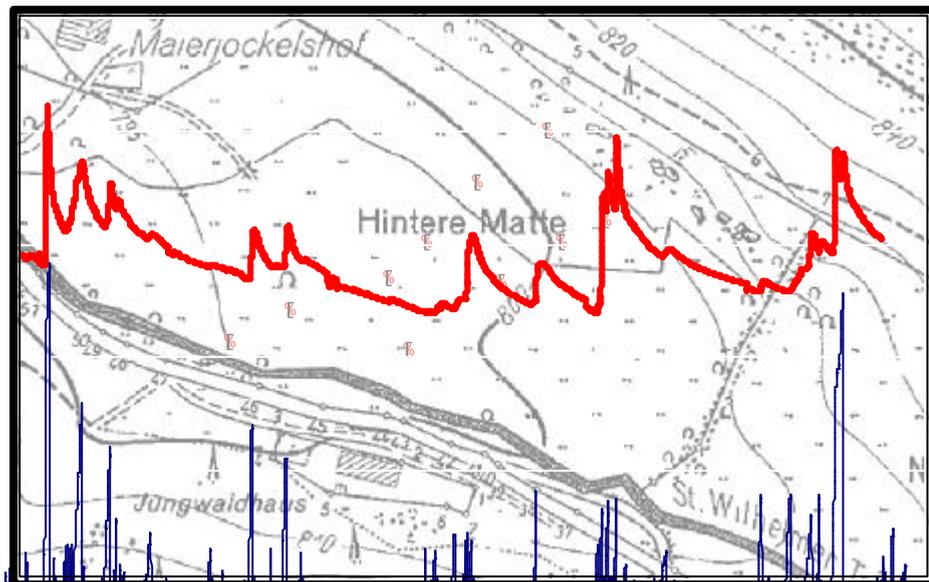


Institut für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

Jochen Wenninger

**Experimentelle Untersuchung zur Dynamik von
Hanggrundwasser und dessen Übertritt in die Talau
und den Vorfluter im Bruggaeinzugsgebiet**



Diplomarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Ch. Leibundgut

Freiburg im Breisgau, April 2002

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

Jochen Wenninger

**Experimentelle Untersuchung zur Dynamik von
Hanggrundwasser und dessen Übertritt in die Talaue
und den Vorfluter im Bruggaeinzugsgebiet**

Referent: Prof. Dr. Ch. Leibundgut

Koreferent: Dr. S. Uhlenbrook

Diplomarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Ch. Leibundgut

Freiburg im Breisgau, April 2002

*A*lles ist aus dem Wasser entsprungen
Alles wird durch Wasser erhalten!
Ozean, gönn uns dein ewiges Walten.
Wenn du nicht in Wolken sendetest,
Nicht reiche Bäche spendetest,
Hin und her nicht Flüsse wendetest,
Die Ströme nicht vollendetest,
Was wären Gebirge, was Ebenen und Welt?
Du bist's der das frischeste Leben erhält.

(Johann Wolfgang von Goethe)

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Theoretische Grundlagen	3
1.2.1 Abflussbildungsprozesse	3
1.2.1.1 Infiltration und Horton'scher Oberflächenabfluss	4
1.2.1.2 Sättigungsflächenabfluss	4
1.2.1.3 Groundwater Ridging	5
1.2.1.4 Piston Flow	5
1.2.2 Begriffe im Zusammenhang mit Grundwasser	6
2. Das Untersuchungsgebiet	8
2.1 Klima und Hydrologie	9
2.2 Geologie und Geomorphologie	12
2.3 Böden	14
2.4 Testfeldauswahl	17
2.5 Beschreibung des Testfeldes	18
3. Methodik	22
3.1 Bestimmung der Aquiferparameter	22
3.1.1 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus der Entnahmemenge	23
3.1.2 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes bei instationärem Strömungszustand	23
3.1.3 Abschätzung der Transmissivität aus einem Pumpversuch	24
3.2 Ganglinienseparation	24
3.2.1 Zweikomponententrennung	25
3.2.2 Dreikomponententrennung	26
3.2.3 Geogene Tracer und Isotope	28
3.2.3.1 Chlor	28
3.2.3.2 Stickstoff	29
3.2.3.3 Schwefel	30
3.2.3.4 Calcium	30
3.2.3.5 Magnesium	31
3.2.3.6 Kalium	31

3.2.3.7	Natrium	32
3.2.3.8	Silicium	32
3.2.3.9	Deuterium	33
3.2.3.10	Verwendung als Tracer	33
3.3	Feldmethoden	34
3.3.1	Bodensondierungen	34
3.3.2	Einrichtung der Grundwasserbeobachtungsstellen	35
3.3.3	Probennahme und Messung der in-situ Parameter	38
3.3.4	Niederschlagsmessung	39
3.3.5	Abflussmessung	40
3.4	Labormethoden	40
3.4.1	Silikatanalyse	40
3.4.2	Bestimmung der Hauptionen	41
3.4.3	Deuteriumanalyse	43
4.	Ergebnisse und Diskussion	44
4.1	Untergrundverhältnisse	44
4.1.1	Bodensondierungen	44
4.1.2	Ergebnisse der Durchlässigkeitsbeiwertbestimmung	47
4.1.3	Diskussion	48
4.1.4	Fazit	49
4.2	Hydrologische Verhältnisse im Untersuchungszeitraum	50
4.2.1	Witterungsverhältnisse	50
4.2.2	Abflussverhalten der Brugga	54
4.2.3	Verhalten der Standrohrspiegelhöhen der Grundwassermessstellen	55
4.2.4	Verhalten der Oberflächengewässer	58
4.2.5	Einfluss der Niederschläge auf die Standrohrspiegelhöhen	59
4.2.6	Einfluss der Niederschläge auf die hydrochemische Signatur	60
4.2.7	Diskussion	64
4.2.8	Fazit	67
4.3	Laterale Interaktionen und Druckwellenausbreitung	69
4.3.1	Reaktionen der Standrohrspiegelhöhen	69
4.3.2	Druckwellenausbreitung	73
4.3.3	Verhalten der Chemischen Parameter	75

4.3.4	Diskussion	79
4.3.5	Fazit	81
4.4	Ereignisbeprobung	82
4.4.1	Witterungssituation und Niederschlagsbeprobung	82
4.4.2	Chemische Parameter	85
4.4.3	Diskussion	97
4.4.4	Fazit	100
4.5	Ganglinienseparationen	101
4.5.1	Grundwassermessstelle 4	101
4.5.2	Grundwassermessstelle 9	104
4.5.3	Ganglinienseparation der Sättigungsfläche	106
4.5.3.1	Zweikomponententrennung	107
4.5.3.2	Quantifizierung des zusätzlichen Grundwasseranteils	108
4.5.4	Diskussion	110
4.5.5	Fazit	113
5. Schlussfolgerungen und Ausblick		114
6. Literaturverzeichnis		118
Anhang A		A1 - A19
Anhang B		B1 - B6
Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes „Hintere Matte“		

Verzeichnis der Abbildungen im Text

Abb. 1.1: Bruggaeinzugsgebiet mit Darstellung der diffus entwässernden Flächen.....	2
Abb. 1.2: Abflussbildungsprozesse am Hang.....	3
Abb. 1.3: Grundwassermessstellen in gespannten und freien Grundwasserleitern.....	6
Abb. 1.4: Begriffsbestimmungen nach DIN 4049.....	7
Abb. 2.1: Lage des Untersuchungsgebiets	8
Abb. 2.2: Mittlere Abflusssspenden der Gewässer St. Wilhelmer Talbach, Brugga und Dreisam	11
Abb. 2.3: Abflussregime der Gewässer St. Wilhelmer Talbach, Brugga und Dreisam.....	11
Abb. 2.4: Geologische Karte des St. Wilhelmer Tals	12
Abb. 2.5: Verbreitung der würmeiszeitlichen Vereisungsphasen.....	14
Abb. 2.6: Gliederung der unterschiedlichen Landschaften in Hangbereichen	15
Abb. 2.7: Blick vom Schmaleck auf das Testfeld in nördlicher Richtung.	19
Abb. 2.8: Schematisches Querprofil des gesamten Hangbereichs	20
Abb. 2.9: Schematischer Schnitt durch das Testfeld mit Lagebezeichnungen	21
Abb. 3.1: Karte der Bodensondierungen auf dem Testfeld	35
Abb. 3.2: Filterrohr mit Rammspitze einer Grundwasserbeobachtungsstelle	36
Abb. 3.3: Rammfilterbrunnen mit Schlagkopfaufsatz kurz vor dem Einbau	37
Abb. 3.4: Schematische Darstellung eines Ionenchromatographiesystems.....	42
Abb. 4.1: Überdeckung des Grundwasserleiters	45
Abb. 4.2: Bodenprofil 1, mit Angabe der Feinbodenart und des Kiesanteils	46
Abb. 4.3: Übersicht der Feinbodenarten	47
Abb. 4.4: Pumpversuchsauswertung der GWMS 6 am 20.09.01.....	48
Abb. 4.5: Abweichungen der Monatsniederschläge und Durchschnittstemperaturen der Station Freiburg im Vergleich zum langjährigen Mittel der Klimaperiode 1961-1990.....	51
Abb. 4.6: Verlauf des Niederschlages und der Lufttemperatur an der Klimastation Katzensteig	53
Abb. 4.7: Abfluss (Brugga) und Niederschlag (Katzensteig) im Untersuchungsgebiet	54
Abb. 4.8: Ereignisse 1 bis 19 mit Flurabstand der GWMS 1	57
Abb. 4.9: Ganglinien der Oberflächengewässer.....	58
Abb. 4.10: Regressionen zwischen Anstiegshöhe des Grundwasserspiegels über die Grundwasserleiteroberfläche (GWLOBF)	59
Abb. 4.11: 7-Tage-Vorregensumme und 7-TageVorregenindex	60
Abb. 4.12: Stichtagsbeprobung Anionen, Kationen und Silikat der GWMS 4.....	62
Abb. 4.13: Stichtagsbeprobung Anionen, Kationen und Silikat des St. Wilhelmer Talbachs	63
Abb. 4.14: Korrelationskoeffizienten (r) zwischen Anstiegsrate und Niederschlagsmenge, bzw. Niederschlagsintensität am Beispiel des Profils 1	65
Abb. 4.15: Vergleich der Grundwasserganglinien des Profils 1.....	69
Abb. 4.16: Mittelwerte der Rangfolge der Scheitelzeiten.....	71
Abb. 4.17: Rangfolge der Scheitelzeiten und Verzögerungszeiten des Profils 1.....	72
Abb. 4.18: Rangfolge der Scheitelzeiten und Verzögerungszeiten des Profils 2.....	72
Abb. 4.19: Beispiel einer Grundwasserganglinie während des Ereignisses mit ausgewählten Zeischritten ($t = 1$ bis $t = 12$).....	73

Abb. 4.20: Interpolationen der Wasserstände für das Ereignis vom 29.11.2001 bis 4.12.2001.....	74
Abb. 4.21: Legende der Abb. 4.20.....	75
Abb. 4.22: Chloridkonzentrationen im Testfeldprofil.....	76
Abb. 4.23: Magnesiumkonzentrationen im Testfeldprofil.....	77
Abb. 4.24: Calciumkonzentrationen im Testfeldprofil.....	77
Abb. 4.25: Silikatkonzentrationen im Testfeldprofil.....	78
Abb. 4.26 : Verlauf des Niederschlags und der Lufttemperatur an der Klimastation Katzensteig während der Intensivmessphase Ende November bis Anfang Dezember 2001.....	83
Abb. 4.27: Verlauf der Anionen des Niederschlags	83
Abb. 4.28: Verlauf der Kationen des Niederschlags	84
Abb. 4.29: Verlauf des Deuteriumgehalts im Niederschlag.....	84
Abb. 4.30: Verlauf der Anionen und des Silikats GWMS 4	86
Abb. 4.31: Verlauf der Anionen und des Silikats GWMS 9	87
Abb. 4.32: Verlauf der Anionen und des Silikats GWMS 10	87
Abb. 4.33: Verlauf der Anionen und des Silikats des Feuchtflächenentwässerungsgrabens	88
Abb. 4.34: Verlauf der Anionen und des Silikats des St. Wilhelmer Talbachs	88
Abb. 4.35: Verlauf der Kationen GWMS 4.....	89
Abb. 4.36: Verlauf der Kationen GWMS 9.....	90
Abb. 4.37: Verlauf der Kationen GWMS 10	90
Abb. 4.38: Verlauf der Kationen des Feuchtflächenentwässerungsgrabens	91
Abb. 4.39: Verlauf der Kationen des St. Wilhelmer Talbachs	91
Abb. 4.40: Verlauf des Deuteriumgehaltes GWMS 4	92
Abb. 4.41: Verlauf des Deuteriumgehaltes GWMS 9	93
Abb. 4.42: Verlauf des Deuteriumgehaltes GWMS 10	93
Abb. 4.43: Verlauf des Deuteriumgehaltes des Feuchtflächenentwässerungsgrabens	94
Abb. 4.44: Verlauf des Deuteriumgehaltes des St. Wilhelmer Talbachs	94
Abb. 4.45: Chloridkonzentrationen der GWMS 10 und des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeprobung	95
Abb. 4.46: Calciumkonzentrationen der GWMS 10 und des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeprobung	95
Abb. 4.47: Standrohrspiegelhöhen der GWMS 1 und 10 und Wasserstände des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeprobung.	96
Abb. 4.48: Vergleich der Deuteriumwerte der Messstellen 4, 9, 10, des St. Wilhelmer Talbachs und des Niederschlags.....	98
Abb. 4.49: Modellvorstellung der Interaktion Vorfluter-Grundwasserkörper	99
Abb. 4.50: Zeitlicher Verlauf des Tracers Silikat für die Ereignisbeprobung der GWMS 4	102
Abb. 4.51: Zeitlicher Verlauf des Tracers Deuterium für die Ereignisbeprobung der GWMS 4	102
Abb. 4.52: Mischungsdiagramm der Tracer Silikat und Deuterium für die Dreikomponententrennung der Grundwassermessstelle 4.....	103
Abb. 4.53: Mischungsanteile der GWMS 4.....	104
Abb. 4.54: Mischungsdiagramm der Tracer Silikat und Deuterium für die Dreikomponententrennung der Grundwassermessstelle 9.....	105

Abb. 4.55: Grundwasseranteile der Dreikomponententrennung der GWMS 9.....	106
Abb. 4.56: Verlauf des Grundwasseranteils im Sättigungsflächenabfluss unter Verwendung des Tracers Silikat	107
Abb. 4.57: Bilanzierung des zusätzlichen Grundwasserabflusses der Sättigungsfläche.....	109
Abb. 4.58: Abfluss des Grundwasseranteils im Vergleich zur Grundwassersituation der sättigungsflächennahen GWMS 9	110
Abb. 4.59: Grundwasseranteile der Zweikomponententrennung mit Silikat und der Dreikomponententrennung mit Deuterium.....	112

Verzeichnis der Tabellen im Text

Tab. 2.1: Stammdaten der Pegel St. Wilhelm und Oberried.....	10
Tab. 2.2: Einzugsgebietskenngrößen der Pegel St. Wilhelm und Oberried	10
Tab. 2.3: Hochwasserabfluss-Kennwerte der Pegel St. Wilhelm und Oberried	10
Tab. 2.4: Flächenanteile des lokalen Einzugsgebietes nach der Raumgliederung	20
Tab. 3.1: Fehlerbetrachtungen der Silikatmessung	41
Tab. 3.2: Fehlerbetrachtungen der Hauptionenanalyse.....	41
Tab. 4.1: Übersicht der kf-Werte der einzelnen GWMS.....	48
Tab. 4.2: Flurabstände der GWMS.....	55
Tab. 4.3: Wassertemperaturen der GWMS und Oberflächengewässer.....	61
Tab. 4.4: End member Konzentrationen der Zweikomponententrennung	107
Tab. 4.5: Auswertung der Zweikomponententrennung und Bilanzierung des Sättigungsflächenabflusses.....	108

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang A

Abb. A1: Talauenbereiche im Bruggaeinzugsgebiet.....	A5
Abb. A2: Feinbodenanteile Sondierungen 1 bis 9.....	A6
Abb. A3: Feinbodenanteile Sondierungen 10 bis 20	A6
Abb. A4: Feinbodenanteile Sondierungen 21 bis 30	A7
Abb. A6: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 1.....	A8
Abb. A7: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 2.....	A8
Abb. A8: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 3.....	A8
Abb. A9: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 4.....	A9
Abb. A10: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 5.....	A9
Abb. A11: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 6.....	A9
Abb. A12: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 7.....	A10
Abb. A13: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 8.....	A10
Abb. A14: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 9.....	A10
Abb. A15: Verlauf der Grundwassertemperaturen am Beispiel der GWMS 1, 2, 6 und 9.....	A11
Abb. A16: Verlauf der Wassertemperaturen der Oberflächengewässer	A11
Abb. A18: Verlauf der pH-Werte der Oberflächengewässer	A12
Abb. A19: Vergleich der Grundwasserganglinien des Profils 2 und des Talbaches bezogen auf die GWLOBF.	A12
Abb. A20: Nitratkonzentrationen entlang des Testfeldes	A13
Abb. A21: Sulfatkonzentrationen entlang des Testfeldes	A13
Abb. A22: Kaliumkonzentrationen entlang des Testfeldes.....	A14
Abb. A23: Natriumkonzentrationen entlang des Testfeldes.....	A14
Abb. A24: Ganglinien der GWMS des Profils 1	A15
Abb. A25: Vergleich der Niederschlagsmessungen der Station Katzensteig, des Pluvio und der Beprobung	A15
Abb. A26: Temperaturverlauf der GWMS 10 während der Ereignisbeprobung.....	A16
Abb. A27: Nitratkonzentrationen der GWMS 10 und des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeprobung	A16
Abb. A28: Sulfatkonzentrationen der GWMS 10 und des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeprobung	A17
Abb. A29: Natriumkonzentrationen der GWMS 10 und des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeprobung	A17
Abb. A30: Kaliumkonzentrationen der GWMS 10 und des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeprobung	A17
Abb. A31: Magnesiumkonzentrationen der GWMS 10 und des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeprobung	A18
Abb. A32: Zeitlicher Verlauf des Tracers Silikat für die Ereignisbeprobung der GWMS 9	A18

Verzeichnis der Tabellen im Anhang A

Tab. A1: Allgemeine Angaben zu den Grundwassermessstellen.....	A1
Tab. A2: Übersicht der Pumpversuche	A1
Tab. A3: Übersicht der Niederschlagsereignisse mit einer Gesamtmenge >10mm der Klimastation Katzensteig im Untersuchungszeitraum. Die markierten Ereignisse mit Hilfe einer Regressionsbeziehung mit der Klimastation Zastler rekonstruiert.....	A1
Tab. A4: Ereignisübersicht GWMS 1.....	A1
Tab. A5: Ereignisübersicht der Niederschläge	A2
Tab. A6: Zur Interpretation des empirischen Korrelationskoeffizienten (nach SCHLITTEGEN 1990)	A2
Tab. A7: Korrelationen Ereignisbeginn. Die gelb unterlegten GWMS gehören zum Profil 1, die grauen zum Profil 2	A3
Tab. A8: Korrelationen der Scheitelwasserstände. Die gelb unterlegten GWMS gehören zum Profil 1, die grauen zum Profil 2.....	A3
Tab. A9: Korrelationen der Anstiegszeiten. Die gelb unterlegten GWMS gehören zum Profil 1, die grauen zum Profil 2	A4
Tab. A10: Korrelationen der Anstiegsraten. Die grau unterlegten GWMS gehören zum Profil 1, die hellgelben zum Profil 2	A4

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang B

Abb. B1: Loggerbereich Messsonde WT-HR 1000 mit Deckel.....	B1
Abb. B2: Skizze der WT-HR Messsonde mit Längenangaben in mm	B2
Abb. B3: Skizze des oberen Loggerbereiches mit Deckel.....	B3
Abb. B4: Längs- und Querprofil des Messwehres	B3
Abb. B5: Foto des eingebauten Messwehres mit Multisonde.....	B4
Abb. B6: Dimensionen eines Dreiecksprofils (verändert nach: BOS 1978)	B5
Abb. B7: Dimensionen eines Trapezprofils (verändert nach: BOS 1978)	B5
Abb. B8: Eichbeziehung des Messwehres.....	B6

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

Abflussspende	[l/s*km ²]	q
Bestimmtheitsmaß		B, r ²
Dichte	[kg/m ³]	ρ
durchflusswirksamer Hohlraumanteil		n _{eff}
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	k _f
Einzugsgebiet	[km ²]	EZG, A _E
elektrische Leitfähigkeit	[μS/cm]	LF
Entnahmemenge, Abfluss oder Durchfluss	[l/s]	Q
Fließgeschwindigkeit	[m/s]	V
Gefälle	[m/km]	I
Geländeoberfläche		GOF
Geländeoberkante	[m ü. M.]	GOK
Geographisches Informationssystem		GIS
Gewässerbreite	[m]	b
Gewässertiefe	[m]	h
Grundwasser		GW
Grundwasserleiteroberfläche		GWLOBF
Grundwassermessstellen		GWMS
Grundwasserstand	[m]	W
höchster Hochwasserabfluss	[m ³ /s]	HQ
höchster je gemessener Hochwasserabfluss	[m ³ /s]	HHQ
Hochwert		HW
Korngröße	[mm]	d _k
Korrelationskoeffizient		r
Meter über Normalnull (topographische Höhe)	[m]	m+NN
mittlerer Abfluss	[m ³ /s]	MQ
Niederschlag	[mm]	N
Niederschlagsdauer	[h]	T _N
Niederschlagsgebiet	[km ²]	A _N
Niederschlagshöhe	[mm]	h _N
Niederschlagsintensität	[mm/h]	I _N
niedrigster je gemessener Niedrigwasserabfluss	[m ³ /s]	NNQ
niedrigster Niedrigwasserabfluss	[m ³ /s]	NQ
Pegel		P
Pegelnul		PN
pH-Wert		pH
Porosität		n
Raumrichtungen		x,y,z
Rechtswert		RW
Standardabweichung		σ
Temperatur	[C°, K]	T
Trockenwetterabfluss	[m ³ /s]	Q _T
Varianz		σ ²
Viskosität	[cP]	
Wasserstand	[m]	W

Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit „Experimentelle Untersuchung zur Dynamik von Hanggrundwasser und dessen Übertritt in die Talau und den Vorfluter im Bruggaeinzugsgebiet“ fand im Rahmes des DFG-Verbundprojektes: „Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung“ statt.

Zielsetzung der Untersuchungen war es, die Dynamik des Hanggrundwassers am Hangfuß und die hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse des Talauenaquifers und dessen Interaktion mit dem Vorfluter genauer zu untersuchen. Besonders im Einzugsgebiet der Brugga, in dem etwa ein Drittel der Einzugsgebietsfläche diffus unterirdisch entwässert wird, ist über die dominanten Abflussbildungsprozesse nur sehr wenig bekannt.

Zur Verwirklichung dieser Zielsetzung wurde nach einem geeigneten Standort für ein Testfeld im Bruggaeinzugsgebiet gesucht, und ein Bereich im hinteren Teil des St. Wilhelmer Tales ausgewählt. In diesem Bereich, mit der Gewinnbezeichnung „Hintere Matte“, wurde ein Testfeld mit insgesamt 10 Grundwassermessstellen eingerichtet. Diese Messstellen wurden zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Standrohrspiegelhöhen mit kapazitiv messenden Sonden ausgestattet. Zusätzlich zu den Grundwassermessstellen wurden die Oberflächengewässer in die Untersuchungen einbezogen. Hierzu kamen sogenannte Multisonden zum Einsatz, die neben der kontinuierlichen Wasserstandsmessung auch die Parameter Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert aufzeichnen. Zur Quantifizierung des Abflusses einer vorfluternahen Feuchtfläche wurde ein Überfallmesswehr installiert.

Zunächst wurde das Testfeld hinsichtlich der Untergrundverhältnisse mit ca. 50 Bodensondierungen bis zu einer Tiefe von zwei Meter untersucht. Bei diesen Sondierungen wurde eine, den eigentlichen Aquifer überdeckende und im gesamten Testfeldbereich vorhandene, schluffige und somit hydraulisch relativ undurchlässige Schicht vorgefunden. Diese Aquitarde wies unterschiedliche Mächtigkeiten im Bereich des Testfeldes auf. Ferner zeigten sich sehr heterogene Untergrundverhältnisse mit unterschiedlichen Anteilen an kiesigen Komponenten.

An Sondierungsstellen, die aufgrund der Untergrund- und Grundwasserverhältnisse geeignet waren, wurden sogenannte Rammfilterbrunnen eingebaut, um die Standrohrspiegelhöhen messtechnisch zu erfassen. Durch die in den Grundwassermessstellen durchgeführten Bohrlochversuche zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeiten bestätigte sich die Heterogenität der Untergrundverhältnisse.

Die Messsonden zur Erfassung der Standrohrspiegelhöhen zeichneten in einem 10 Minuten Intervall die Wasserhöhen auf. Es wurde untersucht, wie sich die zeitliche Variabilität der Standrohrspiegelhöhen im Bezug auf Witterungsverhältnisse und Niederschlagscharakteristika, wie z.B. Niederschlagsmenge und Niederschlagsintensität, sowie auf die Gebietsvorfeuchte, beschrieben durch den Vorregenindex, darstellt. Hierzu

wurden Korrelations- und Regressionsrechnungen durchgeführt. Des Weiteren wurden die Standrohrspiegelhöhen dahingehend untersucht, ob, wann und in wieweit sie gespannte Grundwasserverhältnisse aufweisen, und wie sich das räumliche Verhalten der Standrohrspiegelhöhen während Niederschlagsereignissen darstellt. Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurde exemplarisch für ein Niederschlagsereignis die Druckwellenausbreitung vom Hang ausgehend bis hin zum Vorfluter nachgewiesen.

Zur Erfassung der hydrochemischen Verhältnisse wurde eine 12 Wochen andauernde Routinebeprobung der Grundwassermessstellen und Oberflächengewässer durchgeführt. Dazu wurden Grundwasser- sowie Oberflächenwasserproben entnommen, die *in-situ* Parameter Temperatur, Leitfähigkeit und pH-Wert ermittelt, und die Proben im Labor auf Anionen, Kationen und Silikat untersucht. Dabei zeigten sich recht konstante Verläufe der hydrochemischen Parameter innerhalb der Grundwassermessstellen. Dagegen war für einige der hydrochemischen Parameter, wie z.B. für Silikat, eine räumliche Konzentrationzunahme vom Hang in Richtung Vorfluter festzustellen.

Um die aus den Standrohrspiegelhöhen ersichtlichen, zeitlich eng begrenzten Einflüsse der Niederschlagsereignisse genauer zu untersuchen, fand Ende November bis Anfang Dezember 2001 eine 5 Tage lang dauernde Ereignisbeprobung mit automatischen Probeentnahmegaräten an ausgewählten Grundwassermessstellen und Oberflächengewässern statt. Die Proben dieser 1 bis 2-stündigen Entnahme wurden im Labor auf ihre hydrochemische Zusammensetzung, d.h. Anionen und Kationen- sowie Silikatkonzentrationen und die Isotopensignaturen des Deuteriums untersucht.

Auf der Grundlage dieser Analysewerte wurde für verschiedene Messstellen Zwei- und Dreikomponententrennungen zur Bestimmung der beteiligten Abflusskomponenten durchgeführt. Die Bilanzierung der Abflussanteile der Sättigungsfläche ergab einen zusätzlichen Grundwasseranteil während der Ereignisbeprobung, hervorgerufen durch Druckübertragungsmechanismen.

Durch die Ergebnisse dieser Arbeit konnte das Prozessverständnis der Abflussbildung exemplarisch für Hang- und Talauenbereich im Bruggaeinzugsgebiet verbessert werden. Es konnte eine eindeutige Druckwellenausbreitung vom Hang in Richtung Vorfluter dokumentiert werden, und somit für Teilbereiche der Talauzeitweise durchgängig gespannte Grundwasserverhältnisse abgeleitet werden. Infolge dieser Erkenntnisse und unter Berücksichtigung der lokalen Untergrundeigenschaften, dem Verhalten der hydrochemischen Parameter und den Ergebnissen der Ganglinienseparationen der Sättigungsfläche, kann von der Existenz eines piston flow Prozesses ausgegangen werden.

Abstract

The following thesis “Experimental study about the dynamics of hillslope groundwater and the water transport to the flood plain and the stream in the Brugga basin“ was carried out in the framework of the DFG-project “Runoff Generation Processes and Catchment Modelling“.

The aim of the study was to investigate the dynamics of the hillslope groundwater and the hydrogeology and hydrochemistry at the bottom of the hillslope, the behaviour of the valley aquifer and its interaction with the stream. In the Brugga basin, where about one third of the area is drained on effluent seepage, the dominant runoff generation processes are especially for these parts relatively unknown.

To realise this purpose a suitable site for a test plot in the upper part of the “St. Wilhelmer Tal” in the Brugga basin was chosen. In this area called “Hintere Matte” a test plot with ten groundwater stations was installed. These stations were provided with Water-Height-Dataloggers to continuously record the piezometric head. In addition to the groundwater stations the surface water was also incorporated in the study. A multiple function tube which was installed in the stream continuously measured water level, water temperature, electrical conductivity and pH-value. To quantify the runoff out of the saturated area a V-notch weir was installed.

First, the plot was investigated with 50 soil probes up to a depth of two meters, and soil samples were taken to investigate subsurface conditions. With these probes an aquitard overlaying the aquifer was detected covering the entire test plot. This layer consisting mainly of silty material showing different thicknesses. Furthermore, the subsoil proved to be very heterogenous with variable amounts of gravel components.

On sampling sites, suitable in respect to the subsurface and groundwater conditions, abyssinian wells were installed to register the piezometric head. The heterogenous underground conditions were verified by aquifer tests for the determination of the hydraulic conductivity at the groundwater stations.

The Water-Height-Dataloggers recorded the piezometric head in a 10-min interval. The temporal variability of the piezometric head was investigated in relation to the local weather and the precipitation characteristics, like total amount and intensity, and the moisture conditions, expressed with the antecedent precipitation index. Therefore correlation and regression analysis were carried out. Further, the piezometric head was examined to see if or when the aquifer was showing confining conditions and how it spatially reacts during rainfall events. For one rainfall event the dispersion of the pressure wave from the slope to the stream was demonstrated.

The hydrochemical conditions of the groundwater and surface waters were analysed in a routine sampling period for 12 weeks. The parameters temperature, electrical conductivity and pH-value were determined in situ. In the laboratory the water samples were analysed for anions, cations and silica. The characteristics of the hydrochemical parameters proved to be relatively constant within the groundwater stations. In contrast, some parameters like silica showed a spatial trend in concentration along the test plot.

To scrutinise the influence of the rainfall events on the piezometric head, an intensive 5 day sampling period was carried out with automatic sampling machines at selected groundwater and surface water stations. These samples, taken in an 1- to 2-hour interval, were analysed for their hydrochemical composition, i.e. concentration of anions, cations, silica and deuterium.

Based on these results a two and three component hydrograph separation was carried out for the selected groundwater stations to determine the participating runoff components. Furthermore, a balance of the runoff components for the saturated area was carried out to determine the influence of the additional groundwater component, caused by the pressure dispersion.

With the results of this study the understanding of runoff generation processes at the hillslope and flood plain scale in the Brugga basin was improved. The dispersion of a pressure wave from the slope to the stream occasionally confined aquifer over the entire test plot was verified. This, together with the local subsurface conditions, the reaction of hydrochemical parameters and the results of the hydrograph separation leads to the conclusion that piston flow processes occur in these areas.

As a result and in regard to the local subsurface conditions, the reaction of the hydrochemical parameters and the results of the hydrograph separation for the saturated area, the existence of the piston flow process is verified.

KEY WORDS:

hillslope groundwater, piston flow, runoff processes, unconfined and confined aquifer, hydrochemistry, geogene Tracers, Isotopes, two and three component hydrograph separation, interaction groundwaters-surface water

1. Einleitung

Die Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss ist eines der wichtigsten Phänomene in der Hydrologie. Schon seit der Antike befassen sich die Menschen mit den Mechanismen des Wasserkreislaufs. Aufgrund der Bedrohung ihrer Lebensräume durch Überschwemmungen standen schon früh die Mechanismen der Hochwasserentstehung besonders im Blickfeld des Interesses. Um die daran beteiligten Prozesse besser zu verstehen, und ihnen gezielt entgegenwirken zu können, bedarf es dem Einblick in die ober- und unterirdischen Fließwege in den einzelnen Einzugsgebieten. Trotz intensiver weltweiter Forschungsarbeiten im Bereich der Abflussbildung sind viele Fragen bis heute nicht geklärt. Ein großer Nachteil der Abflussbildungsforschung ist, dass sich die meisten Prozesse der Umwandlung von Niederschlag in Abfluss unterhalb der Erdoberfläche abspielen, und sich somit dem Blickfeld des Betrachters entziehen. Es bedarf der Anwendung verschiedener Techniken, um die unterirdischen Prozesse aufzudecken und zu quantifizieren. Besonders die Techniken der Tracerhydrologie ergaben in den letzten Jahren neue Erkenntnisse in diesem Bereich. Die Grundlage für tracerhydrologische Untersuchungen stellt der Konvergenzansatz (LEIBUNDGUT 1984) dar. Demzufolge konvergieren alle durch die Physiographie des Einzugsgebietes bestimmten Informationen, wie Dynamik des Abflusses und hydrochemische sowie isotopische Eigenschaften des Wassers, im Abfluss am Einzugsgebietsauslass. Durch die Anwendung dieser Methodik können Rückschlüsse auf Gebietseigenschaften und auf die darin ablaufenden Prozesse gezogen werden.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Diplomarbeit fand im Rahmen des DFG-Bündelprojektes „Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung“ statt, an dem neben dem Institut für Hydrologie in Freiburg (IHF) noch mehrere Institutionen aus Deutschland und Österreich beteiligt sind. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, aufbauend auf experimentellen Untersuchungen zur Abflussbildung, ein Modell zu entwickeln, das die Abflussbildung möglichst prozessnah simuliert. Das Ziel der Freiburger Forschergruppe besteht u.a. darin, die Abflussbildungsprozesse mittels tracerhydrologischer Verfahren genauer zu verstehen, um somit eine bessere Grundlage für die prozessorientierte Modellierung zu schaffen.

Gerade in mesoskaligen Einzugsgebieten ist die, für eine physikalisch basierte Wasser- und Stoffmodellierung wichtige Dynamik der Oberflächen-, Boden- und Grundwasserspeicher häufig ungewiss. Besonders die Dynamik des Grundwassers im Hang- und Talauenbereich bedarf einer eingehenden Untersuchung. Ziel ist es die Modellvorstellung, dass diffus

zuströmendes Wasser entscheidend zur Hochwasserbildung beiträgt, experimentell zu belegen. Dies ist in soweit von besonderem Interesse, da z.B. im Einzugsgebiet der Brugga, nur rund zwei Drittel der Fläche direkt über Quellen und offene Gerinne entwässert werden. Ein Drittel der Fläche wird diffus dem Vorfluter zugeführt (Abb. 1.1) Über diese Abflussbildungsprozesse ist im Untersuchungsgebiet wenig bekannt. Es existiert die Vorstellung, dass in mittleren und steilen Hangbereichen der Prozess des Makoporenabflusses dominiert. Im unteren Hangbereich können zusätzlich piston flow Prozesse auftreten. Besonders in Zeiten hoher Vorfeuchte im Einzugsgebiet wird angenommen, dass die diffusen Grundwassereinträge zusätzlich einen hohen Beitrag zum Gesamtabfluss leisten. Diese Modellvorstellungen bedürfen jedoch noch weiteren experimentellen Bestätigungen.

Ziel der Diplomarbeit ist es, durch den Einsatz unterschiedlicher Techniken in einem experimentellen Testfeld exemplarisch die zeitliche Variabilität von Hydrodynamik und Stoffhaushalt eines Hangfußbereichs zu untersuchen. Dieses Ziel soll durch die Installation eines Messfeldes im Untersuchungsgebiet erreicht werden. Wesentliche Bausteine dieses Messfeldes sind die messtechnische Erfassung der zeitlich variablen Grundwasseroberfläche mit automatischen Sonden und die hydrochemische und tracerhydrologische Auswertung von Grundwasserproben. Hierzu fand neben den Stichtagsmessungen auch eine zeitlich hochaufgelöste intensive Beprobung eines Niederschlagsereignisses statt.

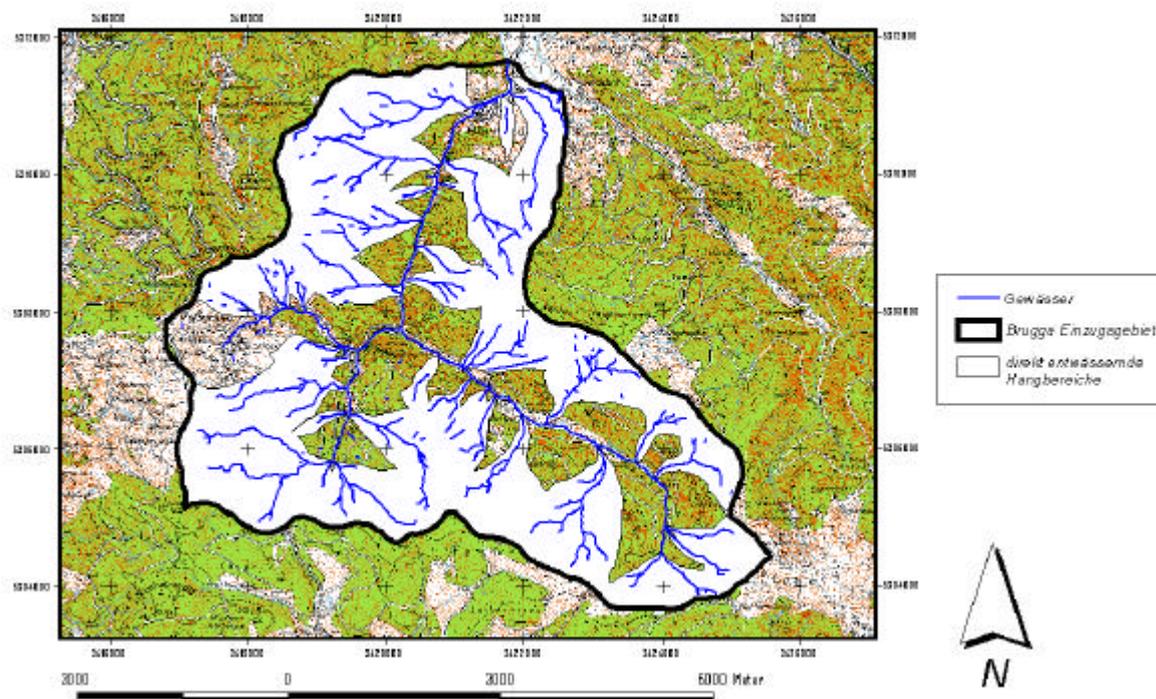


Abb. 1.1: Bruggaeinzugsgebiet mit Darstellung der diffus entwässernden Flächen

1.2 Theoretische Grundlagen

1.2.1 Abflussbildungsprozesse

Die Forschungen im Bereich der Abflussbildung haben in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte gemacht. Es wurden zahlreiche Mechanismen und Prozesse, die zu schnellen Abflusskomponenten führen, aufgedeckt und beschrieben. Dabei wurde der Betrachtungsschwerpunkt, weg von der punktförmigen Vorstellung hin zur flächenhaften Betrachtung der Probleme vollzogen (GUTKNECHT 1996).

Die Prozesse, die im Folgenden kurz beschrieben werden, sind eine Kombination der klassischen Vorstellung zur Abflussbildung und -konzentration. Abb. 1.2 zeigt eine Übersicht dieser Prozesse an einem Hang auf. Die klassische Vorstellung zur Abflussbildung stellt die Aufteilung des Niederschlags in den zum Abfluss beitragenden effektiven Niederschlag und die Verluste dar. Die Abflusskonzentration führt den flächenhaft, in einem Gebiet gefallenen effektiven Niederschlag einem bestimmten Gerinneabschnitt zu (BAUMGARTNER&LIEBSCHER 1996).

Diese klassischen Niederschlag-Abfluss-Beziehungen lassen sich allerdings nur schwer auf die neueren Prozessvorstellungen anwenden. So reicht eine dynamikorientierte Einteilung in Oberflächen-, Zwischen- und Grundwasserabfluss oft nicht mehr aus, um die komplexen Prozesse in ihrer Dynamik zu beschreiben (GUTKNECHT 1996). Es bedarf einer genaueren Beschreibung der Prozesse, gerade im Hinblick auf Fragestellungen der konzeptionellen Modellierung.

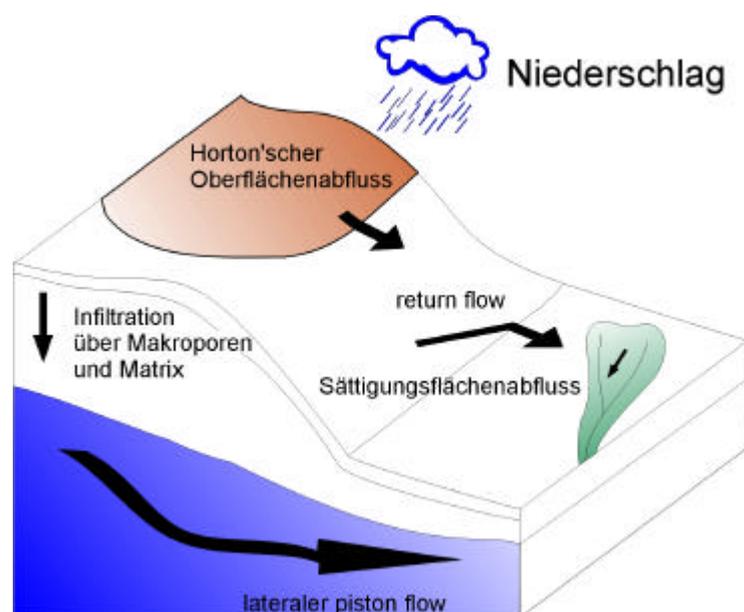


Abb. 1.2: Abflussbildungsprozesse am Hang

Die Reaktionen eines Einzugsgebietes auf ein Niederschlagsereignis stellen eine Kombination der verschiedenen Abflussbildungsprozesse dar. Welche Prozesse dabei dominieren, und in wieweit sie sich gegenseitig beeinflussen, hängt von mehreren Faktoren ab. So sind z.B. Niederschlagscharakteristik, Topographie, Landnutzung und Vorfeuchtebedingungen entscheidende Kriterien. Des Weiteren sind die räumliche Lage und die Vernetzung der unterschiedlichen Abflussbildungsbereiche entscheidend für das zeitliche Auftreten der Prozesse. Die Prozesse der Abflussbildung sind zwar nicht klar voneinander zu trennen, dennoch sollen sie zum besseren Verständnis kurz einzeln beschrieben werden.

