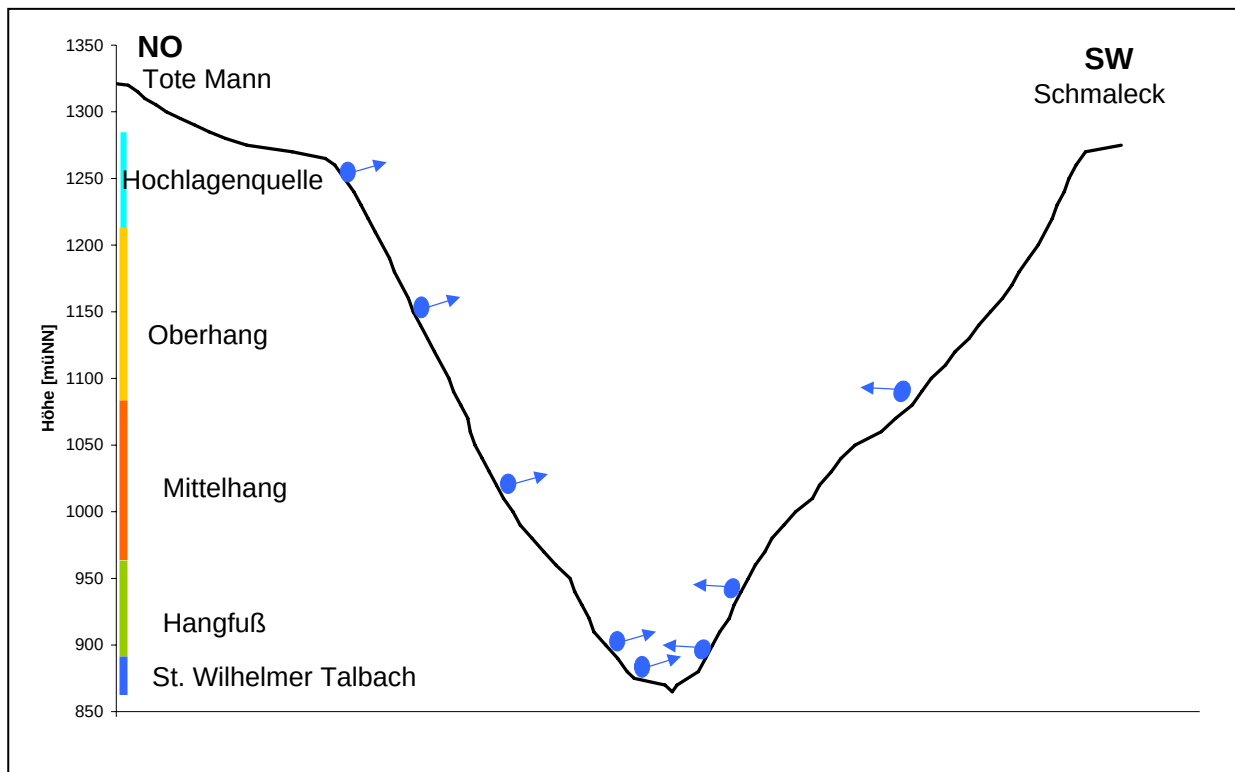


Abb. 4.10 Topographischer Schnitt der untersuchten Hangprofile mit den Höhenlagen der Probennahmestellen

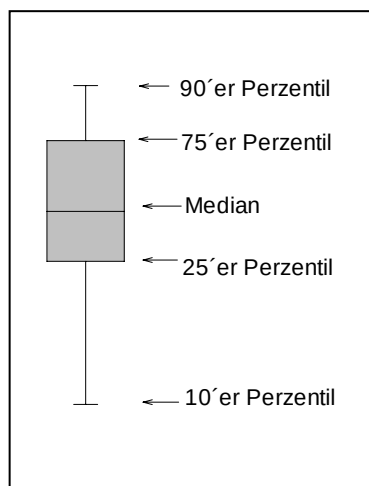


Abb. 4.11: Darstellung der Ergebnisse mittels „box-plots“

Die Ergebnisse wurden mit Hilfe von sog. „box-plots“ dargestellt. Dabei steht jede box für die zeitliche Variabilität des jeweiligen Parameters an einer Probennahmestelle. Dargestellt werden der Median sowie 10'er, 25'er, 75'er und 90'er Perzentil (siehe Abb. 4.11)). Probennahmestellen gleicher Hangposition sind nebeneinander gestellt, unterschiedliche Hangpositionen sind durch Punktklinien getrennt. In einem Schaubild lassen sich also gleichzeitig die beiden Hänge, die unterschiedlichen Hangpositionen, die Variabilität innerhalb einer Hangposition sowie die zeitliche Variabilität jeder Probennahmestelle vergleichen.

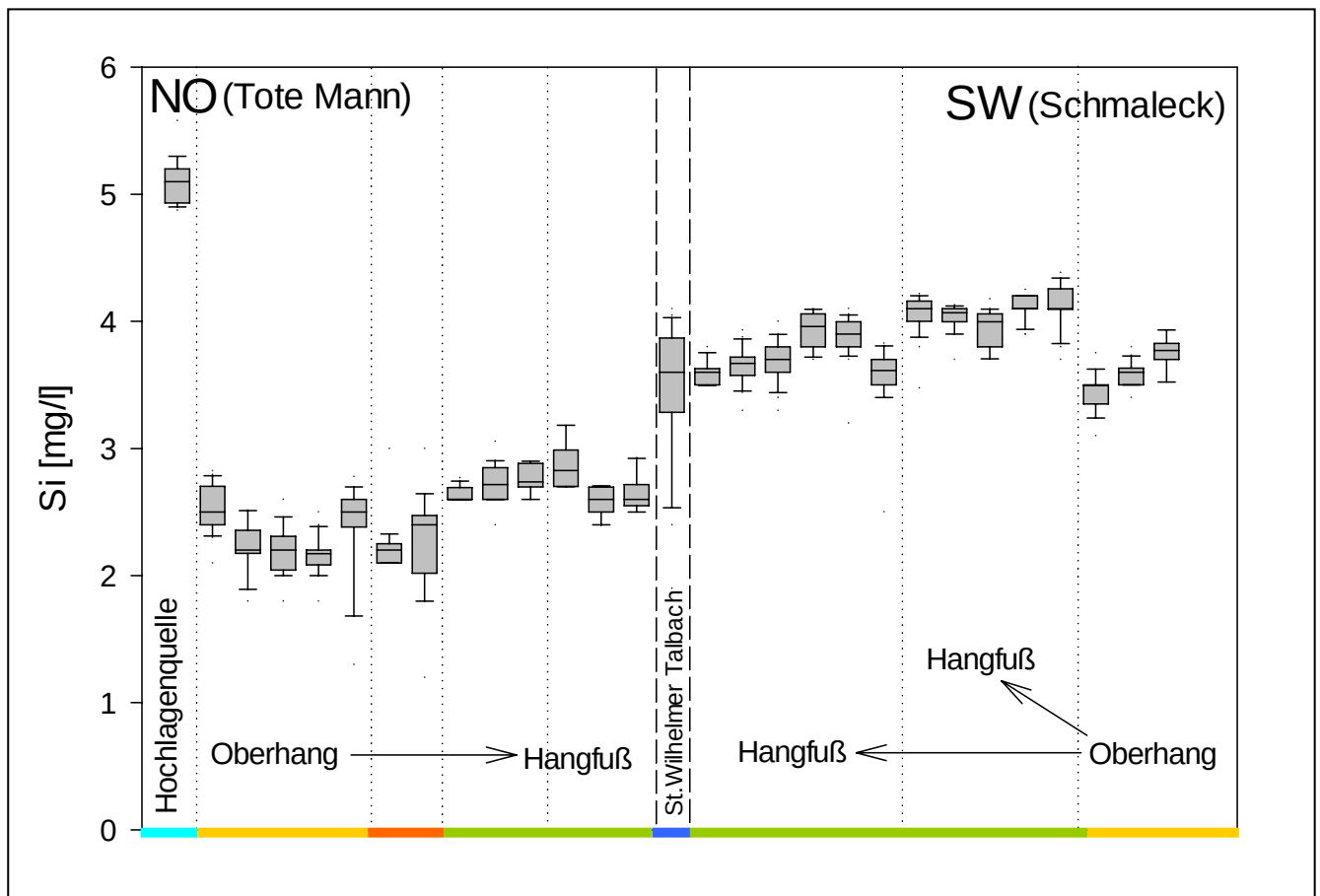


Abb. 4.12 Hangabfolgen der Silikatkonzentrationen

In Abb. 4.12 sind die Abfolgen der beiden Hänge für Silikat dargestellt. Im Vergleich der beiden Hänge fällt sofort auf, dass der NNO-exponierte Hang zwischen Schmaleck und St. Wilhelmer Talbach durchgehend um ca. 1 mg/l höhere Silikatkonzentrationen aufweist als der Gegenhang. Eine signifikante Zunahme der Silikatwerte mit zunehmender Hanglänge lässt sich nicht beobachten. Am SSW-exponierten Hang sind die am Unterhang und Hangfuß gemessenen Werte zwar im Vergleich zu Mittel- und Oberhang etwas erhöht, doch liegt die Variabilität der Werte schon innerhalb der gleichen Hangpositionen und auch zeitlich an den einzelnen Messstellen im gleichen Bereich. Auch am Gegenhang sind die Werte am Hangfuß nicht signifikant höher als am Oberhang. Sowohl innerhalb der gleichen Hangpositionen als auch zeitlich an den einzelnen Messstellen schwanken die Werte erheblich. Maximale Variabilitäten von bis zu 1 mg/l sind dabei zu beobachten.

Zum Vergleich wurde allgemein an möglichst vielen Stellen nicht nur die Kleinquellen der Deckschichten untersucht, sondern auch in der Nähe fließende Gerinne oder stark schüttende Hochlagenquellen. In Abb. 4.12 wurde beispielhaft der St. Wilhelmer Talbach als Vorfluter sowie eine Hochlagenquelle („04.1“, siehe 4.2.2) unterhalb des Tote Mann – Gipfels mit eingezeichnet. Sehr deutlich setzt sich dabei die Hochlagenquelle hinsichtlich der

Silikatkonzentrationen von den Kleinquellen der Deckschichten ab: Sie sind mit ca. 5 mg/l fast doppelt so hoch. Die zeitliche Variabilität ist hingegen vergleichbar mit den Kleinquellen. Die Silikatwerte des St. Wilhelmer Talbachs hingegen zeigen eine deutlich höhere zeitliche Variabilität, während die absolute Höhe der Konzentrationen interessanterweise sehr gut mit der Bandbreite der Werte des NNO-exponierten Hanges zusammenfällt.

In der gleichen Weise wurden die Hangabfolgen für die anderen Wasserinhaltsstoffe in den Abb. 4.13 bis 4.19 dargestellt. Dabei ergibt sich ein sehr uneinheitliches Bild beim Vergleich der einzelnen Ionen. Die Ergebnisse der Calciumanalysen fallen an den beiden Hängen sehr unterschiedlich aus: Die Werte sind am SSW-exponierten Hang relativ einheitlich niedrig, wobei auffällt, dass einzelne Ausreißer nach oben insbesondere bei den Stellen „04.2“ (sechste box von links) und „13“ (erste box von rechts) vorkamen. Am Gegenhang sind für viele der Probennahmestellen sehr viel höhere Calciumkonzentrationen mit erheblich höheren zeitlichen Variabilitäten gemessen worden, wobei einzelne Stellen nur etwa die Konzentrationen des SSW-Hanges aufweisen. Auffällig ist dabei insbesondere die Probennahmestelle „13“, die sehr niedrige absolute Werte bei einer sehr niedrigen zeitlichen Variabilität zeigt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen bei Silikat zeigt die Hochlagenquelle keine besondere Reaktion, auch der St. Wilhelmer Talbach nimmt eine mittlere Stellung sowohl hinsichtlich der absoluten Konzentrationen, als auch der zeitlichen Variabilität ein.

Die Ergebnisse für Magnesium sind denen für Calcium sehr ähnlich. Unterschiedlich sind die sehr viel niedrigeren absoluten Werte. Auffällig ähnlich wie Calcium reagieren die Stellen „04.2“ und „13“, Erstere wie vor mit extremen Ausreißern nach oben, Letztere mit wie vor auffällig niedrigen absoluten Werten und niedriger zeitlicher Variabilität.

Die Kaliumwerte zeigen ein auffallend einheitliches Verhalten mit durchgängig sehr niedrigen Konzentrationen. Bemerkenswert ist lediglich, dass sich auch hier wieder ein zeitlich stärker variables Verhalten beim St. Wilhelmer Talbach und generell etwas höhere Werte für den Schmaleckhang zeigen.

Die Ergebnisse für Natrium zeigen dagegen ein etwas differenzierteres Bild. Im Vergleich der beiden Hänge weisen wiederum die Probennahmestellen des Schmaleckhangs generell höhere Werte, aber auch eine größere Uneinheitlichkeit auf. Wie schon mehrfach bemerkt, fallen die Stellen „04.2“ und „13“ durch vergleichsweise hohe, bzw. niedrige Variabilität mit Ausreißern nach oben auf. Die Hochlagenquelle „04.1“ setzt sich mit deutlich erhöhten Werten ab, der Talbach nimmt eine mittlere Stellung ein.

Die Chlorid – Werte sind, v.a. am SSW-exponierten Tote Mann–Hang, durchgängig sehr niedrig. Am gegenüberliegenden Schmaleck-Hang zeigt sich eine größere Uneinheitlichkeit, v.a. am Hangfuß an den Stellen „02A und 02A.1“ treten erhöhte Werte auf. Der St. Wilhelmer Talbach zeigt ebenfalls sehr niedrige Werte bei sehr niedriger zeitlicher Variabilität. Die Hochlagenquelle „04.1“ verhält sich bezüglich den Chloridkonzentrationen gleich wie der übrige Tote Mann-Hang.

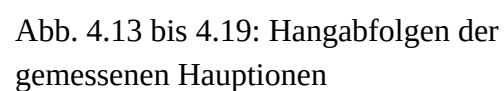
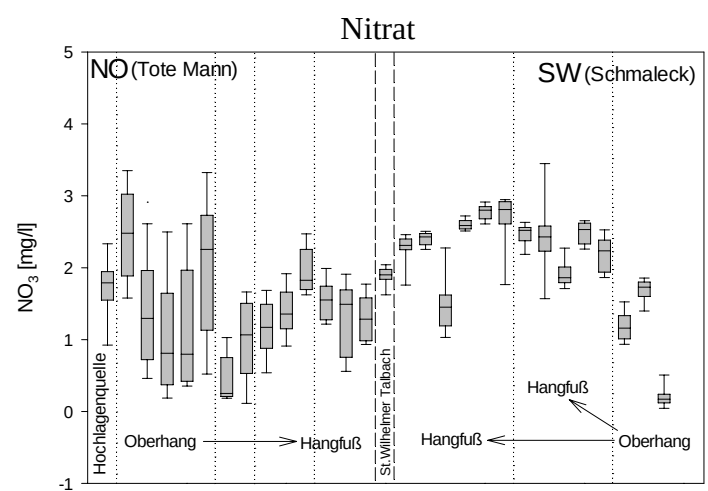
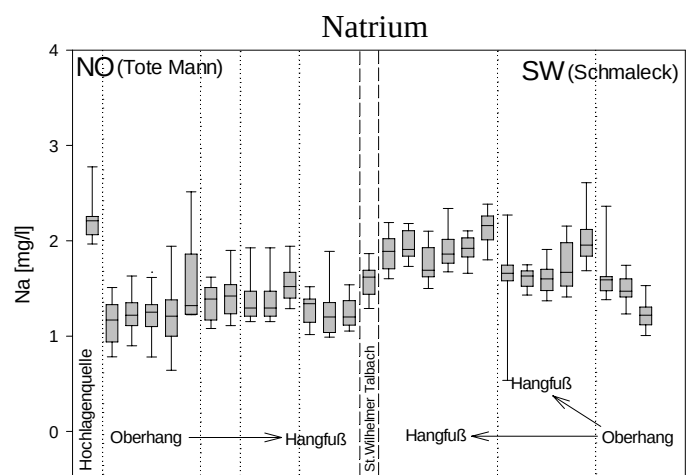
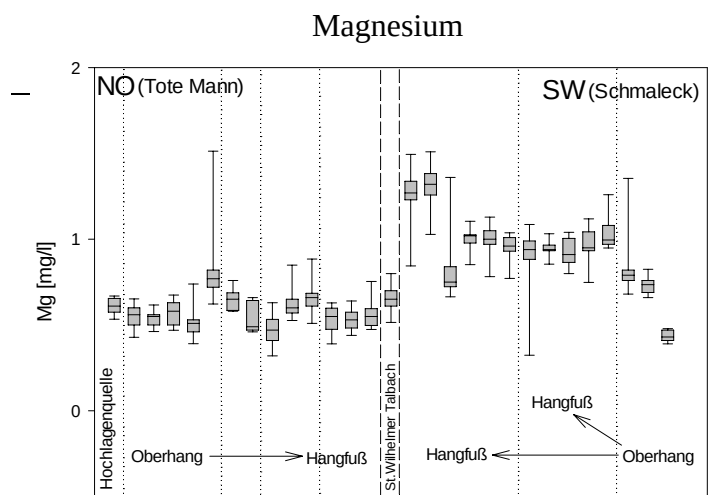


Abb. 4.13 bis 4.19: Hangabfolgen der gemessenen Hauptionen

Bei den Ergebnisse der Nitratanalysen weisen die beiden Hänge im Vergleich sehr unterschiedliche Reaktionen auf: Die Probennahmestellen des Schmaleckhangs zeigen sehr viel geringere zeitliche Variabilität bei etwa gleich hohen absoluten Werten, wobei die Probennahmestelle „13“ durch extrem geringe Werte und Variabilität auffällt. Auch der St.Wilhelmer Talbach weist eine sehr geringe zeitliche Variabilität auf.

Anhand der Sulfatwerte lassen sich keine ausgeprägten hangspezifischen Charakteristika erkennen. Die Werte der einzelnen Probennahmestellen schwanken zwischen 2,5 und 6,5 mg/l, bei unterschiedlicher zeitlicher Variabilität. Die Sulfatwerte der Probennahmestellen am Tote Mann-Hang sind generell etwas niedriger, lediglich die Stelle „04.2“ zeigt höhere Werte und Variabilität. Auffällig sind die sehr niedrigen absoluten Werte und Variabilitäten von St.Wilhelmer Talbach und der Hochlagenquelle „04.1“.

Diskussion

Entgegen den Erwartungen zeigen die Ergebnisse der Silikatanalysen keine signifikante Zunahme der Konzentrationen mit zunehmender Hanglänge, d.h. zunehmender Größe des Einzugsgebiets. Die Variabilität an den einzelnen Hangpositionen ist schon größer als die Variabilität innerhalb des gesamten Hanges. Auffällig ist das unterschiedliche Verhalten der beiden verglichenen Hänge: Sämtliche Messstellen des NNO-exponierten Schmaleckhangs weisen deutlich höhere Si-Konzentrationen auf, als die Messstellen des gegenüberliegenden SSW-exponierten Tote Mann-Hangs. An diesem Hang konnte zum Vergleich eine Hochlagenquelle untersucht werden, die wie erwartet über die gesamte Messperiode deutlich erhöhte Silikatwerte aufwies.

Die ebenfalls analysierten Haptionen zeigen kein einheitliches Bild. Insgesamt bestätigen sie jedoch die Silikatergebnisse, nämlich den signifikanten Unterschied der beiden gegenüberliegenden Hänge und keine Zunahme der Werte mit zunehmender Hanglänge. Bei mehreren Ionen verhalten sich die Probennahmestellen „04.2“ am Oberhang des Tote Mann-Hangs und die Stelle „13“ am Schmaleckhang deutlich unterschiedlich im Vergleich zu den anderen Probennahmestellen. Dabei weist die Stelle „04.2“ immer wieder höhere Werte und höhere Variabilitäten auf. Dies kann damit erklärt werden, dass der beprobte Abfluss nicht direkt an der Austrittsstelle beprobt wurde, sondern zuvor eine kurze Sättigungsfläche durchfließt und somit intensiv den Wechselwirkungen mit dem durchwurzelter Ah-Horizont ausgesetzt ist. Darauf weisen insbesondere die größeren Variabilitäten der Werte hin. Die „Ausreißer“ bei den Ca- und Mg- Werten sind höchstwahrscheinlich durch Waldkalkungen ausgelöst, die in regelmäßigen Abständen per Hubschrauber im Untersuchungsgebiet durchgeführt werden. Dies wirkt sich dann natürlich besonders in den oberflächennahen Abflüssen aus. Im Gegensatz dazu weist die Probennahmestelle „13“ v.a. bei Ca^{2+} , Mg^{2+} und NO_3^- verhältnismäßig niedere Werte und niedere Variabilitäten auf. Die Besonderheit dieser Stelle ist das stark tonige, Vergleyung zeigende anstehende Substrat, das durch den höheren Gehalt an Tonmineralen die Kationen Ca^{2+} und Mg^{2+} stärker adsorbiert. Die Nitratwerte sind

vermutlich durch die anaeroben reduzierenden Verhältnisse erniedrigt. Eine generell größere Variabilität des St.Wilhelmer Talbachs, wie sie sich durch die Si-Ergebnisse andeutet, wird durch die Haptionen widerlegt: Meist liegen sowohl absolute Höhe, als auch Variabilität in einem mittleren Bereich. Ausführlich wurde diese Fragestellung mit einer Ereignisbeobachtung angegangen (siehe Kap.4.2). Die Hochlagenquelle „04.1“ nimmt nur bei Natrium und Sulfat eine Sonderrolle ähnlich wie bei Silikat ein, wobei die Na-Werte erhöht, die SO_4 -Werte jedoch erniedrigt sind (siehe dazu Diskussion bei 4.1.5).

Die generell höheren Konzentrationen der Inhaltsstoffe am Schmaleckhang können durch die beobachteten tieferen Fließwege und damit größeren Aufenthaltszeiten erklärt werden. Eine allgemeingültige Aussage über den Zusammenhang von Exposition und Aufkonzentrierung der Wasserinhaltsstoffe bzw. Mächtigkeit von Deckschichten lässt sich jedoch daraus nicht ableiten. Über die Entstehung von expositionsbedingten Talasymmetrien und unterschiedlichen Mächtigkeiten periglazialer Deckschichten wird kontrovers diskutiert. Nach KARRASCH (1979) führt die intensivere Sonneneinstrahlung auf S- bis W-exponierten Hängen zu verstärkter Solifluktion und Frostsprengung. Langfristig entwickelten sich dadurch verflachte Hänge mit mächtigeren Schuttdecken. Als gegenläufigen Prozess gibt er die fluviale Seitenerosion an, die bei entsprechender Ausprägung die stärker getauten S- und W-Hänge unterschneiden und versteilen kann. FEZER (1957) nimmt eine Umkehr der Talasymmetrie ab einer Höhenlage von 800 m an, da dann die Sommer nicht mehr warm genug waren, um die S-exponierten Hänge aufzutauen. Inwieweit expositionsbedingt variierende Periglazialprozesse im Untersuchungsgebiet zu einer asymmetrischen Talausbildung geführt haben, lässt sich schwer abschätzen. Rezente vegetationsfreie Blockschutthalden finden sich zwar verstärkt an den SW-exponierten Hängen, die NO-exponierten gegenüberliegenden Hänge weisen jedoch genauso hohe Hangneigungen und ebenfalls viele versteilte Bereiche mit Felsdurchragungen und Blockschutt auf.

Fazit

Um herauszufinden, ob es einen Zusammenhang zwischen der Hangposition und der hydrochemischen Signatur besteht, wurden im Rahmen der dreimonatigen Routinebeobachtung Probennahmestellen entlang von Hangprofilen eingerichtet. Die Ergebnisse wurden am Beispiel der Hangabfolgen zweier gegenüberliegender Hänge im Napfgebiet für alle untersuchten Wasserinhaltsstoffe dargestellt. Es zeigte sich, dass ein Zusammenhang von Hangposition und chemischer Zusammensetzung der Deckschichtenabflüsse nicht zu bestätigen ist. Die Variabilitäten von Messstellen einer Hangposition waren schon gleich groß oder sogar größer als die Variabilität innerhalb des gesamten Hangs. Auffällig war das sehr unterschiedliche Verhalten der beiden verglichenen Hänge bezüglich der hydrochemischen Signaturen. Dies konnte durch Ergebnisse von Geländebeobachtungen mit unterschiedlich tiefen Fließwegen an den beiden Hängen erklärt werden. Eine allgemeingültige Aussage über den Zusammenhang von Exposition und hydrochemischer Signatur der Deckschichtenabflüsse ließ sich jedoch daraus aus verschiedenen Gründen nicht ableiten.

4.1.5 Vergleich unterschiedlicher Abfluss- und Tiefenkomponenten

An einigen der beprobten Stellen war ein Wasseraustritt auf kurzer Distanz in vermeintlich unterschiedlichen Tiefenkomponenten zu beobachten. Ein Schichtung vorausgesetzt, konnte mit der Beprobung die unterschiedliche hydrochemische Signatur der verschiedenen Schichtglieder untersucht werden. Zusätzlich wurde so oft als möglich versucht, andere Abflusskomponenten wie z.B. Hochlagenquellen mit zu beproben. Im Folgenden werden die Ergebnisse exemplarisch anhand von Zeitreihen an zwei Lokalitäten dargestellt.