1.2.1.1 Infiltration und Horton'scher Oberflächenabfluss

Beim klassischen Landoberflächenabfluss nach Horton übersteigt die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate. Die Infiltration ist der, in vertikaler Richtung ablaufende, physikalische Prozess der Wasseraufnahme durch den Boden. Dieser kann über zwei Fließwege erfolgen, zum einen über die Bodenmatrix mit Mikro- und Mesoporen, gesteuert durch das Matrixpotential, zum anderen über Makroporen, unter Wirkung des Gravitationspotentials. Makroporen werden hervorgerufen durch die Lagerungsverhältnisse des Substrates, Risse, durch Quellungs- und Schrumpfungsprozesse sowie durch Bodenlebewesen (Edaphon). Die Infiltrationsrate kann zeitlich als auch räumlich sehr variabel sein.

HORTON stellte 1933 bei Infiltrationsversuchen fest, dass die Infiltration eine exponentielle Abnahme mit der Zeit aufweist, die sich einem konstanten Endwert nähert. Wird diese Kapazität überschritten, so fließt das überschüssige Niederschlagswasser als Infiltrationsüberschuss auf der Landoberfläche ab. Die Bedeutung des Horton'schen Oberflächenabflusses wurde in der Vergangenheit überschätzt. Er tritt allerdings bei extremen Niederschlagsereignissen und entsprechenden Landnutzungsarten auf, wie z.B. auf Böden die zu einer Verschlammung der Oberfläche neigen. Besonders bei anthropogen versiegelten Flächen oder Felsoberflächen spielt er eine bedeutende Rolle, wobei dieser so gebildete Oberflächenabfluss nicht den Gebietsauslass erreicht, sondern wieder den Deckschichten, und dem unterirdischen System zurückgeführt wird (UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997).

1.2.1.2 Sättigungsflächenabfluss

Der Sättigungsflächenabfluss stellt in erster Linie ebenfalls einen Landoberflächenabfluss dar. Dieser entsteht auf gesättigten bzw. durch die Wasserverhältnisse aufgesättigten Oberflächen. Man unterscheidet zum einen die Exfiltration, den sogenannten return flow. Dabei handelt es

sich um Wasser, welches bereits im unterirdischen System war und wieder zurück an die Oberfläche gelangt. Zum anderen Niederschlagswasser, das auf die gesättigte Fläche selbst fällt. Der return flow kann sich aus zwei Komponenten zusammensetzen. Erstens aus preevent water, das bereits vor dem Ereignis im Gebiet gespeichert war, und zweiten aus event water, welches infiltriert ist und nach einer kurzen Fließstrecke wieder zu Tage tritt. Der Sättigungsflächenabfluss stellt, wie oben bereits erwähnt, eine Kombination verschiedener Abflusskomponenten dar. Eine Quantifizierung ist im allgemeinen schwierig, da die Beitragsflächen über das Ereignis variabel sein können (UHLENBROOK&LEIBUNDGUT 1997).

1.2.1.3 Groundwater Ridging

Der Prozess des groundwater ridging, bei dem sich sogenannte „Grundwasserberge“ im vorfluternahen Bereich ausbilden, spielt im Untersuchungsgebiet aufgrund der Materialzusammensetzung keine entscheidende Rolle. Es wird auf die Literatur, z.B. (SKLASH&FARVOLDEN 1979; BUTTLE&SAMI 1992; JAYATILAKA &GILLHAM 1996; JAYATILAKA ET AL. 1996; UHLENBROOK&LEIBUNDGUT 1997) verwiesen.

1.2.1.4 Piston Flow

Der piston flow Prozess stellt eine Druckübertragung ausgehend von vorfluterfernen Standorten hin zum Vorfluter dar. Diese laterale Druckübertragung kann durch infiltrierendes Niederschlagswassers am oberen Hangbereich hervorgerufen werden. Durch die Druckübertragung kann vorfluternah gespeichertes Vorereigniswasser schnell mobilisiert werden und zum Hochwasserabfluss beitragen. Der Prozess des piston flow wird begünstigt durch bestimmte topographische Faktoren. So sind konvexe Hangprofile besonders für den Prozess anfällig, da diese im unteren Bereich steiler werden und somit der hydraulische Gradient erhöht wird. Durch eine Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit mit der Tiefe kann es zur Ausbildung hangparallel verlaufender gesättigter Zonen nach Starkniederschlägen kommen, die eine Druckübertragung ermöglichen (UHLENBROOK&LEIBUNDGUT 1997). Auf der anderen Seite begünstigen undurchlässigere hangende Schichten eine Druckausbreitung. Neben der Grundwassererhöhung vorfluterferner Standorte, durch schnell infiltriertes Niederschlagswasser, führen BERGMANN et al. (1996) eine Druckübertragung durch die Bodenluft an. Sie zeigten in einem Säulenversuch im Labor, dass sich durch gleichmäßig infiltrierendes Niederschlagswasser eine temporär gesättigte Zone ausbilden kann, die ein Entweichen der Bodenluft verhindert, die ihrerseits zu einer Druckübertragung führt.

1.2.2 Begriffe im Zusammenhang mit Grundwasser

„Unterirdisches Wasser, das Hohlräume der Lithosphäre zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird“; so lautet die Definition von Grundwasser nach der DIN 4049.

Gerade im Bereich des Grundwassers, mit dem sich neben der Hydrologie auch andere naturwissenschaftliche Disziplinen beschäftigen, ist es wichtig und notwendig, sich auf einheitliche Begriffe und Definitionen zu verständigen, um Missverständnissen vorzubeugen (Abb. 1.3 und 1.4). Im Folgenden soll daher kurz auf die wesentlichen, in der Arbeit verwendeten Begriffe im Zusammenhang mit dem Grundwasser eingegangen werden. Die Definitionen wurden aus IHP/OHP 1998; HÖLTING 1996 und der DIN 4049 Teil 3 entnommen.

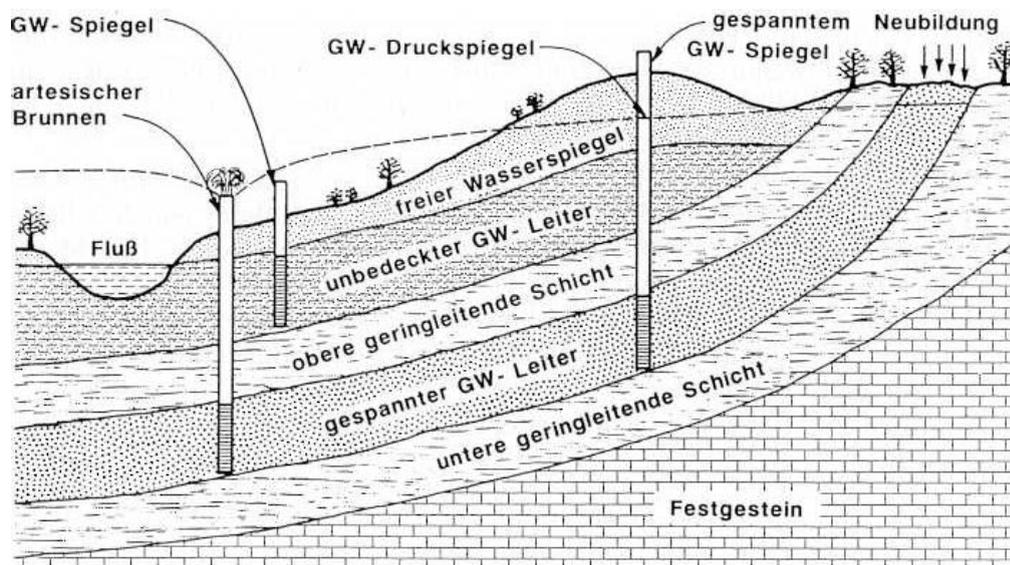


Abb. 1.3: Grundwassermessstellen in gespannten und freien Grundwasserleitern
(aus: SCHREINER&KREYSING 1998)

Der **Grundwasserleiter** (*Aquifer*) ist ein Gesteinskörper, der geeignet ist Grundwasser weiterzuleiten. Er wird nach unten durch die *Grundwassersohle*, nach oben von der *Grundwasserleiteroberfläche (GWLOBF)* begrenzt. Liegt die Grundwasseroberfläche innerhalb des Grundwasserleiters, ist also die *Grundwasserdruckfläche* gleich der Grundwasseroberfläche, so spricht man von *freiem Grundwasser*. In der Natur sind jedoch häufig gut durchlässige Schichten von weniger durchlässigen bzw. undurchlässigen Schichten überlagert. Im Falle von weniger durchlässigen Schichten spricht man von *Grundwasserhemmern (Aquitarden)*, bei undurchlässigen Schichten von *Grundwassernichtleitern (Aquifugen)*. In diesen Fällen kann das Grundwasser nicht so weit

ansteigen, wie es im Normalfall seinem hydrostatischen Druck entsprechen würde, und man nennt es *gespanntes Grundwasser*. Liegt die Grundwasserdruckfläche weder innerhalb des Grundwasserleiters noch innerhalb der *Grundwasserüberdeckung*, handelt es sich um *artesisch gespanntes Grundwasser*. Der **Grundwasserspiegel**, die ausgeglichene Grenzfläche des Grundwassers gegen die Atmosphäre, wird in Grundwassermessstellen (GWMS) gemessen. Bei der Höhenangabe des Grundwasserspiegels gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die *Standrohrspiegelhöhe (hydraulische Druckhöhe)* ist die Summe aus einer Bezugshöhe und der Druckhöhe, der *Grundwasserstand* ist die Höhe bezogen auf eine Bezugsfläche, normalerweise Normalnull. Der *Grundwasserflurabstand* gibt die Tiefenlage des Grundwasserspiegels unter der Geländeoberkante (GOK) an.

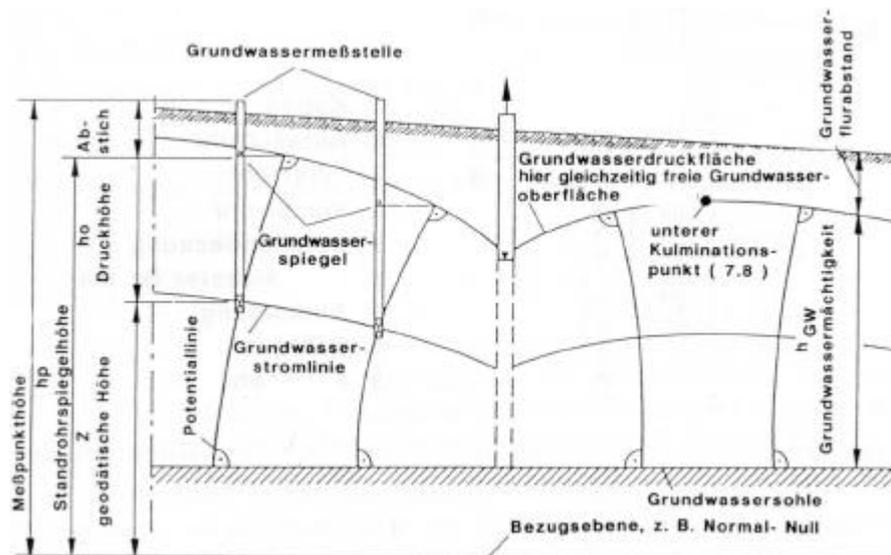


Abb. 1.4: Begriffsbestimmungen nach DIN 4049 (aus: SCHREINER&KREYSING 1998)

2. Das Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen der Hanggrundwasserdynamik fanden im Einzugsgebiet (EZG) der Brugga statt (Abb. 2.1). Dieses liegt in Südwestdeutschland im südlichen Schwarzwald, etwa 10 km südöstlich von Freiburg. Im Folgenden soll kurz auf die Gebietseigenschaften eingegangen werden, weitergehende Ausführungen und Gebietsbeschreibungen finden sich in LINDENLAUB (1998) und UHLENBROOK (1999).

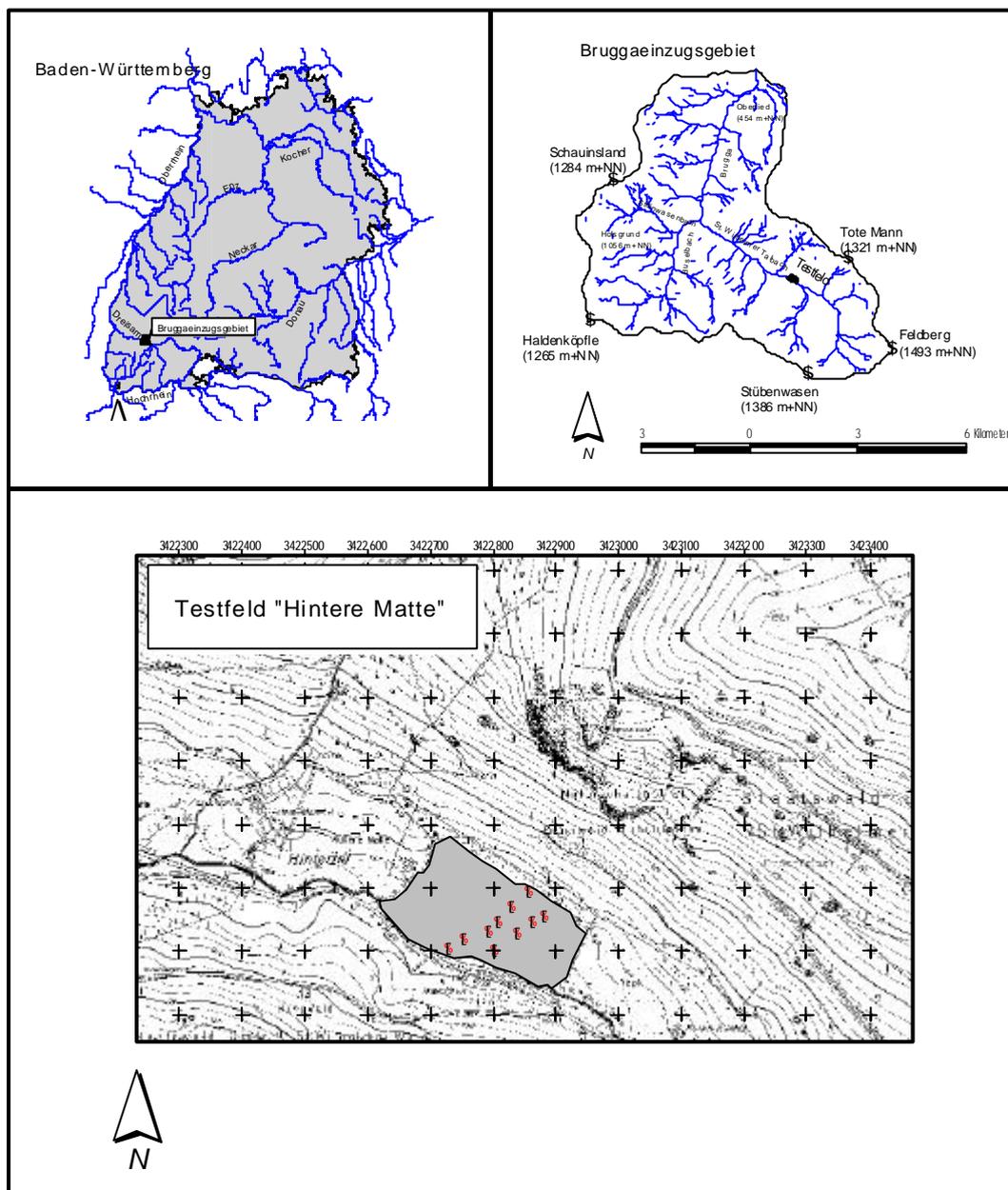


Abb. 2.1: Lage des Untersuchungsgebiets

Das EZG der Brugga, mit einer Einzugsgebietsfläche von 40,12 km² (LFU 1999), kann der hydrologischen Mesoskala zugeordnet werden. Die Höhendifferenz von 1059 m zwischen dem Gebietsauslass am Pegel Oberried (434 m+NN) und dem höchsten Punkt am Feldberg (1493 m+NN) ist erheblich. Die mittlere Einzugsgebietshöhe liegt bei 945 m+NN und die mittlere Hangneigung bei 19,5°. Morphologisch kann das Gebiet in drei Haupteinheiten unterteilt werden. Die Hochlagen besitzen ein charakteristisches kuppig-welliges Flachrelief, das ein Relikt der tertiären Landoberfläche darstellt. Die tief eingeschnittenen Kerbtäler mit ihren steilen Hangbereichen, die den größten Anteil an der Einzugsgebietsfläche ausmachen, zeigen Hangneigungen bis zu 46,2°. Stellenweise tritt das Grundgebirge zu Tage und bildet Felsdurchragungen mit rezenten Blockschuttfeldern. Die schwach ausgeprägten Talböden mit den Vorflutern nehmen nur etwa 3,2% der Fläche ein.

2.1 Klima und Hydrologie

Das Untersuchungsgebiet mit seiner Lage im südwestlichen Schwarzwald kann zu den gemäßigten Übergangsklimaten gezählt werden. Durch die räumliche Lage des Untersuchungsgebietes kommt es zu einem Austausch und zu einer Vermischung subtropischer Warmluft mit polarer Kaltluft. Das Klima der Region ist geprägt durch abwechselnd auftretende Luftmassen, die sowohl maritim-atlantischen als auch kontinentalen Charakter aufweisen. Nähere Ausführungen zum regionalen Klima finden sich in RELKIP (1995) und PARLOW & ROSNER (1997).

Das großräumig vorherrschende Klima wird durch lokale Geofaktoren weiter modifiziert. Diese sogenannten Klimafaktoren sind Relief, Höhenlage, Exposition und Landnutzung. Sie führen zur räumlichen Heterogenität der Klimaelemente (UHLENBROOK 1999).

Der Höhenlage entsprechend (700-900 m+NN) herrscht im Bereich des Testfeldes eine mittlere Jahrestemperatur von 6-7°C vor, mit Tagesmaxima von ca. 25°C und Minima von ca. -15°C (Klimawerte Station Katzensteig 1994-2001, IHF). Weiterhin macht sich die Topographie bei der Verteilung der Niederschläge bemerkbar. Die jährlichen Niederschläge liegen nach den Angaben im Hydrologischen Atlas von Deutschland (BMU 2000) für die Periode 1961-1990 im Bereich des Zartener Beckens um 1000 mm (Station Freiburg i. Br. 955 mm) und steigen auf über 1900 mm in den Hochlagen des Schwarzwaldes an (Station Feldberg 1909 mm). Im Jahresverlauf zeigt sich eine zweigipflige Verteilung der Niederschläge mit einem ersten Maximum im Sommer und einem zweiten von November bis Januar (SCHREINER 1994). Schnee spielt im Untersuchungsgebiet eine wichtige Rolle. Etwa 2/3 der Jahresniederschläge fallen in den Hochlagen, meist in den Monaten Februar und März, als Schnee. In den mittleren Lagen sind es immerhin noch ca. 50% des Jahresniederschlages (PARLOW & ROSNER 1997). Oberhalb von 900 m liegen im Durchschnitt an 85 bis 95 Tagen Schneehöhen von mindestens 20 cm, an 52 bis 70 Tagen mindestens 30 cm. Der

Schneespeicher spielt im Zusammenhang mit der Hochwasserentstehung eine wichtige Rolle (SCHREINER 1994).

Die Hydrologie des Untersuchungsgebietes, insbesondere das Entwässerungssystem ist hauptsächlich geprägt von der geologischen Ausgangssituation. Das Entwässerungssystem mit seinem dendritischen Charakter folgt bevorzugten Leitlinien, welche durch tektonische Störungen oder Gesteinunterschiede vorgegeben sind (UHLENBROOK 1999).

Der St. Wilhelmer Talbach, der zusammen mit dem Steinwasenbach ab der Konfluenz an der „Hohen Brücke“, die Brugga bildet, ist ein Quellgewässer der Dreisam und somit dem Oberrhein tributär. Die wichtigsten gewässerkundlichen Hauptzahlen des St. Wilhelmer Talbachs und der Brugga (Tab. 2.1 bis 2.3) sollen einen Eindruck des Abflussverhaltens liefern.

Tab. 2.1: Stammdaten der Pegel St. Wilhelm und Oberried

Pegel	Rechtswert	Hochwert	Gewässer	A _{EO} [km ²]	PNP [m+NN]	Entfernung zur Mündung [km]
St. Wilhelm (Nr.387)	3420342	5307598	St. Wilhelmer Talbach	15,22	632,49	0,18
Oberried (Nr. 386)	3421750	5311663	Brugga	40,12	434,77	7,0

(Quelle: LFU, 1999) mit A_{EO} = oberirdische Einzugsgebietsfläche; PNP = Pegelnullpunkt

Tab. 2.2: Einzugsgebietskenngrößen der Pegel St. Wilhelm und Oberried

Pegel	S [%]	W [%]	I _G [%]	L [km]	L _C [km]	N _G [mm]
St. Wilhelm (Nr.387)	1,1	78,8	7,35	7,0	3,0	1650
Oberried (Nr. 386)	1,65	74,93	5,25	12,5	5,3	1570

(Quelle: LFU, 1999) mit S = Siedlungsanteil; W = Waldanteil; I_G = gewogenes Gefälle; L = Fließlänge entlang des Hauptvorfluters von der Wasserscheide bis zum Pegel; L_C = Fließlänge entlang des Hauptvorfluters vom Gebietsschwerpunkt bis zum Pegel; N_G = mittlerer jährlicher Gebietsniederschlag

Tab. 2.3: Hochwasserabfluss-Kennwerte der Pegel St. Wilhelm und Oberried

Pegel	Zeitreihe Anzahl HQ-Werte	m^3s^{-1}	MHQ	HQ ₁₀	HQ ₁₀₀	HHQ _{Jahr}
		$\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$				
St. Wilhelm (Nr.387)	1954-1997 44	HQ	6,18	10,86	20,05	11,6
		Hq	0,406	0,714	1,318	1991
Oberried (Nr. 386)	1934-1998 65	HQ	13,74	24,07	44,15	33,6
		Hq	0,342	0,600	1,100	1944

(Quelle: LFU, 1999) mit MHQ = mittlerer Hochwasserabfluss; HQ₁₀ = Hochwasserabfluss mit 10 jährigem Widerkehrintervall; HQ₁₀₀ = Hochwasserabfluss mit 100 jährigem Widerkehrintervall; HHQ_{Jahr} = höchste je gemessene Abfluss mit Jahresangabe.

Bedingt durch die fehlenden bzw. nur geringmächtigen Lockersedimente, und das nur geringe Speichervermögen des Grundgebirges, fließt ein Großteil des Niederschlagswassers rasch im Gerinne ab. Der längerfristig im Gebiet gespeicherte Anteil, der im allgemeinen als Quellausfluss den oberirdischen Gewässern zugeführt wird, ist in erster Linie abhängig vom Niederschlagsangebot, der Morphologie und vor allem von Aufbau und Mächtigkeit der als Speicher fungierenden Verwitterungsdecken, Moränen und Hangschuttmassen. Der kristalline

Gebirgsuntergrund ist aufgrund seiner geringen Durchlässigkeiten von untergeordneter Bedeutung. Er wirkt überwiegend als Wasserstauer. Lediglich in oberflächennahen, aufgelockerten Bereichen, sowie an durch Störungen und Klüfte beeinflussten Stellen kann er als mäßiger Wasserleiter dienen (GLA 1981). Auf die geringen Speichereigenschaften des Gesteins weist UHLENBROOK (1999) hin, indem er die Differenz von MQ zu MHQ (0,66 m³/s zu 6,6 m³/s) anführt, die auf den großen Einfluss schneller Abflusskomponenten hindeutet. Die Abflussspende (Abb. 2.2) der Brugga mit 39 l/s·km², bzw. des St. Wilhelmer Talbachs mit 41 l/s·km² ist im Vergleich zur Dreisam mit 23 l/s·km² sehr hoch, was sowohl auf die Lage der Einzugsgebiete im kristallinen Grundgebirge und das Fehlen eines ausgedehnten Talaquifers, als auch auf die höheren Niederschläge der höher gelegenen Einzugsgebiete zurückzuführen ist.

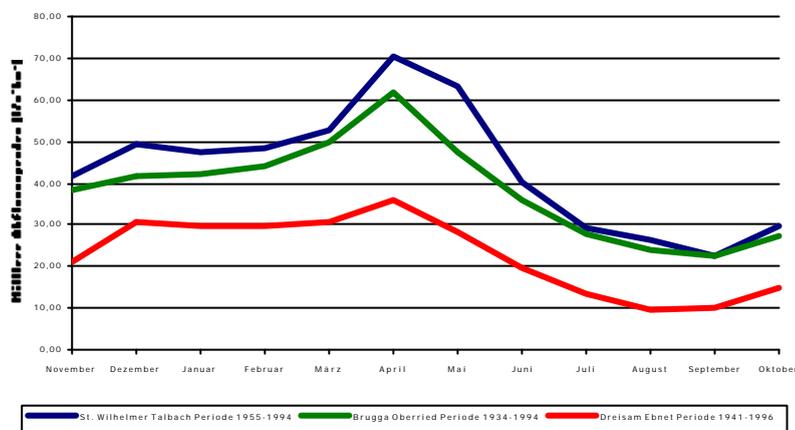


Abb. 2.2: Mittlere Abflussspenden der Gewässer St. Wilhelmer Talbach, Brugga und Dreisam

Die Abflussregime der Pegel (Abb. 2.3) zeigen ein Maximum im April und minimale Werte im August und September. Das Maximum ist zurückzuführen auf die Schneeschmelze im Frühjahr und das Minimum auf sommerliche Verdunstungsprozesse. Das Abflussregime kann als komplexes Regime vom Typ nivo-pluvial bezeichnet werden.

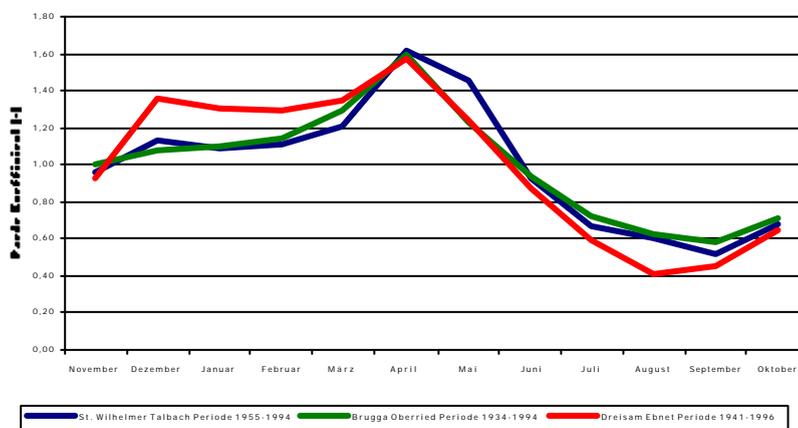


Abb. 2.3: Abflussregime der Gewässer St. Wilhelmer Talbach, Brugga und Dreisam

2.2 Geologie und Geomorphologie

Die Geologie des Untersuchungsgebietes ist vom kristallinen Grundgebirge geprägt. Dieses besteht im Südschwarzwald hauptsächlich aus metamorphen Gneisen und Tiefengesteinen (GENSER 1997). Die im Präkambrium abgelagerten marinen Sedimente durchliefen in ihrer weiteren Geschichte zwei Umwandlungsstadien.

Zunächst erfolgte die „erste Anatexis“ mit der Mobilisierung von Granitmagmen und deren Intrusion in höher gelegene Stockwerke. Eine Vergneisung, von sowohl Para- (Sediment-) als auch Ortho- (Eruptiv-)gesteinen, bildete die Paragneise und Orthogneise. Daraufhin folgte eine regionale „zweite Anatexis“, welche die weit verbreiteten Metatexite und Diatexite hervorbrachte. Beide Phasen der Anatexis (vor 450-500 Millionen Jahre) fanden während der kaledonischen Orogenese im Ordovizium statt.

Der zweiten Anatexis folgte vermutlich im Unterkarbon die Durchschwärmung der Anatexite und Gneise mit Aplitgranitgängen und verwandten Gesteinen. Im untersten Perm kam es zur Intrusion von Gangporphyren. Die Bildung von Erzgängen wird der spätvariszischen Zeit und dem Tertiär zugeschrieben (GLA 1981).

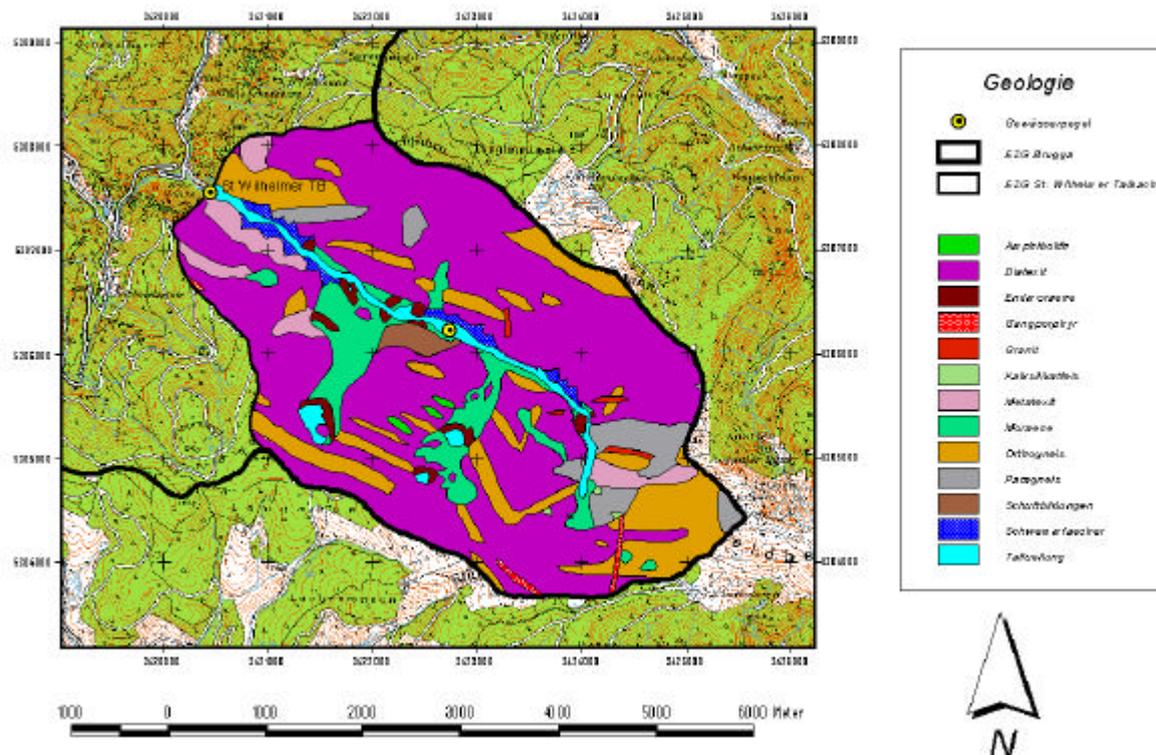


Abb.: 2.4: Geologische Karte des St. Wilhelmer Tals

Das variszische Gebirge unterlag im Karbon und im Perm wieder der Abtragung. Es kam zu einer Einebnung, die zur permischen Landoberfläche führte (GENSER 1997). Diese, unter wechselfeuchten Bedingungen entstandenen, Rumpfflächen wurden während der Trias mit mächtigen terrestrischen und marinen Sedimenten bedeckt. Bedingt durch die mit der Entstehung des Oberrheingrabens zusammenhängende Aufwölbung und Schrägstellung der Gesteine und die anhaltende Erosion wurden die Sedimentdecken im diesem Bereich vollständig abgetragen.

Die im St. Wilhelmer Tal vorkommenden Gesteine sind in Abb. 2.4 dargestellt. Für das Testfeld sind neben den quartären Ablagerungen Diatexite, Orthogneise und Granite von Bedeutung. Eine genauere Beschreibung der einzelnen Gesteine findet sich in GLA (1981).

Die Landschaft in der näheren Umgebung des Untersuchungsgebietes, mit seinem typischen Mittelgebirgscharakter, ist wie bereits oben angedeutet, geprägt von der Heraushebung des Schwarzwaldes während der Entstehung des Oberrheingrabens. Die Schrägstellung ist für die Unterschiede in den Relieftypen des südlichen Schwarzwaldes verantwortlich. Zum einen das sanfte danubische Relief im Osten, zum anderen das steil eingeschnittene rhenanische Relief der westlich orientierten Täler. Naturräumlich betrachtet gehört das Untersuchungsgebiet zum südlichen Kammschwarzwald, der seinen Namen von den zahlreichen Bergkämmen herleitet, die sich zwischen den Tälern erheben. Die Ursache für das tiefe Einschneiden der prä- und interglazialen Flüsse ist die tiefe Lage des Zartener Beckens (METZ 1997).

Die Täler, die sich ausgehend von der Feldberg-Herzogenhorn Gipfelregion erstrecken, zeigen einen ausgeprägten glazigenen Formenschatz, wohingegen die Gipfelregion einen Hochflächencharakter bewahrt hat (Abb. 2.5). Das St. Wilhelmer Tal ist eines der wohl am besten erhaltenen Trogtäler im Schwarzwald. Es erstreckt sich vom Feldberggipfel aus in nordwestlicher Richtung zum Bruggatal. Das Tal schließt Richtung Feldberg mit einem nach Norden offenen Kar, mit einer etwa 450m hohen Karwand ab. Westlich davon befinden sich zwei weitere, nach Norden exponierte Kare, das Wittenbacher und das Katzensteig Kar. Nach Norden hin wird das Tal durch den Hochfarn-Tote Mann-Kamm vom Zastlertal abgetrennt (METZ 1997).

Klare Aussagen im Hinblick auf die Vergletscherungen im Gebiet können nur für die letzte Eiszeit gemacht werden. Die Spuren älterer Vereisungsphasen wurden teilweise erneut überfahren oder durch Erosionsvorgänge sowohl der Gewässer als auch der Hänge zerstört (METZ 1997). Zu Beginn der Würmeiszeit senkte sich die Jahresmitteltemperatur gegenüber heute um 10-12 °C ab, so dass sich die Schneegrenze von der heute gedachten Höhe von 2300 m auf ca. 1000 m verlagerte. Der Schnee blieb auf den Höhen ganzjährig liegen und sammelte sich besonders an N und NO exponierten Hanglagen. An diesen Stellen bildeten sich mit der Zeit Kare aus. Diese Schneeansammlungen führten zur Bildung von Talgletschern (Brugga, Zastler, Wiese), die zum Höchststand der Würmvereisung bis auf 500 m hinunterreichten (GLA 1981). Es gab jedoch kein einheitliches

Vergletscherungszentrum. Von den dünnsten Stellen der Vereisung auf den Kuppen, die wohl nur einige Dezimeter betragen haben dürfte, ergossen sich die Eisströme in die Täler und erreichten im Falle des St. Wilhelmer Tales eine Mächtigkeit von 200-300 m (METZ 1997).

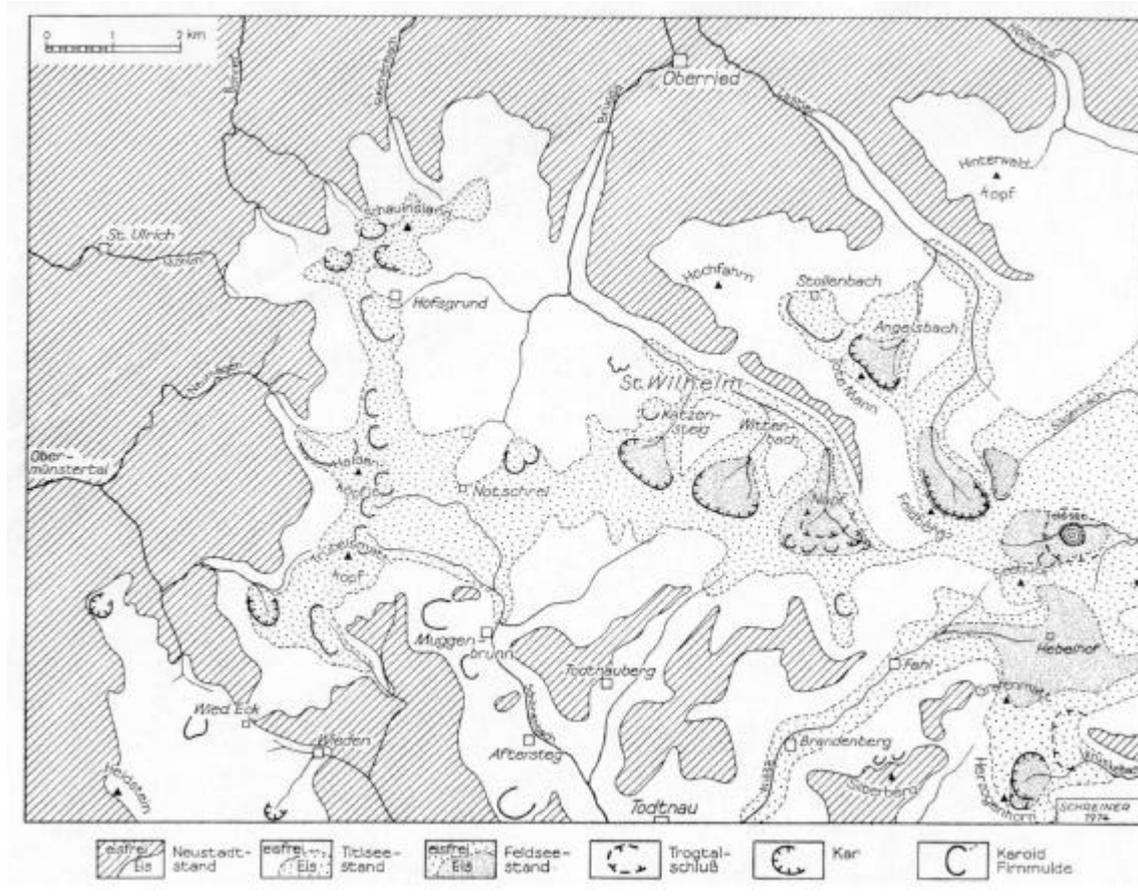


Abb. 2.5: Verbreitung der würmeiszeitlichen Vereisungsphasen (aus: GLA 1981)

2.3 Böden

Die Bodenentwicklung erfasst im Gebiet des südlichen Schwarzwaldes nicht die anstehenden Gesteine, sondern lediglich die hangenden, periglazial und glazial abgelagerten Lockersedimente, welche mit einer Mächtigkeit von 1-2 m die Hochflächen und Hänge überziehen. Das Anstehende tritt nur an besonders steilen Stellen zu Tage, besonders häufig an südexponierten Hängen und im Bereich der Kare (HÄDRICH&STAHR 1997).

Die Böden im Bereich des südlichen Schwarzwaldes lassen sich, wie Abb. 2.6 zeigt, in drei unterschiedliche Höhenbereiche einordnen: Erstens in eine submontane lößbeeinflusste Zone (1), zweitens in eine von Schuttdecken geprägte montane Stufe (2) und drittens in eine Kuppen- und Hochlagenzone (3), welche durch Moränenablagerungen geprägt ist.

Das Untersuchungsgebiet der „Hinteren Matte“ mit einer Höhenlage von ca. 800 m+NN kann zum Bereich der montanen Stufe (2) gezählt werden. Die Beschreibung der Böden soll sich im Folgenden auf diesen Bereich beschränken.

Moränenlandschaft (3)

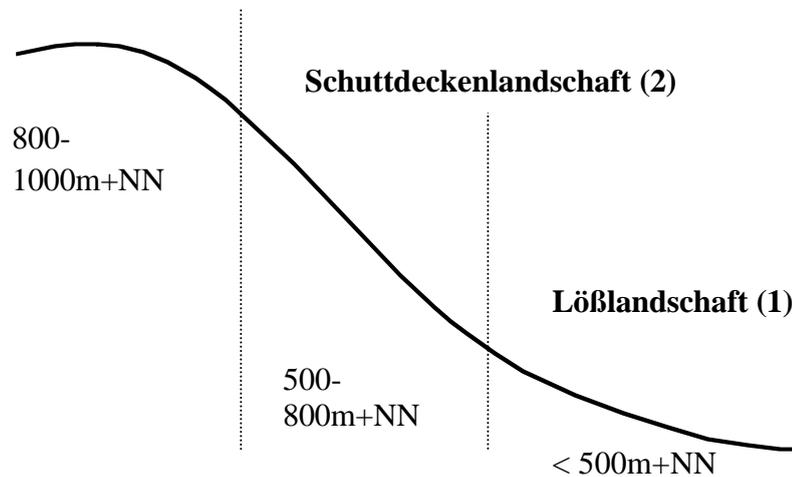


Abb. 2.6: Gliederung der unterschiedlichen Landschaften in Hangbereichen (Zollinger, mündl. 2001)

Der Bereich der montanen Stufe ist geprägt von periglazialen Schuttdecken auf Gneis. Die dominierenden bodenbildenden Prozesse sind die Verbraunung und Verlehmung, welche im Normalfall zur Ausbildung von Braunerden (Ah/Ah-Bv/Bv/Bv-Cv/imC) führten (HÄDRICH&STAHR 1997).

Periglaziale Schuttdecken

Die periglazialen Schuttdecken wurden während des Pleistozäns unter Frostwechselbedingungen gebildet, und überziehen mit einer Mächtigkeit von 1-2m die Hänge und Hochflächen (HÄDRICH&STAHR 1997). Ihre Entstehungsgebiete sind die Hanglagen mit Verwitterungs-, Anwehungs- und Umlagerungsprozessen. Die Schuttdecken setzen sich aus verwittertem Lockergestein zusammen. In mittleren Höhenlagen tritt stellenweise das Anstehende zu Tage und bildet Felsansammlungen. Zu deren Füßen kommt es stellenweise zu waldfreien Blockschutthalden, die sich rezent weiterentwickeln. Der Hangschutt in diesen Bereichen ist sehr steinig und enthält weniger Feinmaterial als z.B. in tieferen Regionen, und am Hangfuß kann er Mächtigkeiten bis zu 10 m erreichen.

In der Literatur finden sich unterschiedliche Theorien der Entstehung des periglazialen Hangschutts. Im Jahr 1998 entschied sich die Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft für den Begriff der „Lage“ mit inhaltlicher Bindung an SEMMEL, der von einer parallelen Abfolge der Entstehungsprozesse ausgeht.

Die Lagen der im Südschwarzwald vorkommenden periglazialen Schuttdecken lassen sich folgendermaßen gliedern:

Den festen und nicht verwitterten Unterbau stellt das kristalline *Grundgebirge* dar, das an seiner oberen Grenze in eine autochton entstandene *Zersatzzone* übergeht. Diese *Zersatzzone* besteht aus grusigem Material sowie aus Steinen und Blöcken. Zu ihr hangend gelegen befindet sich die erste periglaziale Schuttlage, die *Basislage*. Charakteristisch für die *Basislage* ist eine dachziegelartig eingeregelter Ausrichtung des Skelettes. Ein weiteres Merkmal ist die sehr hohe Lagerungsdichte, die oft für eine Einschränkung der bodenbildenden Prozesse, wie das Eindringen von Wurzeln und die Verlehmung und Verbraunung, verantwortlich ist. Sie kann zudem als wasserstauende Schicht fungieren, vergleichbar mit dem Geschiebelehm im Glazialbereich (HÄDRICH&STAHR 1997).