4.1.5.1 Hangfuß des „Tote-Mann-Hanges“

Am Hangfuß des SSW-exponierten Hangs zwischen Tote Mann und St. Wilhelmer Talbach konnten mehrere Hangschutt-Kleinquellen beprobt werden, die offensichtlich den kompletten Hang entwässern. In 5.1.3 bilden sie die unterste Hangposition der analysierten Hangabfolge an diesem Hang. Um die These zu überprüfen, ob ein Teil des Abflusses mit einer anderen hydrochemischen Signatur direkt in tieferen Fließwegen in die alluvialen Schuttkörper und dann direkt in den Vorfluter gelangt, bzw. ob eine signifikante Änderung der hydrochemischen Signatur der Abflusskomponente der Deckschichten auf dem Weg durch den Talaquifer eintritt, wurde in einiger Entfernung zum Talbach eine Bohrung abgeteuft und regelmäßig mitbeprobte. Zum Vergleich wurde auch der St. Wilhelmer Talbach jeweils mitbeprobte. Ausführlich sind die Probennahmestellen in Kapitel 4.2.2 beschrieben.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Analysen sind in Abb. 4.20 und 4.21 zusammen mit dem Abfluss der Brugga dargestellt. Bei den Ergebnissen der Silikatwerte fällt auf, dass sich die Reaktion des Talbachs deutlich von der Reaktion der Hangschuttquellen unterscheiden lässt: Die gemessenen Werte sind fast durchweg 0,7 bis 0,8 mg/l höher und zudem ist eine sehr viel größere Variabilität und Reaktion auf unterschiedliche Abflussverhältnisse beim Talbach zu beobachten. Die im Bohrloch gemessenen Silikatwerte zeigen interessanterweise eine sehr ähnliche Reaktion auf wechselnde Abflussverhältnisse wie der Talbach: V.a. Verdünnungseffekte sind bei den beiden Probennahmestellen mehrere Male sehr ähnlich in der Ganglinie aufzufinden, während sich die absolute Höhe der Konzentrationen im Bereich der Hangschuttquellen bewegt.

Die Ganglinien der Chloridwerte zeigen eine eindeutige Sonderrolle der im Bohrloch entnommenen Wasserproben. Die Werte liegen insgesamt in einem sehr viel höheren Bereich, wobei v.a. einzelne extreme Ausreißer nach oben auffallen. Die Chloridkonzentrationen der Hangschuttquellen und des Talbachs schwanken zwischen 0,2 und 0,7 mg/l, während im Bohrloch mehrmals > 10 mg/l Chlorid gemessen wurden.

Wie schon in 5.1.1 bemerkt, ist bei den Nitratwerten im Verlauf der Messperiode an vielen Probennahmestellen eine abnehmende Tendenz beobachtet worden, die sich auch an den hier betrachteten Probennahmestellen zeigt. Auffällig sind die durchgehend höheren Konzentrationen im Talbach im Vergleich zum Bohrloch. Diese Differenz wird im Verlauf der Messperiode noch durch die extreme Abnahme der Nitratwerte im Bohrloch verstärkt, da die Konzentrationen im Talbach nur leicht zurückgehen. Die Hangschuttquellen nehmen bezüglich des Nitrats eine mittlere Stellung zwischen Bohrloch und Talbach ein. Insgesamt schwanken die Werte aller Probennahmestellen verhältnismäßig stark, wobei die enorm geringen Konzentrationen beachtet werden müssen.

Bei den Ganglinien der Sulfatergebnisse ist bemerkenswert, dass die Werte bei den Hangschuttquellen während des gesamten Untersuchungszeitraums um ca. 1 mg/l höher sind als die Werte, die im Talbach und Bohrloch gemessen wurden. Dabei traten im Bohrloch mit ca. 2 bis 2,5 mg/l insgesamt die geringsten Konzentrationen auf. Die Variabilität der Werte ist bei allen Probennahmestellen sehr hoch, die ausgeglichene Ganglinie weisen die aus dem Talbach entnommenen Proben auf.

Bei den Ganglinien der Natrium- und Kalium-Konzentrationen sind v.a. die sehr niedrigen Konzentrationen bemerkenswert, die für Kalium schon im Bereich der Messgenauigkeit liegen. Auffällig ist die erhöhte Na-Konzentration in der Bohrloch-Ganglinie am zehnten Beprobungstag. Zeitlich fällt sie mit dem zweiten „Ausreißer“ bei der Cl-Ganglinie des Bohrlochs zusammen. Ansonsten variieren die Na-Werte nur wenig, zwischen den Probennahmestellen sind kaum Unterschiede festzustellen. Bei den Kalium-Ganglinien ergaben sich bei den Bohrloch-Proben gegenüber den anderen Stellen erhöhte Werte, mit einer erhöhten Variabilität. Bei der Ganglinie des Talbachs zeigt sich am 8. Beprobungstag eine Erhöhung auf über 2 mg/l Kalium. Die Ganglinien der Hangschuttquellen verlaufen sehr ähnlich und gleichförmig.

Auch die Magnesiumwerte sind mit Konzentrationen < 1 mg/l sehr niedrig. Die Ganglinie der Bohrloch-Proben weist eine größere Variabilität als die anderen beprobten Stellen auf.

Die Ergebnisse der Calciumanalysen ergaben für den Talbach deutlich erhöhte und für die Bohrlochbeprobung leicht erhöhte Werte im Vergleich zu den Hangschuttquellen. Die Variabilität der Werte ist allgemein sehr hoch. Insbesondere die Proben aus dem Bohrloch schwanken stark zwischen 2,5 und 7 mg/l.

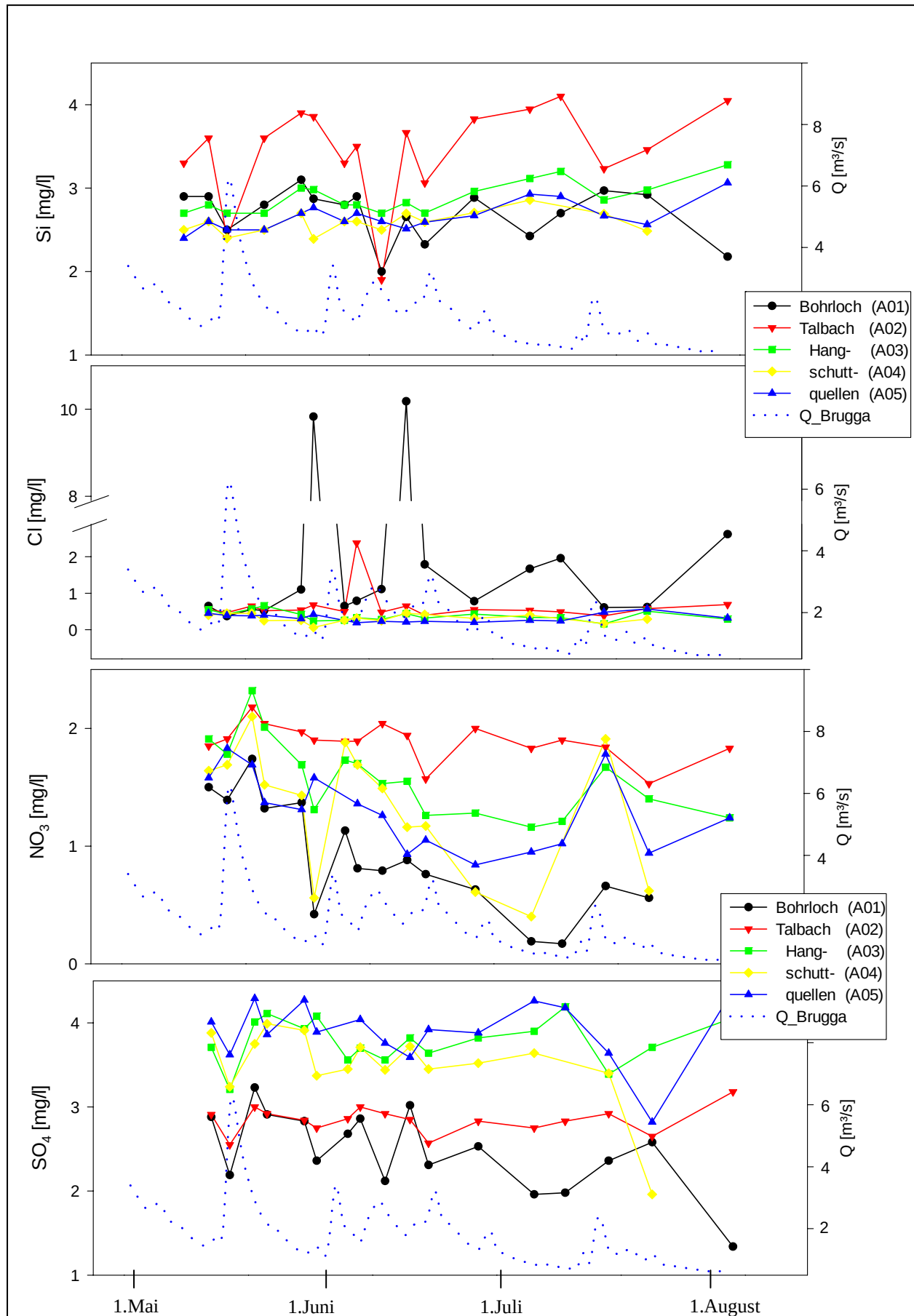


Abb. 4.20: Ganglinien der Silikat- und Anionen-Konzentrationen

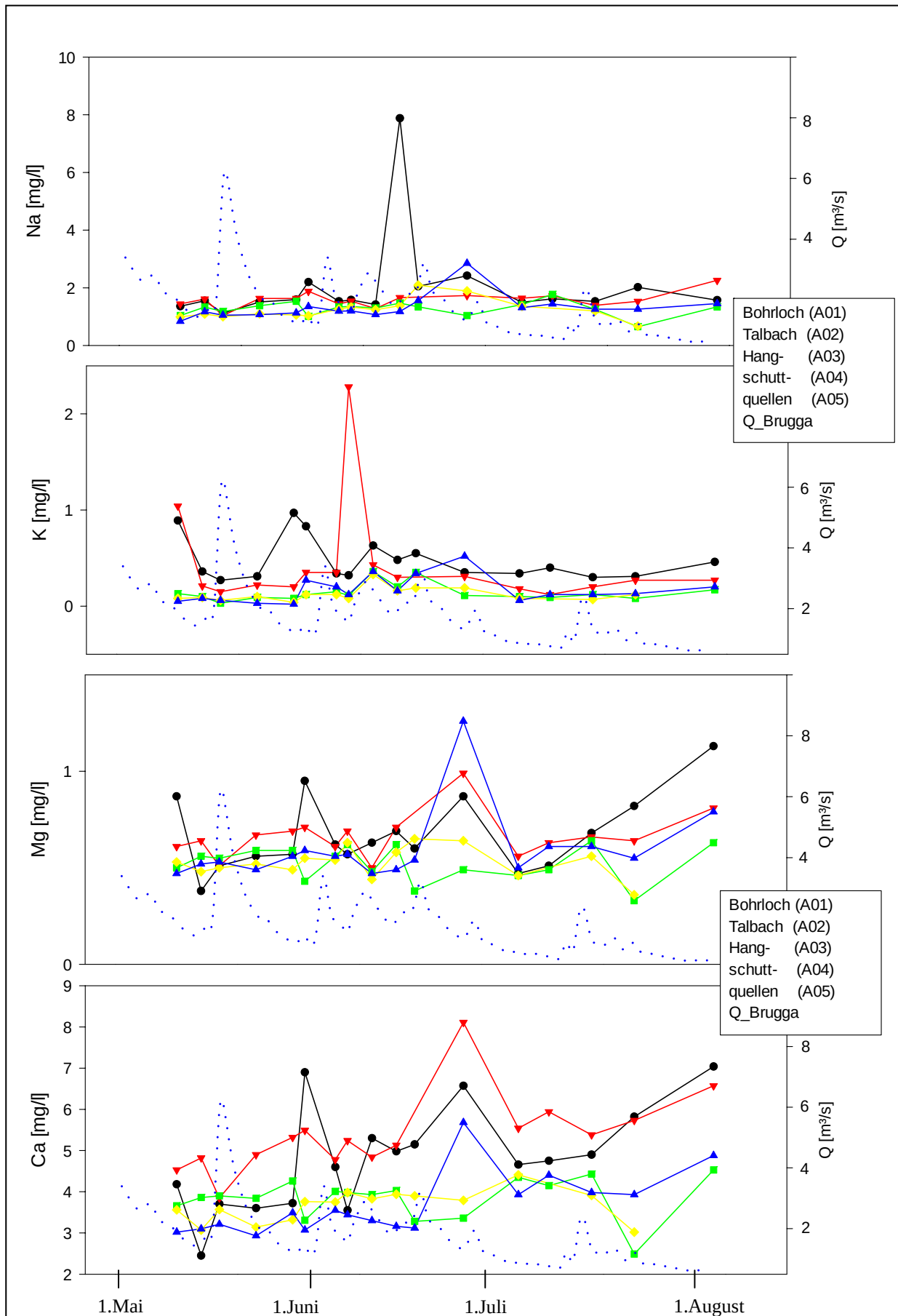


Abb.4.21: Ganglinien der Kationenkonzentrationen

Diskussion

Die Analysen von Silikat und ergänzend der Haptionen bestätigten insgesamt die Vermutung, dass in Bohrloch und Talbach Abflusskomponenten mit hydrochemischen Zusammensetzungen vorzufinden sind, die sich von den Hangschuttquellen deutlich unterscheiden, während diese untereinander sehr ähnlich sind. Die im Bohrloch gemessenen Silikatwerte sind in etwa gleich hoch wie die der Hangschuttquellen, folgen aber insbesondere bei Hochwassersituationen der Dynamik und den Verdünnungserscheinungen des Talbachs. Dies kann durch eine wechselseitige Beeinflussung des Talaquifers durch den Talbach und das von oberhalb einfließende Hangschuttwasser in Abhängigkeit der Abflussverhältnisse erklärt werden. Bei Hochwassersituationen scheinen dabei influente und bei niedrigem Wasserstand effluente Verhältnisse vorzuliegen, d.h. bei Hochwassersituationen wurde hauptsächlich vom Talbach in den Talaquifer gedrücktes Wasser beprobt, bei Niedrigwasser von weiter oben infiltriertes Hangwasser. Diese wechselseitige Beeinflussung zeigte sich nur bei den Silikatergebnissen, was durch das besondere Verhalten dieses Inhaltsstoffes erklärbar ist. Die vereinzelt stark erhöhten Chloridwerte im Bohrloch können nur durch Eintrag von Tierexkrementen erklärt werden. Vergleichbar hohe Konzentrationen sind in Niederschlägen nicht zu finden, ein anthropogener Eintrag durch Streusalz oder Dünger ist auszuschließen. In der Umgebung des Bohrlochs befinden sich die ausgedehnten Wiesenflächen der Napfmatte, die zwar während der Beprobung noch nicht beweidet wurden, aber sicher auch Futterplatz für äsendes Wild sind.

Die Abnahme der Nitratwerte im Verlauf der Untersuchung kann mit der verstärkten Pflanzenaufnahme erklärt werden. Die Vegetationsperiode begann im Untersuchungsgebiet, durch die Höhenlage bedingt, erst etwa mit Beginn der Probennahmen Anfang Mai. Nitrifikationsprozesse finden hauptsächlich in A_h -Horizonten statt, weswegen erhöhte Nitratkonzentrationen bei Niederschlagsereignissen im Sommer auf den Einfluss von oberflächennahem Abfluss hinweisen. Im Fall der vorgenommenen Routinebeprobung wurde jedoch hauptsächlich Basisabfluss und kein Ereigniswasser erfasst. Die unterschiedlichen Nitratwerte sind wohl auf die größere Auswaschung von Nitrat bei Waldböden im Vergleich mit Wiesen zu sehen. Dies würde v.a. die sehr niedrigen Werte der Bohrloch-Proben erklären, da der Standort der Bohrung ringsum von der dicht bewachsenen Napfmatte gebildet wird.

Sulfat wird unter anaeroben Verhältnissen reduziert und dann in Form von Sulfiden ausgefällt, so dass die sehr niedrigen Sulfatkonzentrationen im Bohrloch die wassergesättigten anaeroben Verhältnisse widerspiegeln. Die Variabilität der Werte zeigt nichts anderes als den schwankenden Grundwasserspiegel, der abwechselnd reduzierende (=Sulfid-ausfällende) und reoxidierende (=Sulfat-auswaschende) Verhältnisse schafft.

Die Ganglinien der Natriumkonzentrationen liegen für alle hier betrachteten Probennahmestellen auf einem sehr niedrigen Niveau mit ebenfalls sehr geringer Variabilität. Es lassen sich keine unterschiedlichen Reaktionen der verschiedenen Stellen beobachten. Der

deutlich erhöhte Wert der zehnten Probennahme im Bohrloch kann ähnlich wie bei Chlorid durch Eintrag von Tierexkrementen erklärt werden.

Bei den Kaliumkonzentrationen fällt die Bohrloch-Ganglinie durch erhöhte Werte auf. Kalium wird wie Nitrat stark von Pflanzen aufgenommen und unterliegt hoher Adsorption an Tonmineralen. Die erhöhten Werte könnten deshalb durch eine verminderte Adsorption im tonmineralärmeren kiesigen Grundwasserleiter erklärt werden, aber wiederum ist ein Eintrag über Exkremente denkbar.

Magnesium und Calcium werden sehr leicht ausgewaschen, was die hohen Variabilitäten bei diesen beiden Ionen erklärt. Die im Talbach erhöhten Calciumwerte zeigen lediglich die sehr geringen Calcium-Konzentrationen der Probennahmestellen am Tote Mann-Hang, während an anderen Hängen z.T. sehr viel höhere Konzentrationen gemessen wurden.

Fazit

Am Hangfuß des SSW-exponierten Hangs zwischen St.Wilhelmer Talbach und Tote Mann wurde die hydrochemische Zusammensetzung des Abflusses von drei Hangschuttquellen mit derjenigen des Talbachs und von Proben aus einem Bohrloch in unmittelbarer Nähe zum Talbach verglichen. Es sollte überprüft werden, ob evtl. eine tiefere Abflusskomponente erfassbar ist, die direkt unterirdisch in den Talbach entwässert bzw. ob eine signifikante Änderung der hydrochemischen Signatur der Abflusskomponente der Deckschichten auf dem Weg durch den Talaquifer eintritt. Die Ergebnisse der Analysen zeigen deutliche Unterschiede der hydrochemischen Zusammensetzungen sowie der Variabilitäten. Insgesamt kann jedoch lediglich von einer Modifikation der hydrochemischen Signatur der Deckschichtenabflüsse durch die Prozesse im Talaquifer gesprochen werden, nicht aber von einer eigenen bzw. neuen end-member-Komponente. Insbesondere die Anionen werden offensichtlich während der Passage des Talaquifers verändert: Die Chloridkonzentrationen wurden durch vermutlich organische Einträge enorm erhöht, während Sulfat durch Ausfällung und Nitrat durch Pflanzenaufnahme vermindert wurden. Die Ganglinie der Silikatkonzentrationen zeigt den wechselseitigen Einfluss von Talbach und Hangschuttwasser auf den Talaquifer: Bei Hochwasser liegen offenbar influente und bei Niedrigwasser effluente Verhältnisse vor.

4.1.5.2 Oberhang des „Tote Mann-Hangs“

Am Oberhang des SSW-exponierten Hangs zwischen St. Wilhelmer Talbach und Tote Mann – Gipfel konnten an einer Stelle auf ca. 1200 m Höhe vermeintlich unterschiedliche Tiefenkomponenten beprobt werden. Das Wasser wird an dieser Stelle durch einen tiefgründigen Weganschnitt von ca. 3 m Tiefe an mehreren Stellen zum Austritt gezwungen. Interessant ist dabei die unterschiedliche Austrittstiefe auf kurzer Distanz von einigen Metern (Probennahmestellen „04C“: oberflächennah und „04D“: tiefer). Auch etwas oberhalb des Wegs tritt Wasser in einer Kleinquelle aus, so dass dort eine besonders oberflächennahe Komponente vermutet wurde („04A“). Dieses Wasser durchsickert einen ausgedehnten, durchnässten Bereich, bevor es ebenfalls durch den Weganschnitt gut beprobt werden kann („04B“). Diese Probennahmestellen wurden mit einer Hochlagenquelle („04.1“) verglichen. Hochlagenquellen sind nach SCHWEGLER (1995) im Bruggaeinzugsgebiet Quellen mit hohen Silikatgehalten, leicht sauren pH-Werten und geringer Mineralisierung. Temperatur- und Schüttungsverhalten sind relativ ausgeglichen. Als Herkunftsräume werden die Verwitterungsdecken der Hochlagen angesehen. Ausführlich sind die Probennahmestellen in Kapitel 4.2.2 beschrieben.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Analysen sind in Abb. 4.22 und 4.23 zusammen mit dem Abfluss der Brugga dargestellt. Bei den Ergebnissen der Silikatwerte fällt auf, dass sich die Reaktion der Hochlagenquelle „04.1“ deutlich von der Reaktion der Hangschuttquellen unterscheiden lässt: Die gemessenen Werte sind fast durchweg 2,5 bis 3,0 mg/l höher und zudem ist eine etwas geringere Variabilität und Reaktion auf unterschiedliche Abflussverhältnisse zu beobachten. Die Ganglinien der Hangschutt-Kleinquellen 04A-04D zeigen ebenfalls relativ gleichförmige Silikatganglinien mit geringen Unterschieden in der Konzentration zwischen 2,0 und 2,3 mg/l. Auffällig sind die durchgehend etwas höheren Werte der Stelle „04A“ im Vergleich mit den anderen Kleinquellen, die Differenz beträgt dabei jedoch lediglich ca. 0,1 mg/l.

Bei Chlorid sind v.a. die insgesamt sehr niedrigen Konzentrationen bemerkenswert, die einen Wertebereich von 0 bis 0,7 mg/l umfassen. Deutlich sind die etwas höheren Werte der Hochlagenquelle „04.1“ zu erkennen.

Die Ganglinie der Nitratkonzentrationen zeigen eine schon öfters angesprochene Abnahme während der Messperiode von anfänglich 2 bis 3,5 mg/l zu < 1 mg/l am Ende der Messperiode. Dabei verhalten sich die Konzentrationen der Hochlagenquelle zunächst nicht anders als die der Kleinquellen, nehmen dann aber am Ende des Untersuchungszeitraums stark auf > 3 mg/l zu. Im Vergleich der Hangschutt-Kleinquellen untereinander können bei „04C“ und „04D“ durchgängig etwas geringere Konzentrationen festgestellt werden.

Die Ergebnisse der Sulfatanalysen verdeutlichen den Unterschied zwischen Hangschuttquellen einerseits und Hochlagenquelle andererseits: Die ermittelten Konzentrationen betragen für die Hochlagenquelle ca. 2 mg/l und für die Kleinquellen etwa das Doppelte. Interessant ist der Verlauf der Ganglinien der Hangschutt-Kleinquellen: Anfangs der Messperiode waren die Werte fast gleich hoch, während die Differenzen dann immer größer wurden, d.h. die Ganglinien sich immer weiter auffächern.

Anhand der Ganglinien der Natriumkonzentrationen lassen sich ebenfalls Unterschiede zwischen Hochlagenquelle und Hangschutt-Kleinquellen feststellen: Für Letztere betragen die Werte anfangs der Messperiode ca. 1 mg/l und nehmen dann sukzessive auf ca. 1,5 mg/l zu, während die Werte der Hochlagenquelle „04.1“ mit Schwankungen bei ca. 2 mg/l relativ konstant bleiben.

Bei Kalium, Magnesium und Calcium reagieren alle hier betrachteten Probennahmestellen sehr ähnlich, wobei die Kalium- und Magnesiumwerte mit < 1 mg/l auffallend niedrig sind. Die Calciumkonzentrationen umfassen den Bereich von 3 bis 5 mg/l. Alle drei Inhaltsstoffe zeigen für alle Probennahmestellen eine leicht zunehmende Tendenz im Verlauf des Untersuchungszeitraums.

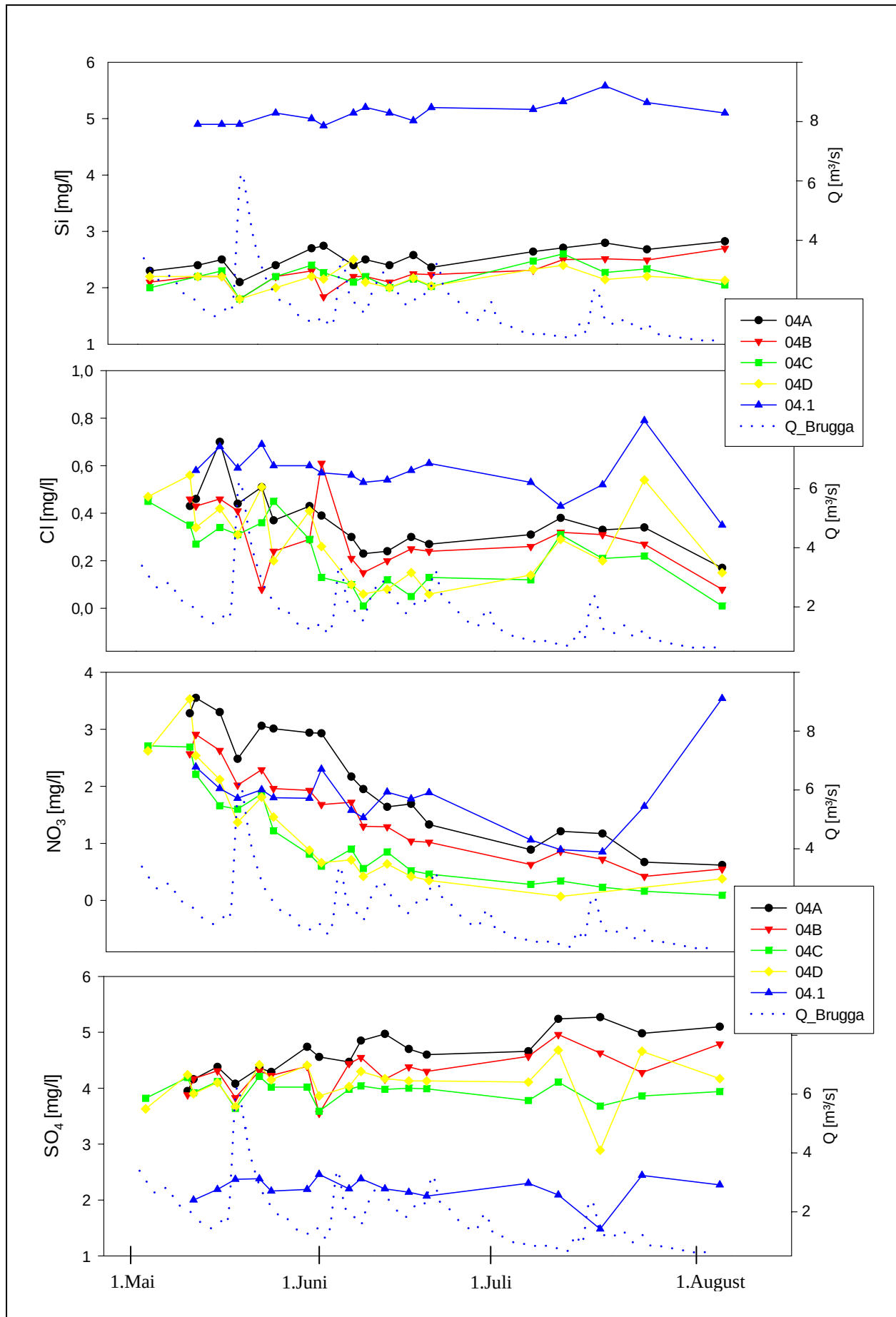


Abb. 4.22: Ganglinien der Silikat- und Anionenkonzentrationen

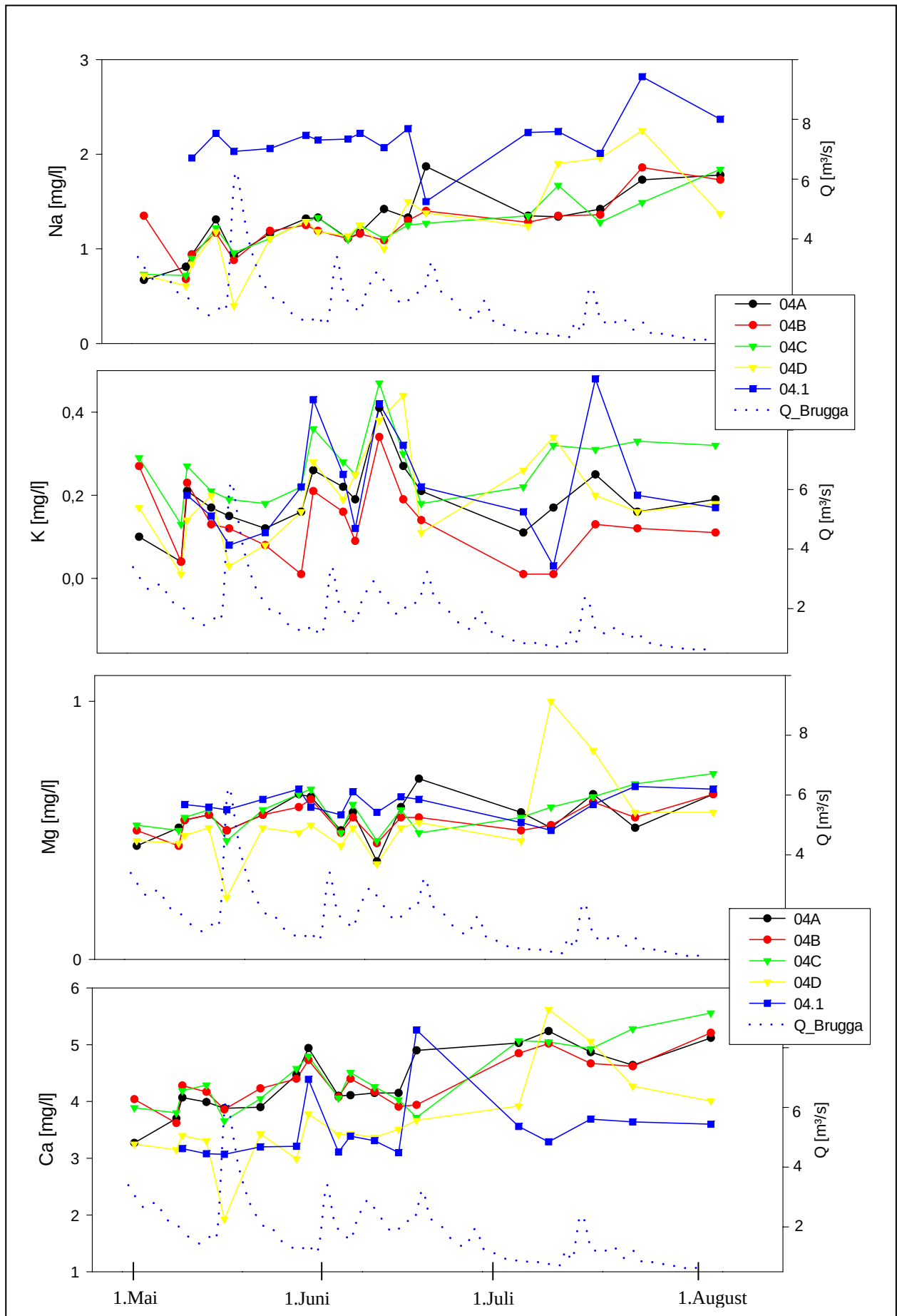


Abb.4.23: Ganglinien der Kationenkonzentrationen

Diskussion

Wie erwartet ergaben sich durch die Analyse der Silikat- und Hauptionen-Konzentrationen signifikante Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung dieser beiden Abflusskomponenten. Die Ergebnisse der Untersuchungen von SCHWEGLER (1995) wurden damit bestätigt, nämlich eine signifikant höhere Silikatkonzentration bei gleichzeitig ähnlich niedriger Gesamtmineralisation der Hochlagenquellen im Vergleich zu den Hangschuttabflüssen. Signifikante Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der verglichenen Hangschutt-Kleinquellen ergaben sich nicht, die vermeintlich unterschiedlichen Tiefenkomponenten unterschieden sich hinsichtlich der hydrochemischen Signatur nur wenig und anders als erwartet.

Mit etwa 5 mg/l sind die Silikatkonzentrationen der Quelle „04.1“ niedriger als der Wertebereich der allgemein im Brugga-EZG für Kluft- und Hochlagenwasser angenommen wird. UHLENBROOK (1998) benützt bei der Erstellung des TAC-Modells einen Mittelwert von 6 mg/l Si, SCHWEGLER (1995) ermittelte einen Bereich von 6 bis 7 mg/l Si für die Hochlagenquellen. Trotzdem kann die Quelle „04.1“ eindeutig dieser Quellgruppe zugeordnet werden. Dafür sprechen neben den hohen Silikatwerten auch die topographische Lage, die gleichmäßige Schüttung und Temperatur sowie die leicht sauren pH-Werte (siehe 4.2.2). Die Silikatwerte der mit dieser Quelle vergleichend gemessenen Hangschutt-Kleinquellen sind mit ca. 2 mg/l signifikant niedriger. Unterschiede in den Konzentrationen der einzelnen Probennahmestellen sind zwar durchgängig vorhanden, nehmen jedoch insgesamt maximale Differenzen von ca. 0,3 mg/l an.

Die sehr niedrigen Chloridwerte sind durch den geringen geogenen Eintrag erklärbar und stützen die These, dass Chlorid in weiten Teilen des Brugga-EZG hauptsächlich atmosphärisch eingetragen wird. Die vergleichsweise höheren Werte der Quelle „04.1“ bei geringerer Variabilität weisen auf einen größeren Speicher hin, der die stoßweise atmosphärisch eingetragenen Chloridwerte mittelt, während die Hangschuttquellen den jahreszeitlichen Schwankungen stärker unterworfen sind. Leider liegen aus dem Untersuchungszeitraum keine Daten der Niederschlagsbeschaffenheit vor, jedoch belegen mehrjährige Datenreihen des UBA (1994-98), gemessen in den Niederschlägen an der Wetterstation Schauinsland, einen Eintrag von Chlorid im Winterhalbjahr mit regelmäßigen Maximalwerten von > 4 mg/l. Aus diesen Daten ergeben sich im Mittel 0,3 mg/l Chlorid, wobei eine Einengung durch Verdunstung berücksichtigt werden muss. Ein anthropogener Eintrag durch Streusalz ist im Napfgebiet, in dem die Untersuchungen durchgeführt wurden auszuschließen.

Auf die abnehmende Tendenz der Nitratwerte wurde schon im vorigen Kapitel eingegangen. Die sprunghafte Erhöhung der Werte an der Quelle „04.1“ zum Ende des Untersuchungszeitraumes könnten auf die in dieser Höhenlage (ca. 1270 m) schon zu Ende gehende Vegetationsperiode zurückzuführen sein, so dass die Nitrataufnahme der Vegetation ebenfalls zurückging.

Die sehr viel niedrigeren Sulfatkonzentrationen, die in der Quelle „04.1“ gemessen wurden, weisen auf den gleichen Prozess der Sulfidausfällung bei reduzierenden Verhältnissen, wie im vorherigen Kapitel beschrieben hin, und zeigen, dass die Quelle direkt einen ständig wassergesättigten Aquifer entwässert, während die Hangschutt-Kleinquellen aus der ungesättigten Zone entwässern.

Die vergleichsweise hohen Natrium-Konzentrationen der Quelle „04.1“ müssen im gleichen Zusammenhang wie die erhöhten Chloridwerte gesehen werden: Der Eintrag erfolgt zwar bei Natrium auch geogen aus der Verwitterung von Plagioklasen, aber auch atmogen mit deutlichem Jahresgang, wobei Maximalwerte von > 2 mg/l regelmäßig im Winterhalbjahr erreicht werden.

Bei Kalium, Magnesium und Calcium konnte kein Unterschied in den Konzentrationen der fünf betrachteten Probennahmestellen festgestellt werden. Dieser geringe Gehalt an Alkali- und Erdalkalitionen der Hochlagenquellen wurde von SCHWEGLER (1995) ebenfalls festgestellt und mit einer Abreicherung an leicht verwitterbaren Mineralien der geologisch älteren Verwitterungsdecken der Hochlagen begründet.

Fazit

Am Oberhang des SSW-exponierten Hangs zwischen St. Wilhelmer Talbach und Tote Mann wurde die hydrochemische Zusammensetzung des Abflusses von verschiedenen Hangschutt-Kleinquellen untersucht. Aufgrund der unterschiedlichen Austrittstiefen des Wassers auf sehr kurzer Distanz wurde vermutet, dass an dieser Stelle unterschiedliche Tiefenkomponenten der Deckschichten vorliegen. Zum Vergleich konnte eine Hochlagenquelle beprobt werden. Die Ergebnisse der Silikat- und Haptionen-Analysen ergaben deutliche Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der Hochlagenquelle verglichen mit den Hangschutt-Kleinquellen. Dabei lagen v.a. wie erwartet die Silikatkonzentrationen der Hochlagenquelle sehr viel höher. Die Anionen Chlorid, Nitrat und Sulfat sowie Natrium ergaben ebenfalls typische Unterschiede dieser beiden Abflusskomponenten, während bei Kalium, Magnesium und Calcium keine signifikanten Unterschiede festzustellen waren. Die These der vermeintlich unterschiedlichen Tiefenkomponenten bei den Hangschutt-Kleinquellen konnte nicht bestätigt werden. Es ergaben sich zwar leichte Unterschiede der aufgenommenen Ganglinien, insgesamt jedoch wiesen die vier beprobten Stellen eine sehr ähnliche hydrochemische Signatur auf.

4.1.6 Vergleich verschiedener Deckschichtentypen

Aus den Arbeiten von FREY (1998) und vor allem DIDSZUN (2000) ergaben sich beim Vergleich zweier Quellen signifikante Unterschiede im Abflussverhalten und der Reaktion der hydrochemischen Zusammensetzung des Quellwassers auf Niederschlagsereignisse. Die Einzugsgebiete der Quellen konnten nach RUTENBERG (1998) unterschiedlichen Deckschichtentypen zugeordnet werden: Zum Einen dem „periglazialen Hangschutt mit Deckfolge“ und zum Anderen den „nicht weiter differenzierten Deckschichten“. Ausgehend von diesen Ergebnissen sollte im Rahmen dieser Arbeit u.a. überprüft werden, ob es möglich ist, den einzelnen Deckschichtentypen bzw. den einzelnen Schichtgliedern eine bestimmte hydrochemische Signatur zuzuweisen.

Aufgrund der in Kapitel 3 ausführlich beschriebenen, kleinräumig sehr uneinheitlichen Ausbildung der Deckschichten, war es nicht möglich, die jeweiligen Einzugsgebiete der beprobten Kleinquellen bestimmten Deckschichtentypen zuzuordnen. Hinzu kamen schlechte Aufschlussverhältnisse im Untersuchungsgebiet sowie die uneinheitlichen Nomenklaturen und Klassifikationskriterien bei der Deckschichtenansprache. Nur an sehr wenigen Stellen konnten den Kleinquellen eindeutig markant unterschiedliche und relativ einheitliche Einzugsgebiete zugewiesen werden.

Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse zweier Probennahmestellen im Bereich des Wittenbachkars vorgestellt. Dort ergab sich durch die besondere Morphologie des Kars mit versteilten Rück- und Seitenwänden, die den verflachten Karboden umgeben, die Möglichkeit zwei Probennahmestellen mit extrem unterschiedlichen Einzugsgebieten auf kurzer Distanz einzurichten. Die jeweiligen Einzugsgebiete konnten relativ eindeutig zum Einen („14“) einem flachgründigen blockschuttreichen Deckschichtentyp (Oberlage über geringmächtiger Hauptlage unterhalb einer Steinschutthalde) und zum Anderen („08“) einem tiefgründigen Deckschichtentyp (vermutlich Hauptlage über Basislage auf Zersatzzone) zugeordnet werden. Die Angaben zur Gründigkeit beruhen dabei auf Geländebeobachtungen in den jeweiligen EZG, die ausführlich in 4.2.2 dargestellt sind. Die Geländebeobachtungen konnten durch Temperaturmessungen und das sehr unterschiedliche Schüttungsverhalten der beiden Kleinquellen bestätigt werden (siehe 4.2.2). In Abb. 4.24 ist zur Verdeutlichung der Verhältnisse die maßstabsgetreue topographische Situation, sowie stark schematisiert und stark überhöht die Deckschichten- Situation dargestellt. Deutlich ist das mehrfach getreppte Kar mit der besonderen Entwässerungssituation zu erkennen. Für die Abflüsse handelt es sich dabei um eine direkte Hangabfolge: Der bei „14“ beprobte Abfluss versickert nach wenigen Metern und kann erst wieder am Hangfuß im Übergang zum verflachten Karboden an der Stelle „08“ beobachtet werden.

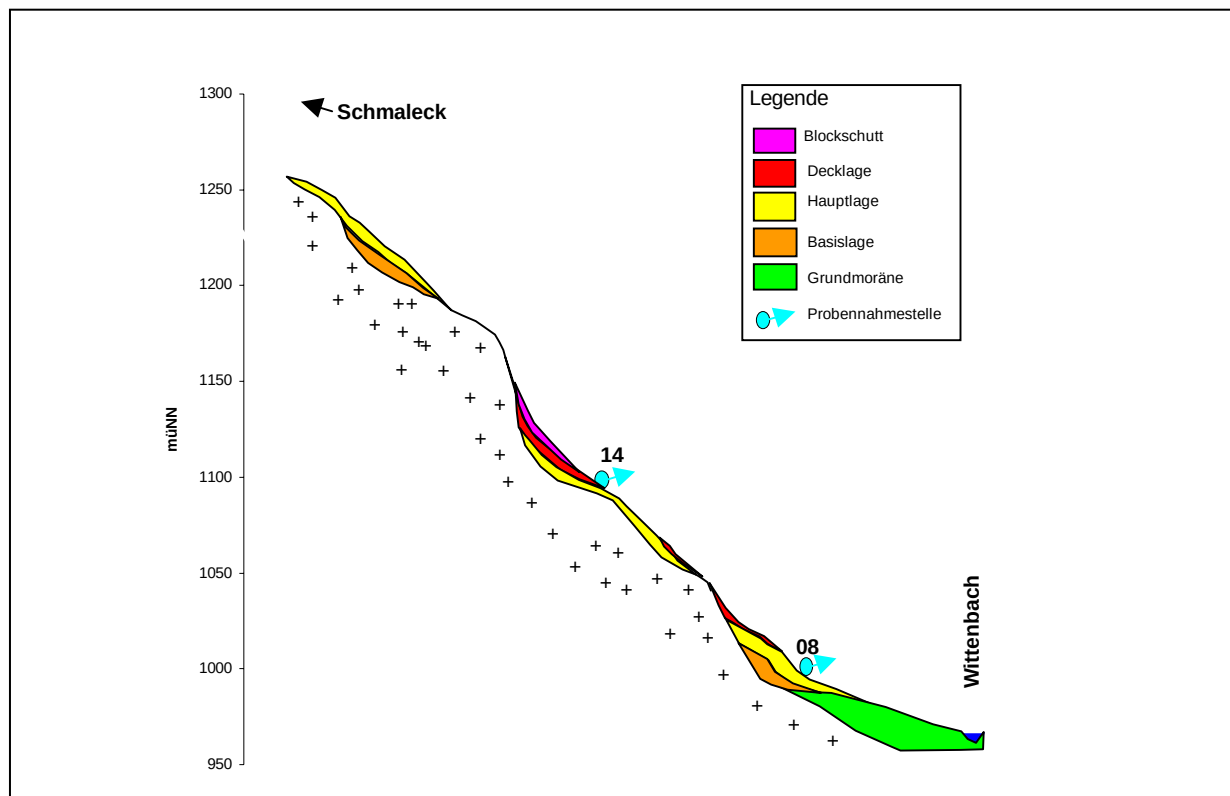


Abb. 4.24: Stark schematisierte und überhöhte Darstellung der Deckschichtensituation im Bereich zwischen Schmaleck und Wittenbach

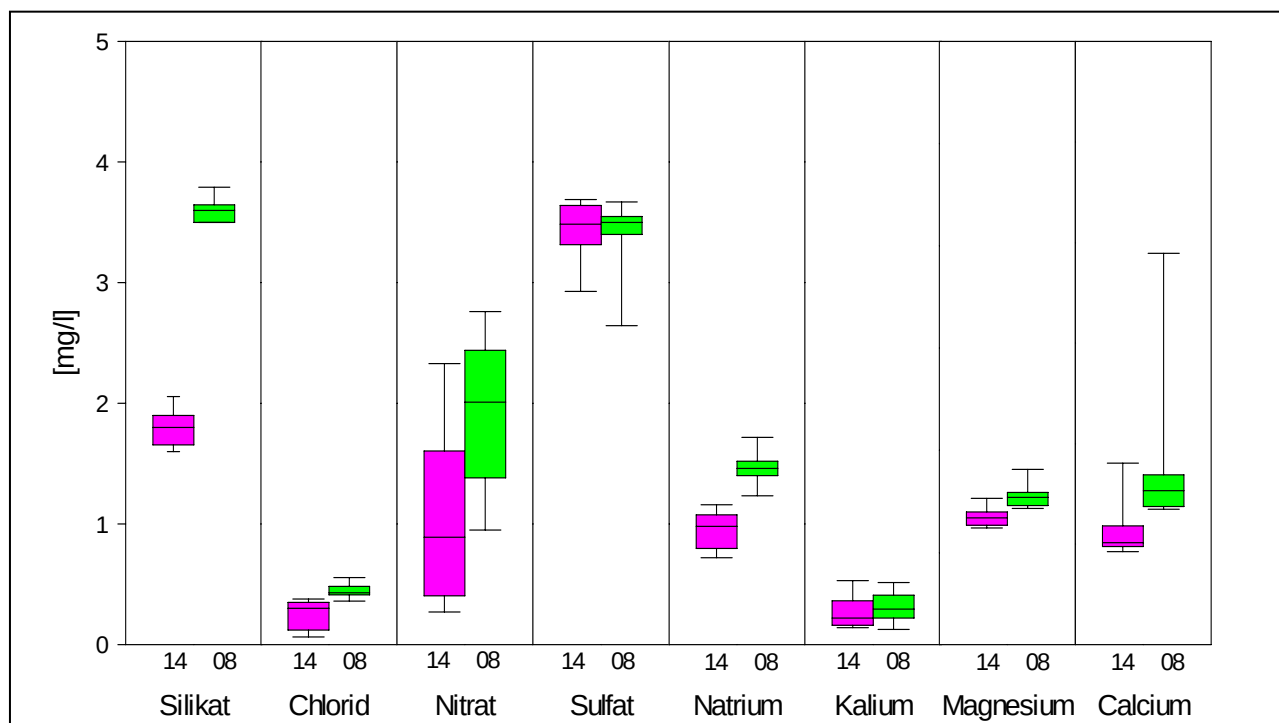


Abb.4.25: Vergleich der Konzentrationen und von den Probennahmestellen „08“ und „14“

Die Ergebnisse der beiden Probennahmestellen sind vergleichend in Form von „box plots“ in Abb. 4.25 dargestellt. Auf den ersten Blick werden die stark erhöhten Silikatwerte der Stelle „08“ (3.6 bis 3.8 mg/l) im Vergleich zu „14“ (1.8 bis 1.9 mg/l) deutlich. Für alle anderen Inhaltstoffe gilt, dass die Konzentrationen der Probennahmestelle „08“ durchgehend, aber nur wenig höher sind, als die Konzentrationen bei „14“. Ausnahmen sind dabei Kalium und Sulfat, die an beiden Kleinquellen sehr ähnliche Werte aufwiesen. Bei Nitrat fällt die hohe Variabilität auf, die allerdings bei beiden Probennahmestellen gleichermaßen auftritt. Beim Blick auf die Darstellung der Ergebnisse mittels Zeitreihen wird diese hohe Variabilität mit der schon mehrfach beschriebenen kontinuierlichen Abnahme von Nitrat während des Untersuchungszeitraums erklärlich.

Diskussion

Obwohl die Probennahmestellen „08“ und „14“ eine direkte Hangabfolge bilden, muss im Zusammenhang mit den Ergebnissen von 4.1.4 festgestellt werden, dass die deutlich höheren Silikatwerte der unteren Probennahmestelle „08“ nicht nur durch die unterschiedliche Hangposition bzw. EZG-Größe erklärt werden können. Vielmehr scheint die unterschiedliche Ausbildung der Deckschichten in den EZG der Kleinquellen ausschlaggebend zu sein. Durch Geländebeobachtungen und v.a. das Schüttungsverhalten wurde eine extrem unterschiedliche Tiefgründigkeit der Fließwege sowie der Aufenthaltszeiten festgestellt, die sich offenbar deutlich in der unterschiedlichen Silikatkonzentration ausdrückt. Dafür sprechen auch die Ergebnisse von 4.1.4, wo unterschiedlich hohe Silikatkonzentrationen hangspezifisch bei unterschiedlich tiefen Fließwegen an den beiden verglichenen Hängen beobachtet wurden. Allerdings ergaben sich dort vergleichbare Unterschiede in der Silikatkonzentration bei einer völlig anderen Deckschichtensituation. Im Vergleich der beiden unterschiedlichen Positionen kann also eine konkrete Zuweisung bestimmter Silikatkonzentrationen zu bestimmten Deckschichtentypen daraus nicht abgeleitet werden.

In Hinblick auf die Verwendung dieser Ergebnisse für Ganglinienseparationen muss einschränkend festgestellt werden, dass die bei „14“ gemessene chemische Zusammensetzung der Abflüsse nicht als end member-Konzentration angesehen werden kann: Die Abflüsse sind nicht direkt an das Gewässernetz angebunden, sondern versickern nach wenigen Metern, um dann erst wieder am Hangfuß mit einer veränderten hydrochemischen Signatur aufzutreten.

Die leicht erhöhten Konzentrationen der Hauptionen bei „08“ sind mit einer generell höheren Mineralisierung durch die längere Aufenthaltszeit erklärbar. Chlorid als nicht geogener Inhaltsstoff ist zwar ebenfalls mit erhöhten Konzentrationen in „08“ gemessen worden, hierfür könnten aber ähnliche Prozesse verantwortlich sein, wie sie in 4.1.4 zur Erklärung der höheren Chloridwerte in der Hochlagenquelle „04.1“ diskutiert wurden. Bei Sulfat und Kalium sind die Messwerte an beiden Probennahmestellen sehr ähnlich. Für Kalium lässt sich dies leicht mit der hohen Sorption an Tonminerale und Aufnahme durch Pflanzen erklären, während für Sulfat eigentlich höhere Konzentrationen bei tieferen Fließwegen an der Stelle

„08“ zu erwarten waren. Schon zum wiederholten Male konnte damit dieser z.B. von SCHWEGLER angenommene generelle Zusammenhang zwischen Sulfatwerten und Fließwegtiefe nicht bestätigt werden.

Fazit

Am NW-exponierten Seitenhang des Wittenbachkars konnten zwei Probennahmestellen mit sehr unterschiedlichen Einzugsgebieten bezüglich der dominierenden Deckschichtentypen auf kurzer Distanz eingerichtet werden. Damit sollte überprüft werden, ob es möglich ist, einzelnen Deckschichtentypen eine bestimmte hydrochemische Signatur bzw. eine bestimmte Silikatkonzentration zuzuweisen.

Die Ergebnisse ergaben tatsächlich signifikante Unterschiede der Silikatkonzentrationen, während sich die anderen Inhaltstoffe bei den zwei Messstellen nur wenig unterschieden. Die Ergebnisse bestätigten die Vermutung aus 4.1.4, dass tiefere, längere Fließwege in den Deckschichten höhere Silikatkonzentrationen bedingen. Eine konkrete Zuweisung bestimmter Silikatkonzentrationen zu einzelnen Deckschichtentypen lässt sich daraus nicht ableiten.