Die *Hauptlage* entstand aus einem oberflächlich auftauenden Permafrostboden, dessen Wasser nicht weiter in die Tiefe abgeführt werden konnte. In Bereichen ab einer bestimmten Hangneigung geriet das Wasser-Boden-Gemisch in Bewegung, so dass ein Einregeln des Skeletts nicht möglich war. Der Skelettanteil ist im Gegensatz zur *Basislage* geringer, was sich günstig auf die Wasserspeicherung, Nährstoffversorgung, Durchwurzelbarkeit und Durchlüftung auswirkt (HÄDRICH&STAHR 1997).

Bei der *Decklage* hingegen ist durch Auftau- und Gefrierprozesse der oberen Bodenschichten, wie Kammeis- und Nadeleisbildung wieder eine Kornsortierung erkennbar. Die *Decklage* ist eine skelettreiche, oft in hangparalleler Richtung eingeregelter Schicht (HÄDRICH&STAHR 1997).

Das Auftreten der einzelnen Lagen ist nicht überall gleich ausgeprägt. Ein Fehlen einzelner Lagen ist durchaus möglich. Die Verbreitung ist abhängig von der Gestalt, besonders der Neigung und Exposition, der Hänge. Problematisch gestaltet sich die Identifikation der einzelnen Lagen im Gelände. Da es sich zum Teil um parallel ablaufende Prozesse handelt, ist eine klare Trennung nicht in jedem Fall möglich. Bei südexponierten Lagen ist die Mächtigkeit der Schuttdecken oft geringer als bei nordexponierten, was auf die Intensität der Solifluktion zurückzuführen ist (GLA 1981). Die Mächtigkeit der Lockergesteinsdecken kann 1-4 m betragen, am Hangfußbereich vereinzelt auch 10 m und mehr. In der Materialzusammensetzung zeigt sich ein weites Kornspektrum (GLA 1981).

Talsedimente

Die Mächtigkeiten der Talsedimente schwanken von maximal 10 m bis zu so geringmächtigen Stellen, dass besonders in den Bachbetten das anstehende Gestein zu Tage tritt (GLA 1981). Die Durchlässigkeiten sind aufgrund der Materialzusammensetzung und Lagerung sehr unterschiedlich, im allgemeinen aber als mäßig einzuschätzen. Im Randbereich findet eine Verzahnung mit Grobgeröllen und Feinmaterialien der Hangbereiche statt, was zu

einer weiteren Erhöhung der Inhomogenität des Materials führt. Hier finden sich holozäne Schwemm- und Schuttfächer.

Im Vergleich zum unterliegenden Material besitzt der aufliegende Auenlehm eine geringere hydraulische Durchlässigkeit (vgl. Kap. 4.1). In Zeiten hoher Gebietsfeuchte und bei ausgiebigen Niederschlägen können gespannte Grundwasserverhältnisse auftreten, wodurch schnelle Abflusskomponenten generiert werden (vgl. Kap. 4.2).

2.4 Testfeldauswahl

Der Einbau der Grundwasserbeobachtungsstellen im Untersuchungsraum war einer der zentralen Punkte der praktischen Geländearbeiten. Hinsichtlich der Fragestellung mussten geeignete Standorte gefunden werden, die, abgesehen von ihrer Erreichbarkeit und den gegebenen Eigentumsverhältnissen, auch geeignete Untergrundeigenschaften zur Installation der Messstellen aufweisen. Im Bruggaeinzugsgebiet existieren, bedingt durch die tief eingeschnittenen Täler und die engen Talböden, wenige Stellen mit geeigneten Bedingungen für die Anlage eines Testfeldes. Voraussetzung hierfür ist ein Vorfluter mit ausgebildeter Talaue, deren Anschluss an den obenliegenden Hangfußbereich gegeben ist. Wie auf der Abb. A1 im Anhang ersichtlich wird, liegen solche Gebiete vor allem im Bereich des St. Wilhelmer Talbachs. Als Testfeld kommen die vier Bereiche „Vordertal“, „Hintere Matte“, „Napf“ und „Napfmatte“ in Frage.

Die ersten Feldbegehungen richteten sich auf die Napfmatte (3423800, 5305700), welche sich von den vier genannten Stellen am weitesten Richtung Talschluss des St. Wilhelmer Tals befindet. In diesem Gebiet lagen zudem bereits erste Erkenntnisse im Bereich der Hydrochemie durch die Diplomarbeit von KIENZLER (2001) vor. Es stellte sich jedoch heraus, dass neben den ungünstig gelegenen anthropogenen Entwässerungsmaßnahmen im unteren Bereich der Matte, auch die Untergrundverhältnisse ungeeignet waren. Die sehr heterogene Materialzusammensetzung mit Geröllen bis zu 40 cm Durchmesser vereitelten zum Teil bereits erste Sondierungsversuche. Ebenfalls wurde der sich anschließende Hangbereich oberhalb der Matte, der teilweise durch Weganschnitte gedrängt wird, als nicht geeignet angesehen. Den periglazialen Decklagen wird durch die Weganschnitte Wasser entzogen, und dem unteren Hangbereich konzentriert über Rohre wieder zugeführt. Das System wird dadurch sowohl hinsichtlich der Dynamik als auch der Stoffzusammensetzung gestört.

Der weiter talabwärts gelegene Bereich „Napf“ (3423000, 5306100) mit gut ausgebildeten Schuttfächern zeigte sich aufgrund eines zu tief liegenden Grundwasserspiegels, der bei einigen Sondierungen nicht erreicht werden konnte, sowie anthropogenen Auffüllungen (3422905, 5306142) im Zusammenhang mit dem Straßenbau, als ungeeignet. Die Topographie hätte den Einsatz von schwerem Bohrgerät nicht zugelassen.

Auf der „Hinteren Matte“ hingegen lagen im Hinblick auf die Fragestellung besonders geeignete Bedingungen vor, so dass dieser Bereich als Testfeld ausgewählt wurde. Die Talaue besitzt eine Ausdehnung von bis zu 130 m mit einem klar abgegrenzten Übergang zum Hangfußbereich. Der Hangbereich ist zwar nicht so mächtig ausgeprägt wie im „Napf“, es konnte allerdings bei den Sondierungen das Hanggrundwasser erreicht werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die anthropogenen Eingriffe klar abgrenzbar sind.

Bereits nach diesen Vorerkundungen, die sich lediglich auf den Bereich des St. Wilhelmer Tales konzentrierten, zeigte sich die Heterogenität des Untergrundmaterials. Die Variabilität, sowohl der Materialzusammensetzung, als auch der Tiefenlage des Grundwassers, ist sehr hoch.

2.5 Beschreibung des Testfeldes

Das Testfeld wurde auf der „Hinteren Matte“ eingerichtet (Abb. 2.7). Es erstreckt sich in der Längsausdehnung über ca. 300 m (3422600 bis 3422950) und in der Breite über 130 m (5306120 bis 5306350). Die Exposition zeigt nach SSW. Talaufwärts wird die Wiese durch eine Lesesteinmauer begrenzt, talabwärts durch den Zufahrtsweg des Maierjockelshofs. Das Testfeld endet nach SSW am Vorfluter, dem St. Wilhelmer Talbach. Nach NNO stellt der Waldrand die Begrenzung dar. Die „Hintere Matte“ wird durch extensive Weidewirtschaft genutzt. Für die Beschreibung der Vorgänge auf dem Testfeld ist es notwendig den Oberhang in die Betrachtungen mit einzubeziehen (Abb. 2.8). Der Oberhang lässt sich in vier Teilbereiche untergliedern. Diese Beschreibungen gehen auf die Forstliche Standortskarte FVA (1994) und die daraus abgeleitete, am IHF verwendete Raumgliederung zurück. Direkt am Waldrand schließt sich ein etwa 50 m breiter, mit Wald bestandener, Bereich periglazialer Deckschichten an. Die Abflussdynamik ist in diesem Bereich geprägt von zwei in ihrem Verhalten recht unterschiedlichen Schichten. Die Decklage ist hydraulisch durchlässiger, bedingt durch einen höheren Skelettanteil. In ihr findet schneller Zwischenabfluss über Makroporen statt. Unter dieser Schicht liegt die mächtige Hauptlage, deren Wasseraufnahmekapazität aufgrund des hohen Feinmaterialanteils begrenzt ist. Der Wasseraustausch zwischen der Deck- und Hauptlage ist ebenfalls gehemmt (ROSER 2001).



Abb. 2.7: Blick vom Schmaleck auf das Testfeld in nördlicher Richtung

Dieser Hangabschnitt wird aufwärts gefolgt von einem ca. 130 m langen rezenten Blockschuttfeld. Die großen Felsblöcke auf der „Hinteren Matte“, deren Durchmesser teilweise mehrerer Meter erreichen, sind auf historische Massenbewegungen aus diesem Bereich zurückzuführen. Stellenweise ist der Blockschutt unbewachsen und liegt frei, hier finden rezente Massenbewegungen statt. Ursprungsort dieser Felsblöcke ist der nachfolgende Felsbereich des „Hirschfelsen“. Diese Felsaustritte des anstehenden Grundgebirges bestehen aus Orthogneis und erreichen eine Höhe von mehreren Zehnermetern. Die Abflussdynamik im Blockschuttfeld ist aufgrund der hohen hydraulischen Durchlässigkeiten sehr groß. Die Infiltrationskapazität ist sehr hoch. Hier wird der Hauptentstehungsort der schnellen Grundwasserneubildung vermutet. In etwa 2/3 der Hanglänge quert der „Obere Ibenfelsenweg“ den Hang. Dieser hat allerdings aufgrund seiner Entfernung zum Testfeld keinen direkten Einfluss. Der oberste Hangbereich weist Hochflächencharakter auf, mit einem flacheren reliktsch vorhandenen danubischen Relief. Dieser ist dem „Hochfarn-Tote Mann-Bereich“ zuzuordnen. Laut Raumgliederung finden sich im lokalen oberirdischen Einzugsgebiet allerdings keine Hochlagenbereiche. Das obere lokale Einzugsgebiet ist geprägt von „klassischen periglazialen Deckschichten“ ohne Decklage, die bei hangabwärts steiler werden des Hangs in Bereiche mit Decklage übergehen. Decklagen treten bei

Hangneigungen von 25-36 ° auf (ROSER 2001). Die lokale Einzugsgebietsfläche beträgt 0,21 km². Die Flächenanteile des Einzugsgebiets sind in Tab. 2.4 dargestellt. Eigentliche Moränengebiete sind nach der Raumgliederung im lokalen Einzugsgebiet nicht vorhanden.

Tab. 2.4: Flächenanteile des lokalen Einzugsgebietes nach der Raumgliederung

Raumgliederungsklasse	Flächenanteil [%]	Fläche [m ²]
Periglaziale Decklage	5	10625
Decklage auf Hauptlage	26	55250
Blockschutt	41	87125
Hangfußbereich	22	46750
Feuchtflächen	6	12750

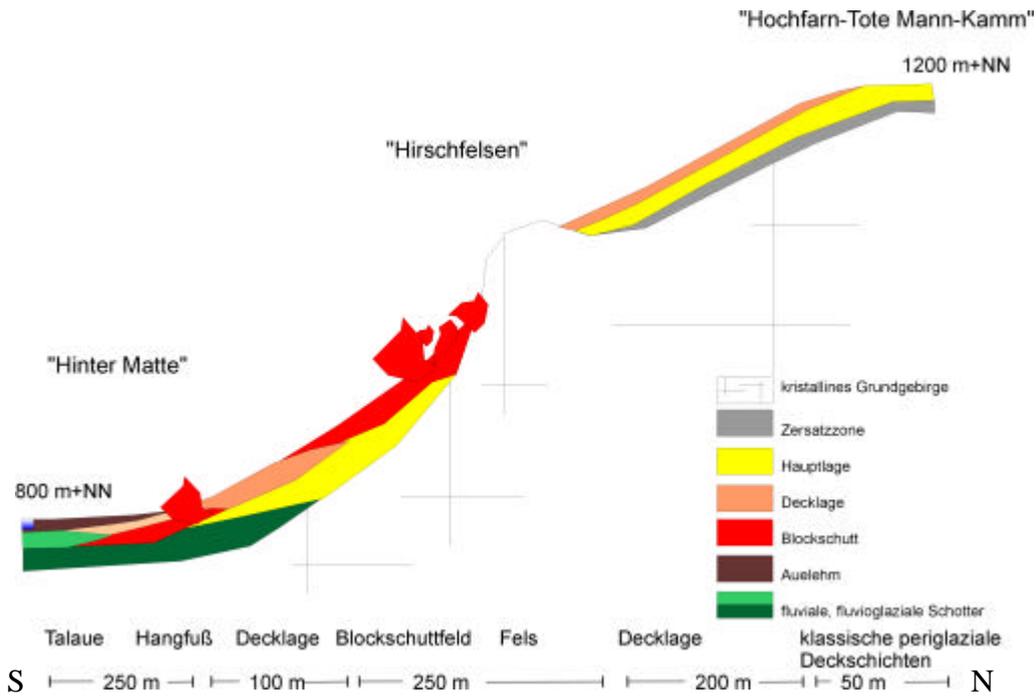


Abb. 2.8: Schematisches Querprofil des gesamten Hangbereichs

Das Testfeld gliedert sich in vier Abschnitte (Abb. 2.9): der eigentliche Hang, der Hangfußbereich, die Terrasse und der vorfluternahe Bereich. Diese Bezeichnungen gelten für die gesamten weiteren Beschreibungen innerhalb der vorliegenden Arbeit.

Der erste Bereich, der Hang, besteht aus zwei Schuttfächern, die sich ausgehend vom darüber liegenden Blockschuttfeld und den damit verbundenen Massenbewegungen in den Talboden erstrecken. Die Schuttfächer sind miteinander verzahnt, und zeigen einen Höhenunterschied von 5 m mit einer konvex divergierenden Wölbung.

Im Bereich des talaufwärts gelegenen Fächers liegen zwei Quellbereiche. Eine der Quellen ist gefasst und wird zur Trinkwasserversorgung des Maierjockelshofs genutzt. Die zweite Quelle wird durch einen Quellgraben Richtung Sättigungsfläche abgeleitet.

Am Fuß der Schuttfächer, dem Hangfußbereich, zeigt sich eine ausgeprägte Mikrotopographie, deutlich geprägt von einer alten Flutrinne. Diese Flutrinne wird heute genutzt um das anfallende Quellwasser aus der Sättigungsfläche über einen Entwässerungsgraben dem Vorfluter zuzuführen. Das Feinsubstrat besteht, im Gegensatz zum Hangbereich, aus sandigen Komponenten mit kantengerundeten Geröllen.

Der dritte Abschnitt, entstanden durch die Verlagerung des Bachbettes, ist als Mittelterrasse zu bezeichnen. Sie hebt sich mit ca. 1 m über das eigentliche Auenniveau heraus. Besonders deutlich ist sie am westlichen Ende ausgebildet.

Vergleichbar mit der Mikrotopographie der Flutrinne an der nördlichen Terrassenkante ist das Relief im südöstlichen Teil des Testfeldes. Die noch recht gut erhaltenen Rinnen deuten auf einen wechselhaften Bachverlauf bis in historische Zeit hin. Hier findet sich die untersuchte Sättigungsfläche. Der Übergang der Aue zum Vorfluter gestaltet sich sehr abrupt. Das nördliche Bachufer ist auf der gesamten Länge mit einer mauerähnlichen Struktur befestigt. Dies ist ein weiteres Indiz für eine anthropogene Regulierung.

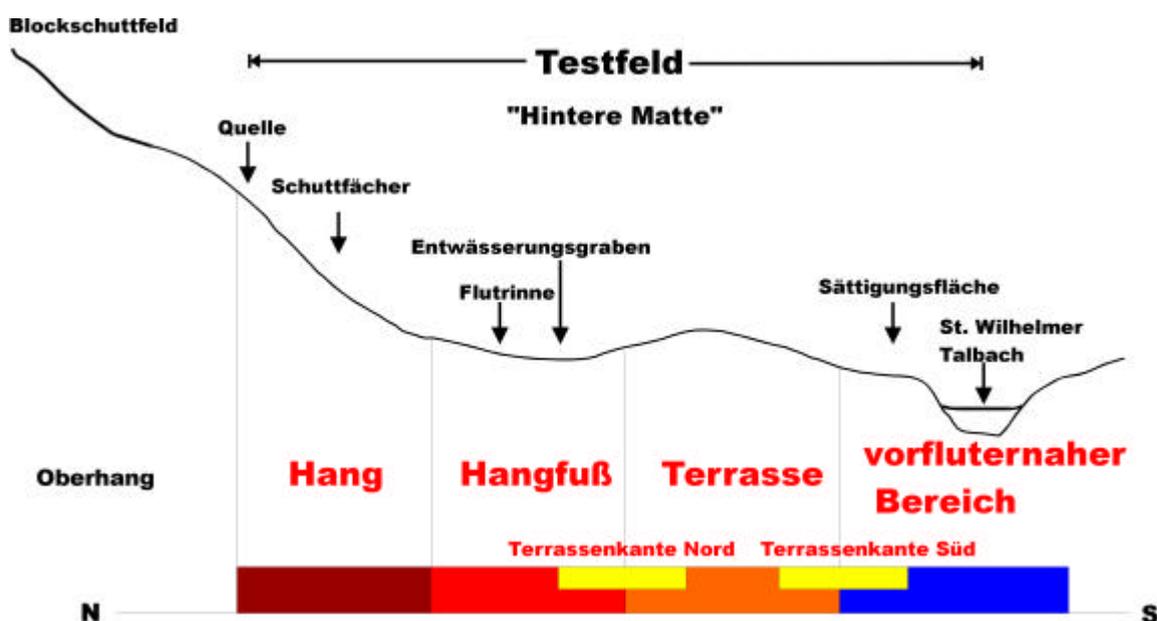


Abb.2.9: Schematischer Schnitt durch das Testfeld mit Lagebezeichnungen (rot)

3. Methodik

3.1 Bestimmung der Aquiferparameter

Zur Bestimmung der hydraulischen Parameter des Talaquifers wurden verschiedene Versuche durchgeführt, deren Grundlagen im Folgenden kurz dargestellt werden.

Strömungsverhältnisse

Es werden Pumpversuche bei stationären und instationären Strömungsverhältnissen unterschieden. Um stationäre Strömungsverhältnisse herzustellen, wird bei konstanter Wasserentnahme der Pumpversuch so lange durchgeführt, bis sich ein dynamischer Gleichgewichtszustand zwischen Grundwasserentnahme und nachströmendem Grundwasser eingestellt hat. In der Praxis ist dieser Zustand jedoch schwer zu erreichen, da das Grundwasser verschiedenen zeitvarianten Einflüssen unterliegt, wie z.B. variable Zu- und Abstromverhältnisse, wechselnder Grundwasserneubildung etc., und man somit lediglich einen quasistationären Zustand erreicht. In der Regel werden kurzfristige Pumpversuche durchgeführt, bei denen sich noch kein dynamisches Gleichgewicht einstellen konnte. Durch diese Versuchsvariante werden instationäre Strömungsverhältnisse hervorgerufen. Es ist bei der Auswertung der Pumpversuche darauf zu achten welcher Strömungszustand zugrunde liegt (HÖLTING 1995).

Die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus Pumpversuchen

Für die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes (k_f -Wertes) stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Eine häufig angewendete Methode ist die Bestimmung mittels Pumpversuchen (HÖLTING 1996; RICHTER&LILLICH 1975). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Durchlässigkeitsbeiwerte des Talaquifers direkt im Bohrloch bzw. in der Grundwasserbeobachtungsstelle bestimmt. Bei diesen Verfahren besteht der Vorteil im geringeren technischen und zeitlichen Aufwand. Sie geben einen schnellen Überblick über Größenordnungen und Verteilung der Durchlässigkeiten. Der Nachteil besteht vor allem darin, dass sie lediglich eine Aussage über einen relativ kleinen, punktförmigen Aquiferausschnitt zulassen (RICHTER&LILLICH 1975), und sich daraus oft kleinere Werte errechnen, als bei großräumig angelegten Pumpversuchen (HÖLTING 1996). Die ermittelten k_f -Werte können bis zu einer Zehnerpotenz kleiner sein. Als Gründe dafür nennen RICHTER&LILLICH (1975) die gestörten hydraulischen Strömungsverhältnisse im Bereich der Teststrecke. HÖLTING (1996) führt die kleineren Durchlässigkeiten darauf zurück, dass nur kurze Profileile des Grundwassers getestet werden, und dass sich die Durchflusswiderstände

der Filterrohre bemerkbar machen können. SCHEYTT&HENGELHAUPT (2001) fanden bei einer Untersuchung verschiedener Auffüllversuche heraus, dass die ermittelten Werte bis zu 1,5 Zehnerpotenzen niedriger liegen können. Dennoch sind diese Tests vor allem dann von praktischem Interesse, wenn es darum geht, Informationen zur räumlichen Varianz und Aquiferheterogenität innerhalb eines Untersuchungsgebietes zu erhalten.

3.1.1 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus der Entnahmemenge

Die Bestimmung des k_f -Wertes aus der Entnahmemenge kann sowohl für gespannte, als auch für ungespannte Grundwasserverhältnisse erfolgen. Im gespannten Fall kommt Formel 3.1 unter Verwendung der Entnahmemenge Q [m^3/s], der Mächtigkeit des genutzten Grundwasserleiters M [m] und des Absenkungsbetrages s [m] im Brunnen zur Anwendung:

$$k_f = \frac{Q}{M \cdot s} \quad (3.1)$$

Für freies Grundwasser gilt die abgewandelte Form:

$$k_f = \frac{Q}{h_m \cdot s} \quad (3.2)$$

mit $h_m = h+s/2$, wobei h die abgesenkte Wassersäule über der Brunnensohle darstellt (Hölting 1996).

3.1.2 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes bei instationärem Strömungszustand

Bei dieser Methode wird kurzzeitig Grundwasser aus dem Bohrloch entnommen, und anschließend der Wiederanstieg des Wasserspiegels gemessen. Dabei wird die Wasserspiegellage h_1 am Ende des Pumpversuchs und die sich zu einem späteren Zeitpunkt einstellende Wasserspiegellage h_2 ermittelt. Unter der Voraussetzung, dass $(L/r) > 8$ ist, gilt laut HÖLTING (1996) die Berechnungsformel:

$$k_f = \frac{r^2}{2L(t_2 - t_1)} \cdot 5,3 \lg \left(\frac{L}{r} \right) \cdot \lg \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3.3)$$

mit: L = Länge der offenen Bohrlochwand [m]
 r = Radius des Bohrlochs [m]
 h₁; h₂ = Wasserspiegellagen [m] zum Zeitpunkt t₁ bzw. t₂

3.1.3 Abschätzung der Transmissivität aus einem Pumpversuch

Nach der Einstellung eines Beharrungszustands des Wasserspiegels, d.h. unter (quasi-) stationärem Strömungszustand, kann die Transmissivität nach folgender Formel abgeschätzt werden (HÖLTING 1996):

$$T = \frac{1,22 \cdot Q}{s} \quad (3.4)$$

mit: T = Transmissivität [m²/s]
 Q = Pumpleistung [m³/s]
 S = Absenkung im Brunnen [m]

3.2 Ganglinienseparation

Unter Ganglinienseparation wird die Aufteilung einer Abflussganglinie in die Ganglinien der einzelnen Abflusskomponenten verstanden. Dies ist vor allem bei der Betrachtung von Hochwasserereignissen von Bedeutung, da hier die Entstehungsgeschichte der Ereigniskomponenten von Interesse ist. Generell können die einzelnen Komponenten aufgrund unterschiedlicher Kriterien einteilen werden.

Sie unterscheiden sich hinsichtlich verschiedenartiger Herkunftsräume, verschiedener Fliesswege und Verweilzeiten in ihrer Dynamik und Beschaffenheit (DYCK&PESCHKE 1995). Bei einer dynamikorientierten Unterteilung kann man zwischen Direktabfluss, Zwischenabfluss und Basisabfluss unterscheiden. SHERMAN beschäftigte sich Anfang der dreißiger Jahre des 20. Jahrhunderts erstmals mit der Analyse von Hochwasserganglinien, und die Aufteilung in Oberflächenabfluss und Reservoirabfluss. HERTZLER erwähnte wenige Jahre später den Begriff des Zwischenabflusses (Interflow). Die Problematik der Abtrennung nach einem dynamikorientierten Ansatz ist, dass die Bestimmung der Anfangs- und Endzeiten der

einzelnen Komponenten trotz der Vielzahl an vorgeschlagenen Methoden schwierig ist. Es können keine quantitativen Aussagen über Verlauf und Größe der Komponenten gemacht werden (BERGMANN et al. 1996).

Eine weitere Möglichkeit der Einteilung ist die des verweilzeit-orientierten Ansatzes, bei dem zwischen Vorereignis- und Ereigniswasser unterschieden wird. Bei Vorereigniswasser (preevent water) handelt es sich um altes Wasser, das bereits vor dem Niederschlagsereignis im Einzugsgebiet gespeichert war, bei Ereigniswasser (event water) um neues Wasser, das erst durch den Niederschlag in das System eingebracht wird. Die Begriffe „old water“ und „new water“ gehen auf PILGRIM et al. (1979) zurück, sie sind gleichbedeutend mit den oben angeführten Begriffen des verweilzeitorientierten Ansatzes der von SKLASH&FARFOLDEN (1979) geprägt wurde (HOOPER&SHOEMAKER 1986).

Bei der Methode der Ganglinienseparation mit natürlichen Tracern können theoretisch mit $n-1$ Tracern n Abflusskomponenten abtrennt und quantifiziert werden. Es werden lineare Mischungsgleichungen aufgestellt, die durch Substitution gelöst werden. Im folgenden wird die Methodik der Zwei- und Dreikomponententrennung dargestellt.

3.2.1 Zweikomponententrennung

Bei der Zweikomponententrennung mit Tracern wird von dem Prinzip der Massenerhaltung ausgegangen. D.h. die Summe der beiden Abflusskomponenten ergibt den Gesamtabfluss, und die Summe der beiden Tracerkonzentrationen ergibt die Konzentration im Gesamtabfluss (Formeln 3.5 und 3.6).

Somit lautet das Gleichungssystem für die Komponententrennung:

$$X = a + b \quad (3.5)$$

$$X \cdot c = a \cdot c_1 + b \cdot c_2 \quad (3.6)$$

mit X = Gesamtabfluss; a = Direktabfluss; b = Basisabfluss
 $c; c_1; c_2$ = Konzentration des Tracers in der jeweiligen Komponente

durch Substitution lässt sich das Gleichungssystem lösen zu:

$$a = X \frac{c - c_2}{c_1 - c_2} \quad (3.7)$$

$$b = X - a \quad (3.8)$$

Die Abtrennung der einzelnen Komponenten mit der Gleichungen 3.5 bis 3.8 kann nur sinnvoll durchgeführt werden, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind (Sklash&Farvolden 1979; HOOPER&SHOEMAKER 1986; OGUNKOYA & JENKINS 1993; UHLENBROOK 1999):

- (1) Die Abflusskomponenten unterscheiden sich signifikant in der Konzentration des Tracers
- (2) Es existiert keine weitere Abflusskomponente
- (3) Die Tracerkonzentrationen der Komponenten bleiben während des Ereignisses konstant bzw. die Veränderung ist bekannt und kann berücksichtigt werden
- (4) Die Tracer verhalten sich konservativ, d.h. sie unterliegen keiner chemischen Umwandlung, werden nicht absorbiert oder abgebaut
- (5) Das System befindet sich im Gleichgewicht, d.h. es findet keine Speicheränderung statt

Mit der Zweikomponententrennung werden Ereigniswasser und Vorereigniswasser getrennt, wobei angenommen wird, dass die Konzentration der Ereigniskomponente zu Beginn gleich Null ist, und der Abfluss ausschließlich aus Vorereigniswasser besteht. Durch den zeitlichen Verlauf der Parameter wird jedoch in vielen Fällen rasch deutlich, dass an der Abflussbildung mehrere Komponenten beteiligt sind, und somit eine Zweikomponententrennung nicht ausreicht. Einen Hinweis auf die Beteiligung einer weiteren Komponente kann das Auftragen der Tracerkonzentration gegen den Abfluss liefern. Zeigt sich hierbei ein Unterschied zwischen dem ansteigenden und dem abfallenden Ast, bildet sich also eine Hystereseschleife aus, so kann dies an einer weiteren Komponente liegen. In diesen Fällen ist es notwendig, die zusätzlichen Abflusskomponenten in einem Mehrkomponentensystem zu betrachten.

3.2.2 Dreikomponententrennung

Bei der Dreikomponententrennung stellt sich die Aufgabe, den Gesamtabfluss in die Komponenten Direktabfluss, Zwischenabfluss und Basisabfluss zu separieren. Für die Abtrennung werden zwei Tracer benötigt. Es gelten die gleichen Voraussetzungen und Grundannahmen wie bei der Zweikomponententrennung, mit der Änderung in der Bedingung (2), dass für diesen Fall drei Komponenten beteiligt sind.

Zur Bestimmung der Tracerkonzentrationen der einzelnen Komponenten werden die Tracer gegeneinander in einem sogenannten Mischungsdiagramm aufgetragen. Falls sich die Tracer nicht linear verhalten, spannen sie ein Dreieck auf. Daraus ergibt sich die zusätzlich Bedingung für die Dreikomponententrennung:

(6) Die Tracerkonzentrationen dürfen kein kollineares Mischungsverhalten zeigen.

Falls diese Bedingung (6) erfüllt ist, und die Werte innerhalb des Dreiecks liegen, können sie mit einer Linearkombination der end member erklärt werden. Befinden sie sich jedoch außerhalb, so werden sie durch dieses mathematische Verfahren nicht erklärt.

Die Formeln für die Separation lauten nach OGUNKOYA & JENKINS 1993:

$$x = \mathbf{a} \cdot c_1 + \mathbf{b} \cdot c_2 + \mathbf{g} \cdot c_3 \quad (3.9)$$

$$y = \mathbf{a} \cdot d_1 + \mathbf{b} \cdot d_2 + \mathbf{g} \cdot d_3 \quad (3.10)$$

mit: α, β, γ = Anteile der Komponenten Niederschlag, Interflow, Grundwasser
 x = Konzentrationen des ersten Tracers im Abfluss
 y = Konzentration des zweiten Tracers im Abfluss
 $c_{1,2,3}$ = Konzentrationen des ersten Tracers der Komponenten 1,2,3
 $d_{1,2,3}$ = Konzentrationen des zweiten Tracers der Komponenten 1,2,3

nach der Auflösung des linearen Gleichungssystems ergeben sich die folgenden Formeln zur Berechnung der Abflusskomponenten:

$$\mathbf{a}_1 = \frac{-(x - c_3) \cdot (d_2 - d_3) + (y - d_2) \cdot (c_2 - c_3)}{(c_2 - c_3) \cdot (d_1 - d_3) - (d_2 - d_3) \cdot (c_1 - c_3)} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{b} = \frac{(x - c_3) \cdot (d_1 - d_3) - (y - d_3) \cdot (c_1 - c_3)}{(c_2 - c_3) \cdot (d_1 - d_3) - (d_2 - d_3) \cdot (c_1 - c_3)} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{g} = 1 - \mathbf{a} - \mathbf{b} \quad (3.13)$$

Zur Bestimmung der Ereigniswasserkomponente wurde der Niederschlag zeitlich aufgelöst beprobt, und mit der Methode des „incremental mean“ gemittelt. Hierzu werden die Isotopengehalte im Niederschlag mit der Niederschlagsmenge nach Formel 3.14 gewichtet:

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (3.14)$$

- mit: C_j = Isotopengehalt des Niederschlags zum Zeitpunkt j [‰]
 P_i = Niederschlagsmenge zum Zeitpunkt i [mm]
 C_i = Isotopengehalt des Niederschlags zum Zeitpunkt i [‰]

Dies ist notwendig, da sich der Isotopengehalt aufgrund der Fraktionierungseffekte während des Ereignisses ändert (vgl. Kap. 4.4), und mit einer Mischprobe, dem “bulk mean”, die Ereigniswasserkomponente überschätzt wird (UHLENBROOK 1999).

Festzuhalten bleibt, dass es sich bei der Lösung dieser Methode, der *end member mixing analysis (EMMA)* (CHRISTOPHERSEN et al. 1990, zit. OGUNKOYA & JENKINS 1993), um eine rein mathematische Linearkombination der end member Konzentrationen handelt, die immer in Kombination mit den Analysen der hydrochemischen Untersuchungen gesehen werden sollten.

3.2.3 Geogene Tracer und Isotope

Natürliche Tracer sind Wasserinhaltsstoffe, die unter natürlichen Bedingungen im System enthalten sind. Der Konzentrationsverlauf während eines Ereignisses kann Informationen über Herkunftsräume und Fließwege liefern. Jedoch verhalten sich viele der Inhaltsstoffe nicht konservativ, d.h. sie unterliegen unterschiedlichen Prozessen, wie der Teilnahme an biochemischen Kreisläufen und Adsorptionsvorgängen. Quellen und Senken der einzelnen Stoffe sind oft nicht genau zu identifizieren. Anthropogene Stoffeinträge, entweder direkter Art durch Einleitungen oder über die Deposition von Luftschadstoffen, können erhebliche Mengen in das System bringen.

3.2.3.1 Chlor

Chlor ist ein wichtiges Element für Tiere und Pflanzen, das in höheren Konzentrationen jedoch eine toxische Wirkung besitzt. Im humiden Klimabereich erfolgt aufgrund der guten Löslichkeit von 200-500 g·l⁻¹ eine rasche Auswaschung. Chlorid (Cl⁻) wird bedingt durch seine negative Ladung und dem relativ geringen Ionenradius nur sehr gering an Bodenpartikel

adsorbiert. Mit abnehmendem pH-Wert steigt jedoch die Chlorid-Adsorption vor allem in eisenoxidreichen Böden (SCHACHTSCHABEL 1992). Diese Eigenschaften sind gute Voraussetzungen für den Einsatz von Chlorid als Tracer. Mögliche Herkunftsräume sind zum einen der Eintrag aus dem Niederschlag, der im Binnenland $5\text{-}20\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ beträgt (SCHACHTSCHABEL 1992), zum anderen sind anthropogenen Einträge durch den Einsatz von Düngemitteln und Streusalz in den Wintermonaten zu beachten. Der Eintrag aus häuslichen Abwässern, sowie das Vorkommen von chloridhaltigen Mineralien kann im Untersuchungsgebiet ausgeschlossen werden.

3.2.3.2 Stickstoff

Stickstoff (N) ist als Element in den Ausgangsgesteinen der Böden nur in sehr geringen Konzentrationen vorhanden. Der Stickstoffbedarf von Pflanzen ist im Vergleich zu anderen Nährstoffen am größten, er ist bedeutender Faktor der Eutrophierung von Oberflächengewässern und verantwortlich für Qualitätsprobleme des Grundwassers. Stickstoff unterliegt im Boden unterschiedlichen Umwandlungsprozessen. Im Stickstoffkreislauf findet eine kontinuierliche Umwandlung zwischen anorganischen und organischen Stickstoffverbindungen statt. Nitrat (NO_3^-) ist ein Produkt des organischen Abbaus, der organisch/anorganischen Düngung und der Deposition von stickstoffhaltigen Verbindungen aus der Atmosphäre. Ein Großteil des Stickstoffs befindet sich im Oberboden in organischen Verbindungen wie Huminstoffen, Vegetationsrückständen und Biomasse.

Anorganisch gebunden und damit pflanzenverfügbar liegt Stickstoff im Bereich von $\text{pH} > 5$ weitgehend leicht löslich und gut auswaschbar als Nitrat und in geringen Mengen auch als Ammonium (NH_4^+) vor (SCHACHTSCHABEL 1992).

Aus organischer Substanz entsteht durch mikrobielle Zersetzung Ammonium, das sich allerdings im humiden Klimabereich im Boden nicht anreichert, sondern in einem nächsten Schritt weiter umgewandelt wird. Diese sogenannte Nitrifikation ist die Umwandlung von Ammonium (NH_4^+) zu Nitrat (NO_3^-) über Nitrit (NO_2^-) mittels zweier mikrobieller Umwandlungen. Für diese exothermen Reaktionen ist das Vorhandensein von elementarem Sauerstoff von Nöten, der durch die autotrophen Bakterien Nitrosomas, im ersten Schritt, und Nitrobacter im folgenden Schritt an das Nitrat gebunden wird. Diese Umwandlungen finden bei Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt zwar verlangsamt, aber dennoch wirksam statt (SCHACHTSCHABEL 1992).

Bei der Denitrifikation sind zwei unterschiedliche Prozesse zu berücksichtigen. Die biologische Umwandlung durch Bakterien und die chemische Umwandlung, die jedoch im geringeren Umfang stattfindet. Die biologische Denitrifikation findet unter hoher Wassersättigung des Bodens, also unter anaeroben Verhältnissen statt. Die Bakterien der

Gattung *Pseudomonas* und *Achromobacter* sind unter Sauerstoffmangel fähig, den Sauerstoff als Elektronenakzeptor anstelle von elementarem Sauerstoff zu verwenden. Nitrat (NO_3^-) wird über NO_2^- , NO , N_2O zu Luftstickstoff (N_2) (SCHACHTSCHABEL, 1992). Es ist also von den Umgebungsbedingungen abhängig, welche Prozesse im Stickstoffkreislauf ablaufen, und ob es zu einer Mobilisierung von Stickstoff kommt oder nicht. In der Untersuchung von FEGER (1999) wurde gezeigt, dass bach- bzw. quellnahe wassergesättigte Böden eine wichtige Puffer- und Transformationsfunktion übernehmen können. Die Nitratkonzentration kann in diesem Bereich auch bei relativ kurzer Kontaktzeit mit der organischen Substanz erheblich gesenkt werden.

Quellen von Stickstoff sind zum einen die Zufuhr von Dünger, Einträge über den Niederschlag und die Bewässerung mit nährstoffreichem Wasser. Zum anderen kann es zu einer Stickstofffixierung durch Bakterien, die sogenannten Rhizobien in Symbiose mit Leguminosen, kommen. Stickstoffverluste entstehen durch Pflanzenentzug der Ernteprodukte, Auswaschung, Denitrifikation, Ammoniakverflüchtigung und Erosion (SCHACHTSCHABEL 1992).

Bei der Verwendung von Nitrat als Tracer ist auf diese Effekte Rücksicht zu nehmen. Erhöhte Nitratkonzentrationen lassen zwar auf eine Beteiligung oberflächennaher Komponenten schließen, jedoch muss bei der Beurteilung auf die Randbedingungen geachtet werden.

Der Stickstoffeintrag aus Freilandniederschlag beträgt $5 - 30 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (REHFUESS 1990).

3.2.3.3 Schwefel

Schwefel (S) ist wie Stickstoff (N) ein wichtiger Nährstoff für Pflanzen. Es liegt in Gesteinen überwiegend als Sulfid (S^{2-}) vor, und wird im Verlauf der Verwitterung zu Sulfat (SO_4^{2-}) oxidiert.

Sulfat ist ebenso wie Nitrat an biochemischen Umsätzen im Ökosystem beteiligt. Im Gegensatz zum Nitrat sind jedoch die Prozesse der Dynamik vielfältiger (FEGER 1999).

Unter aeroben Verhältnissen liegt der anorganisch gebundene Schwefel fast nur als Gips ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) vor. Im anaeroben Milieu ist Schwefel in Sedimenten meist als Eisensulfid (FeS , FeS_2) zu finden. Durch die relativ leichte Löslichkeit von ca. $2 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ und die damit verbundene leichte Auswaschung kommt es im humiden Klimabereich nicht zu einer wesentlichen Anreicherung von SO_4 im Boden (SCHACHTSCHABEL 1992).

Sulfat ist zur Verwendung als Tracer nicht gut geeignet, da es den unterschiedlichsten Austauschprozessen unterliegt.

Der Sulfateintrag aus Freilandniederschlag beträgt durchschnittlich $8 - 28 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (REHFUESS 1990).

3.2.3.4 Calcium

Calcium ist ein essentielles Nährelement für Pflanzen, Tiere und Menschen. Der Gehalt im Boden beträgt zwischen 0,1 und 1,2 %. Zu den calciumhaltigen Mineralien gehören Plagioklase, Pyroxene und Amphibolite. Durch die relativ leichte Verwitterung der Minerale liegt ein wesentlicher Teil in austauschbarer Form vor. Calciumgehalte in der Bodenlösung bewegen sich im Bereich von 40 – 160 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$, können bei sauren Standorten aber darunter liegen. Calciumeinträge über Niederschläge betragen 3 – 21 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (SCHACHTSCHABEL 1992).

Der Eintrag aus dem Freilandniederschlag beläuft sich auf 2 – 11 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (REHFUESS 1990).

3.2.3.5 Magnesium

Magnesium ist wie Calcium ein wichtiges Nährelement für Pflanzen und alle höheren Lebewesen. Der Mg-Gehalt mitteleuropäischer Böden, die salz- bzw. carbonatarm sind, liegt in der Regel zwischen 0,5 und 5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Der überwiegende Teil an Magnesium liegt in Silikaten, wie Amphibolen, Pyroxenen, Olivinen und Biotiten vor. Die Konzentrationen in der Bodenlösung bewegen sich im Bereich von <0,1 bis 60 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$, sinken aber bei sehr stark versauerten Waldböden auf <0,1 bis 10 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Mg-Auswaschung findet in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe statt, dem Boden wird je nach Bodenart 3,5 bis 12 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ entzogen. Durch Mähweidenutzung mit mehreren Schnitten im Jahr wird dem Boden zusätzlich 14-28 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ entnommen (SCHACHTSCHABEL 1992).

Der Eintrag aus Freilandniederschlag beträgt 1 – 2 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (REHFUESS 1990).

3.2.3.6 Kalium

Das Kalium der primären Minerale, wie Feldspäte und Glimmer, unterliegt im globalen System vielfältigen Umsetzungen. In jüngeren nachpleistozänen Böden sind die K-Minerale noch weitestgehend erhalten, während in anderen Böden diese der Auswaschung unterlagen. Ein starker Kaliumeintrag findet durch die Ausbringung von Gülle statt. Eine Kaliumauswaschung ist bei Tonböden mit Dreischichtmineralen zu vernachlässigen, im Gegensatz zu Sandböden, in denen sie je nach Wasserangebot 20 bis 50 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ erreichen kann. In Mineralböden liegt der überwiegende Teil des Kaliums in Silikaten vor, vor allem in Alkalifeldspäten, Glimmern und Illiten. Die Kaliumkonzentration in der Bodenlösung liegt im Bereich von 2 bis 20 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Die Austauschvorgänge zwischen den unterschiedlichen Formen

des Kaliums im Boden und in der Bodenlösung können sehr schnell vor sich gehen. Freiaustauschbares Kalium kann sehr schnell in Lösung gehen und umgekehrt, Kalium in den Zwischenräumen der Schichtminerale hingegen deutlich langsamer. Die Einlagerung von Kalium in Schichtminerale nennt man K-Fixierung. Bei steigender K-Konzentration in der Bodenlösung wird Kalium fixiert, bei geringer werdender Konzentration z.B. durch Pflanzenentzug wird Kalium mobilisiert. Die Kapazität der K-Fixierung hängt vom Angebot an Kalium und von der Häufigkeit der Schichtminerale ab (SCHACHTSCHABEL 1992). Der Eintrag aus Freilandniederschlag beträgt $2 - 11 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (REHFUESS 1990).