Einschränkend im Zusammenhang mit der Nutzung der Ergebnisse für Ganglinien-separationen wurde festgestellt, dass die Silikatkonzentration des Abflusses einer der beprobten Kleinquellen nach Wiederversickerung schon auf relativ kurzer Distanz enorm verändert wurde. Aus diesem Grund können nur Abflüsse, die direkt ins Gewässernetz entwässern.

Die im Vorfeld der Untersuchungen angenommene Eignung für Sulfat als herkunftsraumorientierten Tracer, der die Tiefe der Fließwege anzeigt, konnte zum wiederholten Male nicht bestätigt werden. Dagegen zeigte Chlorid schon zum wiederholten Male eine leichte Erhöhung der Konzentrationen bei Abflusskomponenten mit tiefgründigen Fließwegen. Die anderen Hauptionen wiesen durch generell erhöhte Konzentrationen auf eine stärkere Mineralisierung der Abflüsse hin, ohne jedoch wirklich signifikante Differenzen aufzuweisen.

4.1.7 Zeitliche und räumliche Variabilität der einzelnen Parameter

Für Ganglinienseparationen mit natürlichen hydrochemischen Tracern und N-A-Modellierungen mit dem am Institut für Hydrologie entwickelten TAC-Modell ist es notwendig, einzelnen Abflusskomponenten bzw. Herkunftsräumen bestimmte hydrochemische Signaturen zuzuweisen. Um die Güte der Ergebnisse bzw. deren Interpretation zu optimieren, ist eine genaue Kenntnis der räumlichen und zeitlichen Variabilitäten dieser hydrochemischen Signaturen unablässig. Aus diesem Grund werden die für den Herkunftsraum „periglaziale Deckschichten“ ermittelten Variabilitäten im vorliegenden Kapitel ausführlich dargestellt und diskutiert.

Ergebnisse

Die Ergebnisse aus der dreimonatigen Routinebeprobung für die räumlichen und zeitlichen Variabilitäten der einzelnen Inhaltsstoffe sind im Folgenden mittels box-plots dargestellt (siehe 4.1.3). Zu sehen sind jeweils im linken Teil der Abbildungen die zeitlichen Variabilitäten sämtlicher Probennahmestellen, die eindeutig als Deckschichtenabflüsse angesprochen werden konnten. Rechts abgesetzt, die räumliche und zeitliche Gesamtvariabilität der gemessenen Werte. Rot herausgehoben ist der Mittelwert, in den Abbildungen sind jeweils auch der Median (M), sowie die Standardabweichung (σ) der Gesamtvariabilität eingetragen.

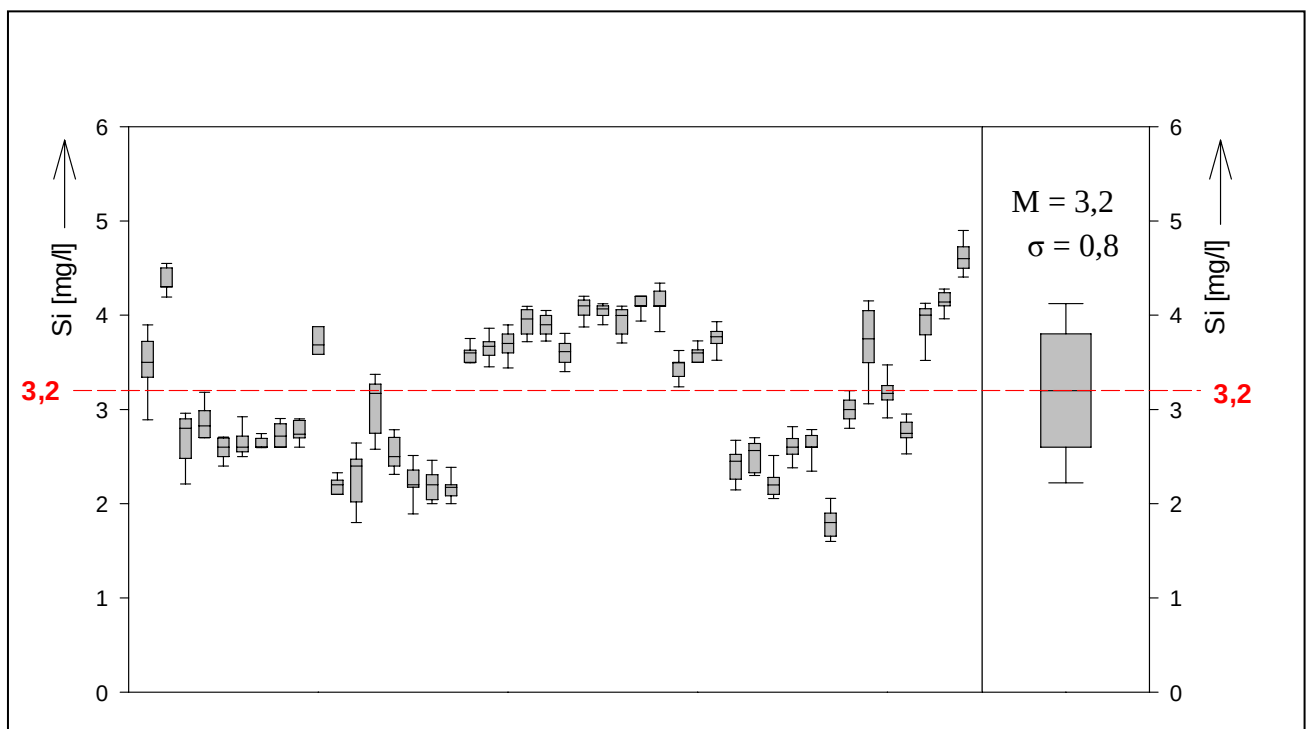


Abb. 4.26: Räumliche und zeitliche Variabilität der Silikatkonzentrationen aller untersuchten Deckschichtenabflüsse

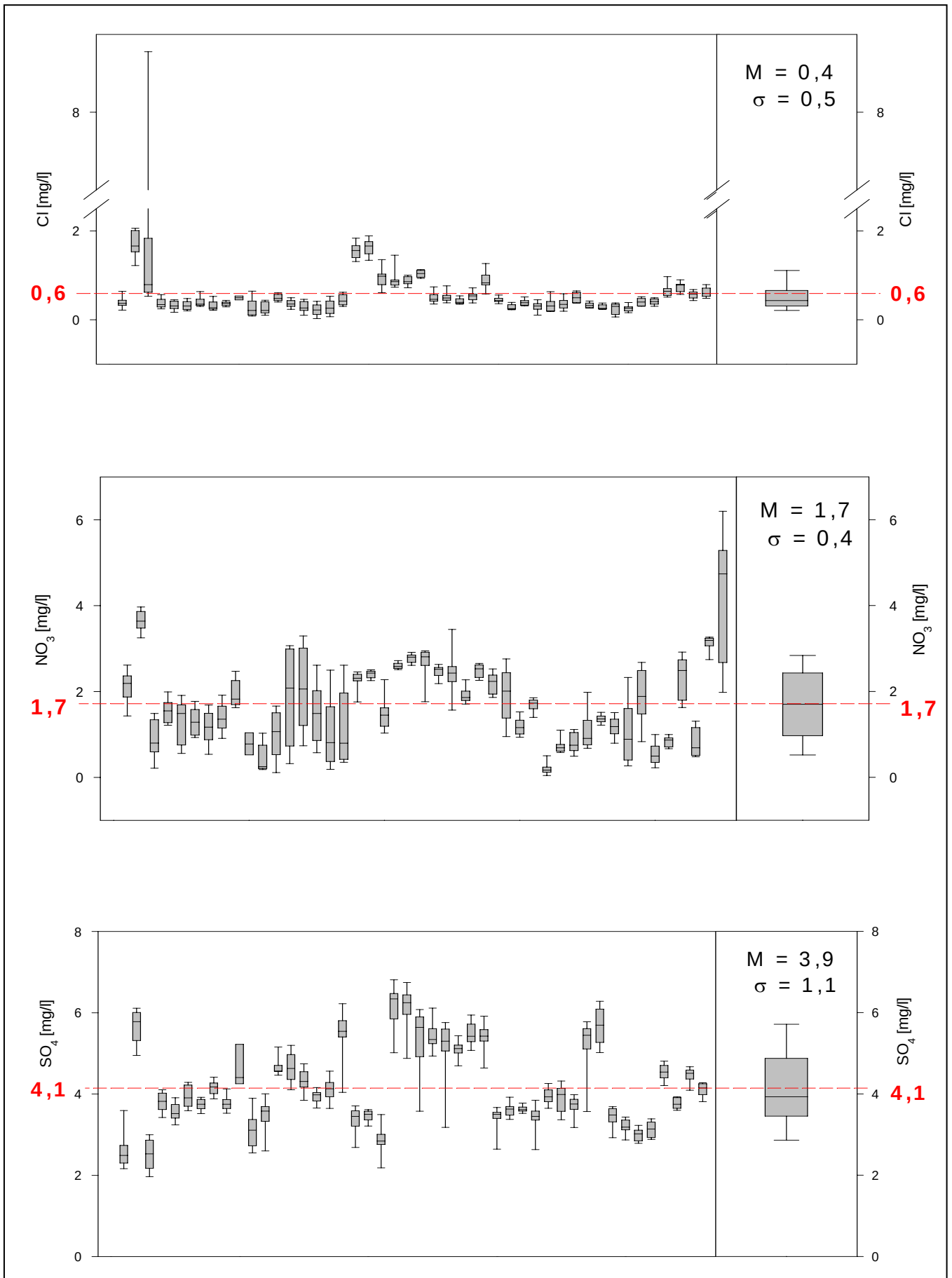


Abb. 4.27: Räumliche und zeitliche Variabilität der Anionenkonzentrationen

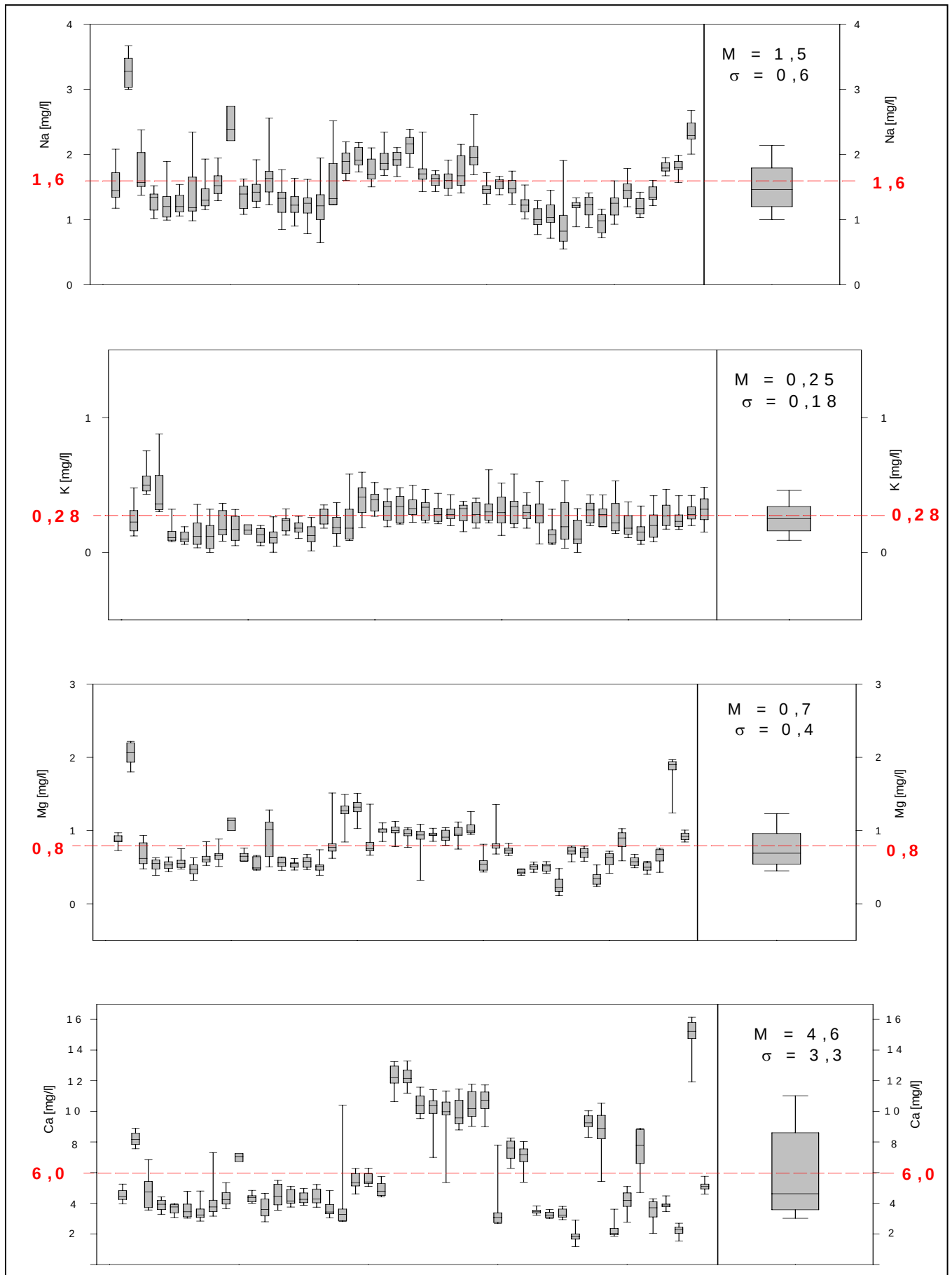


Abb. 4.28: Räumliche und zeitliche Variabilität der Kationenkonzentrationen

Für Silikat ergaben sich für die räumlich und zeitlich arithmetisch gemittelten Werte 3,2 mg/l. Die Variabilitäten sind räumlich gesehen recht groß mit einer Schwankungsbreite zwischen 2 und 4,5 mg/l. Dabei sind Abweichungen vom Mittel nach unten wie oben in gleicher Weise ausgeprägt. Dies zeigt die Übereinstimmung von Mittelwert und Median. Gegenüber den räumlichen sind die zeitlichen Variabilitäten mit wenigen Ausnahmen sehr klein und überschreiten für die meisten Probennahmestellen 0,5 mg/l nicht.

Für Chlorid wurde ein Mittelwert von 0,6 mg/l errechnet. Die meisten der untersuchten Deckschichtenabflüsse wiesen Konzentrationen von ca. 0,4 mg/l, mit sehr geringen zeitlichen Variabilitäten von ca. 0,2 mg/l auf. Nur wenige Probennahmestellen zeigten einzelne extreme „Ausreißer“ nach oben und sehr selten wurden durchgängig erhöhte Werte gemessen. Diese Situation kommt auch durch die Differenz von Median ($M = 0,4 \text{ mg/l}$) und Mittelwert zum Ausdruck.

Bei den Ergebnissen für Nitrat umfassen die Konzentrationen in etwa den Wertebereich zwischen 0 und 4 mg/l bei einem Mittelwert von 1,7 mg/l. Auffällig ist die große zeitliche Variabilität bei etwa der Hälfte der Probennahmestellen, während andererseits viele Stellen nur sehr geringe Schwankungen während des Untersuchungszeitraums zeigten.

Die Analyse der Variabilitäten bei Sulfat ergaben einen Mittelwert von 4,1 mg/l, bei einer generellen Schwankungsbreite der einzelnen Probennahmestellen zwischen 2,5 und 6 mg/l. Für viele Probennahmestellen sind große zeitliche Variabilitäten zu sehen, die v.a. durch einzelne signifikant nach unten abweichende Messwerte entstanden.

Bei den Kationen Natrium, Kalium und Magnesium sind generell nur sehr geringe räumliche, als auch zeitliche Variabilitäten zu beobachten. Natrium weist bei einem Mittel von 1,6 mg/l die größte Schwankungsbreite zwischen 1 und 3 mg/l auf. Die zeitlichen Schwankungen sind bei allen Probennahmestellen sehr ähnlich und betragen zwischen 0,5 und 1 mg/l. Die mit einem Mittelwert von 0,28 mg/l sehr niedrigen Kaliumkonzentrationen sind in extrem gleichartiger Ausprägung an allen Probennahmestellen vorzufinden. Die zeitlichen Schwankungen betragen etwa 0,1 bis 0,4 mg/l. Für Magnesium zeigten sich an den meisten Probennahmestellen sehr kleine zeitliche Schwankungen von 0,1 bis 0,2 mg/l. Der Mittelwert wurde zu 0,8 mg/l berechnet, die räumliche Variabilität der Messwerte lag zwischen 0,6 und 1,4 mg/l.

Mit einem Mittelwert von 6,0 mg/l und einer Schwankungsbreite zwischen 2 und 15 mg/l sind die räumlichen Unterschiede der Calciumkonzentrationen zwischen den Probennahmestellen sehr ausgeprägt. Die zeitlichen Schwankungen mit ca. 1 bis 2 mg/l sind dagegen als recht gering einzustufen, wobei häufig größere Ausreißer zu beobachten sind.

Diskussion

Aufgrund der besonderen Eignung und Bedeutung von gelöstem Silikat als natürlichem Tracer wird auch hier in besonderem Maße auf diesen Wasserinhaltsstoff eingegangen. Die Ergebnisse in Bezug auf die Variabilität der Konzentrationen ergaben für Silikat eine ausgeprägte räumliche Variabilität, wobei 90% aller Messwerte zwischen 2,2 und 4,2 mg/l betragen. Dies bringt deutlich die Heterogenität der Deckschichten und der hydrochemischen Signatur ihrer Abflüsse zum Ausdruck. Die Übereinstimmung von Mittelwert und Median zeigt, dass Abweichungen vom Mittel nach unten wie oben in gleicher Weise ausgeprägt sind. Das deutet darauf hin, dass mit den ausgewählten Probennahmestellen eine repräsentative Auswahl getroffen wurde, so dass für die Deckschichtenabflüsse insgesamt ein Mittelwert von 3,2 mg/l angenommen werden kann. Einschränkend dazu wurde klar, dass die Deckschichtenabflüsse z.T. auch relativ hohe Werte annehmen, so dass die Differenzen der Silikatwerte innerhalb des Herkunftsraum „Deckschichten“ z.T. größer sind als die Differenzen zu anderen Herkunftsräumen, wie z.B. „Verwitterungsdecken der Hochlagen“. Gegenüber den räumlichen, sind die zeitlichen Variabilitäten mit wenigen Ausnahmen sehr klein. Dies heißt, dass unterschiedliche Abflussverhältnisse die Silikatkonzentrationen nur wenig beeinflussen und die Werte als zeitlich konstant angesehen werden können, was auch eindrücklich in 4.1.2 dargelegt wurde.

Neben Silikat wird z.T. auch Chlorid als Tracer zur Ganglinienseparation benutzt. Diesbezüglich muss einschränkend auf die sehr niedrigen Konzentrationen hingewiesen werden, die sich im Schwankungsbereich der Analysefehler befinden. Wie die vereinzelt stark erhöhten Werte zeigen, kann die generell sehr niedrige Konzentration extrem und stoßweise durch organische Einträge erhöht werden, die dem ansonsten konservativen Verhalten von Chlorid entgegensprechen.

Die großen Unterschiede der beobachteten zeitlichen Variabilitäten für Nitrat können beim Vergleich mit den Zeitreihendarstellungen durch die stark abnehmende Tendenz der Nitratwerte infolge Pflanzenaufnahme an vielen Stellen während der Messperiode erklärt werden.

Die recht großen Variabilitäten der Sulfatwerte in räumlicher, als auch zeitlicher Beziehung sind v.a. durch kleinräumige Substrat- und Vegetationsbedingte Faktoren beeinflusst (siehe 4.1.4 u. 4.1.5). Es lässt sich kein einheitliches „Deckschichtenverhalten“ beobachten.

Kalium, Magnesium und Natrium wiesen nur geringe Variabilitäten in räumlicher und zeitlicher Hinsicht auf. Die ermittelten Mittelwerte könnten also in dieser Hinsicht sehr gut zur hydrochemischen Charakterisierung der Abflüsse verwendet werden. Bei vergleichenden Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde jedoch deutlich, dass diese Kationen keine signifikanten Unterschiede zu anderen Abflusskomponenten aufweisen, d.h. keine eigene hydrochemische Signatur charakterisieren.

Die Calciumergebnisse zeigten räumlich und teilweise auch zeitlich sehr variable Werte, so dass davon ausgegangen werden muss, dass die ermittelten Werte Hang- bzw. quellspezifisch ausgeprägt sind und der errechnete Mittelwert nicht auf Deckschichtenabflüsse allgemein übertragen werden darf.

Fazit

Die räumlichen und zeitlichen Variabilitäten der hydrochemischen Signaturen für den Herkunftsraum „periglaziale Deckschichten“ wurden für sämtliche beprobten Abflüsse, die diesem Herkunftsraum eindeutig zugeordnet werden konnten, ausführlich dargestellt und diskutiert. Dabei ergab sich für gelöstes Silikat, den wichtigsten hydrochemischen Tracer, ein fundiert belegter, repräsentativer Mittelwert von 3,2 mg/l. Einschränkend für die Benutzung dieses Werts wurde die gefundene große räumliche Variabilität angeführt, so dass die Grundvoraussetzung für Ganglinienseparationen, nämlich die signifikante Unterscheidbarkeit der Abflusskomponenten, teilweise nicht gegeben ist! Zeitlich hingegen waren die Variabilitäten so gering, dass von quasi konstanten Silikat-Konzentrationen der einzelnen Deckschichtenabflüsse ausgegangen werden kann.

Bei den Hauptionen wurde für Nitrat, Sulfat und Natrium ein räumlich und zeitlich sehr variables Verhalten beobachtet, so dass nicht von einer einheitlichen hydrochemischen Signatur der einzelnen Probennahmestellen und auch der Deckschichtenabflüsse insgesamt bezüglich dieser Inhaltstoffe ausgegangen werden kann.

Calcium hingegen zeigte ein räumlich sehr variables, zeitlich aber relativ wenig variables Verhalten, so dass von einer einheitlichen hydrochemischen Signatur der einzelnen Probennahmestellen, aber nicht der Deckschichtenabflüsse insgesamt bezüglich dieses Inhaltstoffes ausgegangen werden kann.

Für Chlorid, Kalium und Magnesium ergaben sich räumlich und zeitlich sehr wenig ausgeprägte Variabilitäten, allerdings in einem sehr niedrigen Wertebereich nahe der Messgenauigkeit. Diese Inhaltsstoffe verhalten sich auch für andere Abflusskomponenten in sehr ähnlicher Weise.

4.1.8 Multivariate Clusteranalyse

Die vorliegende große Zahl von Wasseranalysen war in ihrer Gesamtheit unübersichtlich und bedurfte einer zusätzlichen Zusammenfassung und Wertung. Um herauszufinden, ob bestimmte Faktoren wie Hangposition oder Deckschichtentyp zu hydrochemischer Ähnlichkeit der jeweiligen Probennahmestellen führt, wurde deshalb eine hierarchische Clusteranalyse zur objektiven Gruppierung durchgeführt. Dabei wurden die einzelnen Probennahmestellen anhand der Ähnlichkeit der hydrochemischen Parameter zu Gruppen zusammengefasst.

Ergebnisse

Für die Ermittlung der Cluster wurden nur die beprobten Kleinquellen benutzt. Die Analysen parallel beprobter Gerinne wurden ausgeschlossen. In einem ersten Durchlauf wurde das Single-Linkage-Verfahren verwendet, um Ausreißer identifizieren und ausschließen zu können. Dazu wurde im Ergebnis-Dendrogramm nach der Stelle gesucht, an der das verwendete Distanzmaß, die quadrierte euklidische Distanz, sprunghaft ansteigt. Dabei ergaben sich für die Probennahmestellen „A01“, „A06“, „Zä“, „04.0“, „04.1“, „Zä“, „19“, „20“ und „21“ deutlich erhöhte Distanzmaße, während alle anderen Kleinquellen ein gemeinsames Cluster bei einem Distanzmaß von 6 bildeten. Diese Probennahmestellen wurden für den zweiten Durchlauf ausgeschlossen, bei dem das Ward - Verfahren zur eigentlichen Gruppenbildung verwendet wurde. Das Ergebnis wurde wiederum mit einem Dendrogramm visualisiert, das in Abb. 4.29 dargestellt ist.

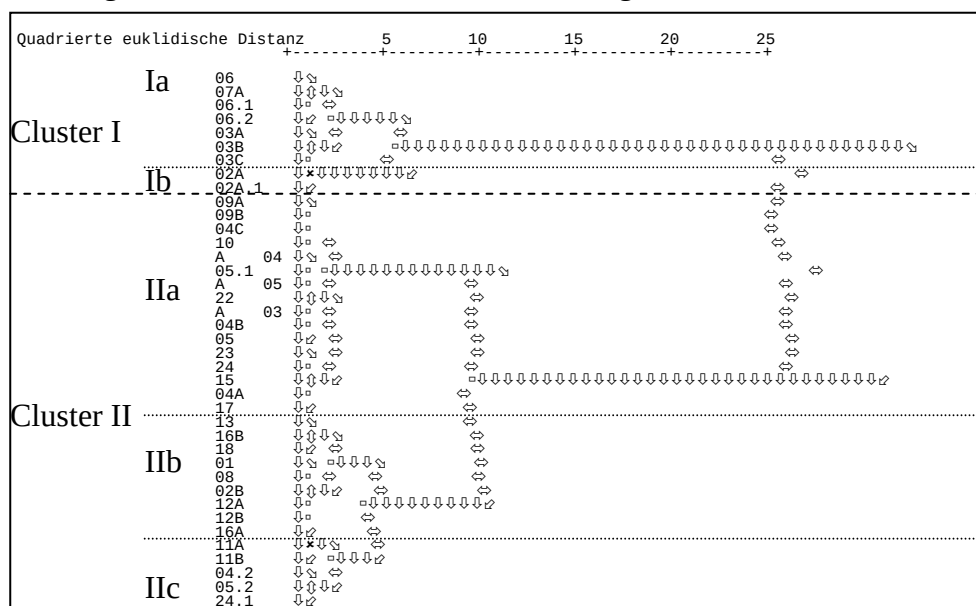


Abb. 4.29: Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse im Dendrogramm
Aus dem Ergebnis der Clusteranalyse lassen sich zwei Hauptcluster erkennen, die in zwei bzw. drei Untergruppen unterteilt werden können. Dabei wird das erste Cluster ausschließlich

von Probennahmestellen des Schmaleckhangfußes gebildet. Die anderen Gruppen lassen sich nicht direkt bestimmten Hängen oder Teilhängen zuordnen., wobei allerdings parallel beprobte Stellen, die nur geringen räumlichen Abstand aufweisen, meist innerhalb einer Gruppe zu finden sind. (z.B. die in Kapitel 4.1.5.1 beschriebenen Probennahmestellen A03, A04, A05). Zur Überprüfung der Gruppenbildung wurden die Mittelwerte in meq% für jede Wasserprobe jeweils nach Clustern getrennt in ein Piperdiagramm (Abb. 4.30) eingetragen.

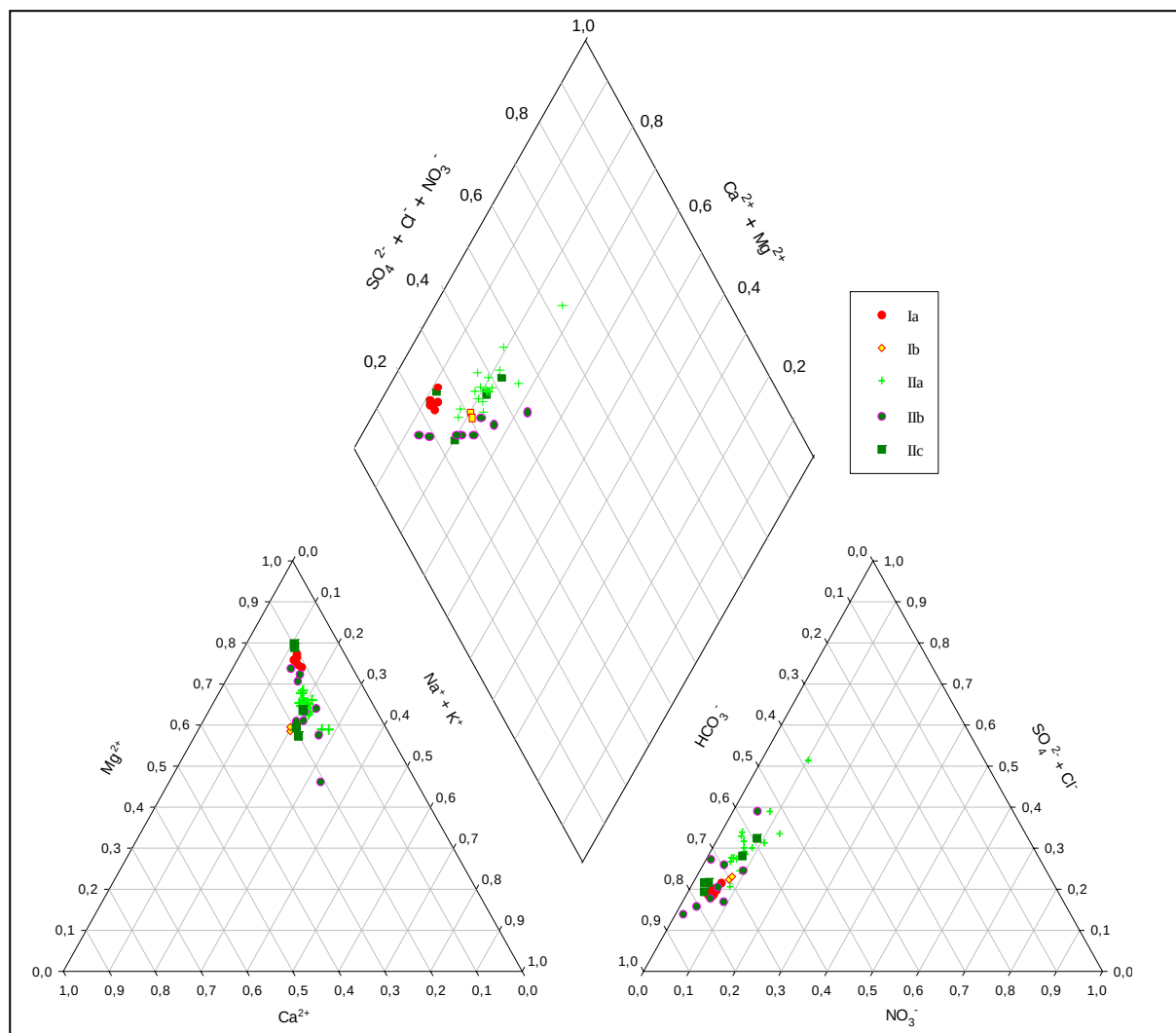


Abb. 4.30: Verteilung der Cluster aus der hierarchischen Clusteranalyse im Piper-Diagramm, Angaben in meq - Anteilen

Alle untersuchten Wässer gehören nach der Klassifizierung von FURTAK & LANGGUTH (1967) zu den überwiegend hydrogencarbonatischen, erdalkalischen Wässern mit z.T. leicht erhöhtem Alkaliegehalt. Generell fällt die geringe Streuung der Probennahmestellen insgesamt auf. Daneben setzen sich auch die ermittelten Cluster nicht deutlich voneinander ab.

Neben den Hauptionen, die im Piper-Diagramm dargestellt werden, wurde auch Silikat als Parameter zur Clusteranalyse verwendet. Eine Gewichtung dieses Parameters hatte die gleiche Gruppenbildung zur Folge. Zur weiteren Überprüfung der Gruppenbildung wurden deshalb die Mittelwerte der einzelnen Probennahmestellen in einem kombinierten Anionen-Kationen-Silikat-Diagramm eingetragen. (Abb. 4.31).

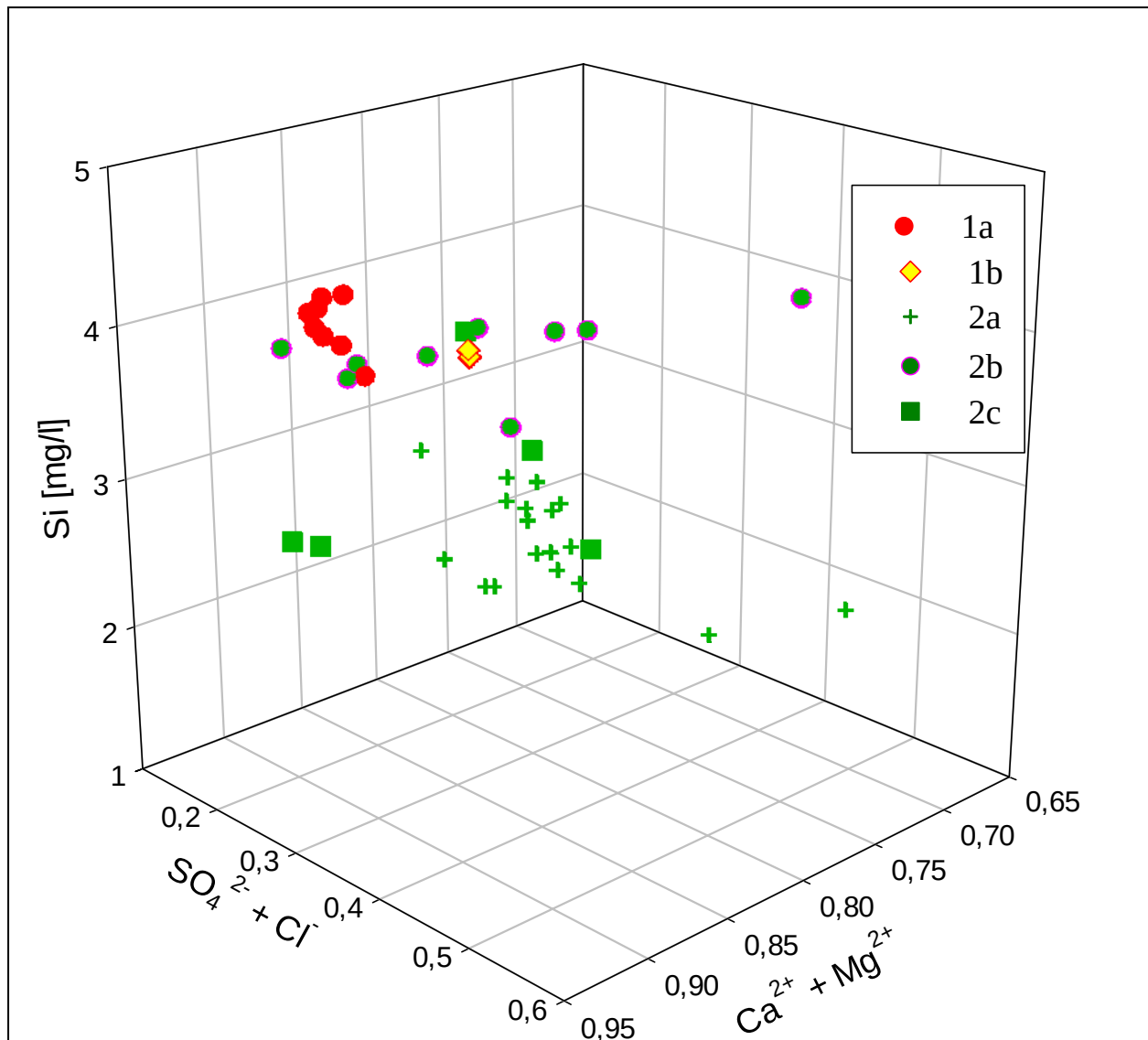


Abb. 4.31: Darstellung der Cluster aus der hierarchischen Clusteranalyse in einem kombinierten Anionen – Kationen – Silikat – Diagramm, Angaben der Hauptionen in meq-Anteilen, von Silikat in mg/l

In diesem Diagramm sind die einzelnen Cluster deutlicher voneinander abgesetzt, allerdings überschneiden sich die einzelnen Gruppen immer noch wesentlich. Auffällig ist v.a. die große Streuung der Silikatwerte innerhalb der Untergruppe IIa, die in der Clusteranalyse als sehr homogene Gruppe aufgetreten war.

Diskussion

In einem ersten Durchgang wurde die Clusteranalyse mittels „single-linkage-Verfahren“ durchgeführt, um einzelne Ausreißer erkennen zu können. Dabei zeigten sich im Dendrogramm, dass die Probennahmestellen „A01“, „A06“, „Zä“, „04.0“, „04.1“, „Zä“, „19“, „20“ und „21“ deutlich erhöhte Distanzmaße aufwiesen, während alle anderen Kleinquellen ein gemeinsames Cluster bei einem Distanzmaß von 6 bildeten. Diese Probennahmestellen waren schon zuvor als Sonderfälle angesprochen worden: Die Stellen „04.0“ und „04.1“ als Hochlagenquellen, „A01“ u. „A06“ sind Bohrlochbeprobungen, „20“ vermutlich Kluftwasser, „19“ eine stark schüttende Quelle mit nicht eindeutig feststellbarem EZG und die Zängerlehofquelle „Zä“ eine räumlich sehr weit abgesetzte Probennahmestelle. Die Clusteranalyse bestätigte somit, dass die hydrochemischen Signaturen dieser Probennahmestellen von denen der anderen beprobten Stellen signifikant abweichen. Das wiederum heißt, dass die Deckschichtenabflüsse recht sicher als solche angesprochen werden konnten und in sich eine Einheit bezüglich der hydrochemischen Signatur bilden.

Die als Dendrogramm veranschaulichten Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse ließen eine klare Einteilung der Probennahmestellen in zwei übergeordnete und insgesamt fünf Untergruppen zu. Dabei fiel gleich auf, dass die erste der übergeordneten Gruppen einer klaren Lokalität zugeordnet werden konnte, während dies selbst bei den Untergruppen des zweiten Clusters nicht möglich war. Insgesamt ergaben sich keine Zuordnungsmöglichkeiten der gebildeten Cluster zu bestimmten Hangpositionen, Deckschichtentypen, Expositionen o.ä..

Die Gruppenbildung wurde durch Eintragen der einzelnen Cluster in ein Piper-Diagramm und zusätzlich in ein kombiniertes Anionen – Kationen – Silikat – Diagramm überprüft. Dabei ergaben sich deutliche Überschneidungsbereiche der einzelnen Gruppen. Besonders durch die Darstellung im Piper-Diagramm wurde deutlich, dass die Wasseranalysen insgesamt nur wenig streuen und sich recht ähnlich sind. Durch die zusätzliche Auftragung gegen die Silikatkonzentration ergab sich eine deutlichere Abgrenzung der Gruppen gegeneinander, allerdings waren wiederum deutliche Überschneidungsbereiche festzustellen. Daraus ergibt sich, dass die clusteranalytisch ermittelten Gruppen nicht eindeutig bestätigt werden konnten. Vielmehr streuen die Wasseranalysen der beprobten Stellen insgesamt sehr wenig und gehören alle dem mehr oder weniger gleichen Wassertyp an.

Fazit

Um herauszufinden, ob bestimmte Faktoren wie Hangposition oder Deckschichtentyp zu ähnlichen hydrochemischen Signaturen führen, wurde eine hierarchische Clusteranalyse durchgeführt. Dabei wurden die einzelnen Probennahmestellen anhand der Ähnlichkeit der hydrochemischen Parameter zu Gruppen zusammengefasst.

Zur Identifizierung von „Ausreißern“ wurde in einem ersten Durchlauf das „single-linkage-Verfahren“ verwendet. Dabei zeigten sich im Dendrogramm einige Probennahmestellen mit deutlich erhöhten Distanzmaßen, während alle anderen Kleinquellen ein gemeinsames Cluster bei einem sehr kleinen Distanzmaß bildeten. Diese Probennahmestellen waren schon zuvor als Sonderfälle wie z.B. Hochlagenquellen angesprochen worden. Die Clusteranalyse bestätigte somit signifikante Abweichungen der hydrochemischen Signaturen dieser Probennahmestellen von denen der Deckschichtenabflüsse, die in sich eine deutlich ansprechbare Einheit bilden.

In einem zweiten Durchlauf mit dem „Ward-Verfahren“ ergaben sich deutlich zwei übergeordnete Cluster und insgesamt fünf Untergruppen. Es ergaben sich jedoch keine Zuordnungsmöglichkeiten der gebildeten Cluster zu bestimmten Hangpositionen, Deckschichtentypen, Expositionen o.ä..

Bei einer Überprüfung der clusteranalytisch gebildeten Gruppen mit Hilfe verschiedener Diagramme konnte die Gruppenbildung nicht bestätigt werden. Die einzelnen Gruppen ließen sich nicht deutlich voneinander abgrenzen, sondern zeigten große Überschneidungsbereiche. Die hydrochemischen Zusammensetzungen der hier untersuchten Abflüsse streuen nur gering und sind sich sehr ähnlich.

5.2 Ereignisbeprobung

Im Verlauf der dreimonatigen Routinebeprobung wurden zwar unterschiedliche Gebietszustände erfasst, letztendlich wurde aber immer wieder der Basisabfluss der Deckschichten beprobt. Über die kurzzeitige Variabilität der chemischen Zusammensetzung, d.h. die Reaktion der hydrochemischen Signatur der untersuchten Abflusskomponente auf Niederschlagsereignisse konnten damit keine Aussagen getroffen werden. Aus diesem Grund wurde Anfang August 2001 eine zeitlich hochaufgelöste Beprobung während eines Niederschlagsereignisses an repräsentativen Probennahmestellen durchgeführt. Genaue Ausführungen zur Lage der Probennahmestellen, sowie zum Ablauf der Beprobung finden sich in Kapitel 3.2.2 bzw. 3.3.

4.2.1 Verlauf von Niederschlag und Abfluss

Wie schon in 4.1.1 ausführlich beschrieben, konnten der Verlauf von Niederschlag und Abfluss von bestehenden Messeinrichtungen des Institut für Hydrologie übernommen werden. Nochmals sei darauf hingewiesen, dass die Werte nicht quantitativ, aber sehr wohl qualitativ als sehr gut übertragbar betrachtet werden können. Die Zeitreihen des Niederschlags an der Klimastation Katzensteig und des Abflusses der Brugga am Pegel Oberried während der Ereignisbeprobung sind in Abb. 4.32 dargestellt. Zum Vergleich sind der langjährige mittlere Abfluss (MQ) und der langjährige mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) eingezeichnet.

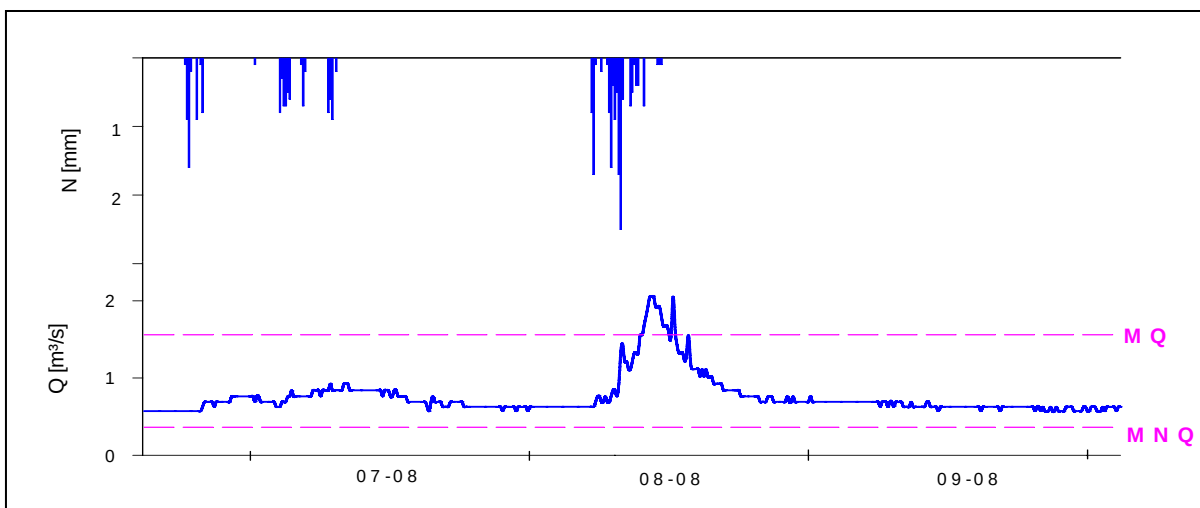


Abb. 4.32: Verlauf von Niederschlag und Abfluss während der Ereignisbeprobung

Deutlich zu erkennen sind zwei kleinere Niederschlagsereignisse am Abend des 6. bzw. Morgen des 7. August mit jeweils 4 mm bzw. 7 mm und ein ausgeprägtes Ereignis mit insgesamt 15 mm Niederschlag am Vormittag des 8. August. Dementsprechend wurde an der Brugga am 07.08. nur ein leicht erhöhter Abfluss gemessen, während im Verlauf des 08.08. ein ausgeprägtes kleineres Sommerhochwasser beobachtet wurde, in dessen Verlauf der Abfluss von ca. 0,5 m³/s auf einen Maximalwert von 2 m³/s zunahm.

5.1.2 Verlauf der hydrochemischen Parameter

Die Ergebnisse der Ereignisbeprobung an den ausgewählten drei unterschiedlichen Deckschichtenabflüssen sowie vergleichend des St. Wilhelmer Talbachs sind in Form von Zeitreihen in den Abb. 4.33 bis 4.36 dargestellt.

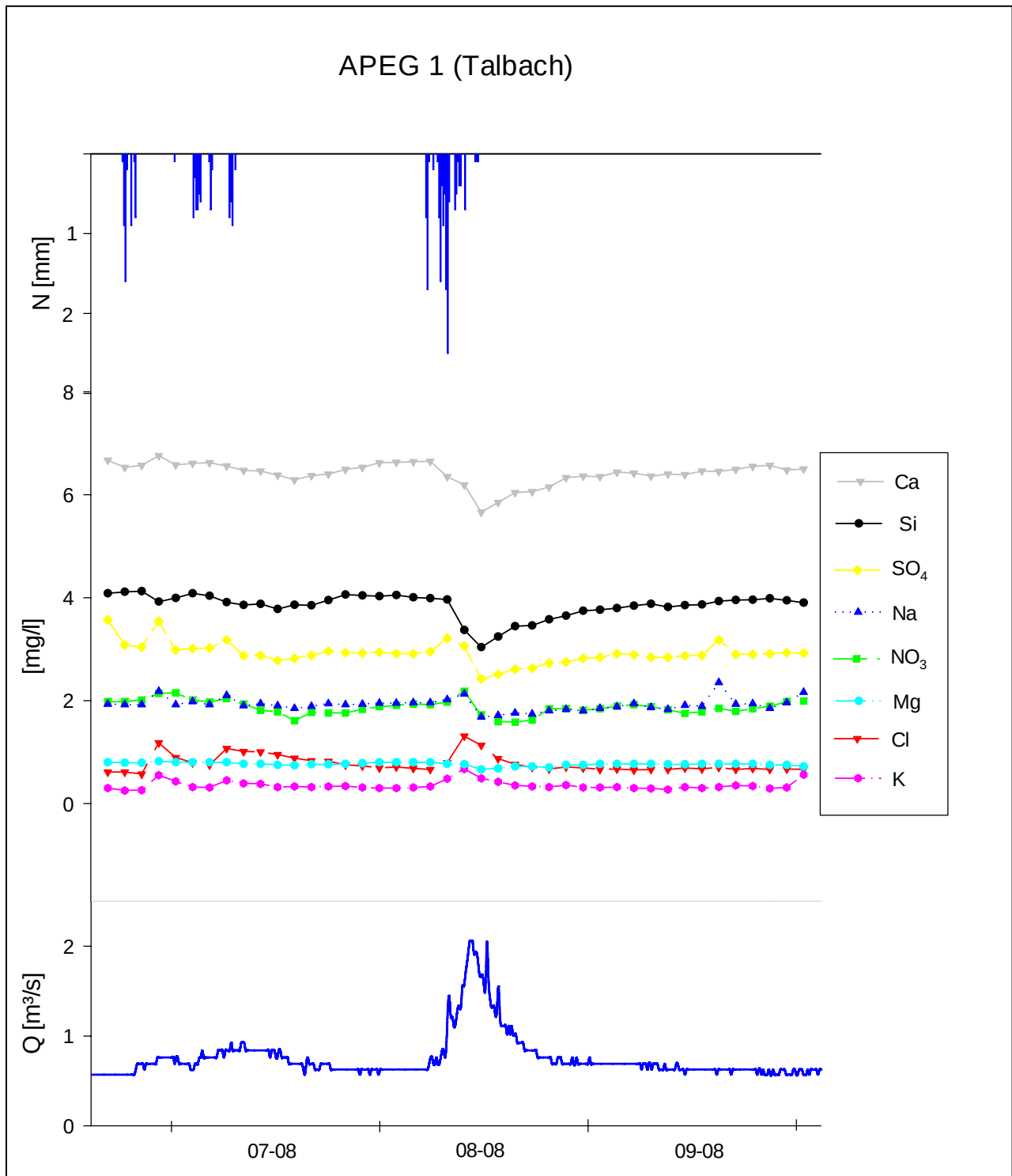


Abb. 4.33: Ganglinien von Niederschlag, Abfluss und Hauptionen im St. Wilhelmer Talbach (APEG 1) während der Ereignisbeprobung

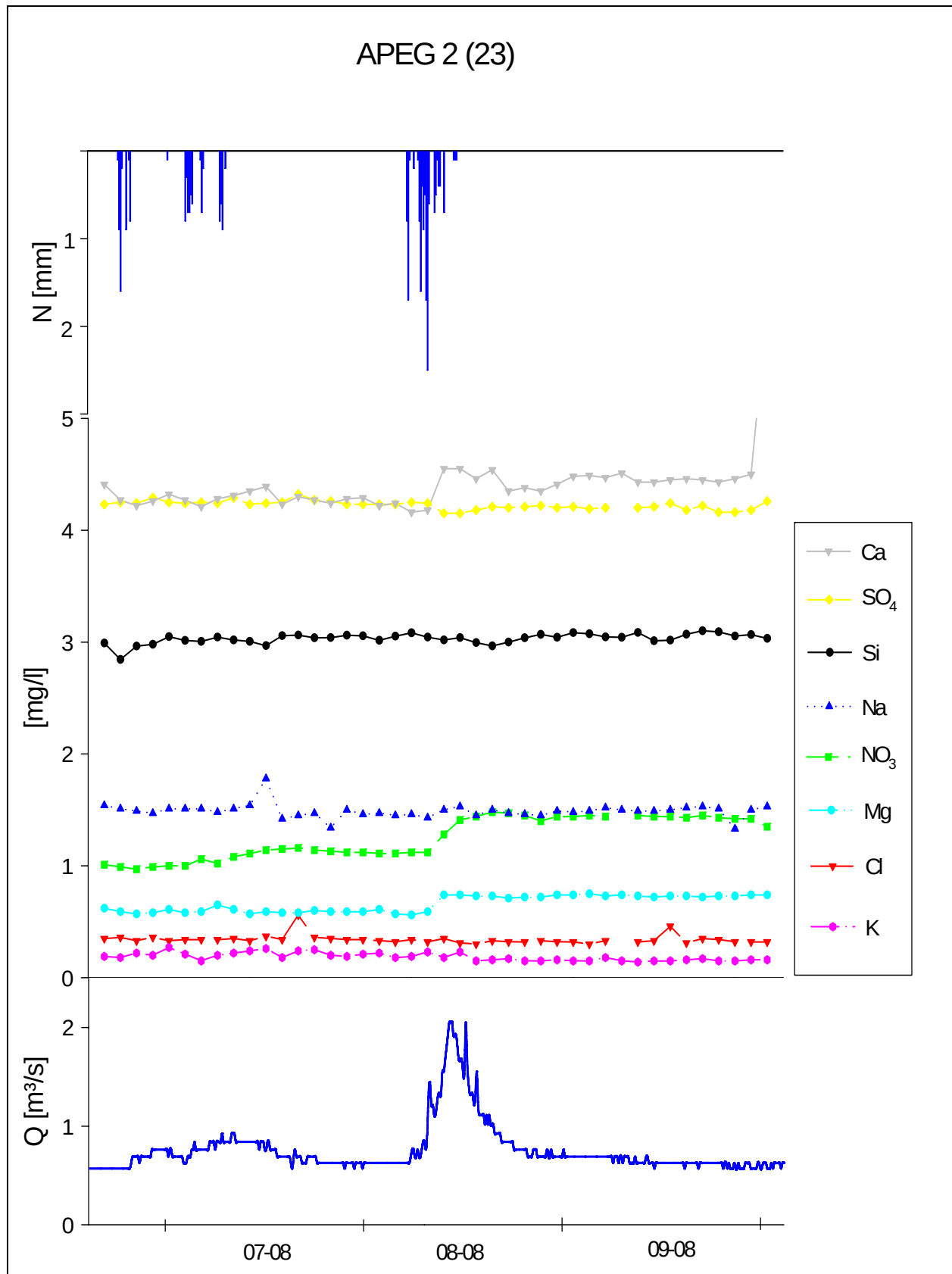


Abb. 4.34: Ganglinien von Niederschlag, Abfluss und Hauptionen an der Probennahmestelle „23“ (APEG 2) während der Ereignisbeprobung