3.2.3.7 Natrium

Natrium ist ebenfalls ein Hauptnährelement, wenn auch nicht für alle Pflanzen. Der Na-Gehalt der Böden liegt zwischen 1 und $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Die höchsten Gehalte finden sich in der Schlufffraktion, in der Natrium an Feldspäte gebunden ist. Die Na-Konzentrationen in der Bodenlösung in Mitteleuropa betragen meist 1 bis $20 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Natrium wird sehr schwach gebunden und leicht ausgewaschen. Eine Zufuhr von Natrium erfolgt zum einen über Niederschläge, im Binnenland meist $1,6$ bis $10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, des weiteren können große Mengen über das Ausbringen von Wirtschaftsdünger z.B. Rindergülle eingetragen werden (SCHACHTSCHABEL 1992).

3.2.3.8 Silicium

Silicium (Si) ist nach dem Sauerstoff das zweithäufigste Element der Erdkruste. Es findet sich in Gesteinen und Böden vor allem in der Form von Silikaten und Oxiden, wobei die letzteren aufgrund der hohen Bindungskräfte sehr verwitterungsbeständig sind (SCHACHTSCHABEL 1992). Silikat stammt hauptsächlich aus der Verwitterung der Minerale Feldspat, Glimmer, Pyroxen, Amphibol und Olivin. In wässriger Lösung, bei pH-Werten unter 9 , liegt hauptsächlich Ortho-Kieselsäure (H_4SiO_4) vor. Dies ist eine schwache Säure mit einer Säuredissoziationskonstanten (pKs) von $9-10$ (UHLENBROOK 1999). Der Gehalt an wasserlöslichem Silikat steigt sowohl mit zunehmender Temperatur, als auch mit abnehmenden pH-Werten. Der Gehalt bewegt sich im Bereich von wenigen $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ bis hin zu $30 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ in stehenden Gewässern. Neben der Temperatur und dem pH-Wert bestimmt auch der Phosphatgehalt die Si-Verfügbarkeit, da Phosphat und Silikat um die gleichen Adsorptionsplätze konkurrieren. Eine Phosphatdüngung führt zu einer erhöhten Si-Verfügbarkeit (SCHACHTSCHABEL 1992).

Silikat ist ein geogener Tracer, dessen Konzentration in der jeweiligen Abflusskomponente bestimmt wird durch die Verwitterungsprozesse der Gesteinsmatrix des Herkunftsraumes. Verglichen mit anderen Wasserinhaltsstoffen sind die Silikatkonzentrationen weniger variabel. Aus diesen Gründen wurde Silikat in zahlreichen Studien zur Abflusskomponententrennung verwendet. z.B. UHLENBROOK (1999), LAUDON&SLAYMAKER (1997) und WELS et al. (1991).

Da neben dem pH-Wert und der Temperatur vor allem die Kontaktzeit des Wassers mit dem Gestein eine entscheidende Rolle für die Silikatkonzentration spielt, sind in tieferen Grundwässern höhere Konzentrationen zu erwarten (UHLENBROOK 1999). Weitergehende Untersuchungen zu den Silikatkonzentrationen der im Bruggaeinzugsgebiet vorkommenden Deckschichten finden sich bei KIENZLER (2001).

3.2.3.9 Deuterium

In der vorliegenden Arbeit wurde als Umweltisotop Deuterium (^2H) untersucht, und als Tracer verwendet. Deuterium ist als Isotop des Wasserstoffs (H) Bestandteil des Wassermoleküls, und zeigt in seinem chemischen Verhalten gegenüber dem wesentlich häufigeren ^1H keine Unterschiede. Das Isotopenverhältnis ($^2\text{H}/^1\text{H}$) beträgt $1,49 \cdot 10^{-4}$ (HÖLTING 1996). Es zeigt ein streng konservatives Verhalten und unterliegt keinen Abbau- oder Umwandlungsprozessen, ist also ein idealer Tracer. Allerdings kommt es aufgrund des Massenunterschieds, durch das zusätzliche Neutron im Kern, zu Fraktionierungseffekten, die bei der Auswertung berücksichtigt werden müssen. Diese sind in Moser&Rauert (1980) ausführlich beschrieben. Das Analyseverfahren und die Angabe des relativen Isotopenverhältnisses, die δ -Notation, wird im Kap. 3.4.3 beschrieben.

3.2.3.10 Verwendung als Tracer

Bei der Anwendung der unterschiedlichen Tracer muss darauf geachtet werden für welche Arten von Abflusskomponententrennungen diese geeignet sind. So stellt das Deuterium einen idealen Tracer für Abtrennung verweilzeitorientierter Komponenten dar, wohingegen das Silikat sich zu Aussagen über die Fließwege heranziehen lässt. Des weiteren ist darauf zu achten, dass die verwendeten Tracer ein konservatives Verhalten aufzeigen. Hier sind die Isotope im Vergleich zum Silikat klar im Vorteil, da es sich um Bestandteile des Wassermoleküls handelt. Die Isotopensignatur wird nicht durch verschiedenartige Fließwege verändert.

Bei der Anwendung von Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- und SO_4^{2-} muss immer darauf geachtet werden, dass es sich um Nährstoffe des Ökosystems handelt, die vielseitigen Prozessen unterliegen. Sie verhalten sich nicht streng konservativ, dies ist bei der Interpretation der Messergebnisse unbedingt zu berücksichtigen.

Eine kombinierte Auswertung sowohl des verweilzeitorientierten Tracers Deuterium und des durch die Fließwege dominierten Tracers Silikat kann bei der Bestimmung der einzelnen Abflusskomponenten hilfreich sein. Die zusätzliche Betrachtung der Anionen und Kationen kann wichtige Informationen zu den Stoffumsätzen im System und konkrete Hinweise auf beteiligte Komponenten liefern.

3.3 Feldmethoden

Das Bruggaeinzugsgebiet wurde bereits in früheren Arbeiten hydrologisch untersucht, und im Rahmen des DFG-Projektes „Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung“ mit einem Messnetz ausgestattet. Das Messnetz beinhaltet neben Abflussmessungen und Oberflächengewässerbeprobungsstellen eine Klimastation am Katzensteigkar auf 765 m+NN. Auf diese Daten konnte im Rahmen der Diplomarbeit zurückgegriffen werden.

Zur Beschreibung der Hanggrundwasserdynamik wurden 10 Grundwassermessstellen eingerichtet und mit kapazitiv arbeitenden Messsonden (vgl. Anhang B) ausgestattet. Es fanden 1 bis 2 mal wöchentlich Stichtagsbeprobungen statt, zusätzlich wurde zur Quantifizierung des Sättigungsflächenabflusses ein Messwehr installiert (vgl. Anhang B). Für Fragestellungen, die eine hohe zeitliche Auflösung erfordern, wurde eine Intensivmesskampagne durchgeführt. Dabei wurde sowohl der Niederschlag als auch das Oberflächen- und Grundwasser mit automatischen Probenentnahmegerten (APEG) beprobt (vgl. Kap. 4.4).

3.3.1 Bodensondierungen

Zur Erfassung der räumlichen Varianz der Untergrundverhältnisse wurden im Bereich des Untersuchungsfeldes ca. 50 Bodensondierungen durchgeführt (Abb. 3.1). Als Sondiergerät kam ein Pürckhauer-Bohrstock mit einer Gesamtlänge von 100 cm und einem Außendurchmesser von 25 bis 35 mm, konisch zulaufend, zum Einsatz. Für tiefere Sondierungen bis 2 m wurde ein sogenanntes Quartärgestänge, mit kleinerem Durchmesser

verwendet. Es fand eine Ansprache des Bodens mit Schwerpunkt auf die Substratzusammensetzung (vgl. Kap. 4.1) in Anlehnung an den Symbolschlüssel Bodenkunde (GLA 1995) statt.

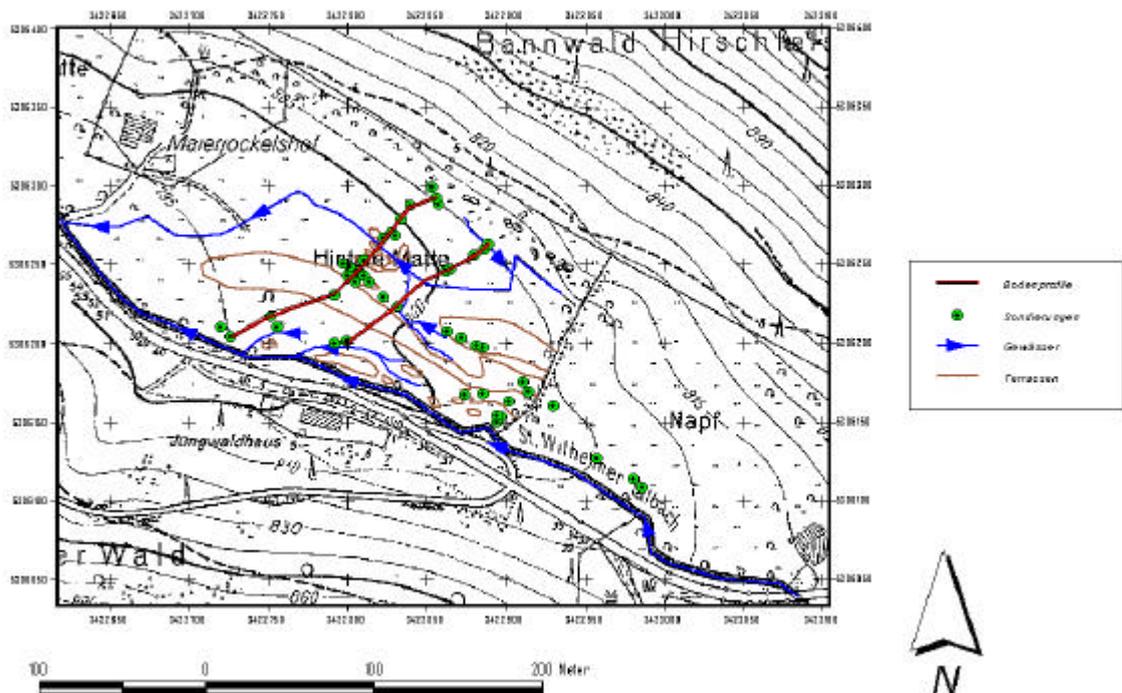


Abb.3.1:Karte der Bodensondierungen auf dem Testfeld

3.3.2 Einrichtung der Grundwasserbeobachtungsstellen

Die Grundwassermessstellen (GWMS) wurden mit Rammfilterrohren erstellt (Abb. 3.2). Das Grundelement besteht aus einem 100 cm langen Filterrohr, an dessen unterem Ende, entsprechend der DIN 4920, eine massive Rammspitze angebracht ist (BIESKE 1968). Der Durchmesser dieser Filterbrunnen beträgt 1 ¼ Zoll. Als Aufsätze dienen massive Rohrstücke, die mit Verbindungsmuffen fixiert wurden.

Nach einer Vorsondierung der ausgewählten Stellen und der Bodenprofilansprache, wurden die Sondierlöcher mit Hilfe eines Rammgestänges mit Entnahmerohr auf ca. 1 Zoll erweitert und das Filterrohr mit entsprechender Verlängerung eingebracht. Die Mindestdiefe der GWMS beträgt 140 cm, eine Vorgabe die sich durch die Länge der verwendeten Messsonden ergibt. Es wurde gerade in der letzten Arbeitsphase, darauf geachtet, dass die verfilterten Teilstücke so schonend wie möglich eingebracht wurden, um das Filtergewebe nicht zu beschädigen. Das Bohrloch wurde oberflächennah mit lokalem Bodenmaterial

abgedichtet und eventuell entstandene Rohrüberstände bis zur Geländeoberkante (GOK) entfernt.



Abb. 3.2: Filterrohr mit Rammspitze einer Grundwasserbeobachtungsstelle

Aufgrund der heterogenen Untergrundbeschaffenheit im Bereich des Messfeldes und der fehlenden Möglichkeit eines Maschineneinsatzes durch widrige Witterungsverhältnisse, wurden alle zehn Grundwasserbeobachtungsstellen wie oben beschrieben von Hand eingebracht (Abb. 3.3). Diese Rahmenbedingungen und die Untergrundverhältnisse führten dazu, dass einige Grundprinzipien beim Bau der Grundwasserbeobachtungsstellen in den Hintergrund treten mussten.

Bei der Erstellung der GWMS ist darauf zu achten, dass die Brunnentiefe ausreicht, um die voraussichtlich niedrigsten Wasserstände des betreffenden Grundwasserstockwerks zu erfassen (LAWA 1982). Dies konnte durch die maximale Tiefe von 2 m in einigen Fällen, besonders bei GWMS 5, nicht erreicht werden. Die übrigen GWMS lagen aber i.A. in diesem Bereich. Die allgemeine Beschreibung der Messstellen, mit z.B. Lageangabe und Messstellentiefe, findet sich in Tab. A1 im Anhang.

Nach der Installation der Filterrohre ist festzustellen, ob die Brunnen ausreichend mit dem Grundwasser hydraulisch in Verbindung stehen, und somit für die Grundwasserüberwachung geeignet sind. Hierzu ist eine Durchlässigkeitsprüfung (Schluckprobe, Pumpprobe) durchzuführen. Bei Beobachtungsrohren hat sich das Auffüllverfahren als zweckmäßig herausgestellt (LAWA 1982).

Die Vorgehensweise der Überprüfung ist laut LAWA (1982) wie folgt durchzuführen: Vor dem Auffüllen des Brunnens wird eine Abstichmessung zur Bestimmung des Anfangswasserstandes durchgeführt. Das Pegelrohr wird um ca. 50 cm aufgefüllt, danach

wird alle 30 Sekunden eine Wasserstandsmessung durchgeführt bis der Ruhewasserspiegel wieder erreicht ist. Der Messzeitraum sollte weniger als 30 Minuten betragen.

Die gemessenen Werte werden in folgende Formel eingesetzt:

$$e = \frac{2(h_1 - h_2)}{\Delta t(h_1 + h_2)} \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (3.15)$$

- mit: ε = Koeffizient zur Bestimmung der Funktionsfähigkeit.
 h_1 = Höhe der Auffüllung [cm]
 h_2 = Höhe am Ende der Messung [cm]
 Δt = Zeit der Messung [min]

Die Messstelle ist funktionsfähig bei einem ε -Wert $\geq 0,0115$.

Diese Methode wurde für die GWMS 1 bis GWMS 4 mit eher mäßigen Ergebnissen im Bereich von $\varepsilon = 0,003$ bis $\varepsilon = 0,019$ durchgeführt. Als Begründung für diese sehr niedrigen Werte wird die Verschlämmung des Filters mit Feinmaterial kurz nach dem Einbau der Messstellen herangezogen. Deshalb wurde auf weitere Auffüllversuche direkt nach der Installation der GWMS verzichtet. Die Funktionsfähigkeit aller Messstellen wurde daher durch einen späteren Spülvorgang mit einer Motorpumpe hergestellt.



Abb. 3.3: Rammfilterbrunnen mit Schlagkopfaufsatz kurz von dem Einbau

Die Messungen der Standrohrspiegelhöhen wurden mittels kapazitiv arbeitender Messsonden (WT-HR 1000) der Firma TruTrack© durchgeführt. Eine genaue Beschreibung dieser findet sich im Anhang B.

3.3.3 Probennahme und Messung der *in-situ* Parameter

Die Probennahme erfolgte mit 150 ml Polyethylenflaschen. Diese wurden im Vorfeld maschinell bei 60°C gespült und beschriftet. Nach der Probenentnahme wurden die Flaschen in Kisten verpackt und bis zur Analyse in Kühlschränken aufbewahrt. Auf die Probennahme wurde großes Augenmerk gelegt, und versucht die Richtlinien der DEV A13 und A15 einzuhalten.

Grundwasser

Die Grundwasserproben wurden mit Hilfe einer Schlauchquetschpumpe aus den Grundwassermessstellen entnommen. Am unteren Ende des Entnahmeschlauchs befand sich ein Filter, um ein Eindringen von Feinmaterial und Verstopfen der Pumpe zu verhindern. Das sich im Pegelrohr und dessen Umgebung befindende Wasser wurde abgepumpt, um eine für das Grundwasser repräsentative Probe zu erhalten. Eine tiefenorientierte Beprobung war aus technischen Gründen nicht möglich. Nach zweimaliger Durchspülung des Pumpensystems (Quetschpumpe und Schläuche) wurden die Probenflaschen und Deckel mehrmals mit Grundwasser gespült und anschließend aus dem freien Strahl bis zum Rand gefüllt und fest verschlossen.

Oberflächengewässer

Die Probenentnahme aus den Oberflächengewässern erfolgte stets an den selben Messpunkten. Um etwaige Unterschiede in der Zusammensetzung zu vermeiden, wurde versucht eine repräsentative Probe aus der Mitte des Fließgewässers zu entnehmen. Auch hier wurden die Flaschen und Deckel mit Probenwasser mehrmals ausgespült.

Jeweils bei der Probenentnahme wurden die Parameter Temperatur, pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit *in-situ* bestimmt. Bei der Erfassung dieser *in-situ* Parameter wurde auf die Aufnahme organoleptischer Parameter, wie Geruch, Geschmack, Trübung und Färbung, in aller Regel verzichtet. Lediglich beim Auftreten von viel Feinmaterial wurde dies im Protokoll vermerkt. Die Messgeräte wurden vor jedem Feldeinsatz im Labor überprüft und gegebenenfalls neu geeicht.

Temperatur

Zur Messung der Temperatur wurde das pH-Messgerät pH 325-A der Firma WTW (Wissenschaftlich Technische Werkstätten) verwendet. Es besitzt einen Wertebereich von -5°C bis $+99^{\circ}\text{C}$, bei einem Einsatzbereich von -10°C bis $+55^{\circ}\text{C}$. Die Genauigkeit liegt bei $\pm 0,1\text{K}$. Die Temperatur wurde im abgepumpten Wasservolumen möglichst schnell nach der Entnahme gemessen und protokolliert.

pH-Wert

Der pH-Wert ist der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration in mol/l. Er besitzt im neutralen Bereich den Wert 7,0. Für die pH-Wertmessung wurde, wie für die Temperaturmessung, das pH-Messgerät pH 325-A der Firma WTW eingesetzt. Der Messbereich liegt zwischen 2 und 16 mit einer Genauigkeit von 0,01. Das Messprinzip beruht auf einer potentiometrischen Messung mit einer Glaselektrode. Die Kalibrierung findet im Labor mit zwei Standardlösungen (pH 4 und pH 7) statt. Die Ablesung des pH-Wertes erfolgte, nachdem die Anzeige über eine gewisse Zeitspanne konstant blieb (i.d.R. 1-2 min).

Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit stellt einen Summenparameter der im Wasser gelösten Stoffe dar. Die Messgröße ist sowohl von der Konzentration der Ionen als auch von deren Dissoziationsgrad, Wanderungsgeschwindigkeit und von der Wassertemperatur abhängig. Die Einheit der elektrischen Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$) stellt den reziproken Wert des elektrischen Widerstandes ($\hat{\Omega}$) bezogen auf einen Wasserwürfel von 1 cm Kantenlänge bei 25°C dar (RUMP 1998).

Zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit kam das LF 325-A der Firma WTW zum Einsatz. Es hat den gleichen Einsatzbereich wie das pH 325-A mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,5\%$. Die Referenztemperatur (T_{Ref}) wurde auf 25°C eingestellt und für die Kompensation wurde die Einstellung „natürliche Wässer“ gewählt.

3.3.4 Niederschlagsmessung

Als Niederschlagsmessgeräte standen zum einen als dauerhafte Einrichtung die Klimastationen des IHF, Katzensteig und Zastler, zur Verfügung, zum zweiten wurde während der Intensivmessphase sowohl ein Niederschlagsmesser nach dem Wägeprinzip, Typ: „Pluvio“ der Firma Ott, als auch ein automatisches Probenentnahmegerät (APEG) zur Niederschlagsmessung im Bereich des Testfeldes installiert.

Die Klimastation Katzensteig liegt auf 765 m+NN. Sie misst neben den allgemeinen Klimaparametern den Niederschlag mit einer Wippe, und zeichnet die Niederschlagsdaten in

zehnminütiger Auflösung auf. Durch ihre gleichartige Höhenlage, und der geringen Entfernung zum Testfeld (ca. 700 m) wurden die Niederschlagsdaten beider Stationen als Input für die weiteren Betrachtungen auf dem Testfeld verwendet. Auf eine Korrektur des systematischen Messfehlers wurde verzichtet.

3.3.5 Abflussmessung

Im Hinblick auf die Quantifizierung der Wasserumsätze und die Bestimmung der Abflussanteile im Untersuchungsgebiet, ist die Erfassung des Abflusses Q erforderlich. Aus diesem Grund wurde an dem, die Feuchtfläche entwässernden Graben ein Messwehr installiert, um über die Aufzeichnung des Wasserstandes einen Abflusswert zu ermitteln (vgl. Abb. B8 im Anhang).

Die Vorteile solcher Überfälle sind die genauen Messungen der Abflüsse, und die relativ geringen Kosten, die für den Einsatz bei temporären Messungen sprechen. Nachteilig ist die Tatsache, dass eine permanente Kontrolle notwendig ist, und Geschiebetransport bzw. anfallendes Geschwemmsel sich störend auswirken kann (LANDESHYDROLOGIE 1982).

Eine genaue Beschreibung des Messwehres ist der Anlage B zu entnehmen.

3.4 Labormethoden

Die Beprobung der Oberflächen- und Grundwässer fand wie in Kap. 3.3.3 beschrieben in 150 ml Polyethylenflaschen statt. Es fanden kontinuierlich Analysen statt, so dass zwischen Probennahme und Analyse in der Regel nicht mehr als drei bis vier Wochen lagen. Die Silikat- und Hauptionenanalysen der Wasserproben wurden vom Autor selbst im Hydrochemischen Labor des Instituts für Hydrologie der Universität Freiburg durchgeführt. Die Deuteriumanalysen wurden von P. Königer mit der Methode der Massenspektrometrie am IHF analysiert.

3.4.1 Silikatanalyse

Das Analyseverfahren zur Silikatbestimmung nach den Deutschen Einheitsverfahren (DEV D21; DIN 38405 Teil 21) basiert auf dem Verhalten der Kieselsäure, die im saueren Bereich

mit Molybdat-Ionen einen blauen Molybdato-Kieselsäure-Komplex bildet, dessen Extinktion gemessen werden kann (GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER 2002).

Die Silikatanalysen wurden mit Hilfe eines Photometers der Firma Spectronic-Unicam (Modell: Aqua Mate) gemessen. Die Extinktion der Probenlösung wurde bei einer Wellenlänge von 820 nm durchgeführt. Die Silikatkonzentration der Probe verhält sich proportional zur Extinktion. Für die Analyse werden 12,5 ml Probenflüssigkeit mit 12,5 ml Aqua dest. verdünnt. Zunächst wird 1 ml Ammoniumheptamolybdat zugegeben, das zur Bildung von Molybdat-Kieselsäure-Komplexen führt. Die Phosphationen, die zu einer Verfälschung des Ergebnisses führen könnten, werden durch 1 ml Oxalsäure maskiert. Nach der Zugabe von PhotoRex[®](4-(Methylamino)-phenolsulphat) bilden sich Molybdänblau-Komplexe, die eine Extinktion im Photometer bewirken. Das Messgerät berechnet intern die Werte der Proben anhand einer Eichbeziehung ($y = -0,003924x^2 + 0,3554x + 0,003886$), die mittels 7 Standardwerten aufgestellt wird. Das Bestimmtheitsmaß betrug $R^2 = 0,9999$. Diese Beziehung wurde während des gesamten Messzeitraumes beibehalten. Zur Überprüfung der Ergebnisse und zur Angabe von Fehlerbereichen wurden pro Messdurchgang (8 Proben) jeweils 2 Kontrollstandards mitgemessen. Der Fehlerbereich der Messung ist in Tab. 3.1 dargestellt. Der Umrechnungsfaktor von Si auf SiO_2 beträgt 2,139.

Tab. 3.1: Fehlerbetrachtung der Silikatmessung. Anzahl der Standards 129

Mittelwert der Abweichungen [mg/l]	Standardabweichung	absolute Abweichung [mg/l]	mittlere Abweichung [%]
-0,006	0,114	-0,5 bis +0,204	3,52

3.4.2 Bestimmung der Hauptionen

Die Ionenchromatographie ist ein geeignetes Mittel um ionische Verbindungen nachzuweisen und quantitativ zu bestimmen. Das Prinzip beruht auf dem Austausch von Ionen der flüssigen Phase mit Ionen ähnlicher Ionenstärke der festen Phase, den sogenannten Gegenionen. Dazu wird die Probenflüssigkeit mit einem Eluenten durch eine Austauschersäule gepresst. Die Ionen unterliegen dabei einer unterschiedlich langen Retentionszeit.

Für Anionen gilt die Reihenfolge der Peaks: $\text{F}^- < \text{OH}^- < \text{Cl}^- < \text{CN}^- < \text{Br}^- < \text{NO}_3^- < \text{HSO}_4^- < \text{J}^-$, für Kationen: $\text{H}^+ < \text{Na}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{K}^+ < \text{Cs}^+ < \text{Ag}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+}$.

Als Anionen wurden Chlorid (Cl^-), Nitrat (NO_3^-) und Sulfat (SO_4^{2-}) untersucht, bei den Kationen Natrium (Na^+), Kalium (K^+), Magnesium (Mg^{2+}) und Calcium (Ca^{2+}).

Näheres zur Bestimmung der gelösten Anionen Fluorid, Chlorid, Nitrit, Orthophosphat, Bromid, Nitrat und Sulfat mittels Ionenchromatographie kann in DEV D19, DIN EN ISO 10304-1, zur Bestimmung der gelösten Kationen Lithium, Natrium,

Ammonium, Kalium, Mangan, Calcium Magnesium, Strontium und Barium mittels Ionenchromatographie in DEV E 34, DIN EN ISO 14911 nachgelesen werden.

Ein Chromatograph der Firma DIONEX (Modell DX 500) stand als Untersuchungsgerät zur Verfügung. Das Herzstück des Systems besteht im wesentlichen aus der Vorsäule mit nachfolgender 4 mm-Austauschersäule, dem selbstregenerierenden Mikromembransuppressor und einem Leitfähigkeitsdetektor (Abb. 3.4). Bei der Anionenanalyse wurde ein Gemisch aus Natriumcarbonat (Na_2CO_3) und Natriumhydrogencarbonat (NaHCO_3), bei der Kationenanalyse eine 0,011 molare H_2SO_4 Lösung als Eluent verwendet.

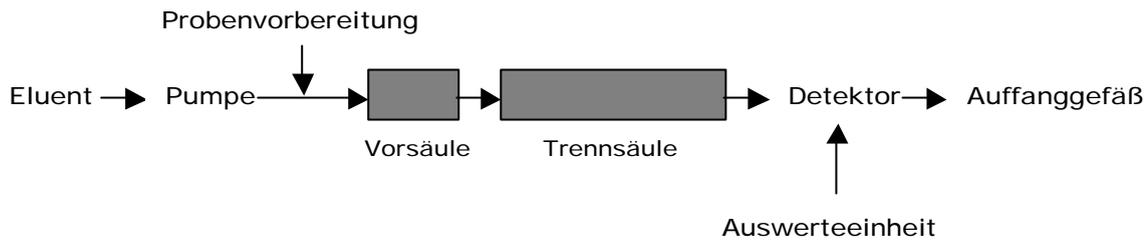


Abb. 3.4: Schematische Darstellung eines Ionenchromatographiesystems (verändert aus: GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER 2002)

Bei der Probenvorbereitung wurden alle Proben mit einer $40\ \mu\text{m}$ Membran filtriert, um eventuell vorhandene unerwünschte Fremdkörper zu beseitigen. Die Proben durchlaufen zusammen mit dem Eluenten das System, und es erfolgt die Trennung der Ionen aufgrund der unterschiedlichen Verweilzeiten. Diese Peaks werden in einem Chromatogramm gespeichert. Die Berechnung der Stoffkonzentrationen erfolgt anhand einer zuvor erstellten Eichkurve intern mit dem Anwendungsprogramm PEAKNET. Die Eichbeziehung wird anhand von 13 Standardproben, von 0,5 bis 20 mg/l, zu Beginn jeder Messreihe ermittelt, und nach 12 Proben jeweils mit einem Standard kontrolliert. Die Anpassung der Eichbeziehungen an die Standardproben ist mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 > 0,996$ sehr gut. Die Fehlerbereiche der Analyseergebnisse sind in Tab. 3.2 dargestellt.

Tab. 3.2: Fehlerbetrachtung der Hauptionenanalyse

	Stichprobenumfang [n]	absolute Abweichung [mg/l]	Mittelwert [mg/l]	Standardabweichung [mg/l]	mittlere Abweichung [%]
Chlorid	33	-0,44 bis 0,38	-0,07	0,18	2,27
Nitrat	33	-0,43 bis 0,49	-0,03	0,21	2,15
Sulfat	33	-0,38 bis 0,60	0,00	0,23	2,69
Natrium	32	-0,37 bis 0,45	-0,01	0,14	5,37
Kalium	32	-0,44 bis 0,37	0,01	0,15	6,03
Magnesium	32	-0,23 bis 0,59	0,06	0,16	4,49
Calcium	32	-0,55 bis 0,21	-0,05	0,18	3,42

3.4.3 Deuteriumanalyse

Die Analytik des stabilen Wasserstoffisotops Deuterium (^2H) wurde mit einem IRMS (Isotope Ratio Mass Spectrometer) vom Typ Delta S der Firma Finnigan/MAT im dualen Einlassverfahren durchgeführt. Das Grundprinzip der Massenspektrometrie beruht auf der unterschiedlich starken Ablenkung der geladenen Teilchen in einem Magnetfeld, je nach ihrer Masse. Für die Deuteriumanalyse wird die H/Device mit Chrom Reduktionsmethode angewendet. Aus 1 ml Probenvolumen wird 1 μl automatisch in einem Reduktionsofen verdampft, dabei wird Wasser zu Wasserstoff reduziert. Eine Messreihe besteht aus insgesamt 30 Proben, wovon 6 Laborstandards mitgemessen werden.

Im Vergleich zu diesen Laborstandards werden die relativen Isotopenverhältnisse bestimmt, und später auf internationale Standards umgerechnet. Die sehr aufwendige Messung der absoluten Isotopenverhältnisse ist nicht nötig. Als Maß wird der sogenannte δ -Wert angegeben (MOSER&RAUERT 1980):

$$\delta^2\text{H} = \frac{R_{\text{PROBE}} - R_{\text{STANDARD}}}{R_{\text{STANDARD}}} \cdot 1000 \text{‰} \quad (3.16)$$

mit: R_{PROBE} = Isotopenverhältnis des Isotops in der Probe
 R_{STANDARD} = Isotopenverhältnis des Isotops im Standard

Als Standard wurde der seit 1976 international eingesetzte Standard V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) eingesetzt. Dieser Standard wird von der IAEA in Wien vertrieben und besitzt ein absolutes Isotopenverhältnis von $^2\text{H}/^1\text{H} = (155,76 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$ (MOSER&RAUERT 1980).

Die Messgenauigkeit liegt bei mehrjährigen Untersuchungen bei 1‰. Die Genauigkeit liegt aber innerhalb einer Serie höher.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Untergrundverhältnisse

Die laterale und vertikale Litho- und Strukturvarianz im Bereich des Testfeldes sind von entscheidender Bedeutung für die dominanten Abflussbildungsprozesse im unterirdischen Wasserumsatzraum der Talaue. Die Materialzusammensetzung des Aquifers ist geprägt durch unterschiedliche Bildungsprozesse. Die Talsedimente sind sowohl aus während des Pleistozän fluvioglazial abgelagerten Sedimenten, als auch aus fluvialen holozänen Sedimenten aufgebaut. Im folgenden werden die Untersuchungsergebnisse zur Beschaffenheit und Verbreitung dieser quartären Lockergesteine, sowie deren Bodenkennwerte und hydraulische Eigenschaften erläutert.

4.1.1 Bodensondierungen

Das Bodenausgangsgestein bilden quartäre Lockergesteine. Sie setzen sich zusammen aus fluvial bzw. fluvioglazial abgelagerten Sedimenten, und periglaziale Hangschuttmaterial, das durch die im Kap. 2.2 und 2.3 beschriebenen Prozesse im unteren Bereich des Hanges akkumuliert wurde.

Die Ansprache der Substratzusammensetzung ergab in den meisten Fällen einen dominanten Anteil an schluffigen Komponenten, mit wechselnder Beimischung von Ton und Sand (Abb. 4.3 und Abb. A2 bis Abb. A5 im Anhang). Generell wird ein etwa 30 bis 50 cm mächtiger schluffreicher Oberboden mit wenig kiesigen Komponenten von einem, tiefer als das Sondierungsgestänge (2 m) reichenden wasserführenden Horizont unterlagert. Dieser wasserführende Horizont ist in der Regel kiesig, mit Anteilen zwischen 10 und 30 Vol.-%. Die Durchlässigkeiten betragen bei einer mittleren Lagerungsdichte laut AG BODEN (1994) $3,2 \cdot 10^{-5}$ m/s. Sie können jedoch je nach Kiesanteil noch höher liegen. Stellenweise konnte noch ein dritter Horizont angesprochen werden. Dieser stellt eine Art Übergangshorizont zwischen dem undurchlässigen hangenden und dem durchlässigen liegenden Horizont dar. Er besteht aus sandigem bis lehmigem Material. Das hangende Lockergestein ist kiesärmer und aufgrund der hohen Schluff- und Tonanteile als wasserhemmend bzw. undurchlässig ($2,3 \cdot 10^{-7}$ bis $1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s) einzustufen. Dennoch bleibt festzuhalten, dass dieses hangende Lockergestein nicht als vollständig undurchlässig zu verstehen ist. So sind sie in den oberen 5-10 cm gut durchwurzelt. Ferner wird die Durchlässigkeit stellenweise durch jene

Makroporen erhöht, die durch das Edaphon verursacht werden. So wurde bei der Installation der GWMS 3 ein Riesenregenwurm der Gattung *Lumbricus badensis* vorgefunden.

Diese obere relativ undurchlässige Gesteinseinheit fungiert als Aquitarde, an deren Basis sich die Grundwasserleiteroberfläche (GWLOBF) definieren lässt. Alle Grundwasserspiegellagen, die sich unterhalb der GWLOBF befinden sind als freie, die darüber liegenden als gespannte Verhältnisse zu verstehen. Die Mächtigkeiten der überdeckenden Schichten sind in Abb. 4.1 dargestellt.

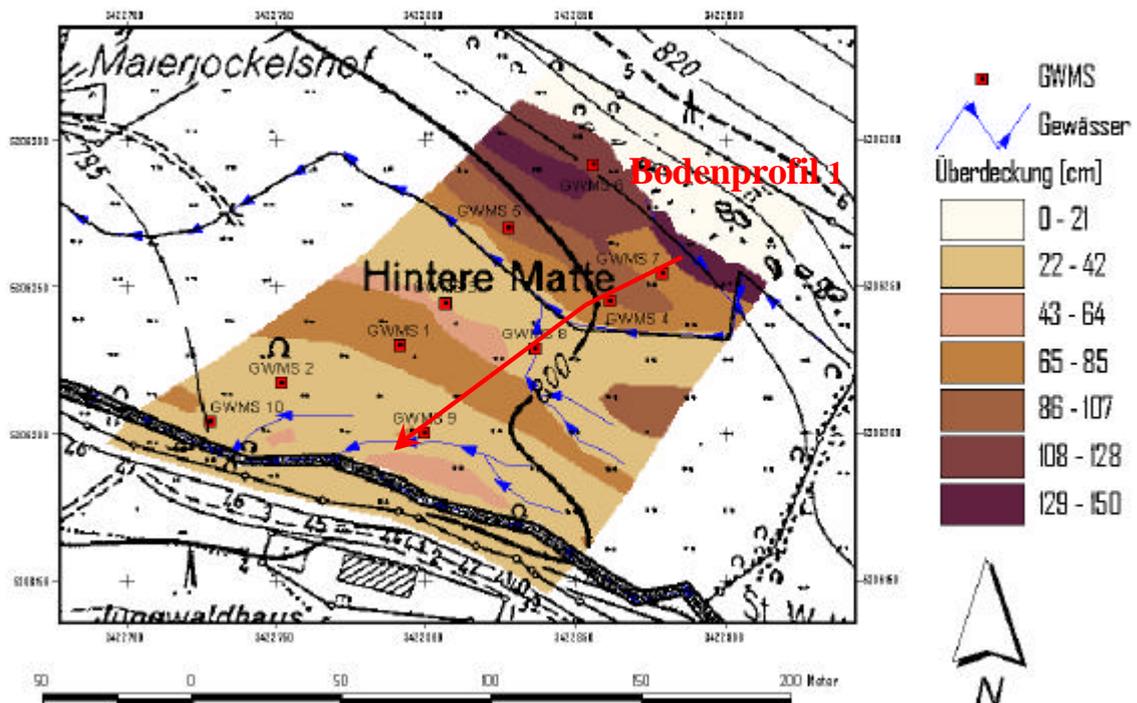


Abb.4.1: Überdeckung des Grundwasserleiters

Die im folgenden verwendeten Lagebezeichnungen für die charakteristischen Stellen des Testfeldes, wie Hang, Hangfußbereich, Terrasse und vorflutnaher Bereich wurden bereits in der Abb. 2.9 im Kapitel 2.5 definiert.

Im Hangbereich des Testfeldes ist das schluffige Hangende bis zu 50 cm mächtig. Aufgrund der Feinbodenzusammensetzung ergeben sich k_f -Werte von $1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Dieser Horizont wird von einem ca. 80 cm mächtigen mehr tonigem bzw. sandigem Horizont (U12, U13), in dem weit mehr kiesige Grobkomponenten zu finden sind, unterlagert. Dieser unterlagernde Horizont wurde aufgrund seiner Materialzusammensetzung der überdeckenden Schicht

zugeordnet (Abb. 4.2). Stellenweise, besonders im unteren Hangbereich und im anschließenden Hangfußbereich folgt im Liegenden ein sandiger Horizont, der hohe hydraulische Durchlässigkeiten von bis zu $3,2 \cdot 10^{-5}$ m/s aufweist.

Als Bodentyp wurde ein Gley ($A_h/G_o/G_r$) ausgewiesen, mit vereinzelt Variationen im Hangprofil. Der A_h -Horizont ist in der Regel frei von hydromorphen Merkmalen, und stark humos. Der G_o -Horizont, oder Oxidationshorizont, ist in der Regel gut durchlüftet und es finden sich Flecken von oxidiertem Eisen (Fe^{3+}) und Mangan (Mn^{3+} , Mn^{4+}).

Im oberen Bereich des Hanges, nahe der Quelle, steht das Grundwasser bis in den A_h -Horizont. Der Abbau organischer Substanz ist gering, so dass sich ein A_a -Horizont ausbildet. Des Weiteren ist kein G_o -Horizont ausgebildet. Der Bodentyp ist dann als Anmoorgley mit A_a/G_r -Profil zu bezeichnen.

Bodenprofil 1

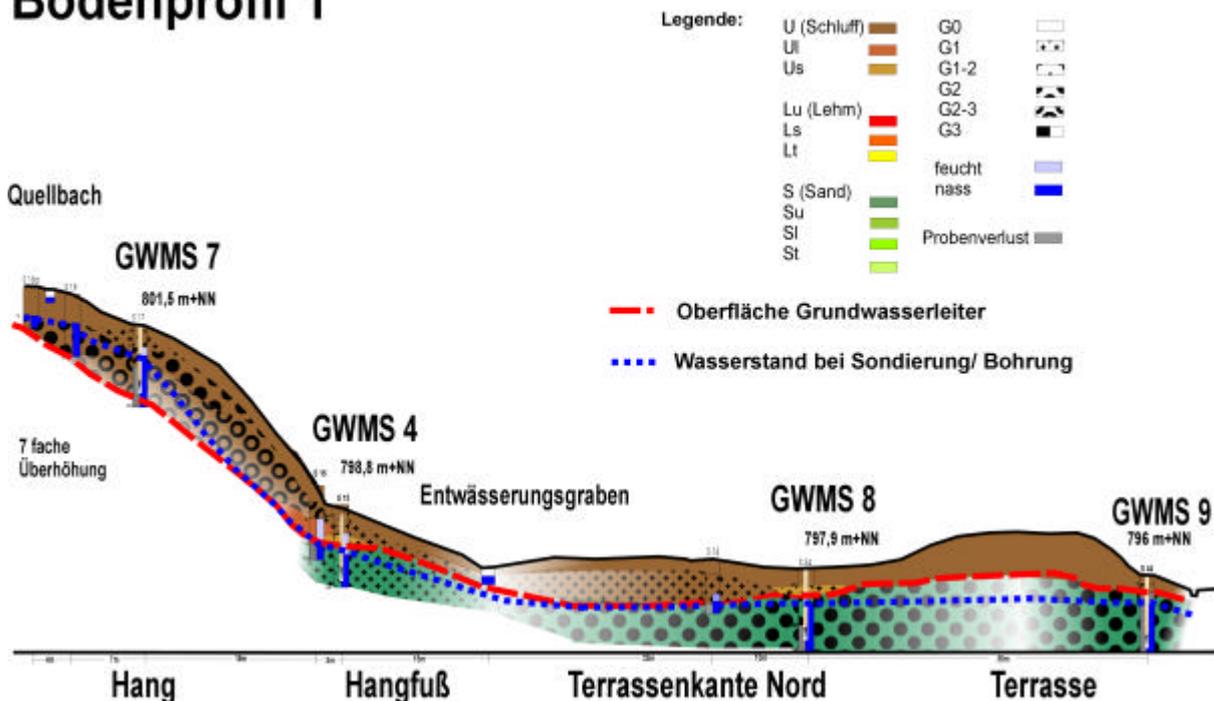


Abb. 4.2: Bodenprofil 1, mit Angabe der Feinbodenart und des Kiesanteils

Im Hangfußbereich, wie bereits oben angeführt, wird der untere Profilbereich ab ca. 150 cm sandiger, was auf den Einfluss der Flutrinne zurückzuführen ist. Hier findet sich der Verzahnungsbereich zwischen Hang und Talau. An der nördlichen Terrassenkante setzt sich dieses Bodenprofil weiter fort, allerdings nimmt die Mächtigkeit des oberen Bodenhorizontes zu, und erreicht auf der Terrasse 80-100 cm. Dagegen streicht die lehmigere Zwischenlage (Ul) in Richtung der Terrasse langsam aus. Der Boden ist vom Typ einer Auenbraunerde ($A_h-B_v-G_oC$), mit mächtigem verbrauntem Mineralboden. Dieser entwickelte

sich aus dem ursprünglichen Auenrohboden (Rambla) nach Beendigung einer aktiven Auendynamik durch die Überflutungen des Talbachs.