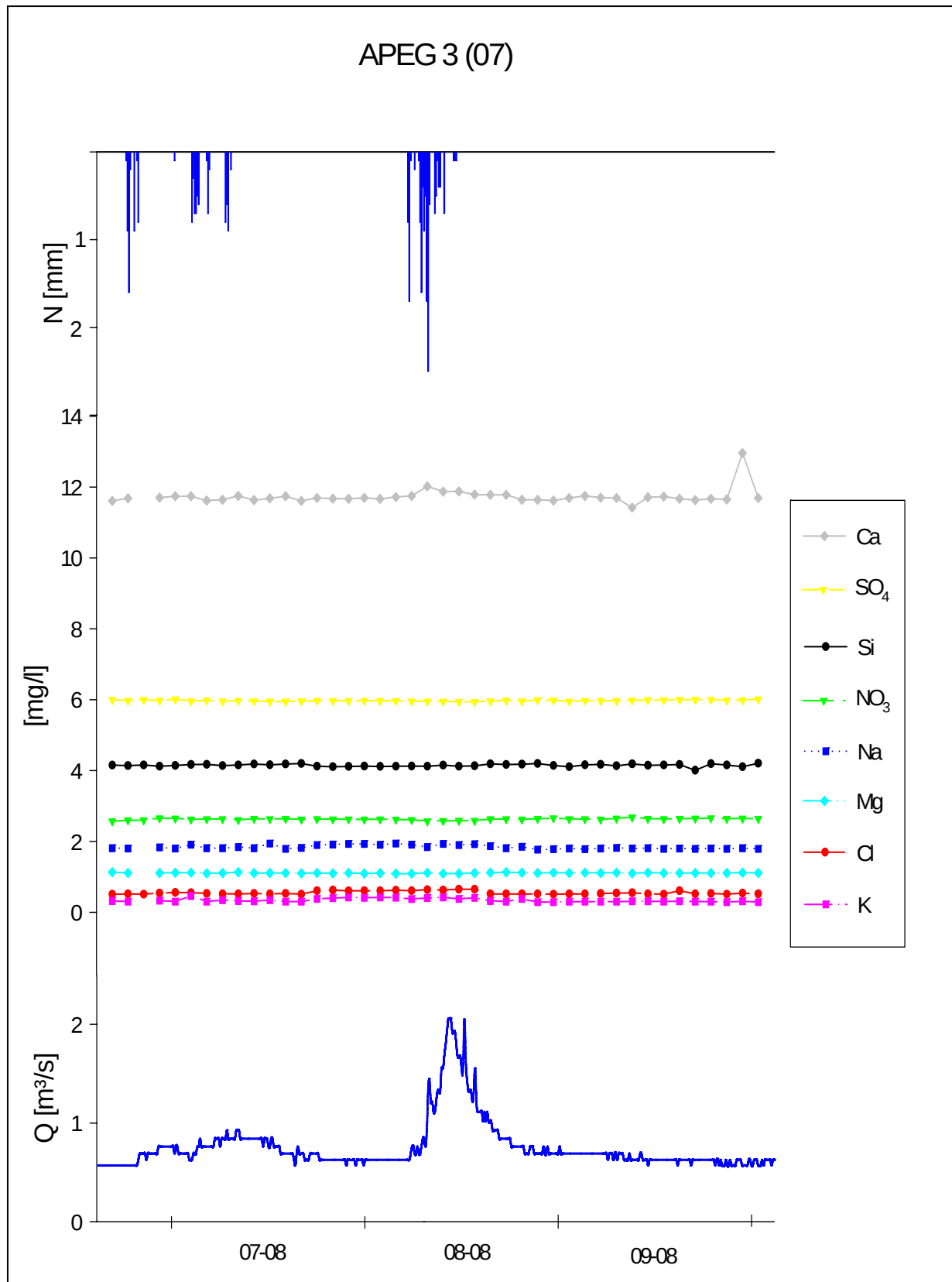


Abb. 4.35: Ganglinien von Niederschlag, Abfluss und Hauptionen an der Probennahmestelle „07“ (APEG 3) während der Ereignisbeobachtung

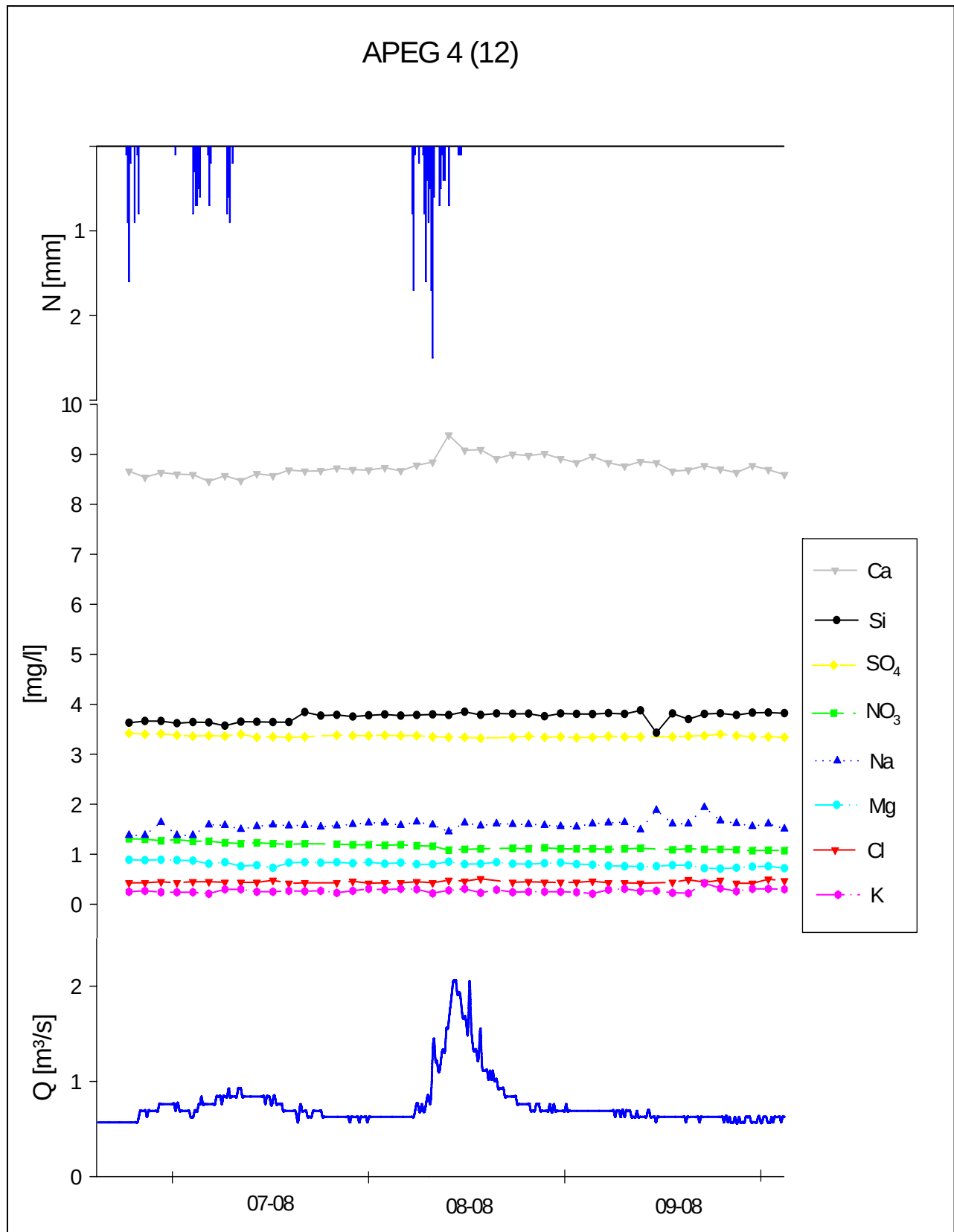


Abb. 4.36: Ganglinien von Niederschlag, Abfluss und Hauptionen an der Probennahmestelle „12“ (APEG 4) während der Ereignisbeobachtung

Die aus dem St. Wilhelmer Talbach entnommenen Proben zeigen in den Ganglinien der chemischen Parameter deutliche Reaktionen auf das Niederschlagsereignis am 8. August, während sich die kleineren Ereignisse am 6. und 7. August kaum auf die chemische Zusammensetzung des Bachwassers auswirkten.

Dabei können für Silikat, sowie für Calcium, Nitrat, Sulfat und Natrium deutliche Verdünnungserscheinungen um maximal ca. 20 bis 25% beobachtet werden. Die Minima sind jeweils sechs Stunden nach Beginn des Niederschlagsereignisses erreicht. Nach dem Ereignis steigen die Konzentrationen langsam wieder an, erreichen jedoch bis zum Ende der Beprobung nicht ganz das Anfangsniveau. Auffällig ist die Reaktion von Sulfat, Nitrat und Natrium, bei denen die Verdünnung einer kurzfristigen Aufkonzentrierung am Beginn des Ereignisses folgt.

Demgegenüber sind bei Chlorid und Kalium deutliche Erhöhungen der Konzentrationen auf etwa das Doppelte der Vorereigniskonzentration zu beobachten. Diese Aufkonzentrierungen fanden dabei nicht nur bei dem Ereignis am 8. August, sondern auch bei den zwei kleineren Ereignissen am 6. und 7. August statt.

In der Ganglinie der Magnesiumkonzentrationen ist nur eine ganz geringe Verdünnung um ca. 5% beim größeren Ereignis am 8. August abzulesen.

Grundsätzlich anders fielen die Reaktionen der parallel beprobten Deckschichten-Kleinquellen aus. Reaktionen auf das Niederschlagsereignis sind nur in sehr viel geringerem Maße zu beobachten und fallen z.T. gegensätzlich aus. An der Probennahmestelle „23“ (APEG 2) ist noch am deutlichsten eine Reaktion der chemischen Zusammensetzung erkennbar, die sich in einer Aufkonzentrierung von Calcium, Magnesium und Nitrat um ca. 10% äußert. Nach dem Ereignis pendeln sich die Konzentrationen dieser Parameter auf einem höheren Niveau ein. Alle anderen Inhaltstoffe zeigen weder eine Verdünnung noch eine Aufkonzentrierung.

In noch geringerem Maße waren die Reaktionen der chemischen Parameter an den Probennahmestellen „12“ und „07“ ausgeprägt. Nach Abzug der Ungenauigkeiten, die durch Messfehler entstehen, kann nur bei Calcium von einer signifikanten zunehmenden Reaktion auf das Niederschlagsereignis gesprochen werden, während alle anderen Inhaltsstoffe konstante Ganglinien aufweisen.

Diskussion

Im Vergleich mit ähnlichen Untersuchungen im Brugga-EZG sind die beobachteten Verdünnungserscheinungen im St. Wilhelmer Talbach mit 20 bis 25% eher schwach ausgeprägt. Mehrfach wurden z.B. von FREY (1998) und DIDSZUN (2000) in verschiedenen Quellen und der Brugga Verdünnungen bis zu 50% beobachtet. Dies hängt sehr wahrscheinlich mit der ebenfalls nicht sehr ausgeprägten Dynamik des beobachteten Ereignisses zusammen. FREY z.B. untersuchte ebenfalls Sommerereignisse, bei denen die Spitzenabflüsse mehrmals über 4 m³/s erreichten.

Die für Silikat, sowie für Calcium, Nitrat, Sulfat und Natrium deutlich beobachteten Verdünnungserscheinungen lassen sich durch den Einfluss des weniger mineralisierten Niederschlagswassers erklären, das von Sättigungsflächen oberflächlich abfließt oder direkt auf die Gerinnefläche fällt.

Auch FREY und DIDSZUN beobachteten neben Verdünnungen bei mehreren Ionen Aufkonzentrierungen, v.a. anfangs der Ereignisse. Als Erklärung für dieses Phänomen führten sie Mobilisierung höher mineralisierten Oberbodenwassers an, das durch den Niederschlag schneller als andere Abflusskomponenten mobilisiert wird und dann zu Peaks in den Ganglinien führt. Im Verlauf des Ereignisses gewinnen tiefere Abflusskomponenten immer mehr an Bedeutung, bei denen der Niederschlag zu Verdünnung der Ionen führt. FREY führt zusätzlich die Abspülung trockener atmosphärischer Deposition an, die zu Beginn eines Niederschlags gerade nach längerer Trockenheit zu Konzentrationsanstiegen führt. Auch SIEDER (2000) führte Konzentrationsanstiege von Kalium, Nitrat und Sulfat zu Beginn von Ereignissen auf Abflüsse aus dem Oberboden zurück, in dem diese Ionen durch Mineralisierung organischer Substanz vermehrt vorliegen, Kalium wird im humosen Oberboden zudem weniger adsorbiert durch den verringerten Anteil an Tonmineralen. Damit ist auch die „fehlende Verdünnung“ von Kalium im späteren Verlauf des Ereignisses erklärt. Nitrat und Sulfat werden außerdem während Trockenperioden verstärkt oxidiert und können dann leicht ausgewaschen werden (MEESBURG 1998). Die Aufkonzentrierung von Chlorid könnte durch Abspülung organischen Materials bedingt sein: Mit 0,6 mg/l war die Konzentration zu Beginn des Ereignisses so gering, dass sich auch kleine Effekte deutlich auswirken. Auch ein direkter Eintrag durch den Niederschlag ist denkbar, allerdings übersteigen die Chloridkonzentrationen im Niederschlag nur selten den Wert von 0,6 mg/l (siehe 4.1.2).

Die Reaktionen der Deckschichtenabflüsse an der Probennahmestelle „23“ lassen sich mit ähnlichen Effekten erklären. Wiederum ist ein Anstieg der Nitratwerte zu beobachten, der auf Ausspülung aus dem humosen Oberboden schließen lässt. Die erhöhten Magnesium- und v.a. Calciumkonzentrationen sind auf den ersten Blick außergewöhnlich, lassen sich aber mit den gelegentlich im Untersuchungsgebiet durchgeführten Kalkungen mit Dolomit (CaMg(CO₃)₂) erklären. Diese finden aus der Luft per Hubschrauber statt, so dass natürlich die oberflächennahen Abflüsse mit Ca und Mg angereichert sind.

Die außergewöhnlich geringe Reaktion der Parameter an den drei untersuchten Deckschicht – Kleinquellen weist auf eine sehr träge Reaktion des Systems hin. Schon durch die Untersuchungen im Rahmen der dreimonatigen Routinebeprobung hatte sich angedeutet, dass unterschiedliche Abflussverhältnisse kaum eine Auswirkung auf die hydrochemische Signatur der beprobten oberflächennahen Abflüsse haben. Da sich so gut wie überhaupt keine Reaktion zeigte, muss davon ausgegangen werden, dass v.a. Wasser zum Abfluss kam, das schon vor dem Niederschlagsereignis im „System“ war (sog. Vorereigniswasser). Die Aufkonzentrierung einzelner Inhaltstoffe zeigt allerdings an, dass dem Deckschichtenabfluss jeweils eine sehr oberflächennahe Abflusskomponente aus dem humosen Oberboden zugemischt wurde. Dieses Wasser scheint bis auf wenige Ionen eine sehr ähnliche hydrochemische Signatur wie die Deckschichtenabflüsse aufzuweisen, so dass es mittels hydrochemischer Tracer nicht möglich ist, die Komponenten zu unterscheiden. Eine Klärung der Frage nach dem Anteil des Ereigniswasser im beprobten Abfluss könnte allerdings über die Analyse der stabilen Isotope in Niederschlag und Kleinquellen möglich sein.

Fazit

An drei repräsentativen Probennahmestellen, sowie im St. Wilhelmer Talbach wurde mit automatischen Probennahmegeräten eine intensive, zeitlich hochaufgelöste Ereignisbeprobung durchgeführt. Ziel dieser Untersuchung war es, die Reaktion auf Niederschlagsereignisse und die zeitliche Variabilität der oberflächennahen Abflusskomponenten aus den Deckschichten näher zu untersuchen. Beprobt wurde ein typisches konvektives Sommergewitter Anfang August, bei dem insgesamt 15 mm Niederschlag innerhalb von drei Stunden fielen.

Die Ergebnisse zeigten für den St. Wilhelmer Talbach deutliche Reaktionen der einzelnen Inhaltstoffe, die sich z.T. in Verdünnungen, z.T. in Aufkonzentrierungen äußerten. Dadurch wurde deutlich eine Zumischung neuer Abflusskomponenten mit anderer chemischer Zusammensetzung im Hochwasserabfluss angezeigt. Die Aufkonzentrierung einzelner Ionen konnte dabei mit dem Einfluss sehr oberflächennaher Komponenten erklärt werden.

Im Gegensatz dazu wurde in den parallel beprobten Kleinquellen nur eine sehr geringe bis gar keine Reaktion der chemischen Parameter auf das Niederschlagsereignis beobachtet. Zur Erklärung dieses Phänomens muss davon ausgegangen werden, dass einerseits sog. Voreigniswasser zum Abfluss kommt und andererseits offensichtlich neue Abflusskomponenten zugemischt werden, die allerdings eine sehr ähnliche chemische Zusammensetzung aufweisen. Eine Klärung des Anteils dieser Komponenten am Hochwasserabfluss könnte mittels Untersuchung der stabilen Isotope in Abfluss und Niederschlag gelingen.

4.3 Silikat – Lösungsversuch

Als Tracer zur Auftrennung der unterschiedlichen Herkunftsräume wurde bisher v.a. gelöstes Silikat verwendet, da es im Gegensatz zu den anderen hydrochemischen Wasserinhaltsstoffen nicht über den Niederschlag eingetragen wird und am wenigsten Wechselwirkungen mit der Bodenzone ausgesetzt ist. Über das genaue Lösungsverhalten von Silikat in natürlichen Systemen gibt es jedoch bisher nur wenige Untersuchungen und widersprüchliche Aussagen, so dass die zugewiesenen Si-Konzentrationen zu den einzelnen Herkunftsräumen nur mit großen Unsicherheiten geschehen konnten. Um die Aussagekraft des Tracers Silikat zu überprüfen und zu präzisieren, wurde mit unterschiedlichen Substraten aus den Deckschichten des Untersuchungsgebietes ein Laborexperiment zur Silikatlösung durchgeführt.

4.3.1 Vergleich unterschiedlicher Substrate

An verschiedenen Hängen im Untersuchungsgebiet waren sehr unterschiedliche Silikatkonzentrationen für die Deckschichtenabflüsse bestimmt worden. Ob unter den dafür verantwortlichen Faktoren auch die Beschaffenheit der unterschiedlichen Deckschichten-Substrate in den jeweiligen Einzugsgebieten eine Rolle spielt, sollte mit dem Laborexperiment geklärt werden. Dazu wurden an verschiedenen Stellen im Untersuchungsgebiet Substratproben aus den Deckschichten entnommen und dann jeweils mehrmals zur Silikatlösung mit Wasser angesetzt. Nähere Informationen zu Versuchsaufbau, den verwendeten Substraten und zum theoretischen Hintergrund der Lösungskinetik von Silikat sind in Kapitel 3.1.3, 3.2.2 und 3.5 zu finden.

Die Ergebnisse des Lösungsversuchs sind in Abb. 4.36 als Zunahme der Silikatkonzentrationen über die Laugungszeit aufgetragen. Dargestellt sind dabei jeweils die gemittelten Werte aus den drei (bei „13“, „04“, „01“, „23“) bzw. zwei (bei „16“, „18“, „12“, „05“) Versuchen, die für die unterschiedlichen Substrate mit deionisiertem Wasser und bei Zimmertemperatur angesetzt wurden.

Für alle Substrate ergibt sich zunächst ein typischer parabolischer Verlauf der Lösungskurven, der nach etwa 50 Stunden einen Wendepunkt erreicht, nach dem die Konzentrationen viel langsamer und linear ansteigen.

Die Lösungskurven verlaufen dabei nicht glatt, sondern mit Schwankungen nach oben und unten. Besonders auffällig ist eine kurzfristige Abnahme der Silikatkonzentrationen nach 72 Stunden, die bei fast allen Probenflaschen gemessen wurde.

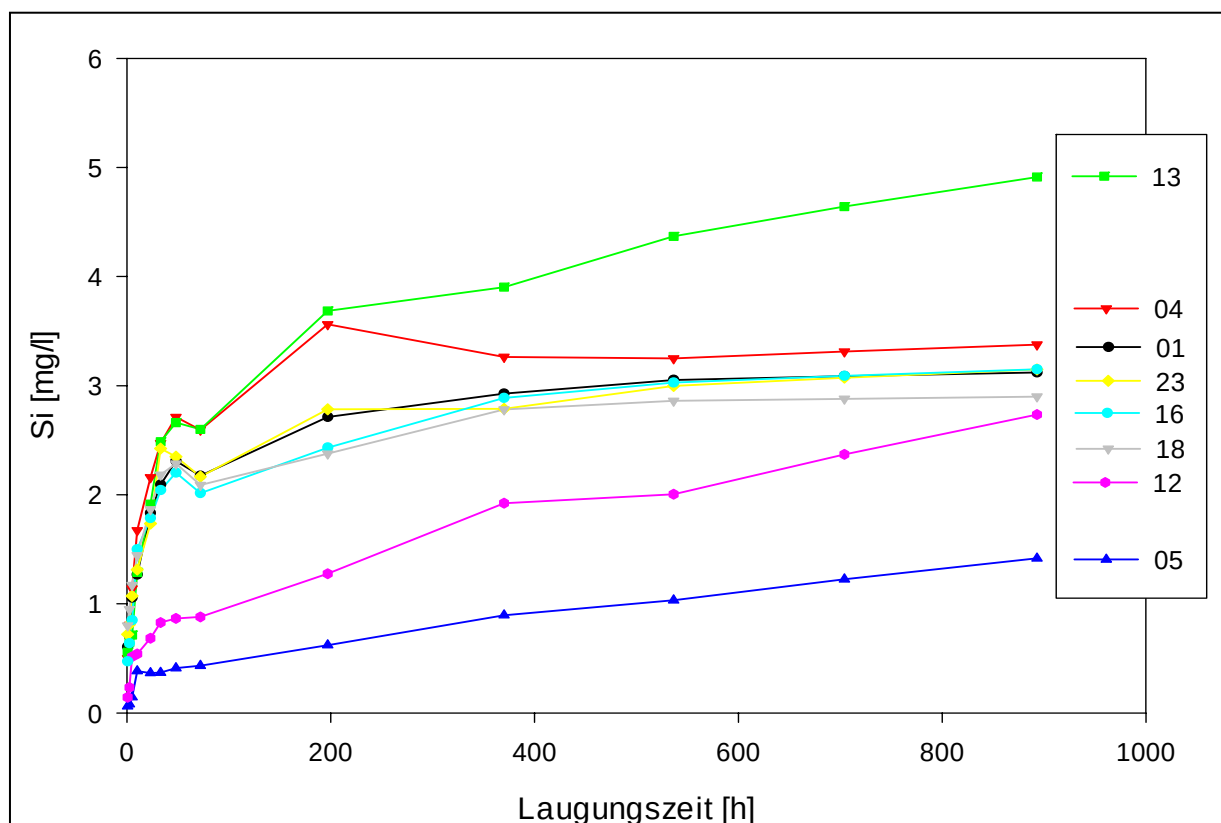


Abb. 4.36: Verlauf der Silikatkonzentrationen mit zunehmender Laugungszeit

Ein Vergleich der Substrate zeigt, dass sich die Lösungskurven von „01“, „13“, „16“ und „18“ fast gleich verhalten: Die Silikatkonzentrationen nehmen innerhalb der ersten zwei Tage rasch auf ca. 2,5 mg/l zu und erreichen damit den oben angesprochenen Wendepunkt. Bei allen hier betrachteten Proben gehen die Konzentrationen danach um ca. 0,2 mg/l zurück, um anschließend bei den nächsten Beprobungen mit verminderter Lösungsrate langsam und linear weiter anzusteigen. Nach ca. 900 Stunden bzw. 38 Tagen wurde das Experiment abgebrochen. Für die hier betrachteten Proben waren nach dieser Laugungszeit Silikatwerte von etwas mehr als 3 mg/l erreicht.