Im unmittelbaren Vorfluterbereich, südlich der Terrasse, finden sich nur noch wenig entwickelte, geringmächtige (15 cm) sandig bis schluffige Lagen unter dem A_h -Horizont, aber mächtige, „junge“ Sande. Die Verbraunung ist an dieser Stelle noch nicht so weit fortgeschritten, wie im Bereich der Terrasse.

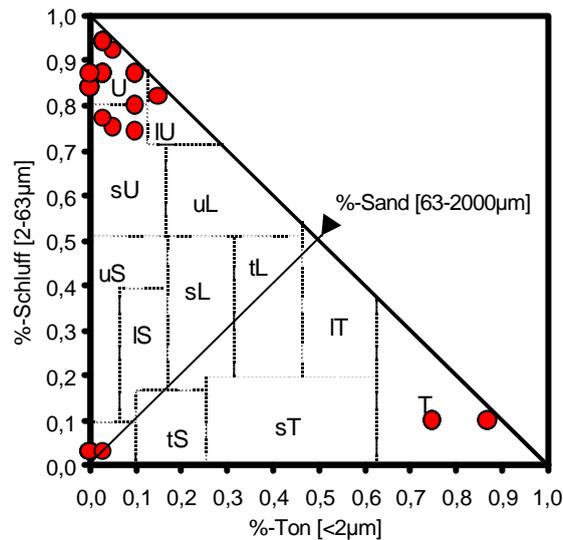


Abb.4.3: Übersicht der Feinbodenarten

4.1.2 Ergebnisse der Durchlässigkeitsbeiwertbestimmung

Zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes wurde die Methode im instationären Strömungszustand mittels Kurzpumpversuchen für alle GWMS angewendet (vgl. Kap. 3.1).

Die Ergebnisse sind in Tab. 4.1 dargestellt. Die k_f -Werte der Grundwassermessstellen liegen im Bereich zwischen $1,46 \cdot 10^{-6}$ m/s und $5,63 \cdot 10^{-9}$ m/s.

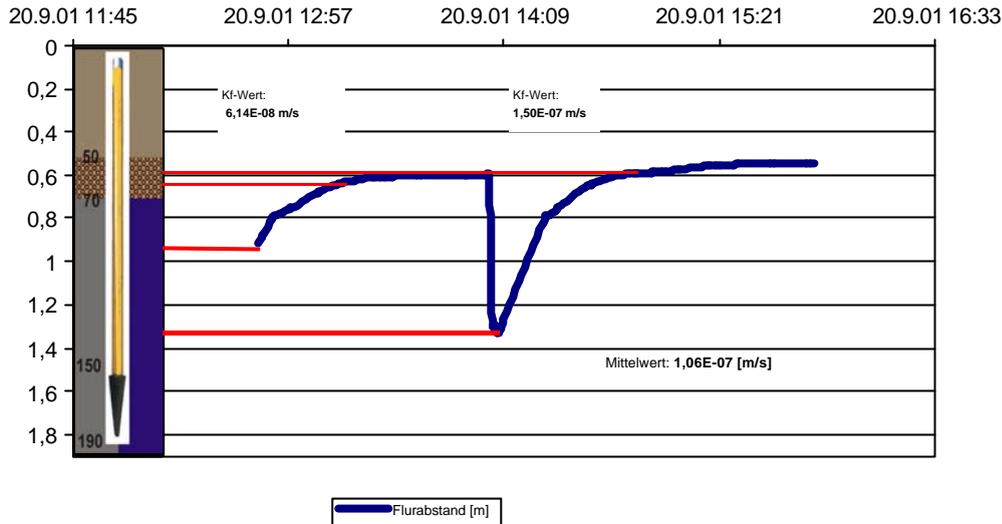


Abb.4.4: Pumpversuchsauswertung der GWMS 6 am 20.09.01

Die Abb. 4.4 zeigt die Wasserstandsschwankungen während zweier Kurzpumpversuchen in der GWMS 6 vom 20.09.2001. Die Ergebnisse der Auswertungen finden sich in der Tab. A2 im Anhang. Zur Berechnung der k_f -Werte werden neben Messstellencharakteristika die Anfangs- und Endwasserstände, sowie die dazugehörigen Zeiten bestimmt. Die roten Querlinien markieren diese Anfangs- und Endstände.

Tab.4.1: Übersicht der k_f -Werte der einzelnen GWMS

Nr.	GWMS 1	GWMS 2	GWMS 3	GWMS 4	GWMS 5	GWMS 6	GWMS 7	GWMS 8	GWMS 9	GWMS 10
k_f -Wert [m/s]	5,75E-07	3,81E-07	1,46E-06	1,09E-07	2,41E-07	1,06E-07	5,63E-09	7,34E-08	4,05E-09	2,50E-08

Für die Grundwassermessstelle 3 wurde zusätzlich die hydraulische Durchlässigkeit aus der Entnahmemenge (vgl. Kap. 3.1) ermittelt. Der ermittelte k_f -Wert ist mit $1,3 \cdot 10^{-4}$ m/s um zwei Zehnerpotenzen höher, als jener, des Kurzpumpversuches.

4.1.3 Diskussion

Die Sondierungen im Bereich des Testfeldes und die Bodenansprache unter besonderer Berücksichtigung der Feinkomponenten, ergab dass auf der gesamten Fläche eine bis zu 1 m mächtige schluffige, den Grundwasserleiter abdeckende Schicht vorzufinden ist. Diese Schicht kann als Auenlehm bezeichnet werden, da sie auf eine Bildung im Holozän zurückzuführen ist. Als Entstehungsprozess sind zwei Möglichkeiten gegeben. Zum einen sind Erosionsprozesse durch historische Waldrodungen (GLA 1990), zum anderen frühere

Wiesenwässerungen (HÄDRICH & STAHR 1997) denkbar. Der genaue Entstehungsprozess ist nicht eindeutig zu belegen. Durch die bergbaulichen Aktivitäten in historischer Zeit und der damit verbundene Bedarf an Holz ist die Theorie der Entstehung durch Erosionsprozesse an den freigelegten Hängen naheliegend.

Die Mächtigkeitsverteilung dieser Lage ist sehr unterschiedlich, und reicht von wenigen Zentimetern bis hin zu einem Meter. Aus Abb. 4.1 wird ersichtlich, dass sich die geringmächtigen Zonen im Bereich der Sättigungsfläche und der Flutrinne am Hangfußbereich, sowie an den vorfluternahen Sättigungsflächen befinden. Im Bereich der vorfluternahen Sättigungsfläche wurde diese abdeckende Schicht wieder erodiert, so dass das Grundwasser an der Oberfläche austreten kann. Mächtigere Abdeckungen finden sich im Bereich der Terrasse und den mikrotopographischen Erhebungen, letztere sowohl in der Flutrinne als auch im vorfluternahen Bereich. Der sich unter dieser Schicht befindende Aquifer ist gekennzeichnet durch kiesige Anteile, wodurch sich die um zwei bis drei Zehnerpotenzen höheren hydraulischen Durchlässigkeiten ergeben. Anhand der Ergebnisse der Pumpversuche zeigte sich kein räumliches Muster der Durchlässigkeiten. Vielmehr bestätigen sie die Heterogenität der Untergrundverhältnisse im Untersuchungsgebiet. Die um zwei Zehnerpotenzen höher liegenden hydraulischen Durchlässigkeiten der GWMS 3, die mittels Kurzpumpversuchen ermittelt wurden, bestätigen die in der Literatur aufgezeigten Aussagen, dass Bohrlochtests lediglich einen kleinen Aquiferabschnitt repräsentieren, und oft zu niedrige Werte liefern (vgl. Kap. 3.1). Dennoch konnte mit diesem Verfahren gezeigt werden, dass die Aquifereigenschaften im Bereich des Testfeldes sehr inhomogen sind.

4.1.4 Fazit

Die Untersuchungen der Untergrundverhältnisse dokumentieren eine sehr heterogene Untergrundbeschaffenheit. Zwar ist die Feinbodenzusammensetzung in der Regel bei allen Sondierungen sehr ähnlich, dennoch zeigen sich sehr unterschiedliche Beimengungen an größeren Anteilen. Neben den Materialunterschieden des Untergrundes ergaben die Sondierungen auch Unterschiede bezüglich der Mächtigkeiten der einzelnen Horizonte. So konnte eine in ihrer Mächtigkeit sehr verschiedenartige Auenlehmschicht bestimmt werden, die den durchlässigeren Grundwasserleiter überdeckt. Die Aufnahme der Bodenprofile stellte sich als sehr wichtige Grundlage für die spätere Beschreibung der Grundwasserverhältnisse heraus. Die Versuche zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeiten bestätigten die Annahme der hohen räumlichen Heterogenität der Untergrundverhältnisse. Sie lieferten gute Ergebnisse, im Hinblick auf die qualitativen Unterschiede der einzelnen Aquiferbereiche um die Messstellen. Allerdings sind die absoluten Werte mit Vorsicht zu betrachten, da diese aufgrund der angewendeten Methodik unterschätzt werden.

4.2 Hydrologische Verhältnisse im Untersuchungszeitraum

In diesem Kapitel wird die zeitliche Variabilität der Witterungsverhältnisse, der Standrohrspiegelhöhen der Grundwassermessstellen und die Wasserstandsschwankungen der Oberflächengewässer aufgezeigt. Die Entwicklungen der gesamten Messperiode stehen hier im Vordergrund der Betrachtung. Die Beprobungen des Grundwassers und der Oberflächengewässer wurden parallel zur Installation der Messstellen betrieben. Daher kommt es zu verschiedenen Probenanzahlen für die Messstellen je nach Installationszeitpunkt. Die längste Beobachtungsreihe, vom 10. September bis 30. November, weist die GWMS 1 mit 19 Grundwasserproben auf. Insgesamt wurden, zusammen mit der Ereignisbeprobung, ca. 475 Wasserproben auf ihre Hauptionen und Silikatkonzentrationen untersucht, und bei der routinemäßigen Stichtagsbeprobung die *in-situ*-Parameter Temperatur, Leitfähigkeit und pH-Wert gemessen.

4.2.1 Witterungsverhältnisse

Der Niederschlag ist als Inputgröße der ausschlaggebende Faktor für die Dynamik des Grundwassersystems. Die Gesamtmenge des Niederschlages sowie sein zeitlicher Verlauf, die Intensität, und die Vorfeuchte sind entscheidende Kriterien zur Beschreibung der Grundwasserverhältnisse im Untersuchungsgebiet. Aus diesen Gründen ist eine detaillierte Beschreibung der Witterungssituation während des Untersuchungszeitraumes September bis Dezember 2001 wichtig. Die Beschreibung der Witterungssituation wurde aus dem Witterungsreport-Express des Deutschen Wetterdienstes entnommen und mit Messungen der Klimastation Katzensteig, sowie eigenen Beobachtungen verglichen und ergänzt. Eine Übersicht der Niederschläge und Lufttemperaturen der Station Katzensteig sind in Abb. 4.6 dargestellt, Abweichungen von Niederschlag und Lufttemperatur vom langjährigen Mittel in Abb. 4.5.

September 2001

Der Monat September war im Vergleich zur Standardperiode 1961 bis 1990 zu kalt und deutlich zu nass. Für die Station Freiburg ergaben sich Abweichungen der Temperatur von $-2,6\text{ °C}$ und $+90\%$ beim Niederschlag (DWD 2001). Insgesamt fielen im September an der Station Katzensteig 272,2 mm Niederschlag. Die Durchschnittstemperatur betrug $9,31\text{ °C}$.

Am **01. September** sorgte ein Trog mit tiefem Druck über Westeuropa für eine unbeständige Witterung, die allerdings zu keinen Niederschlägen führte.

Die darauf folgende Nordwestlage zyklonal, die vom **2. bis zum 13. September** anhielt, sorgte für ungewöhnlich kalte Witterung mit Niederschlägen von über 3 mm Gesamtmenge am 10.09., 11.09. und 12. September. Am 13. September kam es zu einem Ereignis mit 45,5 mm Niederschlag, bei einer maximalen Intensität von 16,8 mm/h.

Der vom **14. bis 17.09.** über Mitteleuropa liegende Trog führte zu andauernden Niederschlägen an allen Tagen und zu einem stärkeren Ereignis mit 25,5 mm am 16./17. September.

Vom **18. bis zum 23. September** bewegte sich ein Tief nur langsam von Mitteleuropa Richtung Nordosten, was zu einer anhaltenden Strömung von kalten und feuchten Luftmassen führte. Ereignisse mit 19,5 mm (19.09.), 9,2 mm (20.09.) und 7,3 mm (23.09.) waren die Folge.

Während der Hochdruckwetterlage vom **24. bis 26.09.** fielen im Untersuchungsgebiet nur geringe Niederschlagsmengen.

Das sich am Monatsende vom **27. bis 29.09.** durchsetzende Hoch über Mitteleuropa sorgte für wärmere Luftmassen. Diese Phase blieb jedoch nicht ganz niederschlagsfrei, es kam zu einem Ereignis am 29.09. mit 5 mm Gesamtmenge.

Am **30. September** bildete sich durch das schnelle Abziehen des Hochs nach Nordosten eine Südwestlage zyklonal aus, die allerdings zu keinen Niederschlägen führte (DWD 2001).

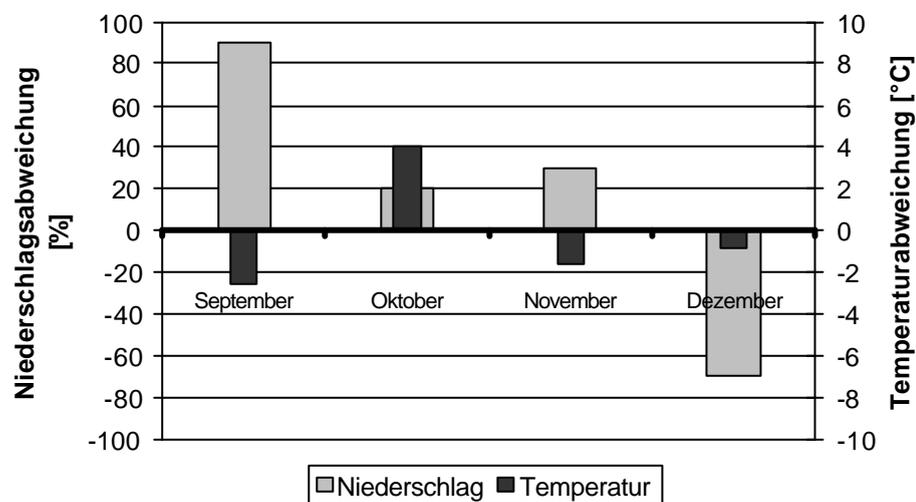


Abb. 4.5: Abweichungen der Monatsniederschläge und Durchschnittstemperaturen der Station Freiburg im Vergleich zum langjährigen Mittel der Klimaperiode 1961-1990. (Daten aus DWD 2001)

Oktober 2001

Der Oktober 2001 war deutlich zu warm im Vergleich zum langjährigen Mittel. Für die Station Freiburg ergeben sich Abweichungen der Temperatur von +4,0 °C und +20 % beim Niederschlag. An der Station Katzensteig wurden insgesamt 110,65 mm Niederschlag gemessen bei einer Monatsmitteltemperatur von 11,9°C.

Die bereits Ende September beginnende Südwestlage zyklonal setzt sich auch **Anfang Oktober bis zum 9.10.** fort. In diesem Zeitraum fanden zwei Ereignisse mit Niederschlägen >10mm statt. Das erste am 3.10. mit 22,4 mm und einer maximalen Intensität von 17,4 mm/h und das zweite am 7.10. mit 17,7 mm Gesamtmenge.

Die darauffolgenden Großwetterlagen Westlage zyklonal vom **10.10. bis 13.10.** und Südlage antizyklonal vom **14.10. bis 20.10.** brachten keine Niederschläge >10 mm Gesamtmenge.

Die winkelförmige Westlage vom **21.10. bis 25.10.** brachte sowohl tiefere Temperaturen als auch Niederschläge am 24.10. und 25.10. mit Mengen von 6,0 bis 7,3 mm.

Erst die Westlage antizyklonal, die **vom 26.10. bis Ende des Monats** anhielt brachte am 31.10. ein Ereignis mit insgesamt 13,1 mm Niederschlag (DWD 2001).

November 2001

Der November war gemessen an der Station Freiburg um 1,6 °C zu kalt und um 30 % zu nass. An der Station Katensteig wurden insgesamt 146,26 mm Niederschlag gemessen, bei einer Durchschnittstemperatur von 1,08°C.

Vom **01.11. bis 09.11.** brachte die Nordwestlage zyklonal zuerst keine Niederschläge, jedoch am 07.11. und 08.11. mit Gesamtmengen >10 mm. Die Niederschläge am 08.11. gingen in Schneegraupel über, der zeitweise auf dem Testfeld liegen blieb.

An den darauffolgenden Tagen bildete sich eine Hochdruckbrücke über Mitteleuropa aus, die bis zum 12. November anhielt.

Vom **13.11. bis 24.11.** dominierte eine Nordwestlage antizyklonal das Wettergeschehen, was am 13.11. zu einem Ereignis mit knapp 5 mm Niederschlag führte, und am 22.11. zu einem Ereignis mit 12,7 mm. Der Niederschlag fiel teilweise als Schnee. An der Station Katzensteig wurde an den folgenden Tagen nur wenig Niederschlag registriert, im Gegensatz zur Station auf dem Feldberg. Eine mögliche Ursache könnte die Tatsache sein, dass diese Station bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt keinen Niederschlag aufzeichnet, da sie nicht beheizt wird.

Die winkelförmige Westlage brachte eine milde und niederschlagsreiche Witterung vom **25.11. bis 30.11.**, was sich an Niederschlägen von 12,7 mm (25.11.), 9,8 mm (27.11.), 12,6 mm (28.11.) und 41,0 mm am 29. November widerspiegelt. Es ist aber festzustellen, dass der Niederschlag am 25.11. überschätzt sein kann, durch Schmelzvorgänge des auftauenden Schnees im Messgerät. Der Temperaturanstieg über den Gefrierpunkt, und die Aufzeichnung von 0,6mm an der Station Feldberg/Schwarzwald (DWD 2001) stützten diese Theorie. Bei

der Feldbegehung am 28.11. fand sich trotz Tauwetter eine geschlossene Schneedecke von 3 cm Mächtigkeit auf dem Testfeld.

Dezember 2001

Der Dezember 2001 war an der Station Freiburg um 0,8 °C zu kalt und um 70 % zu trocken. An der Station Katzensteig wurden 106,9 mm Niederschlag registriert bei -1,84 °C Durchschnittstemperatur.

Die bis zum **06. Dezember** anhaltende winkelförmige Westlage brachte nur noch am 04.12. und am 05.12. Niederschläge, die allerdings unter 8 mm blieben.

Eine Nordostlage antizyklonal vom **07.12. bis 13.12.** und ein Hoch über den Britischen Inseln, das vom **14.12. bis zum 18.12.** andauerte brachten keine nennenswerten Ereignisse bei kontinentaler Polarluft, was sich an der Temperaturganglinie zeigt.

Vom 19.12. bis Ende des Monats dominierte eine Nordwestlage zyklonal mit rascher Störungsabfolge. Sie brachten reichlich Niederschläge überwiegend als Schnee. Am 28.12. begannen die Temperaturen wieder zu steigen in Kombination mit kräftigen Niederschlägen. Vom 28.12. bis 29.12. wurden 49,9 mm Niederschlag an der Station Katzensteig gemessen (DWD 2001).

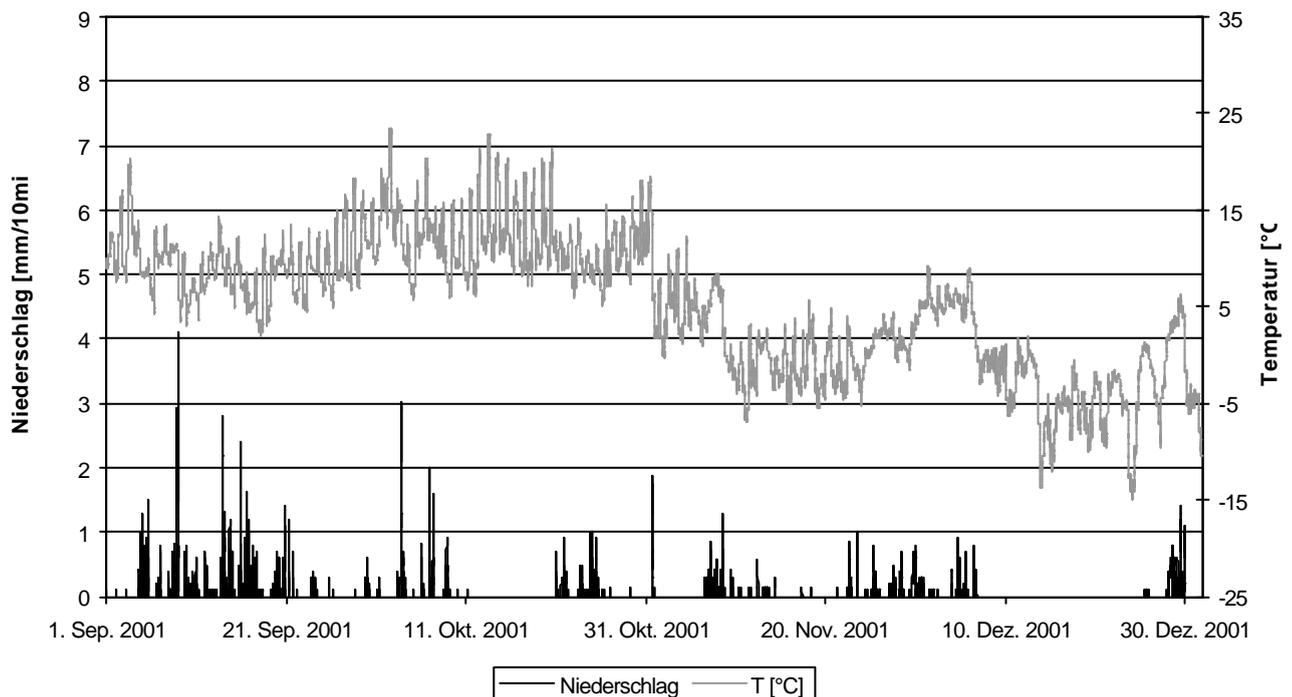


Abb. 4.6: Verlauf des Niederschlages und der Lufttemperatur an der Klimastation Katzensteig

Eine Übersicht für Niederschlagsereignisse einer Gesamtmenge >10mm der Klimastation Katzensteig im Untersuchungszeitraum findet sich in Tab. A3 im Anhang.

4.2.2 Abflussverhalten der Brugga

Das Abflussverhalten der Brugga wird anhand der Radardaten des Pegels Oberried dargestellt. An diesem vom IHF betriebenen Radarpegel werden die Wasserstände der Brugga digital erfasst und als 10-Minutenwerte gespeichert. Mit Hilfe der P-Q-Beziehung des Pegels Oberried, ermittelt durch die LfU, konnten die Wasserstände in Abflüsse umgerechnet werden. Für den St. Wilhelmer Talbach standen die Abflussdaten leider nicht zur Verfügung. Durch die vergleichbare Reaktion der beiden Pegel können jedoch zumindest qualitative Aussagen zu den Abflüssen des St. Wilhelmer Talbachs gemacht werden.

Wie bereits in Kap. 4.2.1 gezeigt wurde, war der Untersuchungszeitraum durch eine Vielzahl von Niederschlagsereignissen mit sehr unterschiedlicher Niederschlagscharakteristik, wie Dauer, Summe, Verteilung und Intensität gekennzeichnet. So waren bis Mitte September sehr nasse Verhältnisse zu verzeichnen, was sich in Form additiver Abflussimpulse widerspiegelt (Abb. 4.7). Danach folgte im Oktober eine relativ trockene Periode mit vereinzelt kürzeren Niederschlagsereignissen, die allerdings zu keinen größeren Ereignissen führten. Die Abflusswerte blieben dauerhaft unter dem mittleren jährlichen Abfluss (MQ) von $1,537 \text{ m}^3/\text{s}$. Erst zu Beginn des Novembers übertreffen die Abflusswerte wieder den MQ. Ende November zeigt sich dann, ausgelöst durch eine Kombination von Niederschlagsereignis und Schneeschmelze, ein Hochwasserereignis mit einem Abfluss über $7 \text{ m}^3/\text{s}$.

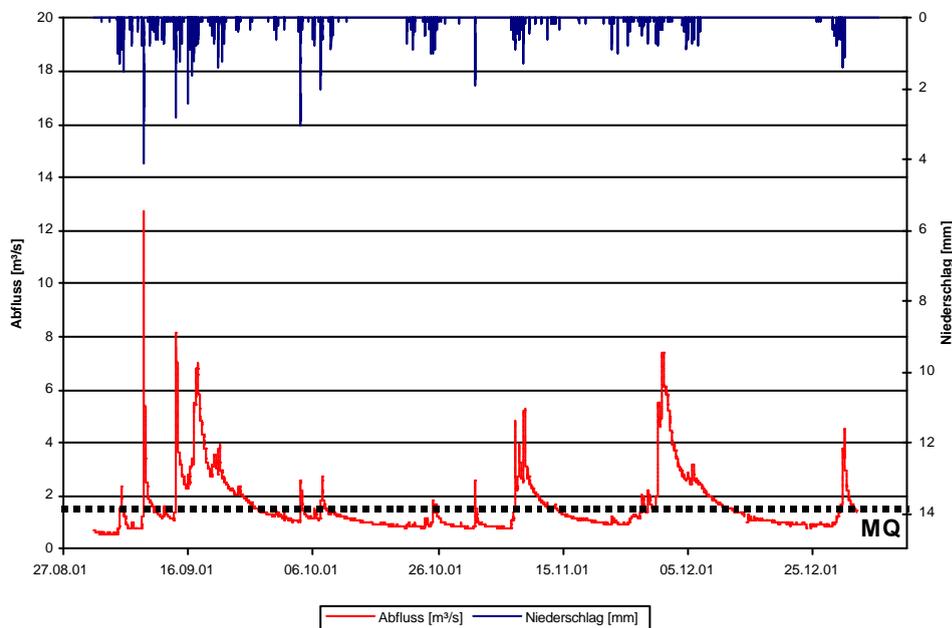


Abb. 4.7: Abfluss (Brugga) und Niederschlag (Katzensteig) im Untersuchungsgebiet, mit MQ der Periode 1934-1994

4.2.3 Verhalten der Standrohrspiegelhöhen der Grundwassermessstellen

In diesem Kapitel werden die Reaktionen der Standrohrspiegelhöhen der Grundwassermessstellen auf die variablen Gebietszustände und ereignisspezifische Niederschlagscharakteristik beschrieben. Die Niederschlagsdaten der Klimastation Katzensteig wurden in insgesamt 213 Niederschlagsereignisse eingeteilt, indem alle Niederschlagsmengen mit einer maximalen Unterbrechung von 60 Minuten zu einem Ereignis addiert wurden. Die Standrohrspiegelhöhen der Grundwassermessstellen zeigen deutliche Reaktionen auf Niederschlagsereignisse in Abhängigkeit von Gebietszustand und Niederschlagscharakteristik. Daraufhin wurden diese Niederschlagsereignisse mit den Reaktionen der Standrohrspiegelhöhen der Grundwassermessstellen verglichen, und letztlich 19 Ereignisse ausgewiesen, für die eine deutliche Reaktion der Standrohrspiegelhöhen zu erkennen war. Am Beispiel der GWMS 1 werden diese 19 ausgewiesenen Ereignisse charakterisiert und dargestellt. Hierzu wurde eine statistische Auswertung durchgeführt, welche die Einflüsse von Gebietsvorfeuchte, Niederschlagssumme und Niederschlagsintensität für alle Messstellen aufzeigt. Es wird darauf hingewiesen, dass die Anzahl der Ereignisse nicht repräsentativ für eine statistische Auswertung ist, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

Die Standrohrspiegelhöhen der GWMS weisen eine hohe Variabilität auf. In Tab. 4.2 sind die Mittelwerte, Minima, Maxima der einzelnen Messstellen dargestellt. Die größte Schwankung, mit 123 cm, zeigt die GWMS 7. Die niedrigsten Werte finden sich im vorfluternahen Bereich der GWMS 10. Einige der Messstellen erreichen während einzelner Niederschlagsereignisse minimale Flurabstände von wenigen Zentimetern. Besonders die GWMS am Hang und Hangfuß weisen hohe Grundwasserstände auf. Die Messstelle 3 war zeitweise artesisch gespannt mit 4,4 cm über GOK.

Tab. 4.2: Flurabstände der GWMS

GWMS Nr.	Mittelwert [mm]	Min [mm]	Max [mm]	Schwankung	Messwerte	GWLOBF [mm]
1 (Terrasse)	1070	390	1302	912	12072	800
2 (Terrassenkante süd)	644	222	896	674	11753	900
3 (Terrassenkante nord)	444	-44	658	702	11728	600
4 (Hangfuss)	685	56	850	794	18346	700
5 (Hangfuss)	1224	634	1327	693	10858	1000
6 (Hang)	696	222	1012	790	10704	700
7 (Hang)	464	75	1305	1230	13976	1000
8 (Terrassenkante nord)	715	152	971	819	9229	600
9 (Feuchtlächennah)	841	278	1237	959	9229	400
10 (Vorfluternah)	1208	862	1295	433	10542	300

Durchgehend gespannte Grundwasserverhältnisse wurden an der am Hang gelegenen Messstelle 7 und der sich am südlichen Terrassenrand befindenden Messstelle 2 gemessen. Ständig im ungespannten Bereich befindet sich lediglich die vorfluternahe Messstelle 10. Alle anderen Messstellen erreichen während Niederschlagsereignissen zeitweise gespannte Grundwasserverhältnisse.

Insgesamt wurden 19 Einzelereignisse ausgewiesen, und für die GWMS wurden die Zeiten für den Ereignisbeginn und den Peak bestimmt mit den dazugehörigen Wasserständen und den Anstiegszeiten und Anstiegshöhen. Bei den dazugehörigen Niederschlagsereignissen wurde die Dauer, die Menge und die Intensitäten ermittelt. Zusätzlich wurde ein 7-Tage-Vorregenindex berechnet, der die Vorfeuchte im Gebiet parametrisiert.

In Tab. A4 und A5 im Anhang sind die Ereignisse der GWMS 1 und die jeweiligen Niederschlagsereignisse dargestellt.

Grundwassermessstelle 1

Ereignis 1 bewirkt, bedingt durch die hohe Gebietsvorfeuchte mit einem Vorregenindex von 37,01 mm, den geringsten Flurabstand (Abb. 4.8). Die sich daraus ergebende Anstiegshöhe ist mit einem Wert von 704 mm die größte im gesamten Untersuchungszeitraum. Der Grundwasserspiegel kommt sehr schnell in den gespannten Bereich. Dieser ist im Fall der GWMS 1 erreicht, wenn die Flurabstände Werte kleiner 800 mm annehmen. Mit einer Gesamtmenge von 45,5 mm war der auslösende Niederschlag enorm hoch. Deutlich ist die schwächer werdende Abnahme des Grundwasserstandes zu erkennen, die bedingt wird durch nachfolgende Niederschläge.

Ereignis 2 setzt bereits zu einem Zeitpunkt ein, als der abfallende Ast des ersten Ereignisses noch nicht wieder den Ausgangswasserstand erreicht hat. Es ist, aufgrund der vielen kleinen einzelnen Niederschlagsphasen zu Beginn des Ereignisses, die einen ungleichmäßigen Anstieg bewirken, nicht zum Vergleich mit den anderen Ereignissen geeignet.

Ereignis 3 ist ebenfalls durch eine langsame Anstiegszeit, bedingt durch ein Niederschlagsereignis mit geringer Intensität, gekennzeichnet. Das Ereignis 4 ist auf den abfallenden Ast des Ereignisses 3 aufgesetzt, und reicht gerade bis an die Grundwasserleiteroberfläche (GWLOBF) heran.

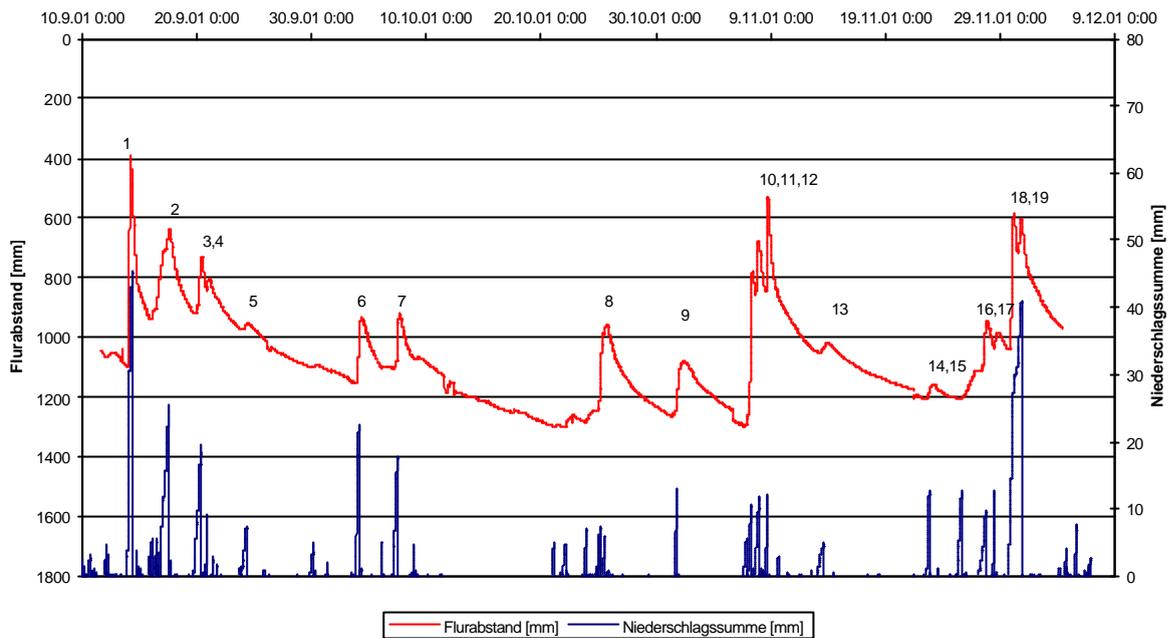


Abb. 4.8: Ereignisse 1 bis 19 mit Flurabstand der GWMS 1 und der Niederschlagssumme der Station Katzensteig

Die Ereignisse 5-9 erreichen aufgrund der anhaltenden trockenen Witterungssituation und das damit verbundene Rezessionsverhalten der Standrohrspiegelhöhe dagegen die GWLOBF nicht mehr, obwohl einzelne heftige Niederschläge auftraten. Im Verlauf dieser Trockenperiode fällt der Vorregenindex auf 0 mm ab, und die Anstiegszeiten der Ereignisse steigen auf über 10 Stunden an. Ereignisse 10, 11 und 12 folgen in einer sehr kurzen zeitlichen Abfolge aufeinander. Die Standrohrspiegelhöhen der Grundwassermessstellen erreichen trotz vorrausgegangener Trockenperiode wieder den gespannten Bereich, dies ist auf eine Addition einzelner weniger ergiebiger aber kurz aufeinanderfolgender Niederschlagsereignis zurückzuführen. Nach diesem kurzzeitigen Anstieg fällt der Grundwasserspiegel wieder weit ab, unter die 1000 mm Marke, und die Standrohrspiegelhöhen der Ereignisse 13 bis 17 erreichen die GWLOBF nicht. Erst bei den beiden Ereignissen 18 und 19 erreichen die Standrohrspiegelhöhen wieder den gespannten Bereich. Die Aufteilung in zwei Peaks wurde durch die Niederschlagsverteilung hervorgerufen.

4.2.4 Verhalten der Oberflächengewässer

Die über den gesamten Zeitraum gesehenen Reaktionen der Oberflächengewässer im Testfeldbereich stehen in einem engen Zusammenhang mit den Reaktionen der Standrohrspiegelhöhen der Grundwassermessstellen. In Abb. 4.9 sind die Wasserstände des St. Wilhelmer Talbachs und des Feuchtflächenentwässerungsgrabens im Vergleich zur Ganglinie des Grundwasserspiegels der GWMS 1 dargestellt. Bei der Betrachtung des Feuchtflächenentwässerungsgrabens ist zu beachten, dass sich ab dem 13. November die Wasserstände durch den Einbau des Messwehres verändert haben. Der Verlauf der Ganglinie ist generell sehr ausgeglichen, mit vereinzelt starken Reaktionen während Niederschlagsereignissen. So ist am 08. November ein starker Anstieg des Wasserstandes von 6 cm auf 20 cm zu erkennen. Während der übrigen Zeit bewegen sie sich meist innerhalb eines zu konstanten Bereiches, so dass die Auflösung der Messsonde keine Veränderung registriert. Die Wasserstände des Talbachs schwanken von ca. 10 cm bis 40 cm. Sie sind höher korreliert zu den Ganglinien der GWMS als der Feuchtflächenentwässerungsgraben. Erst Anfang Dezember zeigt sich ein verändertes Rezessionsverhalten.

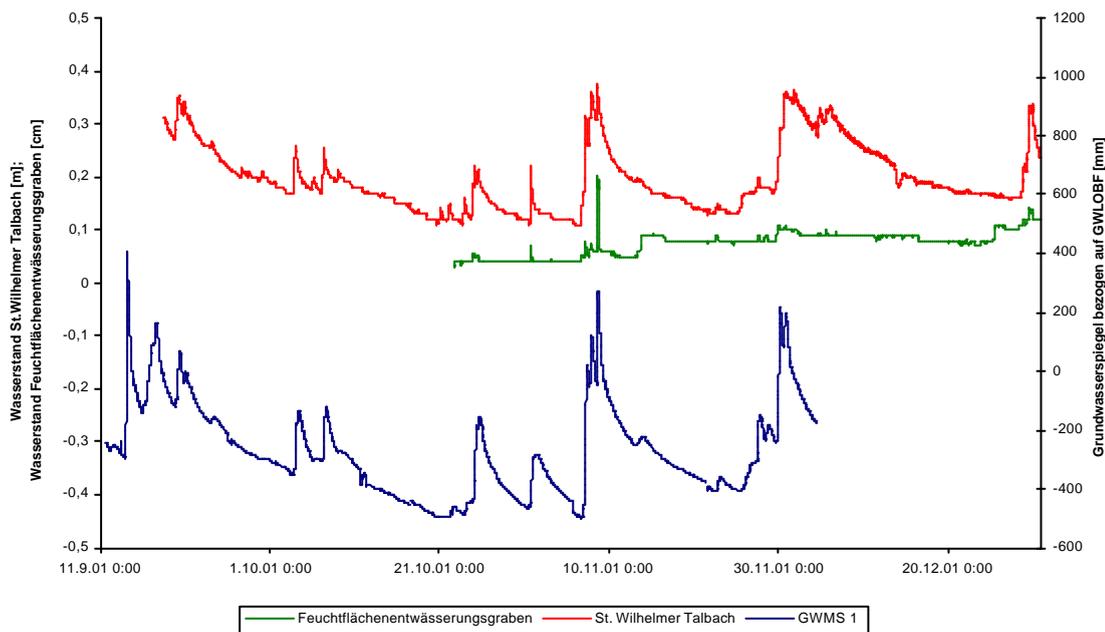


Abb. 4.9: Ganglinien der Oberflächengewässer: St. Wilhelmer Talbach und Feuchtflächenentwässerungsgraben im Vergleich zur GWMS 1

4.2.5 Einfluss der Niederschläge auf die Standrohrspiegelhöhen

Eine Fragestellung der Arbeit ist es zu untersuchen, welche Witterungsverhältnisse notwendig sind, um die Grundwasserstände im Hangfuß- und Auenbereich ansteigen zu lassen. Hierzu wurde ein 7-Tage Vorregenindex (MANIAK 1997) ermittelt, der die Vorfeuchtebedingungen im Gebiet beschreiben soll (Abb. 4.11). Dazu werden die Niederschläge der Vortage mit einer Gewichtung des zeitlichen Abstandes aufsummiert. Dieser Wert wurde neben der Niederschlagsmenge mit dem Parameter Anstiegshöhe über GWLOBF korreliert. Die Ergebnisse der Korrelations- und Regressionsanalysen wurden laut Tab. A.6 im Anhang interpretiert. Die Abb. 4.10 zeigt beispielhaft für die GWMS 1 diese Zusammenhänge zwischen Grundwasserreaktion und Niederschlag. Für diese Messstelle zeigen sich mittlere Zusammenhänge für beide Niederschlagscharakteristika. Der Zusammenhang zwischen 7d-VRI und Anstiegshöhe weist ein Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,56$, der zwischen Niederschlagsmenge und Anstiegshöhe von $r^2 = 0,45$ auf. Die Ergebnisse der weiteren Messstellen werden in der Diskussion behandelt. Die Abb. A6 bis A14 im Anhang zeigen die Regressionen weiterer Messstellen.