Die Verläufe der Silikatkonzentrationen mit zunehmender Laugungszeit weisen für die Substrate „12“ und insbesondere „05“ insgesamt niedrigere Werte auf. Dabei ist der Wendepunkt der Lösungskurve für diese beiden Substrate schon deutlich früher, nach etwa einem Tag erreicht. Bei „12“ wurden zu diesem Zeitpunkt 0,8 mg/l und für „05“ 0,4 mg/l bestimmt. Danach stellt sich ebenfalls ein linearer Verlauf der weiteren Silikatzunahme ein, wobei die konstante Lösungsrate deutlich höher ist, als für die oben betrachteten Substrate, so dass nach Abbruch des Lösungsversuchs die mittleren Konzentrationen für „12“ bei 2,7 mg/l und für „05“ bei 1,4 mg/l lagen.

Im Gegensatz dazu zeigten die Probenflaschen mit den Substraten „04“ und insbesondere „13“ deutlich höhere Silikatwerte bei ähnlichem zeitlichen Lösungsverhalten. Die Proben dieser Substrate zeigen ebenfalls nach zwei Tagen einen deutlichen Wechsel von

parabolischem zu linearem Lösungskurvenverlauf. Die Konzentrationen an diesem Wendepunkt betragen im Mittel 2,7 mg/l. Für beide Substrate gilt anschließend eine Abnahme um 0,2 mg/l und dann eine Zunahme auf 3,5 mg/l, die nach 200 Stunden Laugungszeit erreicht sind. Danach zeigt sich für „04“ ein erneuter Wendepunkt in der Lösungskurve: Die Konzentrationen nehmen leicht ab und anschließend langsam wieder zu. Nach 900 Stunden waren 3,3 mg/l erreicht. Für „13“ nahmen die Silikatwerte hingegen kontinuierlich linear zu, so dass am Ende der Versuchszeit 4,9 mg/l Silikat erreicht waren.

Um die unterschiedlichen Lösungsraten besser vergleichen zu können, wurden sie in Abb. 4.37 jeweils als gemittelte Ergebnisse der einzelnen Substrate gegen die logarithmierte Laugungszeit aufgetragen.

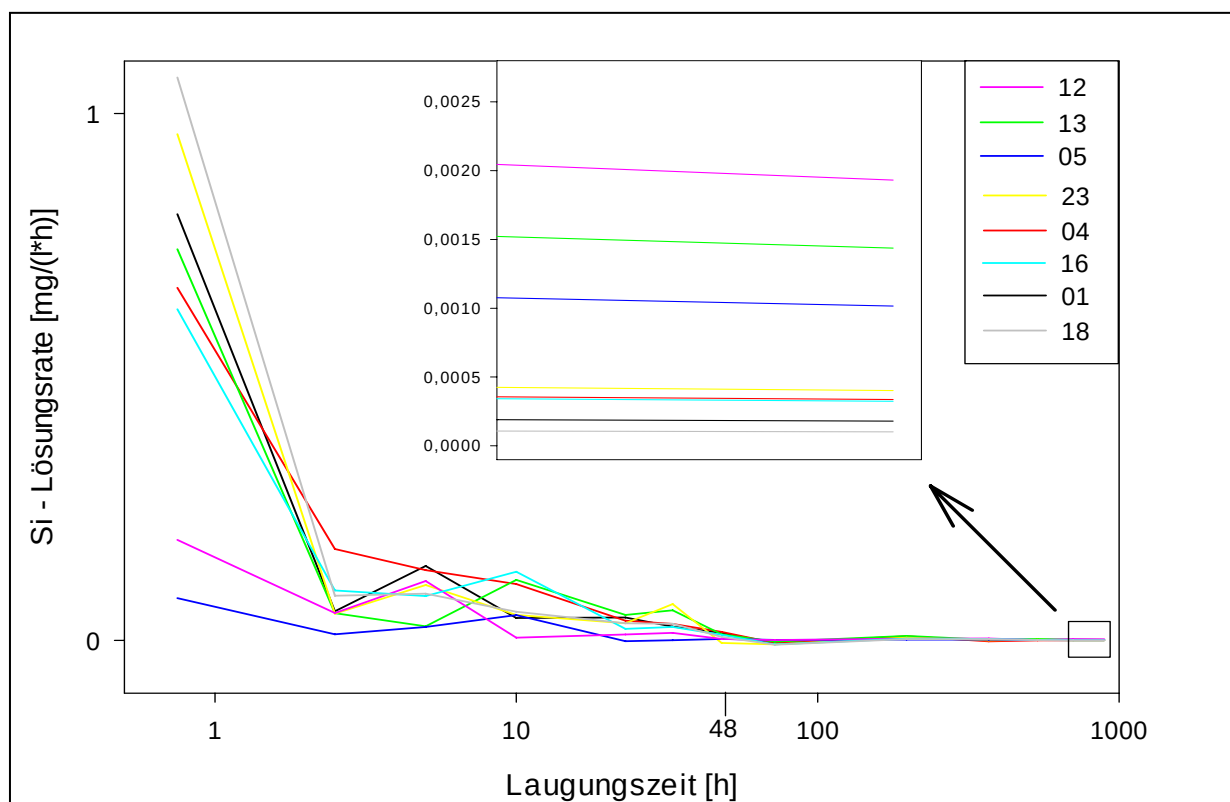


Abb. 4.37: Verlauf der Lösungsraten mit der zunehmenden Laugungszeit

Deutlich ist der generell für alle Substrate gleiche zeitliche Verlauf der Lösungsraten zu erkennen: Die anfangs sehr hohen Lösungsraten nehmen unter Schwankungen sehr schnell ab, um nach ziemlich genau zwei Tagen für alle Proben einen geringen, relativ konstanten Wert anzunehmen. Ein Vergleich der verschiedenen Substrate zeigt wieder signifikante Unterschiede: In der Anfangsphase der Lösungsversuche fallen dabei v.a. die Substrate „05“ und „12“ mit sehr viel geringeren Lösungsraten auf, während diese für alle anderen Proben mehr oder weniger gleich sind. Das Ende der Versuchsphase ist vergrößert herausgestellt und zeigt ebenfalls signifikante Unterschiede der allerdings generell sehr niedrigen Lösungsraten. Dabei sind die Lösungsraten der Substrate „12“, „13“ und „05“ mit Werten von 0,001 bis 0,002 mg/(l*h) sehr viel höher als die der restlichen Substrate, die in sich relativ ähnliche Werte von 0,0002 bis 0,0004 mg/(l*h) aufweisen.

4.3.2 Vergleich verschiedener Randbedingungen

Auf die schlechte Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf natürliche Bedingungen wurde bereits in 4.1.3 hingewiesen. Gründe dafür sind u.a. veränderte Temperaturverhältnisse und Regenwasser statt deionisiertem Wasser als Lösungsmittel. Um den Laborfehler etwas abschätzen zu können, wurden deshalb einige Probenflaschen mit Regenwasser aus dem Untersuchungsgebiet angesetzt, sowie einige Probenflaschen im Kühlschrank konstanten 4°C ausgesetzt. Die Ergebnisse für die dadurch erhaltenen Unterschiede in der Lösungskinetik sind in Abb. 4.38 gezeigt. Dabei sind jeweils dunkelblau die „normalen“ Versuchsanordnungen (20°C, aqua deion.), hellblau die „Kühlschrank – Proben“ (4°C, aqua deion.) und rot die Versuche mit Regenwasser (20°C, aqua pluv.) dargestellt.

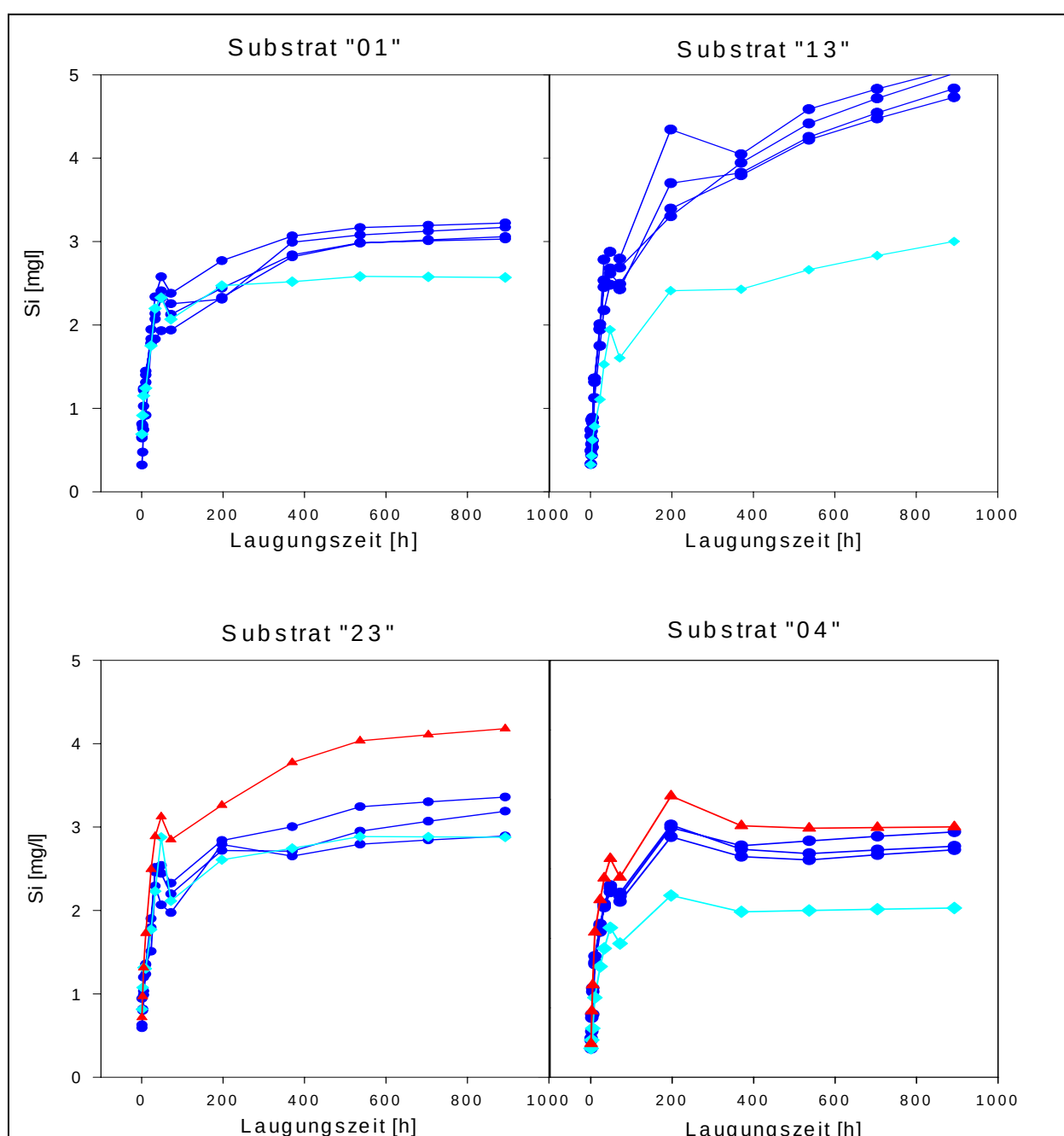


Abb. 4.38: Verlauf der Lösungskurven bei unterschiedlichen Versuchsansätzen

Insgesamt zeigte sich für die „Kühlschrank-Proben“ und die „Regenwasser-Proben“ die gleiche Lösungskinetik, wie bei den „normalen“ Versuchsanordnungen. Unterschiede zeigten sich jedoch in der Höhe der gelösten Konzentrationen.

Die mit Regenwasser angesetzten Probenflaschen verhielten sich zunächst während der parabolisch ansteigenden Phase des Lösungsverlaufs gleich, wie die mit deionisiertem Wasser angesetzten Proben. Der Wendepunkt zur linearen Lösungsphase tritt dann bei beiden in dieser Weise angesetzten Versuchsaufbauten bei einer etwas höheren Silikatkonzentration ein. Diese Differenz verstärkte sich bei den Proben mit dem Substrat „23“ noch im Verlauf des Experiments, während bei „04“ eine Abschwächung des Effekts im Verlaufe des Lösungsversuchs eintrat. Bei Abbruch der Untersuchung nach 900 Stunden lag so die Konzentration der „Regenwasser-Proben“ im Vergleich zu den „normalen“ Proben bei „23“ um ca. 1mg/l und bei „04“ nur um ca. 0,1 mg/l erhöht.

Auch die im Kühlschrank bei konstant 4°C aufbewahrten Proben, zeigen einen zunächst gleichartigen Verlauf der Lösungskurven wie die bei Zimmertemperatur (20°C) angesetzten Proben. Der Wendepunkt zur linearen Lösungsphase tritt dann aber bei zwei der vier in dieser Weise angesetzten Versuchsaufbauten bei einer deutlich niedrigeren Silikatkonzentration ein. Während der anschließenden linear verlaufenden Phase der Silikatlösung zeigen drei der vier „Kühlschrank-Proben“ eine verminderte Lösungsrate. Bei Abbruch des Experiments ergaben sich dementsprechend für die Substrate „13“, „04“ und „01“ verminderte Silikatkonzentrationen für die gekühlten Proben, während bei „23“ kein signifikanter Unterschied zwischen dem Verhalten bei gekühlten Verhältnissen und „normalen“ Verhältnissen festzustellen ist. Bei den Differenzen die sich so bis zum Ende des Experiments herausbildeten, sind bei den Substraten deutliche Unterschiede zu sehen: Bei „13“ betrug die Differenz der Silikatkonzentrationen zwischen gekühlter und ungekühlten Proben nach 900 Stunden 2 mg/l, bei „04“ nur etwa 1mg/l und bei „01“ sogar nur ca. 0,5 mg/l.

Zur Fehlerabschätzung wurden jeweils immer zwei bis vier Probenflaschen mit gleichem Substrat unter gleichen Randbedingungen angesetzt. Hieraus ergaben sich nach 900 Stunden Laugszeit Unterschiede der Silikatkonzentrationen von 0,2 bis 0,5 mg/l.

4.3.3 Diskussion

Bereits in Kapitel 4.1.3 wurde darauf hingewiesen, dass der anfänglich parabolische Verlauf der Silikatlösung schon vielfach bei Laborexperimenten mit reinen Mineralen beobachtet wurde. Trotzdem sind die Mechanismen gerade dieser anfänglichen Phase der Lösung nicht vollständig geklärt. Mit dem hier durchgeführten Experiment konnte gezeigt werden, dass der prinzipielle Verlauf der Lösungskinetik auch in gleicher Weise für die aus den Deckschichten entnommenen Substrate gilt. Bei vielen Versuchsanordnungen mit reinen Mineralen wurden jedoch spätere Zeitpunkte für das Auftreten des Wechsels vom parabolischen zum linearen Lösungsverlauf beobachtet. DAHMKE (1988) stellte durch Literaturvergleich fest, dass dieser „Wendepunkt“ offensichtlich nach spätestens 200 Stunden auftritt. YINIAN (2001) beobachtete bei gleichem Versuchsaufbau ebenfalls einen Wendepunkt nach 48h, während bei DAHMKE (1988) der Übergang zum linearen Verlauf der Lösung erst nach ca. 100 Stunden eintrat. Allerdings arbeitete er mit einem sehr viel kleineren Gestein : Wasser - Verhältnis.

Ausführlich wurde in 4.1.3 dargestellt, dass die in Laborexperimenten ermittelten Ergebnisse nicht ohne weiteres auf natürliche Verhältnisse übertragbar sind. Dies gilt v.a. in Bezug auf die absolute Höhe der ermittelten Konzentrationen, während die prinzipiellen Lösungsmechanismen durchaus auch für natürliche Systeme gelten. Im Hinblick auf die Verwendung von gelöstem Silikat als herkunftsraumorientierten Tracer, ist insbesondere das Ergebnis für den zeitlichen Ablauf der Silikatlösung zu beachten. Es zeigte sich, dass die Lösung bis zu einem bestimmten Niveau sehr schnell vor sich geht. Anfängliche Lösungsraten bis zu 1 mg/(l*h) wurden erreicht. Nach einer Zeit von ca. 200 Stunden war im Versuchsverlauf für alle Substrate eine sehr geringe, relativ konstante Lösungsrate erreicht.

Daraus ergibt sich für die Verwendung von Silikat als Tracer, dass von einer Grundkonzentration ausgegangen werden muss, die für alle Abflüsse gilt, die während des Abflusses mit mineralischem Material in Kontakt standen, auch wenn dieser Kontakt dabei nur kurze Zeit andauerte. Wie hoch diese Grundkonzentration anzusetzen ist, kann mit den Ergebnissen des Versuchs nicht beantwortet werden. Die Ergebnisse bei den sehr grobkörnigen bzw. sehr humosen Substraten „05“ und „12“ zeigen jedoch, dass offensichtlich ein Minimum von etwa 0,5 bis 0,8 mg/l Silikat für Abflüsse angenommen werden muss, die nur wenige Stunden und nur oberflächlich mit der Erdoberfläche in Kontakt standen. Für Wasser, das tiefer in die ungesättigte Bodenzone versickert, aber ebenfalls sehr schnell abfließt, beträgt diese Grundkonzentration offenbar bedeutend mehr.

Wichtig war bei dem durchgeführten Versuch, ob sich bei den unterschiedlichen Substraten Unterschiede in der Lösungskinetik zeigen. Die Ergebnisse zeigten tatsächlich deutlich, dass signifikante Unterschiede bei einzelnen Substraten auftraten. Dabei sind jedoch die drei Substrate „13“, „05“ und „12“, die mit der sehr unterschiedlichen Reaktion auffielen, auch sehr „außergewöhnliche“ Substrate. „12“ und „05“ wurden quasi direkt von der Erdoberfläche entnommen, bei „05“ handelt es sich um ein grobkiesiges Material, bei „12“ um Material aus dem humosen A_h-Bodenhorizont mit einem geringen Anteil an Mineralboden. „13“ ist ein

sehr toniges Substrat mit geringem Skelettanteil aus einem vergleyten staunassen Horizont mit nur sehr kleinräumiger Verbreitung im Untersuchungsgebiet.

Besonders Augenmerk muss deshalb den Ergebnissen der restlichen Substrate gewidmet werden. Diese wurden aus verschiedenen Horizonten der Deckschichten entnommen, die als hauptsächlichlicher Aufenthaltsraum der Deckschichtenabflüsse anzusehen sind. Gerade diese Substrate zeigen aber insgesamt eine sehr ähnliche Silikat - Lösungskinetik mit sehr ähnlichen Wertebereichen. So differieren die Silikatkonzentrationen dieser Substrate nach 900 Stunden Versuchszeit lediglich um maximal 0,4 mg/l. Daraus kann eindeutig geschlossen werden, dass die teilweise sehr unterschiedlichen Silikatkonzentrationen, die im Untersuchungsgebiet an verschiedenen Hängen und Deckschichtentypen gemessen wurden, nicht von der mineralischen Zusammensetzung oder anderen Besonderheiten der Deckschichtensubstrate abhängen, sondern durch andere Faktoren wie z.B. Aufenthaltszeiten gesteuert werden.

Das sehr unterschiedliche Lösungsverhalten der Substrate „05“, „12“ und „13“ kann mit dem großen Einfluss der Korngröße auf die Silikatlösung erklärt werden (YINIAN 2001, HOLDREN & SPEYER 1985). Mit abnehmender Korngröße nimmt die Größe der reaktiven Oberfläche zu, so dass die Lösung durch Hydrolyse in verstärktem Maße vor sich gehen kann. Dabei sind die Lösungsraten der grobkörnigen Substrate „05“ und „12“ zunächst wie erwartet kleiner als bei den feinkörnigeren restlichen Substraten, zeigen aber dann während der linearen Phase der Lösungskurven eine höhere Lösungsrate. Dieses Phänomen kann nur mit der größeren Untersättigung des Laugungswassers erklärt werden.

Die Laborergebnisse sind aus verschiedenen Gründen nur sehr eingeschränkt auf natürliche Verhältnisse übertragbar. Darauf wurde in Kapitel 3.1.3 ausführlich hingewiesen. U.a. sind veränderte Temperaturverhältnisse und Regenwasser statt deionisiertem Wasser verantwortlich für eine veränderte Lösungskinetik unter natürlichen Bedingungen. Die Veränderungen der Versuchsrandbedingungen sollten Aufschluss darüber geben, wie groß der Fehler ist, der durch die künstlich vorgegebenen Randbedingungen im Labor entsteht. Aufgrund der theoretischen Grundlagen der Silikatlösung wurde davon ausgegangen, dass erniedrigte Temperaturen die Lösungsprozesse verzögern. Andererseits kann erwartet werden, dass Regenwasser durch den erhöhten Gehalt an H^+ -Ionen eine verstärkte Hydrolyse im Vergleich mit deionisiertem Wasser bewirkt.

Diese Verhalten wurde tatsächlich durch die Lösungsversuche bestätigt, allerdings in sehr unterschiedlichem Maße bei den unterschiedlichen Substraten. Die verminderte Silikatlösung durch gekühlte Randbedingungen ergab verminderte Silikatkonzentrationen von 0 bis 50%, eine Erhöhung durch Verwendung von Regenwasser ergab sich im Bereich von 0 bis 25%. Die Resultate verschiedener Versuche mit gleichen Substraten bei gleichen Randbedingungen ergaben Unterschiede bis zu 15%. Aus diesen Ergebnissen lassen sich keine allgemeine Aussagen ableiten. Die verminderten Temperaturen scheinen insgesamt einen stärkeren Einfluss auf die Lösungskinetik auszuüben als der Unterschied zwischen Regenwasser und deionisiertem Wasser, dies konnte aber nicht vollständig geklärt werden. Abschließend kann

festgestellt werden, dass veränderte Randbedingungen sehr große erhöhende wie vermindernde Auswirkungen auf die Lösungskinetik haben können. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse der Laborexperimente tatsächlich nur sehr eingeschränkt auf natürliche Verhältnisse übertragen werden können. Zumal ein großer Unterschied zwischen den benetzten Oberflächen in Labor und unter natürlicher Lagerung zu erwarten, der zu sehr viel größeren Unterschieden der Lösungskinetik führen kann ist (BRANTLEY 1992).

4.3.4 Fazit

Um die Lösungskinetik von Silikat bei unterschiedlichen natürlichen Substraten näher zu untersuchen, wurde ein einfaches Laborexperiment durchgeführt. Dabei wurde mit unterschiedlichen, aus den Deckschichten entnommenen Materialien die Zunahme der Silikatkonzentration mit der Zeit beobachtet. Zur Abschätzung der dabei entstehenden Fehler wurden jeweils mehrere Versuche mit dem gleichen Substrat bei gleichen und bei veränderten Randbedingungen durchgeführt.

Prinzipiell konnte bei allen Versuchen ein typischer Verlauf der Lösungskinetik beobachtet werden: Einem anfänglichen raschen, parabolisch verlaufenden Anstieg der Silikatkonzentrationen folgte nach etwa zwei Tagen eine zweite Phase mit einer konstanten, sehr niedrigen Lösungsrate. Für die Verwendung von gelöstem Silikat als Tracer ergab sich daraus, dass auch für Abflüsse, die nur sehr kurz in Kontakt mit mineralischen Oberflächen standen, von einer signifikanten Grundkonzentration von mindestens 0,5 bis 0,8 mg/l nach wenigen Stunden und von ca. 2 bis 2,5 mg/l nach einigen Tagen ausgegangen werden muss. Von dieser Grundkonzentration ausgehend zeigt das Lösungsverhalten von Silikat dann für alle Substrate eine lineare, sehr langsame Zunahme der Konzentrationen, so dass sehr hohe Konzentrationen in Abflüssen lange Aufenthaltszeiten anzeigen.

Der Vergleich der Lösungskinetik bei unterschiedlichen Substraten von verschiedenen Hängen und Deckschichtentypen ergab sich ein sehr ähnliches Verhalten der unterschiedlichen Substrate. Lediglich Substrate mit „außergewöhnlichen“ Korngrößen zeigten ein sehr unterschiedliches Verhalten. Daraus ergibt sich, dass die teilweise sehr unterschiedlichen Silikatkonzentrationen, die im Untersuchungsgebiet an verschiedenen Hängen und Deckschichtentypen gemessen wurden, nicht von der mineralischen Zusammensetzung oder anderen Besonderheiten der Deckschichtensubstrate abhängen, sondern durch andere Faktoren wie z.B. Aufenthaltszeiten gesteuert werden.

Durch Vergleich unterschiedlicher Randbedingungen wurde deutlich, dass veränderte Temperaturverhältnisse und veränderter Chemismus des Lösungsmittels zu großen erhöhenden wie auch vermindernenden Auswirkungen auf die Lösungskinetik führen können. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse der Laborexperimente in quantitativer Hinsicht nur sehr eingeschränkt auf natürliche Verhältnisse übertragen werden können.

5 Schlussfolgerungen

Ausgehend von der Zielsetzung, die hydrochemische Signatur der oberflächennahen unterirdischen Abflusskomponenten in ihrer räumlichen und zeitlichen Variabilität so umfassend wie möglich zu untersuchen und darüber hinaus die Aussagekraft dieser hydrochemischen Signatur zu überprüfen und zu präzisieren, wurden im Verlauf dieser Arbeit unterschiedliche experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden jeweils exemplarisch ausführlich dargestellt, diskutiert und ein Fazit gezogen. Im Folgenden wird nun versucht, die allgemeingültigen Aussagen und Schlussfolgerungen, die sich aus den Untersuchungen ergaben darzustellen.