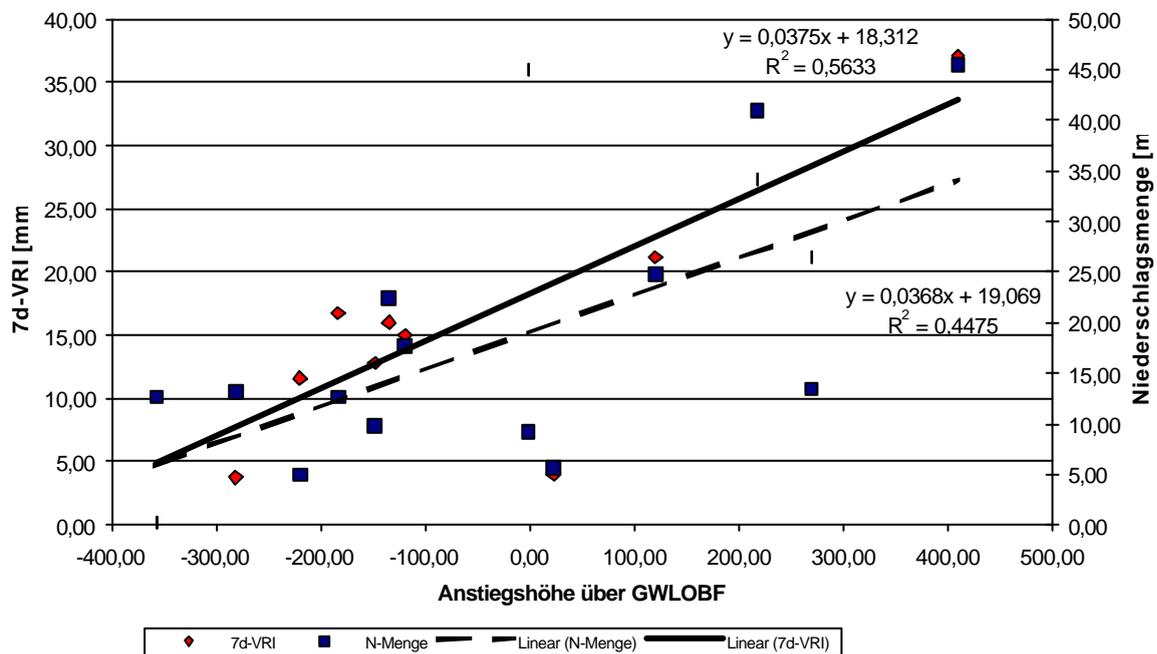


Abb. 4.10: Regressionen zwischen Anstiegshöhe des Grundwasserspiegels über die Grundwasserleiter-oberfläche (GWLOBF) mit der Niederschlagsmenge bzw. dem 7d-VRI der Messstelle 1

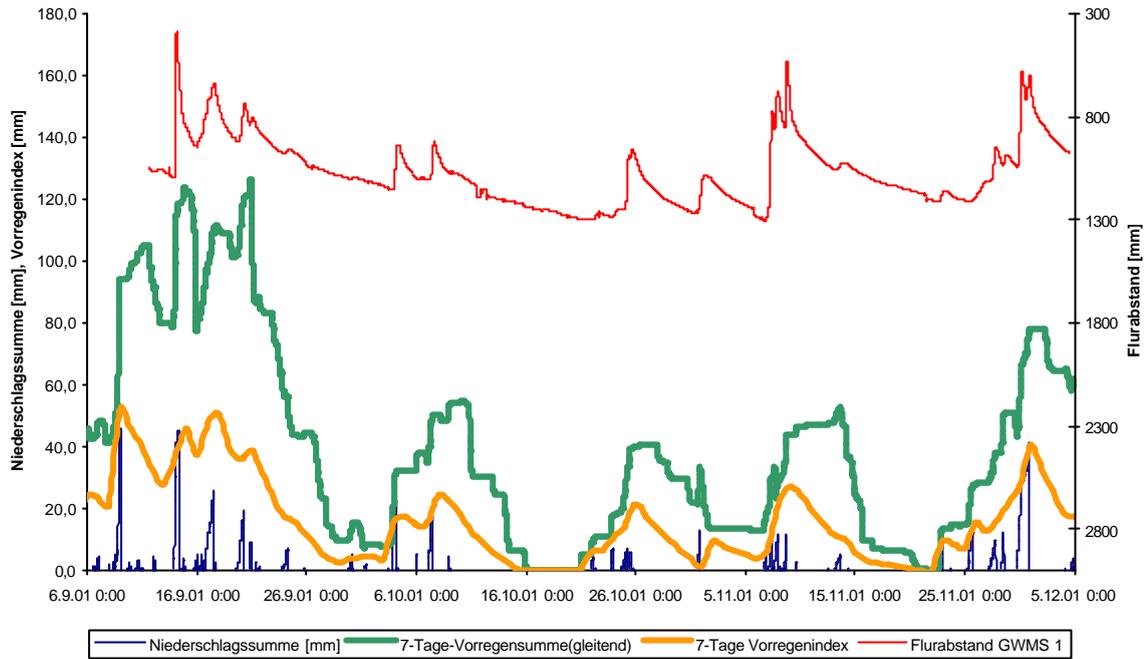


Abb. 4.11: 7-Tage-Vorregensumme und 7-TageVorregenindex

Untersuchungen mit der Niederschlagsmenge bzw. Niederschlagsintensität und der Anstiegsrate der GWMS, d.h. die Anstiegshöhe pro Zeiteinheit, führten zu sehr unterschiedlichen Zusammenhängen. Während die am Hang gelegene Messstelle 7 für den Zusammenhang zwischen Anstiegsrate und Niederschlagsmenge einen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,72$ aufzeigt, nimmt der Zusammenhang entlang der Talauwe bis hin zur vorfluternahen Messstelle 9 ab, und weist an dieser Stelle keinen Zusammenhang mehr auf ($r = -0,04$).

4.2.6 Einfluss der Niederschläge auf die hydrochemische Signatur

Während des gesamten Untersuchungszeitraumes wurden regelmäßige Stichtagsbeprobungen der GWMS und Oberflächengewässer durchgeführt. Bei der Probenentnahme wurden die *in-situ* Parameter Temperatur, Leitfähigkeit und pH-Wert gemessen. Die Multisonden in den Oberflächengewässer zeichnen diese Werte konstant, in einer 10-minütigen Auflösung auf. Die Wasserproben wurden später im Labor auf die Konzentrationen der Anionen, der Kationen und des Silikats hin untersucht (vgl. Kap.3.4).

Temperatur

Ein Vergleich der Wassertemperaturen der Grundwassermessstellen untereinander ergab ein homogenes Bild (vgl. Abb. A15 im Anhang). Die Wassertemperaturen zeigen Unterschiede zwischen 7 und 14 °C. Tagesschwankungen und Veränderungen während Niederschlagsereignissen sind im Temperaturverlauf der GWMS nicht zu erkennen. Die Mittelwerte liegen im Bereich von 8-11 °C, was in etwa der mittleren Jahreslufttemperatur entspricht. Auffallend ist, dass die Grundwassertemperaturen deutlich höher liegen als diejenigen der am Hang gelegenen Quelle und der Oberflächengewässer (Tab. 4.3). Ein deutlicher Tagesgang der Wassertemperaturen ist an den Oberflächengewässern zu verzeichnen durch die direkte Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen (Abb. A16 im Anhang). Dennoch ist der Temperaturverlauf der Quelle und somit auch des Entwässerungsgrabens, der hauptsächlich durch die Quelle gespeist wird, mit Schwankungen von 1,8 °C bzw. 3,8 °C dementsprechend sehr konstant.

Tab. 4.3: Wassertemperaturen der GWMS und Oberflächengewässer

GWMS Nr.	Mittelwert [°C]	Min [°C]	Max [°C]	Schwankung	Messwerte
1 (Terrasse)	11,38	6,90	14,10	7,20	12057
2 (Terrassenkante süd)	10,10	5,20	13,50	8,30	11761
3 (Terrassenkante nord)	10,13	5,20	13,50	8,30	11726
4 (Hangfuss)	8,70	3,50	13,80	10,30	18347
5 (Hangfuss)	10,85	6,20	14,00	7,80	10852
6 (Hang)	10,31	5,20	12,80	7,60	10704
7 (Hang)	8,47	2,50	13,10	10,60	17260
8 (Terrassenkante nord)	10,18	4,60	11,80	7,20	9778
9 (Feuchtlächennah)	7,58	3,20	10,80	7,60	17197
10 (Vorfluternah)	8,69	2,50	11,20	8,70	10535
Oberflächengewässer	Mittelwert [°C]	Min [°C]	Max [°C]	Schwankung	Messwerte
Quellbach	8,84	8,20	10,00	1,80	10
Entwässerungsgraben	7,47	5,70	9,50	3,80	9079
FFentwässerungsgraben1	4,82	0,70	10,10	9,40	11935
St. Wilhelmer Talbach	4,71	0,00	11,40	11,40	16862

Elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert

Die elektrische Leitfähigkeiten (LF) der GWMS variieren von ca. 70 bis 200 µS/cm. Mit einer Zunahme der LF reagieren die GWMS 1, 5, 6 und 7 bei abnehmenden Wasserständen, und einem Abfallen der LF bei feuchteren Gebietszuständen. Die übrigen Messstellen zeigen keinen eindeutigen Trend.

Die Oberflächengewässer zeigen deutlich voneinander unterschiedliche LF (vgl. Abb. A17 im Anhang). Die Quelle besitzt mit 70 - 80 µS/cm die höchsten Werte, gefolgt vom der

Feuchtfläche mit 50 - 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und dem Talbach mit Werten von 30-40 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sie reagieren bei Niederschlagsereignissen mit Verdünnungseffekten von 20 bis 40 % der Ausgangswerte. Die pH-Werte der GWMS schwanken zwischen 5,5 und 8. Eine längerfristige Tendenz ist in den Werten nicht zu erkennen. Dagegen zeigt der zeitlich hoch aufgelöste Entwässerungsgraben und der Talbach tägliche Schwankungen des pH-Wertes mit Maxima um die Mittagszeit. Diese erreichen beim Entwässerungsgraben mit ca. 10 % eine größere Variabilität als beim Talbach, bei dem die Schwankungen nur 3 % ausmachen. Die Werte des Entwässerungsgrabens liegen etwas höher als die des Talbachs. Während Niederschlagsereignissen ist auch bei diesem Parameter eine Verdünnung um bis zu 15 % festzustellen (vgl. Abb. A18 im Anhang).

Anionen und Kationen

Der Verlauf der Anionen und Kationen während der Untersuchungsphase ist in der Regel als ausgeglichen zu charakterisieren. Die absoluten Konzentrationen der Inhaltsstoffe liegen für fast alle Messstellen in den gleichen Bereichen. Einzig die hangnahen GWMS 6, 7 und 8 weisen etwas höhere Calciumgehalte mit einem größeren Schwankungsbereich auf. Anhand von 2 Messstellen (GWMS 4 und St. Wilhelmer Talbach) soll der zeitliche Verlauf der chemischen Parameter, die mittels Stichtagsbeprobungen ermittelt wurden, dargestellt werden (Abb. 4.12 und 4.13).

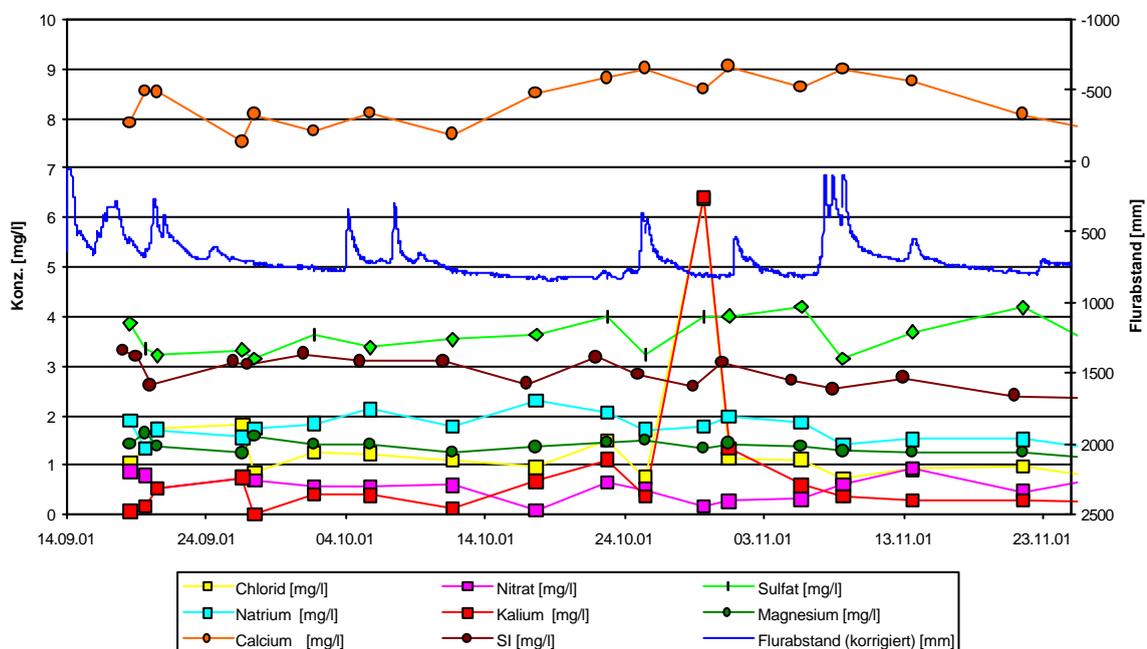


Abb. 4.12: Stichtagsbeprobung Anionen, Kationen und Silikat der GWMS 4

Die Natriumkonzentrationen liegen in einem Bereich von 1,5-3 mg/l. Sie lassen sowohl bei den GWMS als auch für die Oberflächengewässer keinen positiven oder negativen zeitlichen Trend erkennen. Im Fall der Kaliumwerte zeigen sie, abgesehen von Einzelproben, die Konzentrationen von bis zu 50 mg/l erreichen können, im Allgemeinen niedrige Konzentrationen, die zwischen 0,5-2 mg/l variieren. Dagegen ergeben sich für Magnesium und Calcium von allen untersuchten Anionen und Kationen die höchsten Konzentrationen. Sie bewegen sich, für Calcium, im Mittel um 5-12 mg/l. Beim Magnesium liegen sie mit ca. 1,5 mg/l deutlich niedriger. Die hangnahen GWMS 6, 7 und 8 weisen größere Schwankungen der Calciumwerte auf, und reichen von 7 bis 15 mg/l, 4 bis 23 mg/l bzw. 7 bis 17 mg/l. Im Fall der Oberflächengewässer lassen sich steigende Tendenzen der Calciumwerte mit Anhalten der Trockenperiode erkennen, was sich Ende der Untersuchungsphase wieder umkehrt.

Die untersuchten Anionen verhalten sich ebenfalls recht konstant. Beim Chlorid sind wie beim Kalium Einzelwerte mit erhöhten Konzentrationen festzustellen. Für das Nitrat schwanken die Werte im Grundwasser zwischen 0 und 1,5 mg/l, nehmen aber in den Oberflächengewässern höhere Werte an.

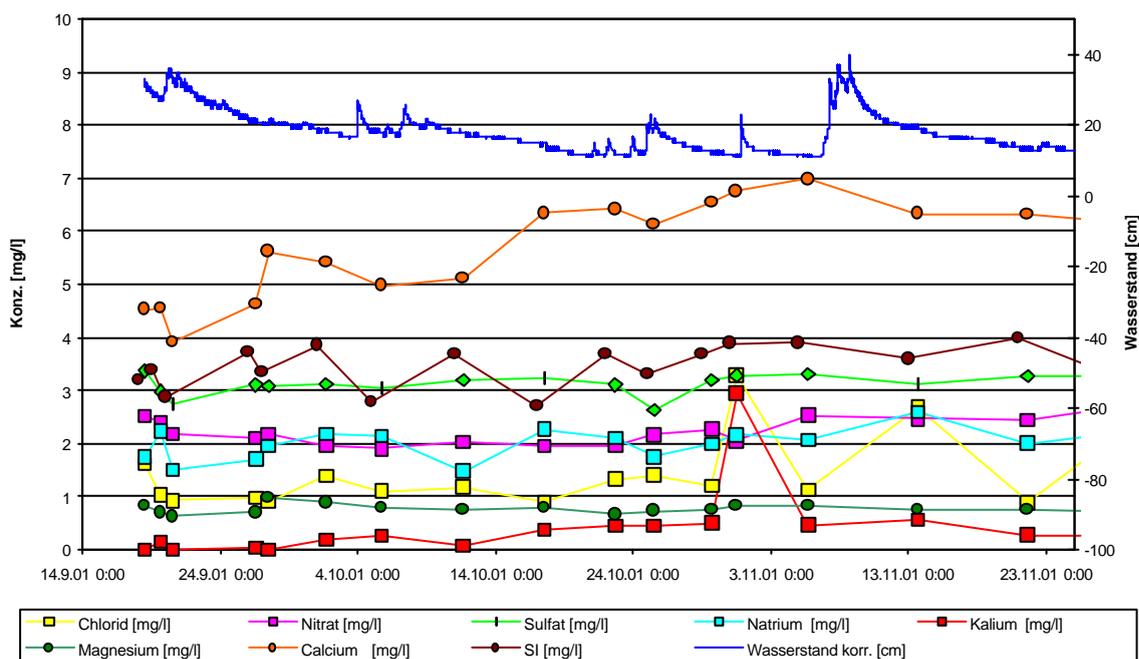


Abb. 4.13: Stichtagsbeprobung Anionen, Kationen und Silikat des St. Wilhelmer Talbachs

Die Silikatkonzentrationen der Grundwassermessstellen schwanken um Werte zwischen 2 und 4 mg/l, die Mittelwerte der Stichtagsproben liegen bei 2,3 bis 3,2 mg/l. Für die Oberflächengewässer ergeben sich geringere Variationsbereiche mit Mittelwerten zwischen 3,4 und 3,8 mg/l.

4.2.7 Diskussion

Die Witterungssituation, hier vor allem die Niederschläge, und die Abflussverhältnisse weisen sehr hohe Zusammenhänge auf. So reagiert der Abfluss der Brugga am Pegel Oberried sehr sensitiv auf Niederschlagsereignisse und kehrt schnell wieder auf das ursprüngliche Ausgangsniveau zurück. Deutlich ist dies Anfang September zu erkennen. Vorausgegangen war eine langanhaltende Trockenperiode seit Anfang Juli, die Anfang des Monats durch heftige Niederschläge, bis über 40 mm, unterbrochen wurde. Der Abfluss stieg infolge dieses Ereignisses innerhalb kurzer Zeit von knapp 1 m³/s auf über 12 m³/s an. Nach dem Niederschlagsereignis erreichte er sehr schnell wieder Werte des Trockenwetterabflusses von unter 1,5 m³/s. Gefolgt wurde dieses extreme Ereignis von einer anhaltend feuchten Witterungsphase im weiteren Verlauf des Septembers, was sich in den Abflüssen, die ständig über dem MQ liegen widerspiegelt. Der Oktober und der November waren im langjährigen Vergleich ausgeglichener und es stellten sich erneut Basisabflussverhältnisse ein, die lediglich durch einzelne Ereignisse unterbrochen wurden. Die Niederschlagsmengen erreichten lediglich 50% der Menge des Septembers. Der Dezember, deutlich zu trocken im Vergleich zur Klimaperiode 1961-1990, zeigt dennoch die typischen langanhaltenden abfallenden Äste. Diese werden von Schneeschmelzereignisse verursacht. Besonders deutlich lässt sich dies Anfang des Monats erkennen, als durch einen Warmlufteinbruch in Verbindung mit ergiebigen Niederschlägen der Schnee bis in höhere Lagen zum schmelzen kam.

Die Reaktionen der GWMS sind ebenfalls sehr stark verknüpft mit den Niederschlagsereignissen. Die Ergebnisse der Korrelationen zwischen der Anstiegshöhe des Grundwasserspiegels und dem 7-Tage-Vorregenindex ergab mit r²-Werten zwischen 0,4 und 0,75 mittlere bis starke Zusammenhänge. Lediglich die GWMS 5 weist mit 0,23 einen schwachen Zusammenhang, und die GWMS 7 einen leicht negativen Zusammenhang auf. Diese Zusammenhänge zeigen die erwarteten Vorstellungen: Bei einer hohen Gebietsfeuchte und bereits erhöhten Wasserständen ergeben sich hohe Grundwasseranstiege. Wenn der Grundwasserstand an den gespannten Grundwasserbereich heranreicht, genügt ein relativ geringer Niederschlag, um für gespannte Verhältnisse, und somit für ein schnelles und hohes Ansteigen der Standrohrspiegelhöhe zu bewirken.

Bei den Untersuchungen mit der Niederschlagsmenge ergeben sich ähnliche Beobachtungen. Hier liegen die Bestimmtheitsmaße zwischen 0,26 und 0,9. Besonders die hangnahen GWMS 6, 7 und 8 zeigen starke Zusammenhänge. Diese Messstellen sind häufig nahe am gespannten Zustand und reagieren sofort auf Niederschlagsereignisse mit Standrohrspiegelanstiegen.

Die Untersuchungen der Zusammenhänge von Niederschlagsmenge bzw. Niederschlagsintensität und der Anstiegsrate der GWMS ergaben eine zunehmend schlechtere Korrelation bei zunehmender Entfernung vom Hang (Abb. 4.14). Dies kann sowohl auf eine

Entfernungszunahme zum Entstehungsgebiet der lateralen Druckübertragung mit resultierender Dämpfung durch Zunahme der Reibungsverluste entlang der Übertragungstrecke zurückgeführt werden, als auch auf eine mögliche Phasenverschiebung der Druckwelle entlang der Ausbreitungstrecke.

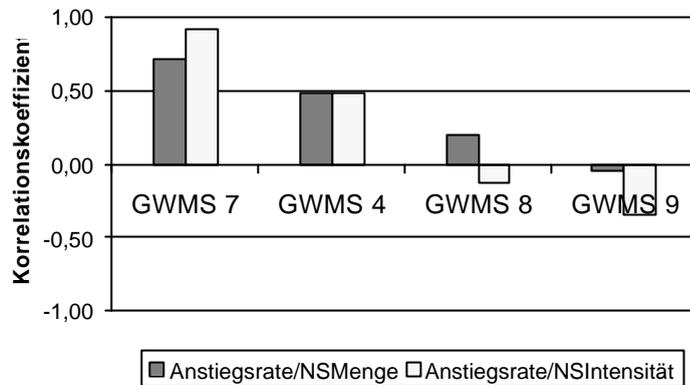


Abb. 4.14: Korrelationskoeffizienten (r) zwischen Anstiegsrate und Niederschlagsmenge, bzw. Niederschlagsintensität am Beispiel des Profils 1

Für die Verringerung der Flurabstände der Grundwassermessstellen sind nicht nur der Vorregenindex, vorhergehender Wasserstand und Niederschlagscharakteristik, wie z.B. Niederschlagsintensität verantwortlich, sondern auch die Niederschlagskontinuität. Dies könnte für eine notwendige Grundwasserakkumulation im Hang sprechen, die nur zustande kommt, wenn sich die Impulse von am verschiedenen Positionen infiltriertem Wasser in der Aue überlagern.

Die Oberflächengewässer im Testfeldbereich zeigen eine unterschiedliche Ausprägung der Reaktionen auf die Niederschlagsereignisse. Während der Talbach im wesentlichen die gleichen Reaktionen wie die der GWMS aufweist, zeigt der Entwässerungsgraben der Sättigungsfläche einen äußerst konstanten Verlauf der Wasserstände. Dies ist auf eine gleichmäßige Schüttung des quellenartigen Bereichs innerhalb der Feuchtbläche zurückzuführen. Dieser Quellbereich speist bei Trockenwetter den Feuchtblächenentwässerungsgraben und stellt somit seinen Basisabfluss dar. Während der Niederschlagsereignisse wird Sättigungsflächenabfluss gebildet, sowohl durch direkt auf diesen Bereich fallenden Niederschlag, als auch durch verstärktes Ausdrücken von Grundwasser infolge lateraler piston flow-Prozesse. Diese Anstiege erfolgen sehr schnell und die Wasserstände fallen genau so schnell wieder ab. Deutlich ist dies an der Reaktion vom 08. November zu erkennen. Der Wasserspiegel im Entwässerungsgraben steigt um 16 cm an (Abb. 4.9), was nicht allein durch die gefallen Niederschläge zu erklären ist, die lediglich 13 mm ergaben. Allerdings lässt sich aufgrund des 7d-VRI von 21 mm eine hohe Gebietsvorfeuchte erkennen, und die GWMS des Profils 1 zeigen sehr hohe, gespannte Wasserstände. Somit kann auf einen hohen Anteil der unterirdischen Komponente

geschlossen werden, d.h. es wurde viel Grundwasser durch die Druckübertragung der Sättigungsfläche zugeführt.

Das veränderte Rezessionsverhalten des Talbachs Anfang Dezember ist mit der Schneeschmelze zu erklären. Durch das Abschmelzen der Schneedecke bis in höhere Lagen fallen dessen Wasserstände vergleichsweise langsamer als jene der GWMS.

Die Messungen der Wassertemperatur deuten darauf hin, dass an allen GWMS der gleiche Aquiferbereich erfasst wurde. Die Temperaturdifferenzen zwischen Minima und Maxima sind zurückzuführen auf die abnehmenden Lufttemperaturen während der Messkampagne, und die Einflüsse der Bohrlochs auf die Wassertemperatur. Die Tatsache, dass keine Wassertemperaturschwankungen der GWMS bedingt durch Tageseinflüsse bzw. Niederschlagsphasen zu erkennen sind, weist auf eine relativ gut abdeckende, den Grundwasserleiter überlagernde Schicht hin, in Verbindung mit einer guten Grundwasserdurchströmung der Grundwassermessstellen.

Auffallend an den Temperaturen der Oberflächengewässer sind die konstant niedrigen Temperaturen. Die Quelle und der Entwässerungsgraben zeigen die konstantesten Temperaturverläufe. Auch Mitte Dezember, als der Feuchtflächenentwässerungsgraben und der St. Wilhelmer Talbach Werte nahe dem Gefrierpunkt zeigen, liegt der Entwässerungsgraben bei über $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dies deutet auf einen großen und tiefliegenden Speicherraum der Quelle hin.

Die stärksten Verdünnungseffekte der Leitfähigkeit (LF) wurden beim Feuchtflächenentwässerungsgraben festgestellt. Verdünnungen von bis zu 40 % sprechen für einen Einfluss des Niederschlags auf die Feuchtfläche. Ein Vergleich der Oberflächengewässer untereinander ergibt, anders als erwartet, eine Abnahme der LF zum Vorfluter hin. An dieser Stelle sollte jedoch das Testfeld nicht als Querschnitt betrachtet werden, da die Leitfähigkeiten des St. Wilhelmer Talbaches durch ein zum Testfeld verschiedenes Einzugsgebiet geprägt sind. Die geringeren elektrischen Leitfähigkeiten des Feuchtflächenentwässerungsgrabens im Verhältnis zum Entwässerungsgraben der Quelle können verursacht sein durch die stetige Verdünnung des Grundwassers entlang seiner Fließbewegung zum Vorfluter durch infiltrierendes Niederschlagswasser. Dem steht allerdings die Annahme entgegen, dass sich bei einer längeren Verweilzeit eine höhere LF durch Lösungsprozesse einstellt. Eine entgültige Erklärung dieses Phänomens konnte nicht ermittelt werden.

Die täglichen Schwankungen des pH-Wertes sind auf den verstärkten Strahlungsinput, und damit auf die hohe photoautotrophe Produktion, zu den Mittagsstunden zurückzuführen. GUNKEL (1996) gibt hierfür als Begründung die Nutzung des Hydrogencarbonates (HCO^-) als Kohlenstoffquelle, und die damit verbundene Abgabe von OH^- durch die Pflanzen an. Hier zeigt der Entwässerungsgraben im Vergleich zum Talbach, bedingt durch die höhere

Primärproduktion, eine größere Variabilität. Die Verdünnungseffekte im pH-Wert der Oberflächengewässer, und hier vor allem beim Entwässerungsgraben, sind begründet in den niedrigen pH-Werten der Niederschläge. Sie liegen laut BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2002) bei einem jährlichen Mittelwert für 1998 von 4,8 an der Station Schauinsland.

Die im Allgemeinen niedrigen Lösungsinhalte der Wässer sind auf die Eigenschaften des Einzugsgebietes und der darin enthaltenen Gesteine und deren Löslichkeit zurückzuführen.

Natrium wird durch Verwitterungsprozesse aus den Gesteinen freigesetzt. Es wird sehr schwach gebunden und unterliegt leicht der Auswaschung. Erhöhte Natriumwerte einzelner Proben sind mit Einträgen aus tierischen Exkrementen zu begründen.

Kalium ist generell nur in sehr geringen Konzentrationen enthalten, da es der Absorption an Tonmineralen unterliegt. Die Einzelproben mit extrem erhöhten Konzentrationen sind auf den Einfluss tierischer Exkremente zurückzuführen. Kalium ist ferner als Nährstoff Minimumfaktor und unterliegt der Aufnahme durch Pflanzen. Die niedrigen Konzentrationen sind somit nicht außergewöhnlich.

Hohe Calcium und Magnesiumwerte sind hauptsächlich begründbar durch ihre leichte Auswaschbarkeit. Höhere Calciumkonzentrationen, im Vergleich zu Magnesium, entstehen durch einen höheren Anteil calciumhaltiger Minerale wie Plagioklase in den Gesteinen des Einzugsgebietes. Die magnesiumhaltigen Minerale, wie Biotite und Cordierite sind im Untersuchungsgebiet weniger zu finden.

Niedrige Chloridwerte sind auf das Fehlen chloridhaltiger Gesteine im Untersuchungsgebiet zurückzuführen. Ein Input findet lediglich durch Niederschläge und tierische Exkremente, worauf die Einzelwerte zurückzuführen sind, statt. Ein Input durch das Ausbringen von Streusalz im Winter hat jedoch Einfluss auf die Chloridwerte des Talbaches, wie im Kap. 4.4 gezeigt wird.

Die Variabilität der chemischen Parameter ist recht gering, trotz sich verändernder Witterungsverhältnisse. Einzelne Proben zeigen dennoch Verdünnungserscheinungen, die eventuell auf Niederschlagsinfiltration zurückzuführen sind. Gründe für die sonst ausgeglichene chemische Signatur kann eine schnelle Lösungskinetik sein, so dass infiltriertes Niederschlagswasser während der Bodenpassage rasch aufkonzentriert wird.

4.2.8 Fazit

Festzuhalten ist, dass eine hohe Vorfeuchte im Gebiet im Zusammenhang steht mit einer starken Reaktion der Standrohrspiegelhöhen der GWMS infolge Niederschläge. Der Zusammenhang zwischen Vorregenindex bzw. Niederschlagsmenge und Reaktion der

GWMS wurde nachgewiesen. Ein Zusammenhang mit der Niederschlagsintensität muss differenziert betrachtet werden. Hier scheint eine Abhängigkeit der Reaktion der Messstellen von der Länge der Druckübertragung eine Rolle zu spielen. Exemplarisch wurden die Ganglinien einer GWMS und eines Oberflächengewässer dargestellt und in Bezug zu den Niederschlägen gesetzt. Dieser allgemeine Zusammenhang entsprach den Erwartungen an die Reaktionen. In einem weiteren Schritt müssen nun die Reaktionen der GWMS untereinander untersucht werden, um die räumliche Vernetzung der Druckübertragung zu verstehen.

Die chemischen Parameter erwiesen sich als sehr konstant. Lediglich eine leichte Zunahme einzelner Parameter, wie z.B. Calcium, während anhaltender Trockenheit konnte festgestellt werden. Dies lässt auf eine langsame und gleichförmige Fließbewegungen am Hangfuß und in der Talaue schließen.

4.3 Laterale Interaktionen und Druckwellenausbreitung

4.3.1 Reaktionen der Standrohrspiegelhöhen

Die Reaktionen der Standrohrspiegelhöhen der Grundwassermessstellen auf Niederschlagsereignisse wurden für den gesamten Zeitraum anhand 19 ausgewiesener Ereignisse in Kap. 4.2.3 dargestellt. Hier standen die Reaktionen der einzelnen GWMS im Vordergrund. In diesem Kapitel wird nun der räumliche Bezug der einzelnen Messstellen untereinander hergestellt, was für die Interpretationen der Ergebnisse, besonders im Hinblick auf eine Druckwellenausbreitung, von besonderer Bedeutung ist. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Anzahl der Ereignisse nicht repräsentativ ist. Dennoch muss auf diese Weise eine statistische Betrachtung stattfinden, um die generellen Zusammenhänge zu verdeutlichen. In der Abb. 4.15 sind die Ganglinien des Profils 1, vom Hang bis hin zum Vorfluter dargestellt. Für das Profil 2 findet sich diese Darstellung in Abb. A19 im Anhang.

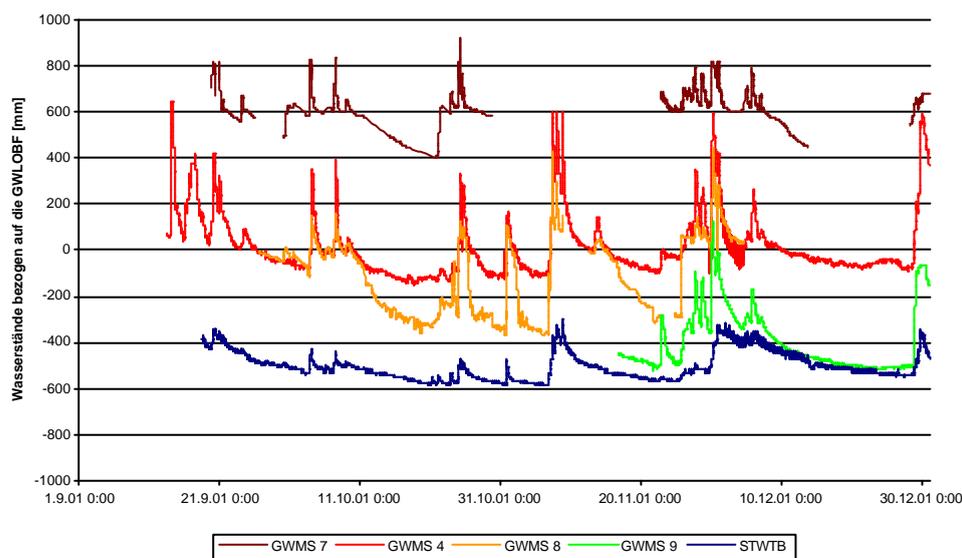


Abb. 4.15: Vergleich der Grundwasserganglinien des Profils 1 und des Talbaches bezogen auf die GWLOBF

Da die ereignisbezogenen Reaktionen auf den ersten Blick keine klaren raum-zeitlichen Abfolgen aufzeigen, wurde im ersten Schritt der Auswertung versucht die Charakteristika der 19 Ereignisse miteinander in Beziehung zu setzen. Hierzu wurden vier verschiedene Gangliniencharakteristika der Standrohrspiegelhöhen der GWMS untersucht. Dazu gehört der „Ereignisbeginn“, der „Scheitelwasserstand“, die „Anstiegszeit“ der Ereignisse und deren „Anstiegsrate“.

Die Korrelationen zwischen dem Parameter „Ereignisbeginn“, d.h. die Verzögerungszeit zwischen Niederschlagsereignis und erster Ganglinienreaktion der Standrohrspiegelhöhen, weisen zum Teil hohe Korrelationen auf (vgl. Tab. A7 im Anhang). Die Messstelle 10 fällt hier allerdings aus der Reihe, was mit der nicht repräsentativen Datengrundlage zusammenhängt. Augenfällig sind die hohen Korrelationen der GWMS 1 mit den übrigen Messstellen. Für eine getrennte Betrachtung nach Profilen ergeben sich für das Profil 2 generell mittlere bis starke Zusammenhänge, mit Ausnahme der Messstellen 5 und 2, die einen Korrelationskoeffizienten von $r = -1$ ergaben. Für das Profil 1 sind ebenfalls keine durchgängigen hohen Zusammenhänge erkennbar. So ergaben sich für die Messstellen 7 und 4 nur schwache Zusammenhänge. Die Auswertung des Parameters „Scheitelwasserstand“ ergab generell hohe Zusammenhänge aller Messstellen untereinander (vgl. Tab. A8 im Anhang). Die Ausnahme bildet GWMS 7, die mit GWMS 1 bzw. GWMS 3 nur schwache Zusammenhänge aufzeigt. Innerhalb der Profile besitzen die GWMS aber starke Zusammenhänge mit Korrelationskoeffizienten $r > 0,79$ für beide Profile.

Die beiden Parameter „Anstiegszeit“ und „Anstiegsrate“ sollen das dynamische Verhalten der einzelnen GWMS untereinander in Bezug bringen. Die Betrachtung der „Anstiegszeit“ (vgl. Abb. A9 im Anhang) ergab jedoch weniger klare räumliche Zusammenhänge. Zwar finden sich auch hier für das Profil 1 generell starke Zusammenhänge, jedoch fällt die GWMS 8 aus der Reihe. Auch innerhalb des Profils 2 finden sich Messstellen, so z.B. GWMS 2, die lediglich schwach mit den übrigen korreliert sind. Der Vergleich der „Anstiegsrate“, d.h. der Quotient aus Anstiegshöhe und Anstiegszeit (vgl. Tab. A10 im Anhang) ergab ebenfalls unterschiedliche, nicht über die gesamten Profile einheitliche, Zusammenhänge. Bei diesem Parameter traten ebenfalls negative Korrelationen auf.

Um die räumliche Abfolge der Reaktionen in einen Zusammenhang zu bringen, wurden in einem zweiten Schritt die Ränge und Verzögerungszeiten der GWMS ermittelt. Als Charakteristikum der GWMS wurde die „Scheitelzeit“, also der Zeitpunkt der Ganglinie ermittelt, an dem der Grundwasserstand seinen Maximalwert erreicht. Dieser Parameter wurde gewählt, da er die am besten zu ermittelnde Zeit der Ganglinie darstellt. Die Rangfolge gibt an in welcher Reihenfolge die GWMS reagieren. Die Messstelle, welche als erste den Scheitel erreicht bekommt den Wert 0, die zweite den Wert 1 usw. Zur besseren Vergleichbarkeit der GWMS wurde zusätzlich eine Verzögerungszeit ermittelt. Die Verzögerungszeit wird mittels einer Zeitdifferenz zur Scheitelzeit der GWMS mit dem

Rang 0 bestimmt. Beide Parameter werden für jedes Ereignis separat bestimmt und über alle Ereignisse gemittelt. Aufgrund der Tatsache, dass die Installation der GWMS zeitgleich mit der Datenerhebung weitergeführt wurde, sind nicht für alle Ereignisse des Untersuchungszeitraumes Daten für alle GWMS verfügbar. Aus diesem Grund findet die Auswertung auf der Basis von Ereignissen statt, bei denen jeweils die Daten von 5 Messstellen vorliegen. Ein Vergleich der Auswertungen mit veränderter Ereigniszahl ergab, dass sowohl bei den Rängen als auch bei den Zeiten kein bedeutender Unterschied festzustellen ist, wenn mehr Ereignisse eingeschlossen werden. Hingegen zeigen sich signifikante Abweichungen falls lediglich 3 Ereignisse berücksichtigt werden.

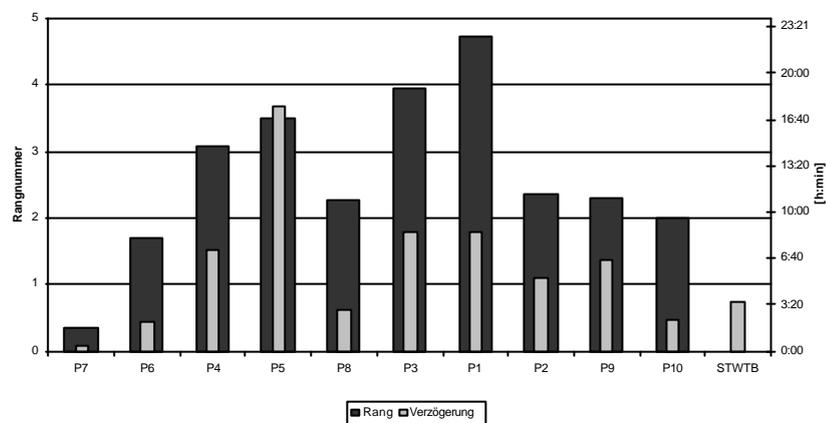


Abb. 4.16: Mittelwerte der Rangfolge der Scheitelzeiten und Verzögerungszeiten

In Abb. 4.16 sind die Rangfolgen und Verzögerungszeiten aller GWMS aufgetragen. Deutlich ist eine Zunahme der Rangnummer bis zur Terrasse (GWMS 3 und 1) mit Ausnahme der GWMS 8 erkennbar. Mit Annäherung an den Vorfluter sinken diese jedoch wieder ab.

Die Verzögerungszeiten zeichnen dieses Bild im wesentlichen nach. Allerdings weist hier die GWMS 5 eine sehr lange Verzögerungszeit auf.

Die Aufteilung des Testfeldes in die Profile ergibt ein deutlich unterschiedliches Bild. Es zeigt eindrücklich den Unterschied der beiden Traversen. Das Profil 1 in Abb. 4.17 spiegelt einen Aquiferbereich wider, in dem überall sehr schnell gespannte Verhältnisse erreicht werden und in dem eine Druckübertragung relativ schnell vollzogen werden kann. Die sich am Hang befindende GWMS 7, an der zusätzlich ständig gespannte Verhältnisse vorzufinden sind, reagiert am schnellsten, und weist somit auch die geringsten Verzögerungszeiten auf. Die übrigen Messstellen dieses Profils zeigen ein ausgeglichenes Reaktionsverhalten. Die Ränge bewegen sich in einem Bereich zwischen 2,25 und 3,07. Die Verzögerungszeiten sind mit durchschnittlich zwischen 3 bis 7 Stunden ebenfalls gering.

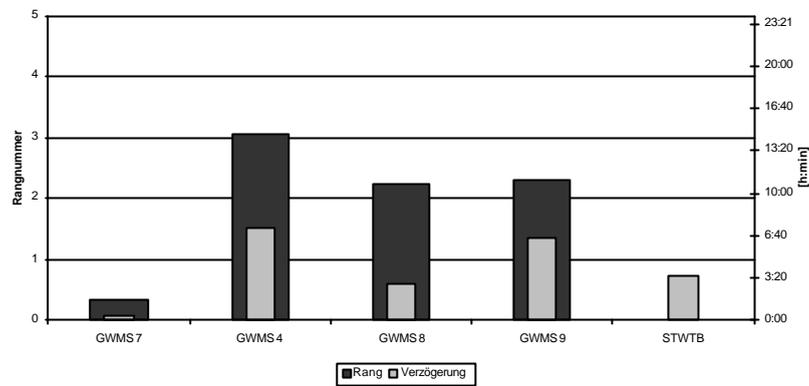


Abb. 4.17: Rangfolge der Scheitelzeiten und Verzögerungszeiten des Profils 1

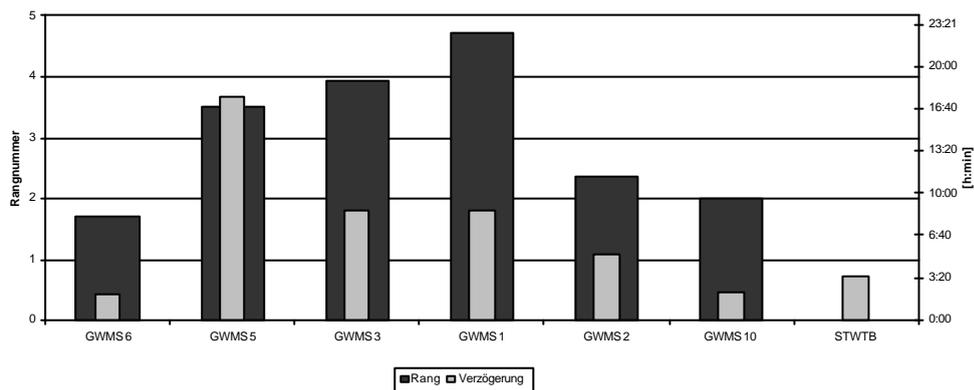


Abb. 4.18: Rangfolge der Scheitelzeiten und Verzögerungszeiten des Profils 2

Ein ganz anders Bild zeigt das Profil 2. Zwar reagiert auch hier die am Hang gelegene GWMS 6 als erste, jedoch mit einem höheren mittleren Rang von 1,7. Auch die übrigen Messstellen weisen Unterschiede zum Profil 1 auf. Die sich nördlich der Terrasse befindenden GWMS besitzen höhere Ränge, und zwar zunehmend entlang des Profils in Richtung Terrasse. Mit einer durchschnittlichen Rangnummer von 4,71 ist die Reaktion der GWMS 1, auf der Terrasse gelegen, am spätesten. Die Rangfolgen und Verzögerungszeiten nehmen mit Richtung auf den Vorfluter wieder ab. Ausnahme bildet hier, die bereits oben erwähnte Messstelle 5.

4.3.2 Druckwellenausbreitung

Die Dynamik des Hanggrundwassers wurde in seiner zeitlichen Dimension, die in erster Linie vom Verlauf des Niederschlagsereignisses, d.h. der Niederschlagsmenge und der Intensität, und den Eigenschaften des Aquifers abhängt, im Kap. 4.2. Hinzu kommt die räumliche Dimension, d.h. die Reaktion der einzelnen Pegel im Verhältnis zueinander. Beide Dimensionen können einzeln betrachtet gute Aussagen zur Abflussdynamik liefern, jedoch erst bei einer gleichzeitigen Betrachtung werden die Zusammenhänge des Druckaufbaus und der Druckausbreitung entlang des Hangfußes und der Talaue greifbar. Aus diesem Grund wurde am Beispiel des Ereignisses vom 29.11.01 bis 4.12.01 die räumliche und zeitliche Dynamik des Hanggrundwassers ausgewertet.

Die Grundwasserspiegelhöhen der einzelnen Beobachtungsstellen wurden in das Geographische Informationssystem ARC-VIEW® eingelesen und mit Hilfe der „Inverse Distance Weighting (IDW)“-Methode interpoliert. Diese Interpolationsmethode interpoliert Punktwerte, mit der Annahme, dass jeder Punktwert einen lokalen Einfluss hat, der mit zunehmender Entfernung zum Ausgangspunkt abnimmt (BURROUGH & MCDONNELL 1998). Das Ergebnis ist eine Karte der interpolierten Grundwasserspiegelhöhen für jeden Zeitschritt. Zur Darstellung der Dynamik werden zwölf markante Zeitschritte herausgegriffen. Als Beispiel zeigt Abb. 4.19 die Ganglinien der GWMS 1 und 9. Die Wasserstände beziehen sich auf die Grundwasserleiteroberfläche, positive Werte bedeuten gespanntes Grundwasser, negative Werte stehen für freie Grundwasserverhältnisse. Die Abb. 4.20 zeigt die Ergebnisse der Interpolation über das Testfeld.

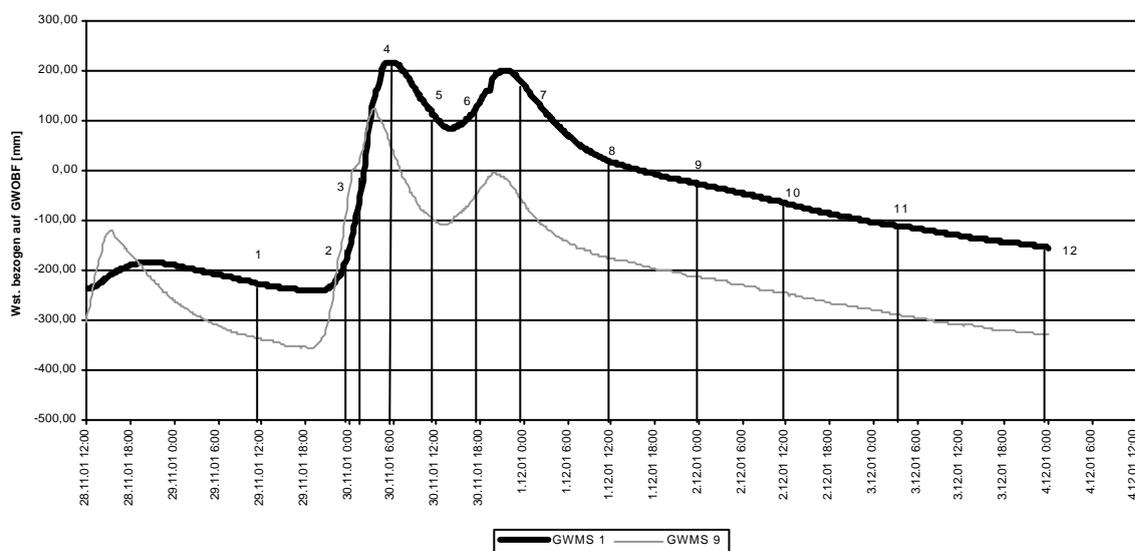


Abb. 4.19: Beispiel einer Grundwasserganglinie während des Ereignisses mit ausgewählten Zeitschritten ($t = 1$ bis $t = 12$).

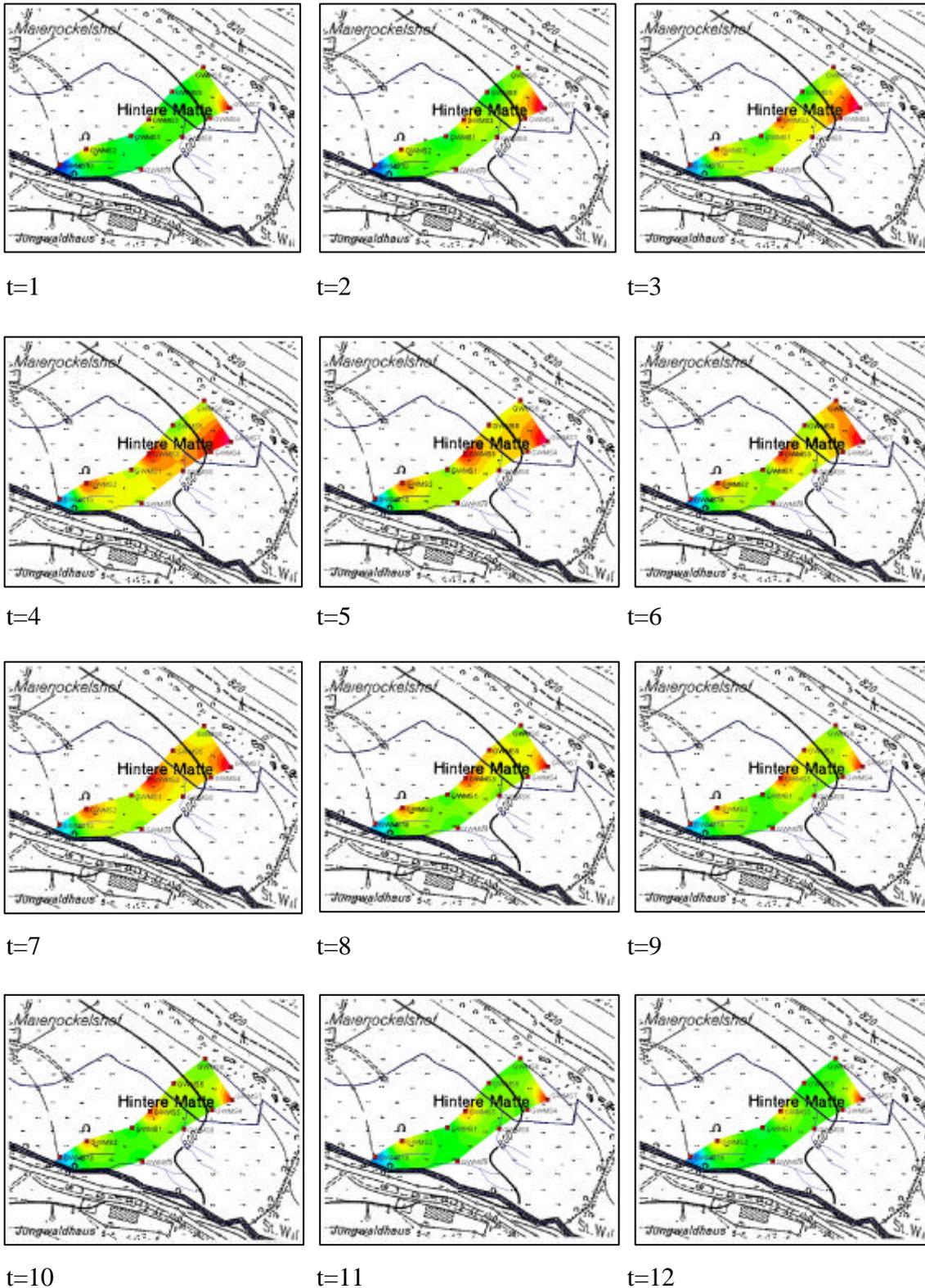
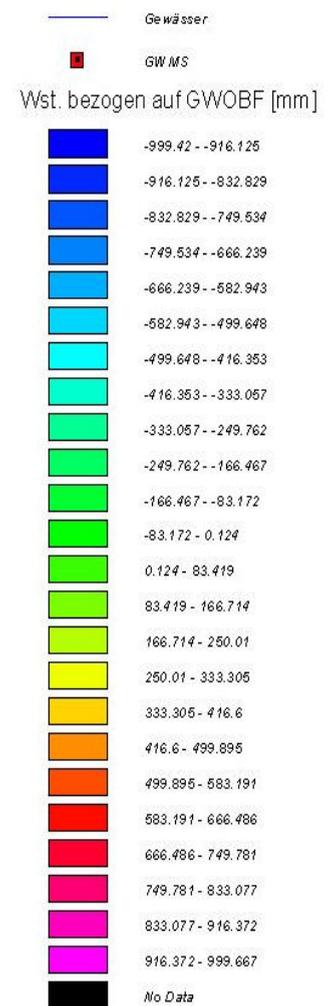


Abb. 4.20: Interpolationen der Wasserstände für das Ereignis vom 29.11.2001 bis 4.12.2001

Zu Beginn des Ereignisses ($t = 1$) ist deutlich erkennbar, dass das Grundwasser an der GWMS 7 am Hang gespannt ist. Dies verändert sich über das Ereignis nicht. Im Gegensatz dazu finden sich an der vorfluternahen GWMS 10 immer freie Grundwasserstände. Der Wasserstand steigt hier um 244 mm an, erreicht aber nie die Grundwasserleiteroberfläche (GWLOBF). Alle dazwischen liegenden GWMS sind gespannt, bzw. erreichen während des Ereignisses den gespannten Zustand.

Für das Profil 1 baut sich vom Hang (GWMS 7) ausgehend ein Druck auf, der sich bereits zum Zeitpunkt $t = 3$ bis zur GWMS 9 ausgebreitet hat, und das gesamte Profil befindet sich zu diesem Zeitpunkt durchgängig im gespannten Grundwasserbereich. Zum Zeitpunkt $t = 5$ bricht für kurze Zeit diese Druckübertragung ab, und der Wasserstand an der GWMS 9 fällt zurück unter die GWLOBF. Ausgelöst durch die zweite Niederschlagsphase ist wiederum ein schneller Ansteigen bis hin zum gespannten Bereich zu verzeichnen. Dieser ist allerdings nicht so stark ausgeprägt, so dass bereits zum Zeitpunkt $t = 7$ die Druckübertragung für das Profil 1 zum Erliegen kommt.

Die Reaktionen des Profils 2 sind dagegen sehr viel komplexer. Zwar ist auch bei diesem Profil die am Hang gelegenen Messstelle 6 gespannt, und es kann sich ebenfalls ein Druck in Richtung Vorfluter aufbauen. Dieser erreicht allerdings den Vorfluter nicht, sondern wird, wie die Messstelle 10 eindeutig belegt, im vorfluternahen Bereich unterbrochen.



..... Abb.4.21: Legende der Abb. 4.20

4.3.3 Verhalten der Chemischen Parameter

Um die räumliche Variabilität der chemischen Parameter aufzuzeigen, werden die einzelnen Parameter im Profilverlauf betrachtet. Die folgenden Abbildungen zeichnen das Testfeld angefangen mit dem Hang, über den Hangfußbereich, die Terrasse, bis hin zum vorfluternahen Bereich nach. Einschaltet sind die Oberflächengewässer in ihrer entsprechenden Lage, Quellbach, Entwässerungsgraben, Feuchtflächenentwässerungsgräben und St. Wilhelmer Talbach. Somit ergibt sich jeweils ein Querschnitt durch das Testfeld.

Einige der Parameter zeigen eine auffallende Differenz zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser. Für einige der Parameter kann eine tendenzielle Veränderung entlang der Fließwege festgestellt werden.

Die *Chloridkonzentrationen* zeigen entlang des Querschnitts keine räumliche Tendenz (Abb. 4.22). Die Werte der GWMS liegen mit Mittelwerten bis zu 8 mg/l generell höher als die der Oberflächengewässer mit Werten um 1,5 mg/l. Auffallend bei diesem Parameter ist die hohe zeitliche Variabilität der GWMS 5 und 7. Vereinzelt Ausreißer der Messstellen 1, 2 und 8 sind zu verzeichnen.

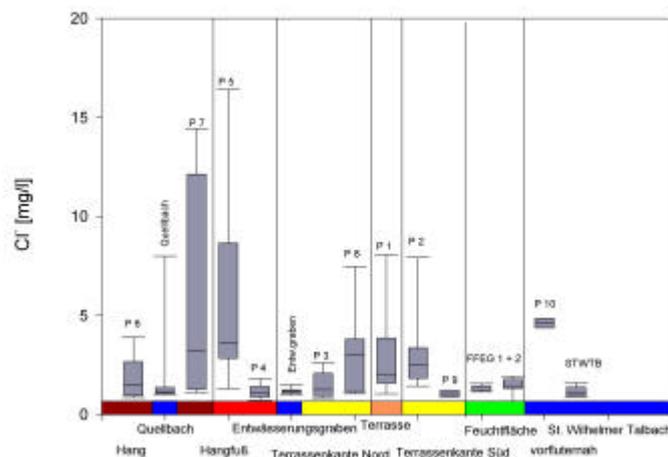


Abb. 4.22: Chloridkonzentrationen im Testfeldprofil

Die *Nitratkonzentrationen* sind im allgemeinen sehr gering und liegen um 1 mg/l. Beim Nitrat sind ebenfalls keine Tendenzen erkennbar. Deutlich heben sich jedoch die erhöhten Werte der Oberflächengewässer mit Mittelwerten bis zu 3,59 mg/l ab.

Sulfat zeigt ein sehr heterogenes Bild, ohne tendenzielle räumliche Entwicklung. Die Mittelwerte der Messstellen schwanken zwischen 2,95 mg/l und 5,71 mg/l.

Die *Natriumkonzentrationen* liegen in einem ausgeglichenen Wertebereich von 1 mg/l bis hin zu 3,3 mg/l. Ähnlich verhalten sich die *Kaliumkonzentrationen*. Sie zeigen neben Chlorid die höchsten Variabilitäten aller untersuchter Parameter. Auffallend erhöhte Werte zeigen sich an den Messstellen 1, 2, 5 und 8 mit Ausreißern bis über 50 mg/l.

Die Entwicklungen der Parameter Nitrat, Sulfat, Natrium und Kalium finden sich im Anhang Abb. A20 bis Abb. A23.

Die beiden Erdalkaliionen *Magnesium* (Abb. 4.23) und *Calcium* (Abb. 4.24) zeigen eine deutliche Abnahme der Konzentration entlang des Testfeldes. Magnesium geht von 2,23 mg/l

(GWMS 7) auf 0,77 mg/l (St. Wilhelmer Talbach) zurück, Calcium von 12,65 mg/l (GWMS 7) auf 5,69 mg/l (St. Wilhelmer Talbach).

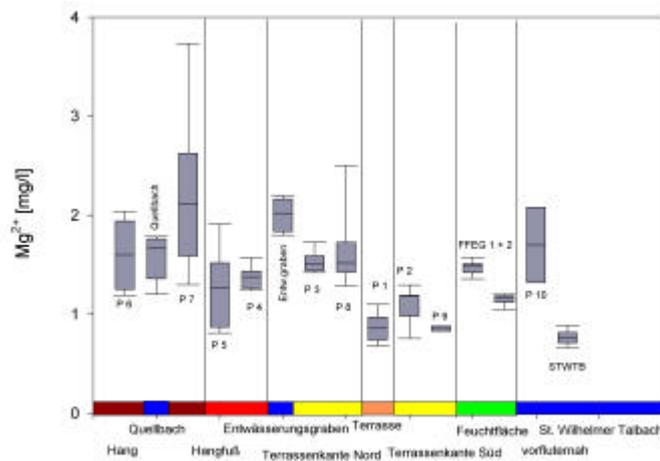


Abb. 4.23: Magnesiumkonzentrationen im Testfeldprofil

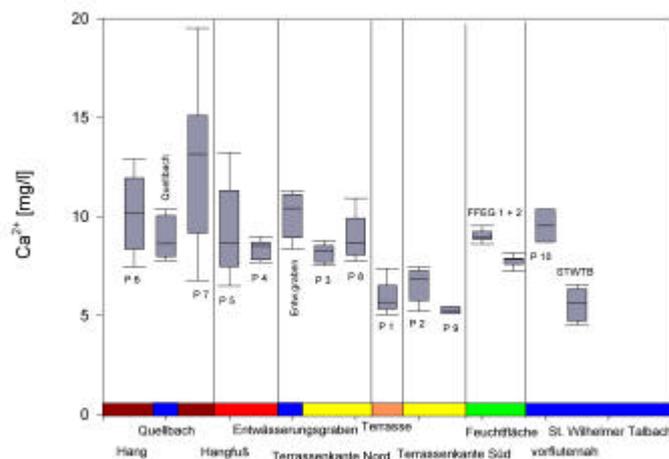


Abb. 4.24: Calciumkonzentrationen im Testfeldprofil

Für die *Silikat*konzentrationen ergibt sich ein gegenläufiges Bild (Abb. 4.25). Hier zeigt sich eine leichte Zunahme der Konzentrationen entlang des Fließweges. Die höchsten Konzentrationen weist der Quellbach, und der Entwässerungsgraben auf. Einige Messstellen reagieren während Niederschlagsereignissen mit Verdünnungseffekten. Um diese Effekte auszuschließen, wurden lediglich Werte ohne Witterungseinfluss betrachtet. Die Werte

entwickeln sich von 2,48 mg/l (GWMS 6) bis hin zu 3,72 mg/l (Feuchtflächenentwässerungsgraben).

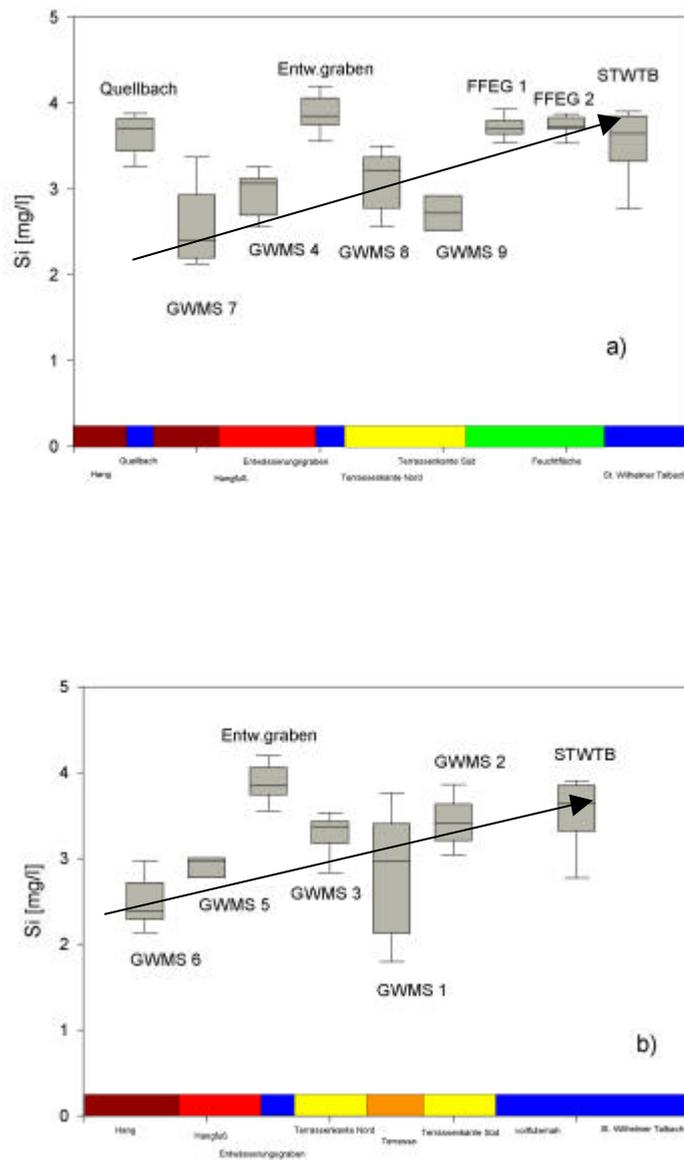


Abb. 4.25: Silikatkonzentrationen im Testfeldprofil. a) Profil 1; b) Profil 2

4.3.4 Diskussion

Die Rangfolgen und die Verzögerungszeiten der GWMS hängen ursächlich davon ab, ob die Messstelle gespannt oder ungespannt ist, bzw. wie langsam oder schnell gespannte Verhältnisse erreicht werden. Wie aus Abb. 4.15 deutlich wurde, zeigen die GWMS, deren Wasserspiegel sehr nah an der Grundwasserleiteroberfläche (GWLOBF) liegt, bzw. sich ständig darüber befindet, die schnellsten Reaktionen. So sind beide Hangmessstellen der zwei Profile, GWMS 6 und 7, diejenigen, welche als erste auf Niederschlagsereignisse reagieren. Ab dem Hangfußbereich müssen jedoch die beiden Traversen getrennt voneinander betrachtet werden. Während beim Profil 1 die Druckübertragung funktioniert, d.h. alle GWMS innerhalb des Ereignisses gespannte Verhältnisse aufweisen, und sich somit die Druckwelle Richtung Vorfluter ausbreiten kann, bewirken die Untergrundverhältnisse des Profils 2, dass die Druckübertragung stellenweise nicht durchgängig vorhanden ist. Die Messstelle 1 erreicht nicht bei jedem Ereignis die GWLOBF. Auffallend ist, dass die Rangfolgen und Verzögerungszeiten in Richtung Vorfluter wieder abnehmen. Zum einen zeigt die GWMS 2 durchgängig gespannte Verhältnisse, was zur schnellen Reaktion und zum raschen Ansteigen führt. Zum anderen wird die Reaktion der vorfluternahen Messstelle 10, wie aus Kap. 4.4 ersichtlich, von der Reaktion des St. Wilhelmer Talbaches beeinflusst. Zur Veranschaulichung wurde die Verzögerungszeit des Talbaches in den Abb. 4.17 und 4.18 mit aufgetragen. Die Tatsache, dass die Verzögerungszeit der GWMS 10 im Vergleich zum Talbach kürzer ist, obwohl diese von ihm mit beeinflusst wird, hängt damit zusammen, dass es sich hier um eine Kombination aus Hanggrundwasserdynamik und Vorfluterdynamik handelt. Die GWMS 10 befindet sich im Einflussbereich beider Teilsysteme.

Die extrem lange Verzögerungszeit der GWMS 5 ist auf den tiefliegenden Grundwasserspiegel in diesem Bereich und auf die Substratzusammensetzung zurückzuführen. Der Flurabstand ist generell sehr groß, d.h. ein großer Aquiferbereich muss erst langsam aufgefüllt werden, damit der Wasserspiegel im Beobachtungsrohr steigt, und der gespannte Bereich erreicht wird. Dies hängt wohl hauptsächlich mit dem sandig-kiesigen Aquifermaterial zusammen, welches in der alten Flutrinne zu finden ist. Dort besteht dann die Möglichkeit, dass das Grundwasser entsprechend des hydraulischen Gefälles unterirdisch lateral abfließen kann.

Die Ergebnisse der Korrelationen von Gangliniencharakteristika der GWMS untereinander wiesen zum Teil hohe Korrelationskoeffizienten auf. Dies bestätigte die Beobachtungen, dass alle Messstellen im Prinzip ähnlich auf die Niederschlagsereignisse reagieren. Ziel dieser Untersuchung war ein räumliches Muster der Reaktionen aufzuzeigen. Die dynamischen Parameter Anstiegszeit und Anstiegrate ergaben allerdings keine neuen Erkenntnisse. Das ist darauf zurückzuführen, dass die lokalen Aquifereigenschaften das großräumige Verhalten überprägen. Ebenfalls keine durchgängigen Korrelationen waren beim Parameter

„Ereignisbeginn“ festzustellen. Hier finden sich immer wieder Messstellen deren Reaktionen nicht mit den anderen konform laufen. Einzig der Wasserstand, entsprach den Erwartungen, hier wiesen die Korrelationskoeffizienten beider Profile hohe Werte auf, was auf starke Zusammenhänge schließen lässt.

Die Interpolationen der Grundwasserstände während des Ereignisses vom 29.11.2001 bis 4.12.2001 veranschaulichen die Druckwellenausbreitung deutlich. Besonders für das Profil 1 ist diese in Ihrem zeitlichen Verlauf, vom Hangbereich über die Terrasse bis hin zur sättigungsflächennahen GWMS 9 deutlich zu erkennen. Abb. A24 zeigt den Verlauf der einzelnen Ganglinien. In dieser Abbildung ist eine Abnahme der Anstiegshöhen in Richtung des Vorfluters zu erkennen, so dass für dieses Ereignis die GWMS 9 nur zu Zeiten der beiden Scheitel gespannte Verhältnisse aufzeigt. Diese Abnahme des Drucks kann zum einen durch einen mächtiger werdenden Aquifer in Richtung Vorfluter begründet sein, zum anderen an einer Zunahme der Durchlässigkeiten im vorfluternahen Bereich liegen. Aufgrund der eingeschränkten Tiefeninformation für Bereiche >2 m kann keine eindeutige endgültige Bewertung gegeben werden.

Für das Profil 2 zeigte sich ein weitaus differenzierterer Druckverlauf. Eine Abnahme des Druckes in Richtung Vorfluter konnte nicht so eindeutig festgestellt werden. Deutlich wird in diesem Profil, dass im vorfluternahen Bereich die bereits oben erwähnten Gründe zum Abbruch der Druckübertragung führen. Ebenfalls stellt der in diesem Profil stärker ausgeprägte Terrassenbereich mit der GWMS 1 eine Schwachstelle (Abb. 4.18) der Druckübertragung dar. Der zeitliche Ablauf sowie die Anstiegshöhen in den gespannten Bereich weisen auf keine einheitliche Drückausbreitung in diesem Bereich hin.

Die oft deutlichen Unterschiede zwischen den chemischen Parametern der GWMS und denen der Oberflächengewässer sind durch verschiedene Prozesse und Verhältnisse zu erklären. Die Oberflächengewässer mit ständigem Kontakt zur Atmosphäre, dem Strahlungsinput und den biologischen Prozessen mit Stoffumsätzen und vor allem der Sauerstoffproduktion, zeigen vor allem in den Anionen Nitrat und Sulfat generell erhöhte Werte.

Das Chlorid, das aufgrund seiner Eigenschaften (vgl. Kap. 3.2.3.1) sehr mobil ist, zeigt keine Tendenzen entlang des Testfeldes. Einzelne erhöhte Werte sind zum Teil auf tierische Einflüsse zurückzuführen. Die niedrigen Nitratwerte der GWMS, sind auf eine rasche anaerobe Reduktion des NO_3 im oberflächennahen Grundwasser zurückzuführen. Hohe Variabilitäten der Parameter Chlorid und Kalium weisen auf die externe Beeinflussungen durch tierische Stoffeinträge hin.

Die Abnahme der Erdalkalikonzentrationen kann mit der Zunahme der Fließlänge begründet werden. Aufgrund der starken Bindung im Boden durch Tonminerale, werden sie dem Grundwasser sukzessive entzogen. Eine weitere Erklärung der erhöhten Konzentrationen in

Richtung Neubildungsgebiet kann die von Zeit zu Zeit stattfindende anthropogene Kalkung mittels Hubschrauber im Einzugsgebiet sein.

Die Zunahme der Silikatkonzentrationen um über 1,5 mg/l entlang des Testfeldes ist auf eine länger werdende Verweilzeit im Aquifer zurückzuführen. Die erhöhten Konzentrationen der Quelle und somit auch des Entwässerungsgrabens beruhen auf einem, zum Testfeld verschiedenen, großen und ausgeglichenen Speicherraum mit tieferen Fließwegen. Dies wurde auch durch die Ergebnisse der Temperatur- und Leitfähigkeitsaufzeichnungen, die im Kap. 4.2.4 dargestellt wurden, bestätigt.

4.3.5 Fazit

Die Auswertungen der Rangfolgen und Verzögerungszeiten zeigten die gravierenden Unterschiede der beiden Profilen. Während die GWMS des Profil 1 relativ zeitgleich reagieren und geringe Verzögerungszeiten aufweisen, zeigen die GWMS des Profils 2 unterschiedliche Reaktionszeiten mit zum Teil sehr langen Verzögerungszeiten, die auf nicht immer durchgängige Druckübertragungen schließen lassen. Diese Erkenntnisse wurden durch die Detailbetrachtungen für das Ereignis vom 29.11.2001 bis 4.12.2001 bestätigt. Hierbei zeigte sich die Heterogenität der Aquifereigenschaften in eindrucksvoller Weise. Es konnte gezeigt werden, dass eine Druckübertragung entlang des Profils 2 nicht durchgängig gegeben ist, und dass der vorfluternahe Bereich einen freien Grundwasserspiegel aufweist.

In einer weiteren Untersuchung (vgl. Kap. 4.4) wird zu zeigen sein, wie sich diese Grundwasserverhältnisse auf die Sättigungsfläche und die Interaktion des Grundwassers mit den Talbach auswirken.

4.4 Ereignisbeprobung

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die zeitlichen und räumlichen Reaktionen der GWMS und ihrer Parameter über den gesamten Beobachtungszeitraum dargestellt und diskutiert. Um die hohe zeitliche und räumliche Hang- und Talauendynamik besser zu erfassen und zu beschreiben, wurde Ende November eine intensive Ereignisbeprobung durchgeführt. Hierzu kamen 6 automatische Probennehmergeräte (APEG) zum Einsatz: ein volumengesteuerter APEG zur Niederschlags Erfassung, zwei zeitgesteuerte APEG für die Oberflächengewässer St. Wilhelmer Talbach und Feuchtplächenentwässerungsgraben und drei APEG für die Beprobung der Grundwassermessstellen 4, 9, und 10.

4.4.1 Witterungssituation und Niederschlagsbeprobung

Die dominierende Witterungssituation war, wie im Kap. 4.2.1 beschrieben, eine winkelförmige Westlage, die vom 25.11. bis zum 06.12.2001 anhielt. Niederschläge vor dem 25.11. fielen teilweise als Schnee, und es bildete sich eine ca. 5 cm mächtige geschlossene Schneedecke auf dem Testfeld. Ab dem 24.11. stiegen die Lufttemperaturen wieder über den Gefrierpunkt, so dass ein Abschmelzen der Schneedecke begann. Der daraufhin gemessene Niederschlag von 12,7 mm am 25.11.2001 ist wahrscheinlich bedingt durch Schneeschmelze im Messgerät, als zu hoch einzuschätzen. Die Standrohrspiegelhöhen der Grundwasserbeobachtungsstellen reagieren auf dieses Ereignis nicht in dem Maße, wie es bei einer solchen Niederschlagsmenge zu erwarten gewesen wäre. Die Niederschläge am 27.11. und 28.11. waren mit Gesamtmengen von 9,8 mm bzw. 12,6 mm von mittlerem Ausmaß, und trotz Tauwetters war noch am 28.11. eine Schneedecke von 3 cm vorhanden. Das Niederschlagsereignis während der Intensivmessphase begann am 29.11. um 18:20 h und dauerte bis zum 30.11. um 21:40 h an. Es brachte insgesamt eine Niederschlagsmenge von 41,0 mm, welche auf zwei Hauptniederschlagsphasen verteilt war, was sich in den Ganglinien der Grundwasserbeobachtungsstellen widerspiegelt. Dieses Ereignis war das drittgrößte während des gesamten Messzeitraumes. Eine anhaltend warme Witterung in Verbindung mit reichlich Niederschlägen führte zu einem kompletten Abschmelzen der Schneedecke bis zum 01. Dezember. Vom 01.12. bis 04.12. fielen weitere Niederschläge, allerdings mit geringen Gesamtmengen von < 1 mm. Sie führten zu keinen weiteren Reaktionen der Standrohrspiegelhöhen. Die Abb. 4.26 zeigt den Temperaturverlauf und die Niederschläge während der Ereignisbeprobung.

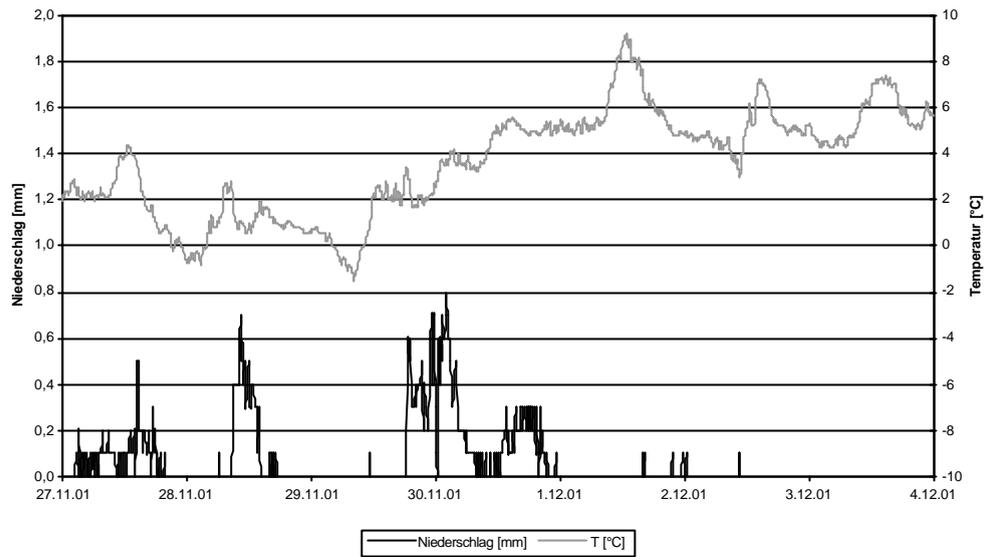


Abb. 4.26 : Verlauf des Niederschlags und der Lufttemperatur an der Klimastation Katzensteig

Die Niederschlagsbeprobung wurde mit Hilfe eines APEG durchgeführt. Dieses füllt ein mit 3,6 cm³ definiertes Niederschlagsvolumen in die Probenflaschen ab, was einer Niederschlagsmenge von ca. 1,8 mm entspricht. Die abgefüllten Niederschlagsproben summierten sich zu einer Gesamtniederschlagssumme von 43,96 mm. Der zur Erfassung der hohen zeitlichen Niederschlagsverteilung installierte Pluviograph ermittelte für das Ereignis eine Niederschlagssumme von 40,74 mm. Ein Vergleich der Niederschlagsmessung findet sich in Abb. A25 im Anhang. Die Niederschlagsproben wurden auf ihre chemischen Inhaltsstoffe und Deuteriumgehalte untersucht, um zeitlich hoch aufgelöste Inputwerte für die im Kap. 4.5 folgenden Ganglinienseparationen zu erhalten (Abb. 4.27 bis 4.29).

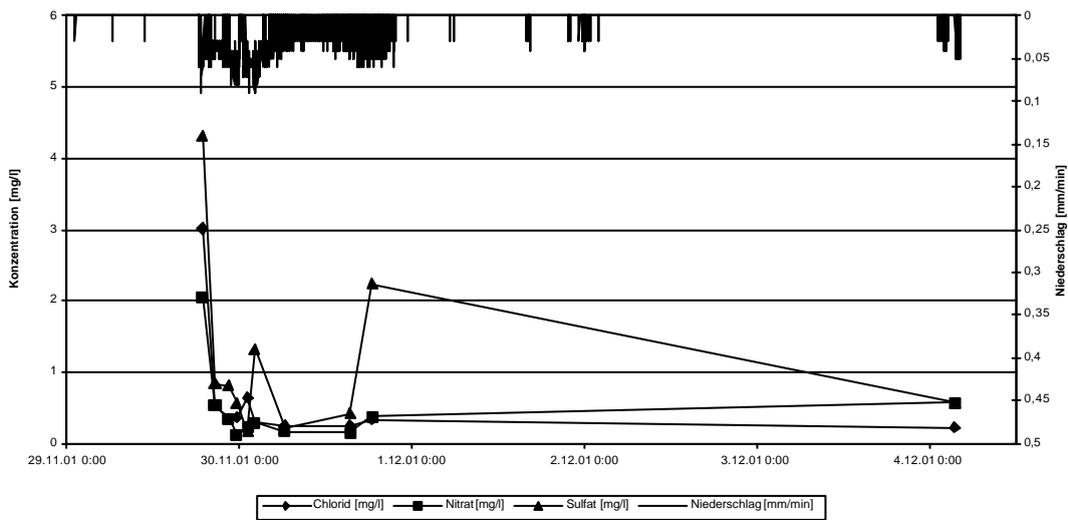


Abb. 4.27: Verlauf der Anionen des Niederschlags

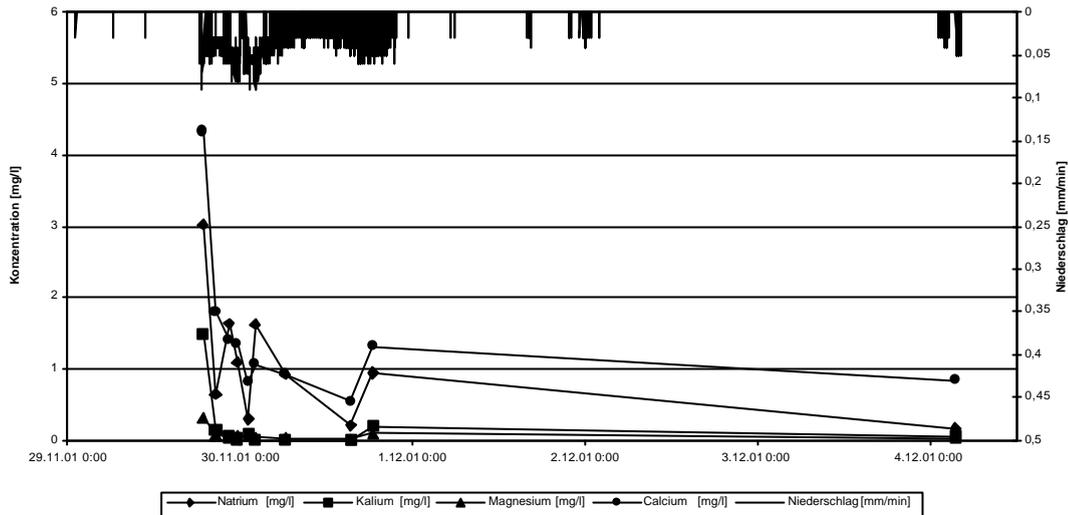


Abb. 4.28: Verlauf der Kationen des Niederschlags

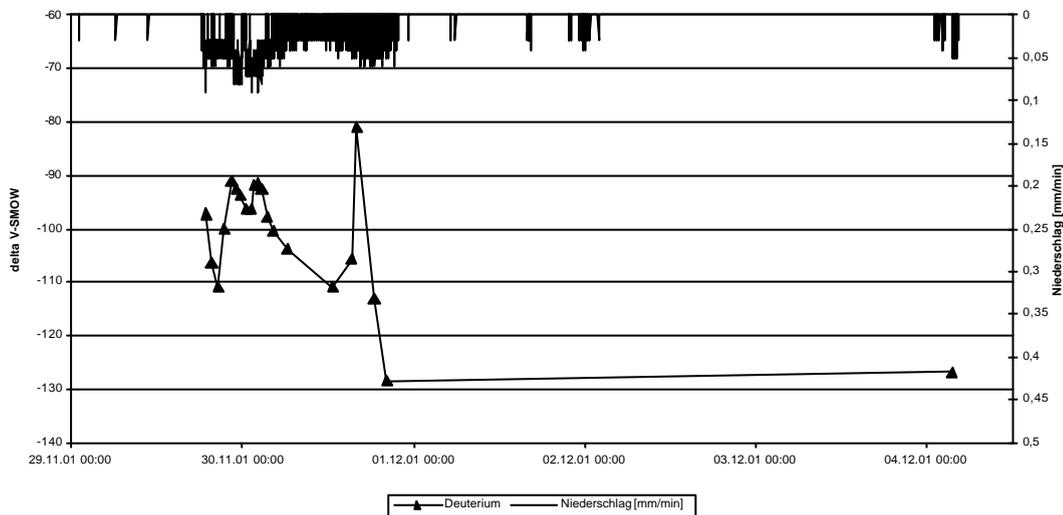


Abb. 4.29: Verlauf der Deuteriumgehalts im Niederschlag

Die Konzentrationen der Anionen und Kationen im Niederschlag zeigten ein überraschendes Bild. Zwar liegen die Werte im Mittel unter 1 mg/l, dennoch sind im zeitlichen Verlauf große Unterschiede festzustellen. Die erste Probe des Niederschlagsereignisses vom 29.11. 18:51 h zeigt sowohl für die Anionen als auch für die Kationen um ein vielfaches höhere Werte. Im weiteren Verlauf fallen die Konzentrationen wieder rasch auf ein niedrigeres Niveau zurück, und sinken im weiteren Verlauf weiter ab, bis sie minimale Werte am 30.11. 01:08 h erreichen. Ein Wiederansteigen der Niederschlagsintensität, durch Einsetzen der zweiten Niederschlagsphase bewirkt höhere Konzentrationen der Inhaltsstoffe. So weisen die Proben vom 30.11. 02:09 h und vom 30.11. 18:30 ansteigende Werte auf.

Die Deuteriumgehalte des Niederschlags zeigen nahezu das gleich zeitliche Verhalten wie die chemischen Wasserinhaltsstoffe. Nach Beginn des Ereignisses fallen die Werte zunächst von

–97 ‰ auf –110 ‰ ab. Beim Ansteigen der Intensitäten im weiteren Verlauf werden die Niederschlagsproben wieder isotopisch schwerer, und steigen auf Werte um –91 ‰. Nach dem Nachlassen der Niederschlagsintensität der ersten Niederschlagsphase sinken die Werte erneut auf unter –110 ‰, steigen jedoch, vergleichbar mit den Reaktionen der Anionen und Kationen bis auf –81 ‰ an, um danach auf ca. –128 ‰ zurückzufallen.

4.4.2 Chemische Parameter

Die Probennahme der Grundwasser- und Oberflächengewässer wurde ebenfalls mit Hilfe der APEG durchgeführt. Als Beprobungsintervall wurde zunächst eine Stunde eingestellt, das im späteren Verlauf auf ein zweistündiges Intervall ausgedehnt wurde. Die hydrochemischen Reaktionen der einzelnen Messstellen sind sehr unterschiedlich ausgeprägt. Während der Verlauf der GWMS 4 eher als ausgeglichen beschrieben werden kann, sind die Verläufe der GWMS 9 und 10 sehr variabel.

Wie sich im Verlauf der Ereignisbeprobung und der späteren Analyse im Labor zeigte, ergaben sich durch die vorhandene Schneedecke unerwartete technische Schwierigkeiten. Durch den, besonders im Bereich der Messstellen, aufgefrorenen Oberboden und die daraus resultierenden trichterförmigen Vertiefungen in Kombination mit dem eingeführten Probenentnahmeschlauch, kam es zu Komplikationen bei den Messstellen 9 und 10. Es kam zu einem direkten Einlaufen von Niederschlags- und Schneeschmelzwasser in diese beiden Messstellen zu Beginn der Ereignisbeprobung. Dies zeigte sich ebenfalls durch kurzzeitigen Wassertemperaturrückgang der GWMS (vgl. Abb. A26 im Anhang). Dennoch sollen die Analysen der gesamten Ereignisbeprobung dargestellt werden, da sich im späteren Verlauf auch für die Messstellen 9 und 10 wichtige Informationen ergeben.