Durch Geländebeobachtungen von Morphologie, Schüttungsverhalten und kleinräumigem Gewässernetz konnten die Abflüsse der Schuttdecken an Weganschnitten und natürlichen Austrittsstellen meist eindeutig als solche angesprochen werden. Dies wurde durch die Ergebnisse der hydrochemischen Analysen beim Vergleich mit anderen Abflusskomponenten bestätigt (Kap. 4.1.4). Auch die durchgeführte hierarchische Clusteranalyse zeigte eine deutliche Abgrenzbarkeit der chemischen Zusammensetzung der Deckschichtenabflüsse gegen andere Abflusskomponenten, wie z.B. Hochlagenquellen, Kluftquellen, Gerinne (Kap. 4.1.7).

Unter Berücksichtigung aller in dieser Arbeit untersuchten Deckschichtenabflüsse wurde für gelöstes Silikat ein fundiert belegter, repräsentativer Mittelwert von 3,2 mg/l gefunden (Kap. 4.1.6). Einschränkend für die Benutzung dieses Werts muss die große räumliche Variabilität mit einer Schwankungsbreite zwischen 2 und 4,5 mg/l angeführt werden. Zeitlich hingegen waren die Variabilitäten auch während der durchgeführten Ereignisbeprobung so gering, dass von quasi konstanten Silikat-Konzentrationen der einzelnen Deckschichtenabflüsse ausgegangen werden kann (Kap. 4.1.2 u. 4.2).

Bei den Hauptionen wurde für Nitrat, Sulfat und Natrium ein räumlich und zeitlich sehr variables Verhalten beobachtet, so dass nicht von einer einheitlichen hydrochemischen Signatur der einzelnen Probennahmestellen und auch der Deckschichtenabflüsse insgesamt bezüglich dieser Inhaltstoffe ausgegangen werden kann. Calcium hingegen zeigte ein räumlich sehr variables, zeitlich aber relativ wenig variables Verhalten, so dass von einer einheitlichen hydrochemischen Signatur der einzelnen Probennahmestellen, aber nicht der Deckschichtenabflüsse insgesamt bezüglich dieses Inhaltstoffes ausgegangen werden kann.

Für Chlorid, Kalium und Magnesium ergaben sich räumlich und zeitlich sehr wenig ausgeprägte Variabilitäten, allerdings in einem sehr niedrigen Wertebereich nahe der Messgenauigkeit (Kap. 4.1.6). Diese Inhaltsstoffe finden sich auch bei anderen Abflusskomponenten in sehr ähnlicher Weise. Die im Vorfeld der Untersuchungen angenommene Eignung für Sulfat als herkunftsraumorientierten Tracer, der die Tiefe der

Fließwege anzeigt, konnte mehrere Male nicht bestätigt werden. Dagegen zeigte Chlorid generell eine leichte Erhöhung der Konzentrationen bei Abflusskomponenten mit tiefgründigen Fließwegen.

Die Ergebnisse einfacher Regressionsanalysen bestätigten die Sonderrolle, die dem gelösten Silikat als hydrochemischem Tracer zugewiesen wird. Offensichtlich wird die Silikatkonzentration der Abflüsse hauptsächlich von Lösungs- und Verdünnungsprozessen bestimmt und weniger durch biologische, pedologische und anthropogene Einflüsse. Eine Einschränkung der Benutzung von Silikat als hydrochemischem Tracer zeigten die engen Grenzen, in denen sich die Silikatkonzentrationen während des Untersuchungszeitraums bei unterschiedlichen Abflussverhältnissen bewegten. Dadurch wurden Grenzen der Nutzung von Silikat als Tracer aufgezeigt. Die gemessenen Werte wiesen zu geringe Differenzen auf, um verschiedene Komponenten damit aufzutrennen. Offenbar wiesen unterschiedliche Abflusskomponenten sehr ähnliche Silikatkonzentrationen auf.

Für die Betrachtungsebene der Hangskale ergab sich, dass das sog. Fließsystem-2, die Abflusskomponente der periglazialen und holozänen Schuttdecken, auf der Basis der hydrochemischen Signatur vertikal nicht weiter zu untergliedern ist. Die verschiedenen Schichten der Schuttdecken, wie z.B. Basislage, Hauptlage, etc. bilden hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung zusammen eine Abflusskomponente. Dies konnte durch Beprobung unterschiedlicher Tiefenkomponenten gezeigt werden, die jeweils eine sehr ähnliche hydrochemische Signatur aufwiesen (Kap.4.1.5). Darüber hinaus wurde durch Literaturvergleich und eigene Geländebeobachtungen klar, dass eine Schichtung der Schuttdecken keinesfalls überbewertet werden darf. Charakteristisch ist vielmehr ein sehr kleinräumiger Wechsel und unklar ausgeprägte Schichtgrenzen, so dass der Abfluss zur ständigen Durchmischung gezwungen wird (Kap. 2.5).

Ein genereller Zusammenhang zwischen der hydrochemischen Signatur der verschiedenen beprobten Deckschichtenabflüsse und verschiedenen Faktoren wie Hangposition, Einzugsgebietsgröße oder Exposition konnte nicht bestätigt werden. Beprobte Hangabfolgen widerlegten einen signifikanten Einfluss der Hangposition (Kap. 4.1.4). Die Überprüfung der clusteranalytisch durchgeführten Gruppierung ergab, dass die beprobten Abflüsse insgesamt einen sehr ähnlichen Chemismus aufweisen und sich nicht in klar voneinander abgegrenzte Gruppen aufteilen lassen.

Die Unterschiede der Silikatkonzentrationen der Abflüsse von Hang zu Hang, konnten mit hangspezifischen Merkmalen erklärt werden. Eindeutig konnten Teilhängen mit sehr flachgründigen Fließwegen in den Schuttdecken niedrigere Silikatkonzentrationen zugeordnet werden, als Teilhängen mit tiefgründigen Fließwegen (Kap. 4.1.6 u. 4.1.4). Daraus konnten sich aber keine allgemeingültigen Aussagen über die Bindung dieser Tiefgründigkeit der Fließwege an bestimmte Hangexpositionen, Deckschichtentypen oder –mächtigkeiten ableiten lassen.

Deutlich wurden die Grenzen der Methode der herkunftsraumorientierten Abflusskomponententrennung mittels hydrochemischer Signaturen klar. Es konnte gezeigt werden, dass hydrochemische Parameter schon auf kurzer Fließstrecke signifikant verändert werden können. Konkret konnten für Silikat und Chlorid deutliche Erhöhungen der Konzentrationen und für Nitrat und Sulfat deutliche Verminderungen der Konzentrationen auf kurzer Fließstrecke nach Wiederversickern nachgewiesen werden (Kap.4.1.5 u. 4.1.6). Dies stimmt auch mit Untersuchungen von FEGGER et al. (1999) überein, die feststellten, dass Nitrat und Sulfat durch Reduktionsprozesse in bachnahen Böden stark verändert werden können. Daraus ergibt sich, dass hydrochemische Signaturen maskiert werden können. Flächen, die nicht direkt ans Gewässernetz angeschlossen sind, dürfen nicht mit eigenen hydrochemischen Signaturen ausgewiesen werden.

Aus dem Laborexperiment zur Lösungskinetik von Silikat ergab sich eine Einschränkung für die Nutzung dieses geochemischen Tracers. Auch für Abflüsse, die nur sehr kurz in Kontakt mit mineralischen Oberflächen standen, muss von einer signifikanten Grundkonzentration von mindestens 0,5 bis 0,8 mg/l schon nach wenigen Stunden und von mindestens 2 bis 2,5 mg/l nach etwa zwei Tagen ausgegangen werden. Erst von dieser Grundkonzentration ausgehend zeigt das Lösungsverhalten von Silikat dann eine lineare, sehr langsame Zunahme der Konzentrationen, so dass sehr hohe Konzentrationen in Abflüssen lange Aufenthaltszeiten anzeigen. Aus dem Vergleich verschiedener Substrate ergab sich, dass die teilweise sehr unterschiedlichen Silikatkonzentrationen, die im Untersuchungsgebiet an verschiedenen Hängen und Deckschichtentypen gemessen wurden, nicht von der mineralischen Zusammensetzung oder anderen Besonderheiten der Deckschichtensubstrate abhängen, sondern durch andere Faktoren wie z.B. Aufenthaltszeiten gesteuert werden (Kap. 4.3).

Trotz der ausgedehnten Untersuchungen ist letztlich weiterhin unklar, wodurch die geringe zeitliche Variabilität der hydrochemischen Signatur der Deckschichtenabflüsse gesteuert wird. Denkbar wäre aufgrund der beobachteten raschen Lösungskinetik eine schnelle chemische Angleichung unterschiedlicher Abflusskomponenten. Andererseits ist denkbar, dass durch das Niederschlagsereignis ein hoher Anteil von Vorereigniswasser piston-flow-artig ausgepresst wird. Eine teilweise Beantwortung dieser Frage könnte die Analyse der stabilen Isotope in den entnommenen Ereignisproben bringen. Weitere Ereignisbeprobungen mit kombinierter Analyse der stabilen Isotope und der chemischen Zusammensetzung könnten eine weitere Klärung dieser Probleme bringen.

Durch Vergleich unterschiedlicher Randbedingungen während des Laborexperiments zur Silikatlösung wurde deutlich, dass veränderte Temperaturverhältnisse und veränderter Chemismus des Lösungssagens zu großen erhöhenden wie auch vermindernden Auswirkungen auf die Lösungskinetik führen können. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse der Laborexperimente in quantitativer Hinsicht nur sehr eingeschränkt auf natürliche Verhältnisse übertragen werden können. Zur genauen Ermittlung der Grundkonzentration, die für Silikat angenommen werden muss, sind aus diesem Grund weitere Untersuchungen nötig. Genauere

Daten könnten durch Säulenversuche mit natürlich gelagerten Bodenproben oder idealerweise mittels Lysimetern im Untersuchungsgebiet gewonnen werden.

Die Beprobung wurde räumlich stark eingeschränkt durchgeführt, um eine bessere Auflösung zu erreichen. Zur Überprüfung der Repräsentativität der Ergebnisse wäre es nötig, zunächst eine Beprobung der Deckschichten-Kleinquellen auf das ganze Brugga-EZG auszudehnen. Davon ausgehend, könnten ähnliche Untersuchungen in weiteren EZG mit anderen Ausgangsgesteinen die Übertragbarkeit der Ergebnisse zeigen.

Auf die Problematik der Zuweisung von hydrochemischen Signaturen auf bestimmte Flächen wurde schon mehrfach hingewiesen. In dieser Untersuchung konnte kein genereller Zusammenhang zwischen bestimmten aus Karten ablesbaren Parametern wie z.B. Hangneigung, Exposition oder Deckschichtentyp und z.B. der Silikatkonzentration der Deckschichtenabflüsse bestätigt werden. Andererseits wurde eine sehr geringe zeitliche Variabilität gerade der Silikatkonzentrationen an den einzelnen Probennahmestellen festgestellt. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, Teilflächen durch eine hydrochemische Kartierung bestimmte Silikatkonzentrationen zuzuweisen.

Abschließend ist zu bemerken, dass die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit hauptsächlich Grenzen der Nutzung von hydrochemischen Wasserinhaltsstoffen als herkunftsraumorientierte Tracer aufzeigten. Trotzdem oder gerade dadurch die Aussagekraft der hydrochemischen Signatur von Abflüssen präzisiert werden und das Wissen über oberflächennahe unterirdische Abflusskomponenten ein Stück vorangebracht werden.

6 Literatur

- ANDERSSON, J.G. (1906): Solifluction, a component of subaerial denudation. J. Geol. 14, 91-112, Chicago.
- BERNER, R..A. & HOLDREN, G.R. (1977): Mechanism of feldspar weathering: Some observational evidence. Geology 5, 369-372, Boulder.
- BIBUS, E., NAGEL, G. & SEMMEL, A. (1976): Periglaziale Reliefformung im zentralen Spitzbergen. Catena 3, 29-44, Gießen.
- BIEHLER, D. (1995): Kluftgrundwässer im kristallinen Grundgebirge des Schwarzwaldes – Ergebnisse von Untersuchungen in Stollen. Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA), C22, Tübingen.
- BRANTLEY, S.L. (1992): Kinetics of dissolution and precipitation – experimental and field results. In: Kharaka & Maest (ed.): Water – Rock – Interaction, 3-6, Balkema, Rotterdam.
- BÜDEL, J. (1959): Periodische und episodische Soifluktion im Rahmen der klimatischen Solifluktionstypen. Erdkunde 13, Bonn.
- BÜDEL, J. (1960): Die Frostschuttzone Südostspitzbergens. Colloq. Geogr. cum, 6, 1- 105, Bonn.
- BÜDEL, J. (1961): Die Abtragungsvorgänge auf Spitzbergen im Umkreis der Barentsinsel. In: Deutscher Geographentag Köln 1961, Tagungsber. u. wiss. Abh., 337-375, Wiesbaden.
- DAHMKKE, A. (1988): Lösungskinetik von feldspat-reichen Gesteinen und deren Bezug zu Verwitterung und Porenwasser-Chemie natürlicher Sandersedimente. Berichte, Geol.-Paläont. Inst. Univ. Kiel, 20, Kiel.
- DIDSZUN, J. (2000): Abflussbildung an Hängen. Diplomarbeit, Institut für Hydrologie, Uni. Freiburg, (unveröffentlicht).
- FEGER, K.-H., Köhler, H., Armbruster, M. (1999): Beeinflussung der Wasserqualität in einem bewaldeten Einzugsgebiet durch biogeochemische Stoffumsetzungen in bachnahen Böden. Forstw. Cbl.118, 345-354, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin.
- FEZER, F. (1953): Schuttdecken, Blockmassen und Talformen im nördlichen Schwarzwald. Gött. Geogr. Abh. 14, 1-34, Göttingen.

- FEZER, F. (1957): Eiszeitliche Erscheinungen im nördlichen Schwarzwald. Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde, Remagen.
- FITZPATRICK, E. (1956): An indurated soil horizon formed by permafrost. *J. Soil Sci.* 7, 248-257, Oxford.
- FREY, M. (1999): Tracerhydrologische Untersuchung im Bruggaeinzugsgebiet: Gase, Silikat und stabile Isotope. Diplomarbeit, Institut für Hydrologie, Uni. Freiburg (unveröffentlicht).
- FRÜHAUF, M. (1990): Neue Befunde zur Lithologie, Gliederung und Genese der periglazialen Lockermaterialdecken im Harz: Fremdmaterialnachweis und Decksedimenterfassung. *Petermanns geogr. Mitt.* 4, 249-256, Gotha.
- FURTAK, H. & LANGGUTH, H.R. (1967): Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen. *Intern. Asso. Geohydrol.* 7, 89-96.
- GASSMANN, A. (1999): Die periglazialen Deckschichten und Böden im unteren Höllental. Diplomarbeit, Geol. Institut, Uni. Freiburg, (unveröffentlicht).
- GLA (1981): Erläuterungen zur Geologischen Karte Freiburg im Breisgau und Umgebung 1:50000, Stuttgart.
- HAINES, T.S. & LLOYD, J.W. (1985): Controls on silica in groundwater environments in the United Kingdom. *J. Hydrol.* 81, 277-295.
- HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie. Enke Verlag, Stuttgart.
- HÖTZL, H. (1982): Statistische Methoden zur Auswertung hydrochemischer Daten. DVWK-Schriften 45, 1-69, Paul Parey Hamburg.
- HÖTZL, H. (1999): Methoden für die Beschreibung der Grundwasserbeschaffenheit. DVWK-Schriften 125, Bonn.
- HOLDREN, G.R.JR. & ADAMS, J.E. (1982): Parabolic dissolution kinetics of silicate minerals: an artifact of non-equilibrium precipitation processes? *Geology*, 10, 186-190, Boulder.
- HOLDREN, G.J.JR. & SPEYER, P.M. (1985): Reaction rate – surface area relationships during the early stages of weathering. I. Initial observations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49: 645-681, Oxford.

- HOOPER, R.P. & SHOEMAKER, C.A. (1986): A Comparison of Chemical and Isotopic Hydrograph Separation. *Wat. Resour. Res.* 22, 10, 1444-1454.
- KARRASCH, H. (1970): Das Phänomen der klimabedingten Reliefasymmetrie in Mitteleuropa. *Göttinger geogr. Abh.* 56, Göttingen.
- KENNEDY, V.C., KENDALL, C., ZELLWEGER, C.W., WYERMAN, T.A. & AVANZINO, R.J. (1986): Determination of the components of stormflow using water chemistry and environmental isotopes, Mattole river basin, California. *J. Hydrol.*, 84, 107-140, Elsevier, Amsterdam.
- KUGLER, H. & SCHAUB, D. (1997): Allgemeine Geomorphologie. In: Hendl, M. & Liedtke, H. (Hrsg.): *Lehrbuch der Allgemeinen Physischen Geographie*. Justus Perthes Verlag, Gotha.
- LEANNEY, F.W., SMETTEN, K.R.J., CHITTLEBOROUGH, D.J. (1993): Estimating the contribution of preferential flow to subsurface runoff from a hillslope using deuterium and chloride. *J. Hydrol.* 159, 291-303.
- LEIBUNDGUT, CH. (1984): Zur Erfassung hydrologischer Messwerte und deren Übertragung auf Einzugsgebiete verschiedener Dimensionen, *Geomethodica* 9, 141-170.
- LINDENLAUB, M. (1998): Abflusskomponenten und Herkunftsräume im Einzugsgebiet der Brugga. Dissertation, Institut für Hydrologie, Uni. Freiburg.
- LOZINSKI, W. (1909): Über die mechanische Verwitterung der Sandsteine im gemäßigten Klima. *Cl. Sci. Math. et Naturelles* 1, 1-25, Krakau.
- MATTHESS, G. (1990): Die Beschaffenheit des Grundwassers. Gebrüder Bornträger, Berlin.
- MEESBURG (1997): Untersuchungen zum Säure-Base-Status eines episodisch sauren Fliessgewässers im Schwarzwald. *Freiburger geogr. Hefte* 51, Geogr. Institut, Uni. Freiburg.
- MEHLHORN, J. (1998): Tracerhydrologische Ansätze in der Niederschlags-Abfluss-Modellierung. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, Band 8, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg.
- MOSER, H. & RAUERT, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrogeologie. Gebrüder Bornträger, Berlin.

- MÜLLER, H.E. (1998): Hydrochemische Untersuchungen und Datenauswertung. Scriptum Laborseminar Hydrologie, (unveröffentlicht).
- OHSE, W. (1983): Lösungs- und Fällungserscheinungen im System oberflächennahes unterirdisches Wasser / gesteinsbildende Minerale – eine Untersuchung auf der Grundlage der chemischen Gleichgewichts-Thermodynamik. Diss., Univ. Kiel, Kiel.
- PETERS et al. (1998): Tracing solute mobility at the Panola Mountain Research Watershed, Georgia, USA: Variations in Na^+ , Cl^- , and H_4SiO_4 concentrations. IAHS-Publ.248, 483-490.
- ROHDENBURG, H. (1968): Zur Deutung der quartären Taleintiefung in Mitteleuropa. Die Erde 99, 4, 297-304, Berlin.
- RUTENBERG, E. (1998): Raumgliederung aufgrund der dominanten Abflussbildungsprozesse im Bruggagebiet. Diplomarbeit, Institut für Hydrologie, Uni. Freiburg, (unveröffentlicht).
- SAUTER, K. (1967): Beiträge zur Hydrogeologie der näheren Umgebung von Freiburg im Breisgau. Mitt. bad. Landesver. Naturkunde und Naturschutz, 9, 3, 611-637.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1989): Lehrbuch der Bodenkunde. Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHILLING, W. & WIEFEL, H. (1962): Jungpleistozäne Periglazialbildungen und ihre regionale Differenzierung in einigen Teilen Thüringens und des Harzes. Geologie 11, 428-460, Berlin.
- SCHLITTGEN, R. (1993): Einführung in die Statistik: Analyse und Modellierung von Daten. 4. überarb. und erw. Aufl., Oldenbourg, München, Wien.
- SCHWEGLER, M. (1995): Klassifizierung von Quellen nach Hydrochemie und Herkunftsräumen im Einzugsgebiet der Brugga (Südschwarzwald). Diplomarbeit, Institut für Hydrologie, Uni. Freiburg, (unveröffentlicht).
- SEMMELE, A. (1969): Verwitterungs- und Abtragungserscheinungen in rezenten Periglazialgebieten (Lappland und Spitzbergen). Würzburger Geogr. Arb., 26, Würzburg.
- SEMMELE, A. (1977) zit. in REHFUESS, K.E. (1990): Waldböden – Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. Pareys Studentexte, 29, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

- SEMMEI, A. (1985): Periglazialmorphologie. Ertr. Forsch., 231, Darmstadt.
- SHARP, R.P. (1942): Soil structures in the St. Elias Range, Yukon Territory. J. Geomorph 5, 274-301, New York.
- SIEDER, M. (1998): Experimentelle Untersuchung der Abflussbildung auf Sättigungsflächen. Diplomarbeit, Institut für Hydrologie, Uni Freiburg, (unveröffentlicht).
- SKLASH, M. G. & FARVOLDEN, R.N. (1979): The role of groundwater in storm runoff. J. Hydrology 43, 45-65.
- SOULSBY, C., CHEN, M., FERRIER, R.C., HELLIWELL, R.C., JENKINS, A. & HARRIMAN, R.: Hydrogeochemistry of shallow groundwater in an upland Scottish catchment. Hydrol. Process. 12, 1111-127, John Wiley & Sons, New York.
- STAHR, K. (1979): Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für Bodenbildung und Standortseigenschaften im Südschwarzwald. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, 9, Freiburg.
- STOBER, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. Ferdinand-Enke-Verlag, Stuttgart.
- STUMM, W. & MORGAN, J.J. (1981): Aquatic chemistry. Wiley & Sons: 780 S., New York.
- UHLENBROOK, S. (1999): Untersuchung und Modellierung der Abflussbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 10, Institut für Hydrologie, Uni. Freiburg.
- VELBEL, M.A. (1990): Influence of temperature and mineral surface characteristics on feldspar weathering rates in natural and artificial systems: A first approximation. Water Res. Res. 26, 3049-3053.
- WEISE, O.R. (1983): Das Periglazial. Gebrüder Bornträger, Berlin u. Stuttgart.
- WELS, C., TAYLOR, C.H., CORNETT, R.J. (1991): Streamflow generation in a headwater basin on the precambrian shield. Hydrol. Processes 5, 185-199.
- WIMMENAUER, W. & HÜTTNER, R. (1967): Geologische Karte von Baden-Württemberg. Erläuterungen zu Blatt 8013 Freiburg. GLA Baden-Württemberg, Stuttgart.
- YINIAN, Z. (2001): Hydrogeologie und Gestein – Wasser – Reaktion in der Grube Clara (Schwarzwald). Freiburger geowiss. Beitr. 15, Freiburg.

7 Anhang

Tab.A: Lage und geschätzte EZG-Größe der Probenahmestellen

Bezeichnung	Höhe m ü NN	Koordinaten Rechtswert / Hochwert	EZG-Größe [m²] (Schätzung)
01	660	3420681 / 5307375	3137
Zä	650	3420593 / 5307419	114172
Zä_alt	670	3420587 / 5307555	93785
Zä_A	680	3420617 / 5307537	15369
Zä_B	680	3420635 / 5307520	15369
Zä_C	670	3420680 / 5307490	15369
Zä_unt	675	3420750 / 5307459	
SchB	850	3423624 / 5305809	
SchB.1	1140	3423925 / 5306366	
HüB	915	3423928 / 5305650	
HüB.1	1190	3424476 / 5305998	
Alluv02	865	3423737 / 5305697	
Alluv01	870	3423710 / 5305730	
Alluv03	875	3423686 / 5305791	8155
Alluv04	880	3423718 / 5305784	8155
Alluv05	880	3423785 / 5305710	22897
Alluv06	870	3423762 / 5305688	3764
22	920	3423888 / 5305724	19447
23	920	3423856 / 5305758	1568
24	910	3423732 / 5305852	4078
24.1	920	3423531 / 5305969	8782
05	1080	3424008 / 5305896	8782
05.1	1080	3424011 / 5305888	2509
05.2	1080	3423893 / 5306033	
04.0	1200	3424691 / 5305817	
04.1	1270	3424588 / 5305948	
04A	1200	3424118 / 5306127	5332
04B	1180	3424101 / 5306112	7214
04C	1180	3424090 / 5306117	7214
04D	1180	3424103 / 5306101	7214
04.2	1140	3423937 / 5306289	5646
10	970	3424151 / 5305007	5960
11A	1060	3423858 / 5304924	10037
11B	1060	3423837 / 5304933	10037
12A	1080	3423546 / 5305263	11919
12B	1100	3423505 / 5305243	2823
13	1090	3423417 / 5305300	2196
14	1090	3423100 / 5305002	5646
15	1150	3422879 / 5304605	2823
16A	1190	3423070 / 5304574	4078
16B	1190	3423104 / 5304585	4078

17	1210	3423186 / 5304714	9410
B01	1100	3422868 / 5304781	
B01.1	1150	3422858 / 5304604	
B01.2	1190	3423051 / 5304578	
18	1190	3422338 / 5305240	4391
19	1170	3422315 / 5305081	10351
20	1080	3422654 / 5305540	
21	1000	3422133 / 5305847	9723
B03	1000	3422082 / 5305800	
02A	880	3423781 / 5305594	33875
02A.1	880	3423774 / 5305591	33875
02B	880	3423838 / 5305547	15056
03A	910	3423999 / 5305425	31366
03B	910	3424018 / 5305398	31366
03C	910	3424036 / 5305400	31366
NB	890	3423898 / 5305493	
06	950	3423956 / 5305246	
06.1	950	3423984 / 5305210	40776
06.2	950	3423972 / 5305232	40776
07A	965	3423890 / 5305279	40776
07B	940	3424001 / 5305274	22270
08	1100	3423095 / 5305318	22270
LA	745	3421904 / 5306571	15056
AL	780	3422331 / 5306428	
KSB	760	3421967 / 5306433	