Anionen und Silikat

Die Konzentrationsverläufe der Anionen, auf das Niederschlagsereignis und das dadurch ausgelöste Ansteigen des Grundwasserspiegels der GWMS 4, sind sehr ausgeglichen (Abb. 4.30). Der *Chlorid*gehalt variiert auf einem niedrigen Niveau von 0,4-0,8 mg/l. Es zeigt sich ein leichter Anstieg während des Ereignisses. Im weiteren Verlauf verhält Chlorid sich jedoch relativ konstant, mit einer leicht ansteigenden Tendenz gegen Ende. Die *Nitrat*gehalte steigen zu Beginn des Ereignisses von konstanten Werten um 0,9 mg/l auf 1,9 mg/l an. Das Ansteigen dieses Parameters verhält sich zeitgleich zum Ansteigen des Wasserstandes des ersten Peaks, während das zweite Konzentrationsmaximum, welches geringer ausfällt, einen zeitlichen Verzug um mehrere Stunden zur Grundwasserganglinie erkennen lässt. Im Falle des *Sulfats*, bewegen sich die Konzentrationen auf einem Niveau von ca. 3 mg/l. Die Konzentrationen sind während des Ereignisses konstant, zeigen aber die gleiche ansteigende

Tendenz am Ende der Beprobungsphase. Für das *Silikat* lässt sich eine leichte Verdünnungserscheinungen erkennen. Die Konzentrationen sinken von anfänglich 2,5 mg/l auf 1,9 mg/l. Eine zeitliche Verzögerung in Bezug auf die Peaks der Ganglinie von 6 bis 8 Stunden ist zu erkennen.

Der Verlauf der Anionen der GWMS 9 ist für den letzten Abschnitt der Beprobungsphase nahezu identisch mit dem der GWMS 4 (Abb. 4.31). Auch hier ist ein leichtes Ansteigen der Parameter zu erkennen. Jedoch liegen die absoluten Konzentrationen der Messstelle etwas niedriger. Zu Beginn des Ereignisses, und zwar für die erste wie auch die zweite Niederschlagsphase, ist die direkte Beeinflussung durch Niederschlagswasser festzustellen. Alle gemessenen Inhaltsstoffe sinken auf Werte von 0,1-0,2 mg/l ab, was dem Input durch den Niederschlag entspricht.

Die GWMS 10 zeigt wie Messstelle 9 zu Beginn des Ereignisses starke Verdünnungseffekte, die der gleichen Ursache zugeschrieben werden können. Gegen Ende sinken allerdings die Konzentrationen des Chlorids und Nitrats leicht ab, die des Sulfats sogar beträchtlich von über 5 mg/l auf Werte um 3 mg/l. Im Gegensatz zur Messstelle 4 und 9 stabilisieren sich die Silikatkonzentrationen bei 2,3 mg/l (Abb. 4.32).

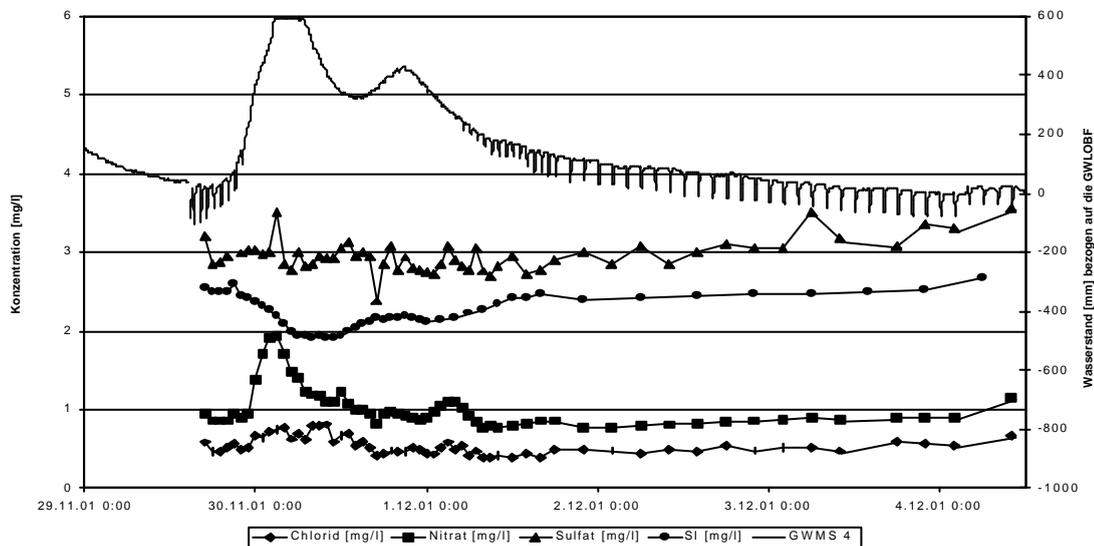


Abb. 4.30: Verlauf der Anionen und des Silikats der GWMS 4

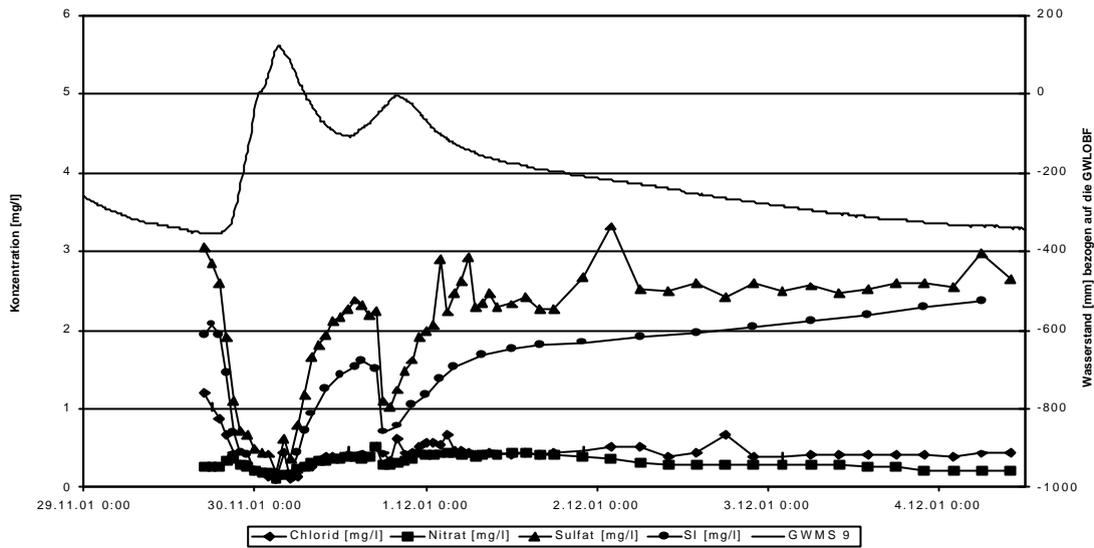


Abb. 4.31: Verlauf der Anionen und des Silikats GWMS 9

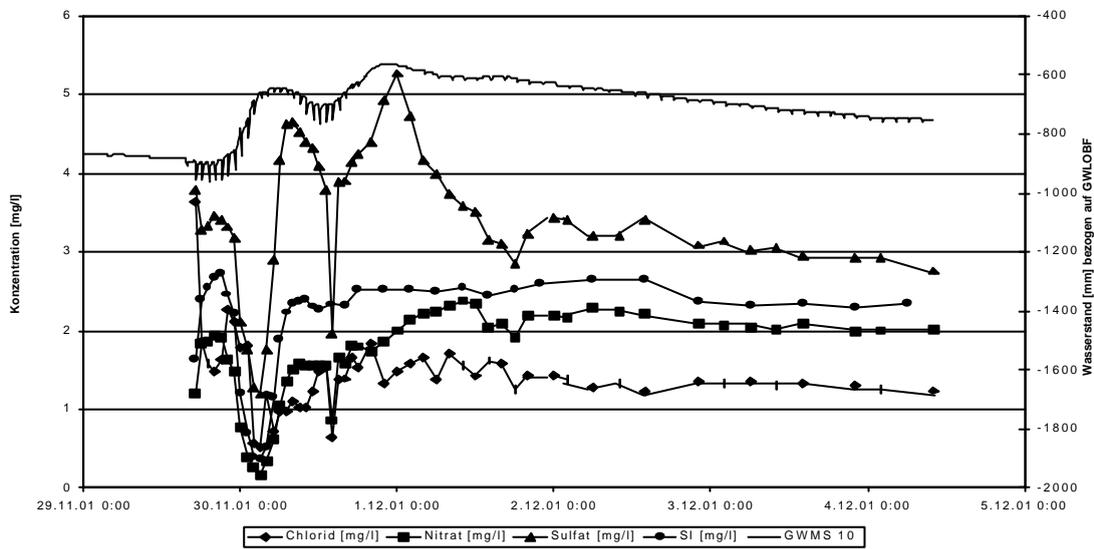


Abb. 4.32: Verlauf der Anionen und des Silikats GWMS 10

Die Anionen des Feuchtflächenentwässerungsgrabens zeigen bis auf das *Chlorid*, welches relativ konstant bleibt, Verdünnungserscheinungen durch den Niederschlag (Abb. 4.33). So nimmt das *Sulfat* von 5 mg/l auf 3,1 mg/l und das *Nitrat* von 2,7 mg/l auf 1,5 mg/l ab. Die gleiche Dynamik vollzieht sich für das *Silikat*. Es reagiert auf das Niederschlagsereignis mit einer Reduktion von 2,4 mg/l auf 1,2 mg/l. Der Anstieg aller Parameter gegen Ende der Beprobung ist vergleichbar mit den Anstiegen der GWMS 4 und 9.

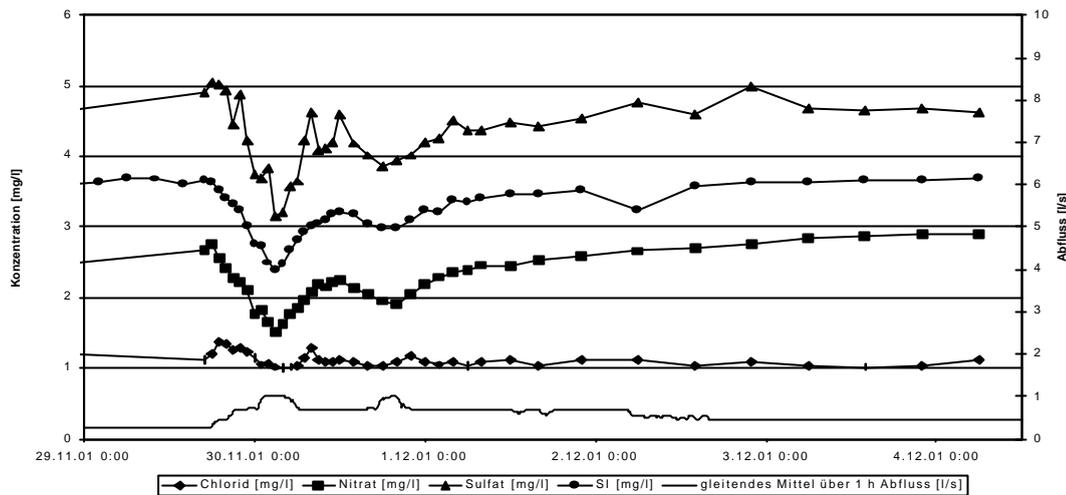


Abb.4.33: Verlauf der Anionen und des Silikats des Feuchtflächenentwässerungsgrabens.

Im Falle des St. Wilhelmer Talbachs liegen die Werte generell in einem, von den übrigen Messstellen unterschiedlichen Bereich (Abb. 4.34). So weist das *Chlorid* generell höhere Werte über 1 mg/l auf, ebenso sind die *Nitrat*gehalte erhöht, und liegen zwischen 2 mg/l und 3,5 mg/l, während die Werte des *Sulfats* mit Konzentrationen unter 3 mg/l generell niedriger liegen als die der übrigen Messstellen. Die Konzentrationen von *Silikat*, *Nitrat* und *Sulfat* reagieren vergleichbar mit dem Feuchtflächenentwässerungsgraben mit einer Verdünnung infolge Niederschlag. Augenfällig ist die Reaktion des *Chlorids*, das zu Beginn des Ereignisses einen steil verlaufenden Anstieg aufweist bis zu einem Spitzenwert von 3,3 mg/l, und sich im weiteren Verlauf wieder rasch Werten um 1,5 mg/l und darunter annähert. Generell zeigen die Anionen gegen Ende der Beprobung ein Abfallen der Konzentrationen vergleichbar der GWMS 10.

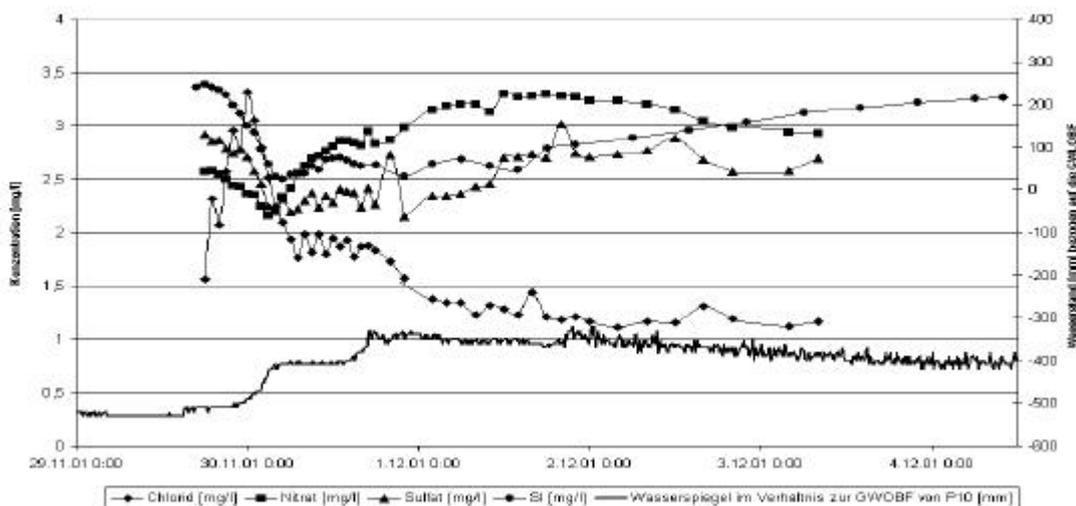


Abb.4.34: Verlauf der Anionen und des Silikats des St. Wilhelmer Talbachs.

Kationen

Die Konzentrationsverläufe der Kationen sind in der Regel ausgeglichener im Vergleich zu den zeitlichen Schwankungen der Anionen (Abb. 4.35 bis Abb. 4.39).

Für die GWMS 4 zeigt sich ein konstantes Verhalten des Parameters *Kalium* im Bereich von 0,2 mg/l. Eine ebenfalls geringe Variabilität um 1 mg/l besitzt das *Magnesium*, dieses weist allerdings einen minimalen Rückgang der Konzentration während des Ereignisses auf. Stärkere Schwankungen sind im Parameter *Natrium* zu finden, dessen Werte sich um 1,5 mg/l bewegen. Die deutlichste Reaktion ist für das *Calcium* festzustellen, dessen Werte zu Beginn leicht ansteigen, während des Ereignisses auf 7,5 mg/l abfallen, und gegen Ende ein deutliches Wiederansteigen auf über 8 mg/l erkennen lassen.

Im Fall der GWMS 9 liegen wie bei den Anionen die Konzentrationen generell etwas niedriger, als die der Messstelle 4, bei den *Calcium*werten um bis zu 50 %. Zu Beginn des Ereignisses zeigen sich auch bei den Kationen die typischen Verdünnungserscheinungen aller Parameter durch die Beeinflussung des Niederschlags. Für den zweiten Peak weist allerdings nur das *Calcium* eine Verdünnung von 4,2 mg/l auf 3,5 mg/l auf, während *Magnesium* und *Natrium* konstant bleiben. Augenfällig ist hier das Ansteigen der *Kalium*konzentration von 0,5 mg/l auf 1,7 mg/l.

Die Grundwassermessstelle 10 ist am deutlichsten durch das Niederschlagswasser beeinflusst. Alle Werte gehen auf etwa 0,2 mg/l zurück. Die Parameter steigen jedoch rasch wieder auf die ursprünglichen Konzentrationen an. Unterdessen weisen die Inhaltsstoffe im Verlauf des zweiten Peaks keine Verdünnungen auf.

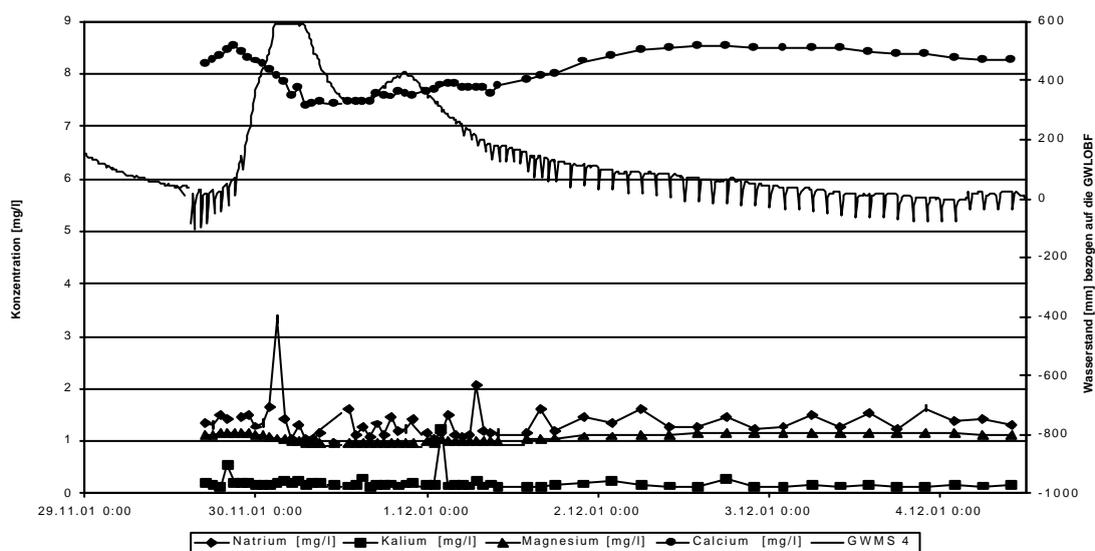


Abb. 4.35: Verlauf der Kationen GWMS 4

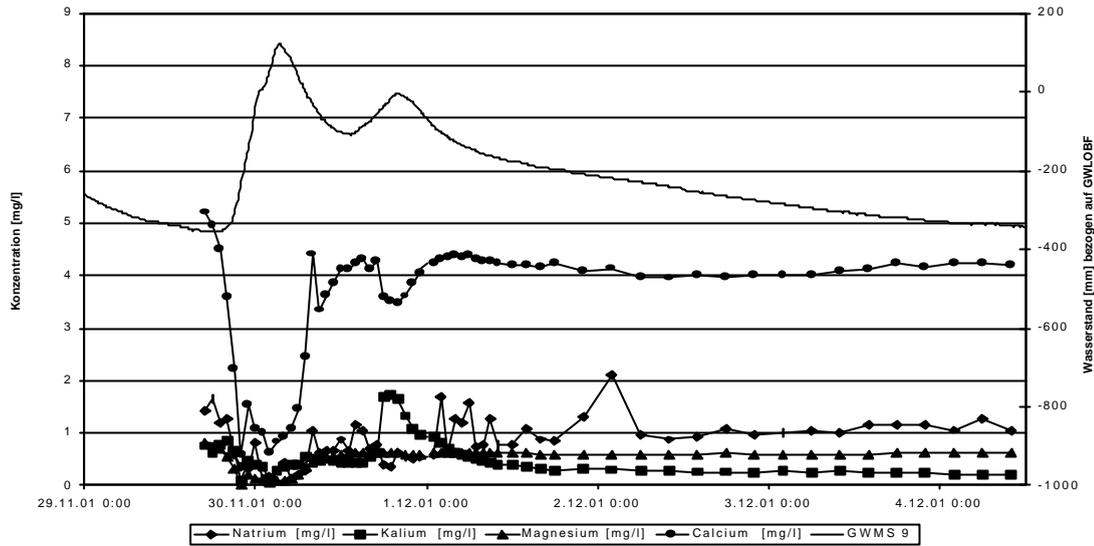


Abb. 4.36: Verlauf der Kationen GWMS 9

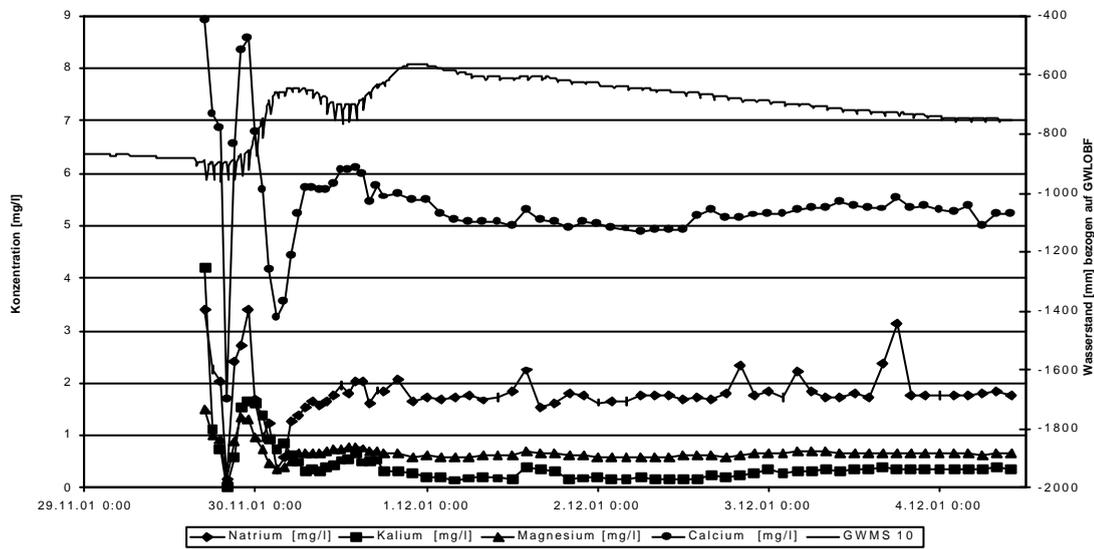


Abb. 4.37: Verlauf der Kationen GWMS 10

Die Kationen des Feuchtflächenentwässerungsgrabens zeichnen den Verlauf der Anionen nach, mit dem Unterschied, dass eine Verdünnung durch den Niederschlag nur beim *Calcium* deutlich zu erkennen ist. *Kalium* verhält sich sehr konstant bei Werten um 0,5 mg/l. *Magnesium* weist, vergleichbar mit der GWMS 4 einen geringfügigen Rückgang der Konzentration auf, und *Natrium* schwankt mit seiner hohen Variabilität um 2-2,5 mg/l.

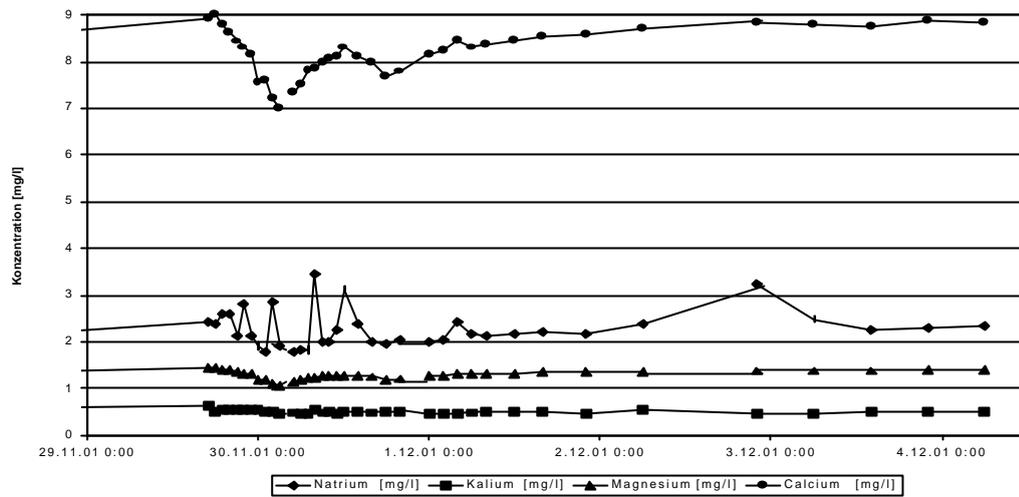


Abb. 4.38: Verlauf der Kationen des Feuchtflächenentwässerungsgrabens

Der St. Wilhelmer Talbach liegt mit den Konzentrationen von *Natrium*, *Kalium*, *Magnesium* in einem ähnlichen Wertebereich, zeigt allerdings für *Calcium* niedrigere Konzentrationen. Auch für dieses Oberflächengewässer ist der Verdünnungseffekt durch Niederschlag einzig beim *Calcium* deutlich zu erkennen.

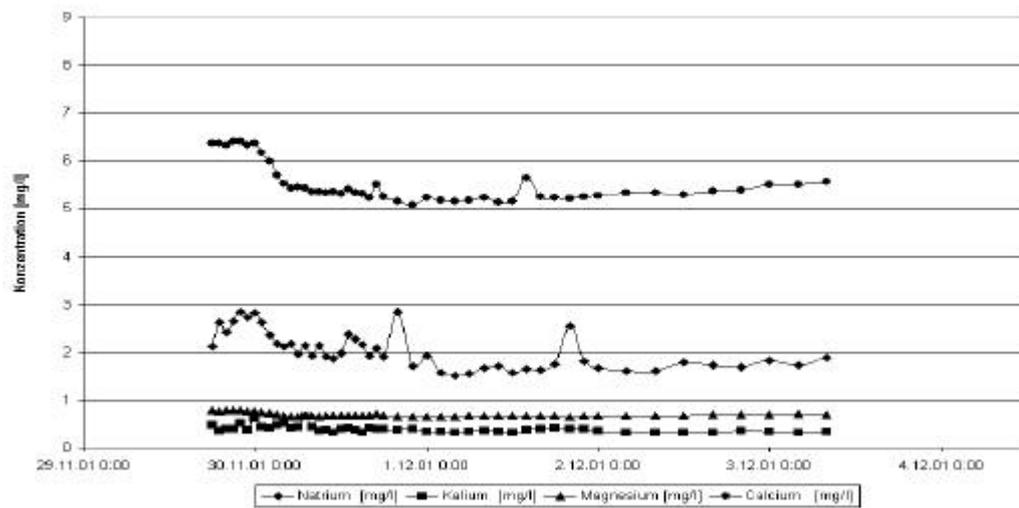


Abb. 4.39: Verlauf der Kationen des St. Wilhelmer Talbachs

Deuterium

Die Reaktion der Deuteriumgehalte der einzelnen Messstellen weisen zum Teil sehr unterschiedliche Verläufe auf (Abb. 4.40 bis 4.44). Ebenso sind die Ausgangswerte nicht identisch.

Die Deuteriumwerte der GWMS 4 besitzen die geringsten Variationen. Von anfänglichen $-55,9\text{‰}$ gehen die Werte auf $-60,5\text{‰}$ während des Ereignisses zurück, steigen danach kurzzeitig wieder etwas an ($-58,4\text{‰}$) und sinken gegen Ende auf einen Wert von $-61,7\text{‰}$ ab.

Die Werte der GWMS 9 hingegen zeigen einen extremeren Verlauf, bedingt durch die Niederschlagsbeeinflussung. Von $-66,2\text{‰}$ fallen die Deuteriumgehalte rasch auf die Werte des Niederschlags ($-90,9\text{‰}$) ab, erholen sich kurzzeitig, um während des zweiten Peaks erneut, wenn auch nicht so stark, abzusinken. Gegen Ende des Ereignisses ist, entgegen der Tendenz der Messstelle 4, ein Anstieg bis auf $-71,4\text{‰}$ zu verzeichnen.

Der Deuteriumgehalt der GWMS 10 ist wie die Messstelle 9 zu Beginn von einem Verdünnungseffekt gekennzeichnet. Die Werte sinken ebenfalls auf bis zu $-92,7\text{‰}$, aber es zeigt sich, vergleichbar mit den Reaktionen der Anionen und Kationen, keine Verdünnung während des zweiten Peaks. Am Ende der Ereignisbeobachtung steigen die Werte an und erreichen $-62,7\text{‰}$.

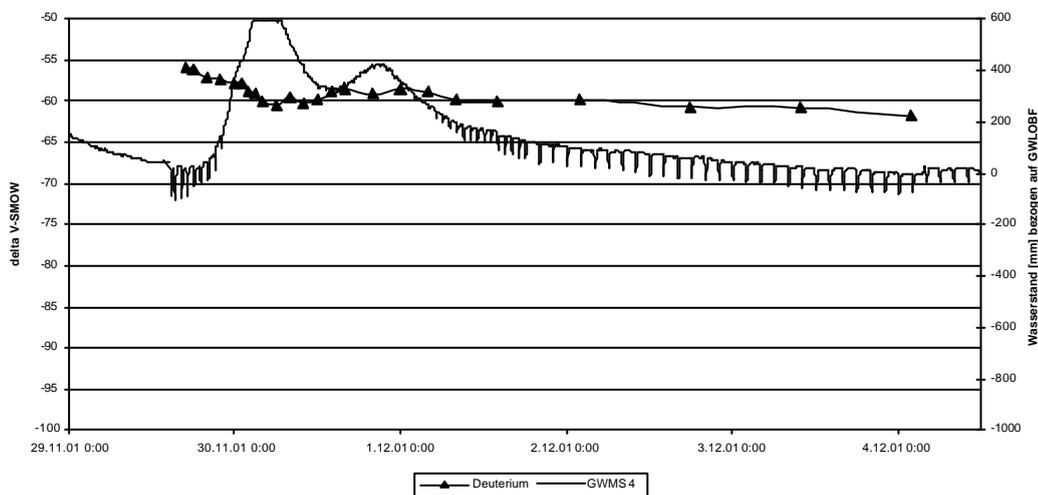


Abb. 4.40: Verlauf des Deuteriumgehaltes GWMS 4

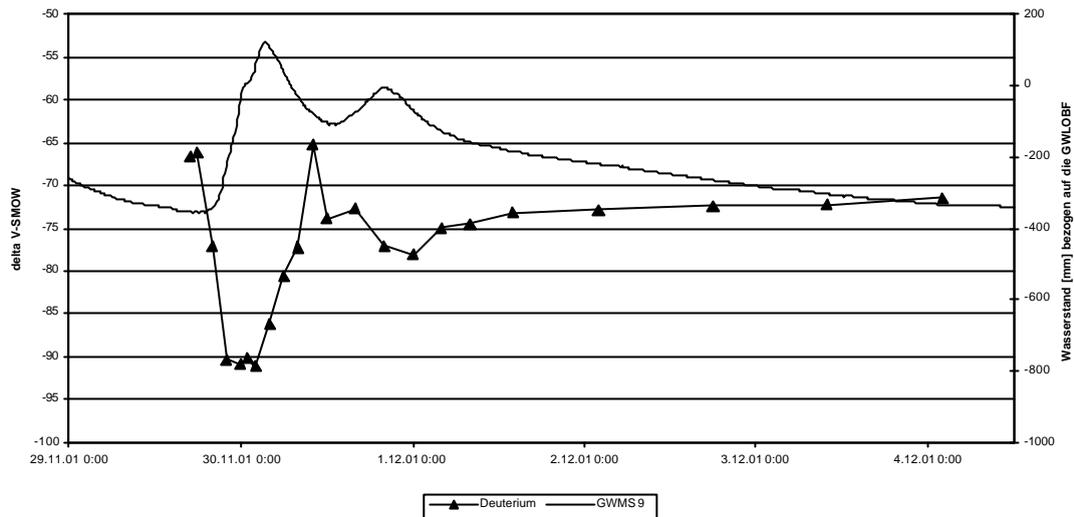


Abb. 4.41: Verlauf des Deuteriumgehaltes GWMS 9

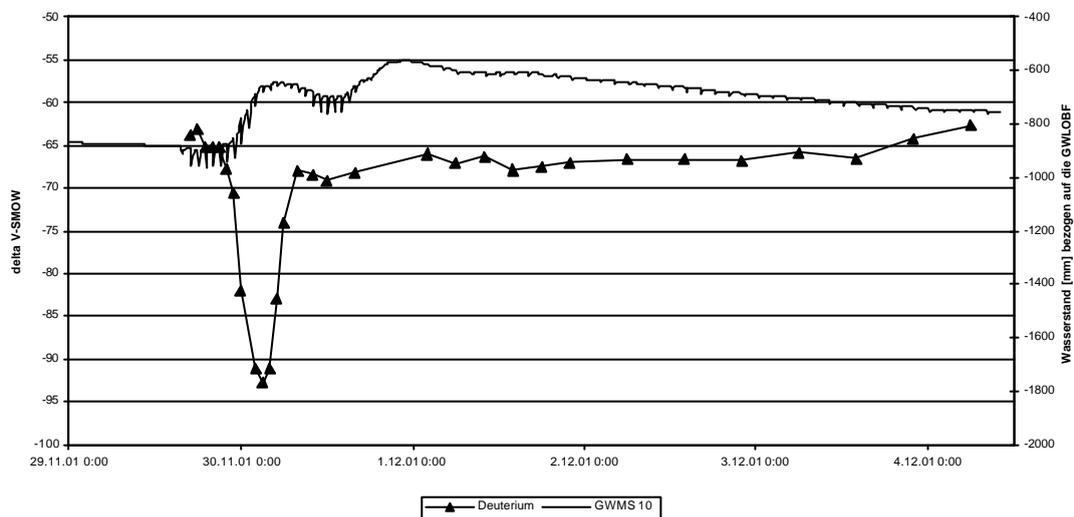


Abb. 4.42: Verlauf des Deuteriumgehaltes GWMS 10

Die beiden Oberflächengewässer weisen, wie schon durch die Verläufe der Anionen und Kationen zuvor gezeigt, eine Beeinflussung durch Niederschläge auf. Während der Feuchflächenentwässerungsgraben direkt auf beide Niederschlagsphasen zeitgleich mit einem Abnehmen der Isotopenwerte reagiert, weist der St. Wilhelmer Talbach für das zweite Ereignis eine zeitliche Verzögerung auf. Außerdem unterscheiden sich die Tendenzen am Ende der Beprobung dahingehend, dass der Feuchflächenentwässerungsgraben isotopisch schwerer wird, hingegen bleiben die Deuteriumwerte des Talbaches konstant, und es kann eher eine abnehmende Tendenz beobachtet werden.

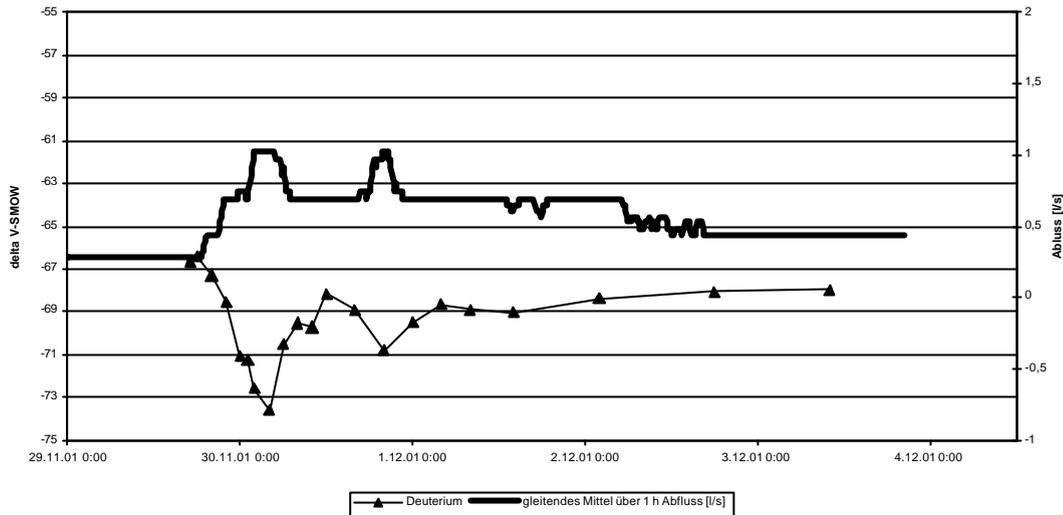


Abb. 4.43: Verlauf des Deuteriumgehaltes des Feuchflächenentwässerungsgrabens

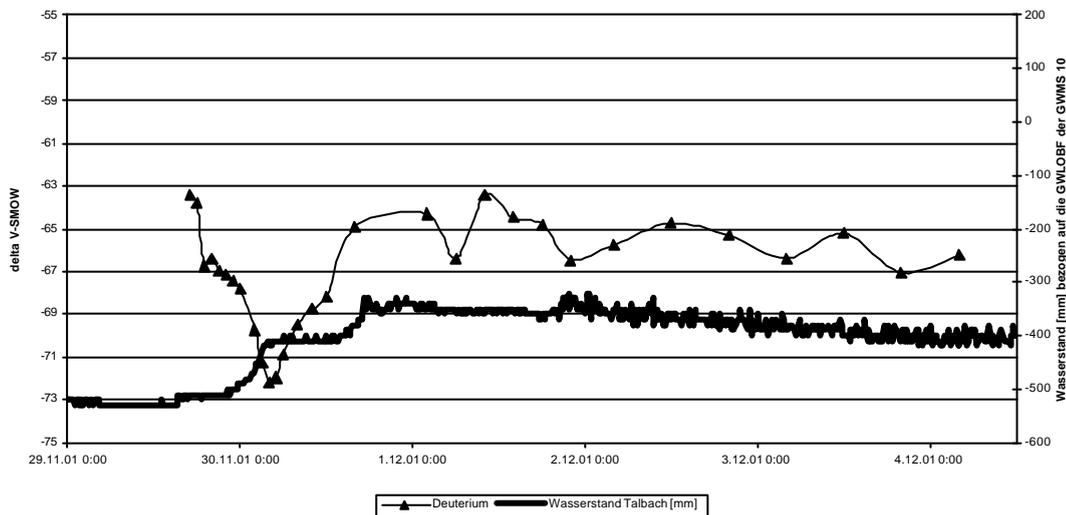


Abb. 4.44: Verlauf des Deuteriumgehaltes des St. Wilhelmer Talbachs

Interaktion zwischen Grundwasser und St. Wilhelmer Talbach

Die Analysen der hydrochemischen Parameter und die Werte der Isotopensignaturen des Deuteriums deuten auf eine Beeinflussung der Grundwassermessstelle 10 durch den St. Wilhelmer Talbach hin. Für beide Messstellen sind die gleichen ansteigenden Konzentrationen gegen Ende der Ereignisbeobachtung festzustellen. Dieses ähnliche Verhalten der Parameter lieferte das erste Indiz für eine mögliche Interaktion zwischen St. Wilhelmer Talbach und dem vorfluternahen Grundwasserbereich. Abbildungen 4.45 und 4.46 zeigen am Beispiel der hydrochemischen Parameter Chlorid und Calcium den direkten Vergleich zwischen Talbach und der GWMS 10. Im Fall Deuterium wird auf die Abb. 4.48 verwiesen, für weitere Anionen und Kationen auf die Abb. A27 bis Abb. A31 im Anhang.

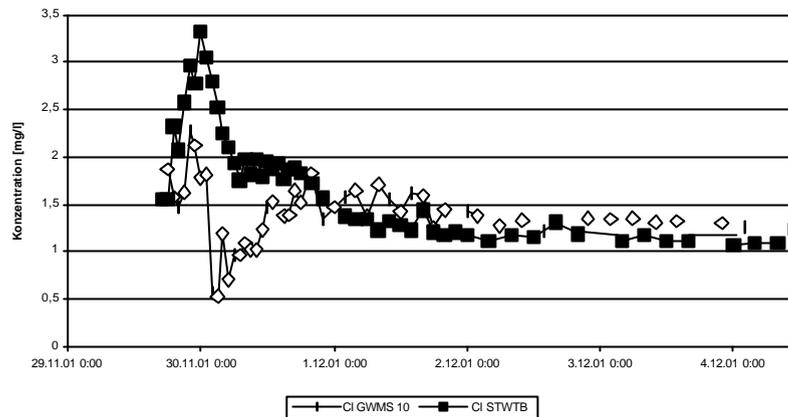


Abb. 4.45: Chloridkonzentrationen der GWMS 10 und des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeobachtung

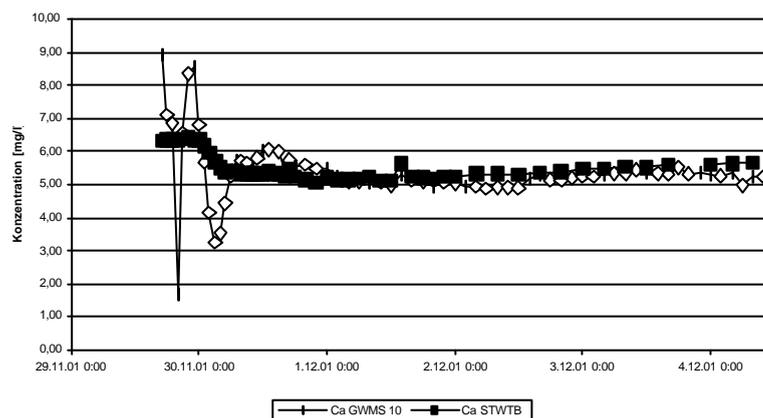


Abb. 4.46: Calciumkonzentrationen der GWMS 10 und des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeobachtung

Für alle untersuchten Kationen lässt sich eine Übereinstimmung der Konzentrationen zwischen St. Wilhelmer Talbach und der GWMS 10 ab 30.11.01 18:00h feststellen. Für das Anion Chlorid ist dieses Verhalten ebenfalls erkennbar. Sulfat zeigt zwar eine Angleichung der Konzentrationen beider Messstellen, allerdings mit einer größeren Verzögerungszeit. Hier weisen die Werte erst ab dem 01.12.01 18:00h ähnlich hohe Konzentrationen auf. Hingegen ist bei Nitrat zwar ein gleichartiges Verhaltensmuster zu erkennen, die Konzentrationen des Talbaches liegen allerdings um etwa 1 mg/l höher. Nitrat und Sulfat unterliegen aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften (vgl. Kap. 3.2.3) einer Vielzahl von Wechselwirkungen im Interaktionsbereich zwischen Vorfluter und Grundwasser, und zeigen deshalb ein zu den übrigen Parametern verschiedenartiges Verhalten. Deuterium, als idealer Tracer ohne

Wechselwirkungen mit dem Aquifermaterial, bestätigt die Erkenntnisse der Kationen und des Chlorids.

Aufgrund dieser Erkenntnisse lässt sich vermuten, dass diese Interaktion ebenfalls an der Ganglinie der Standrohrspiegelhöhe der GWMS 10 zu erkennen ist. In Abb. 4.47 sind die Standrohrspiegelhöhen der GWMS 1 und 10 zusammen mit dem Wasserstand des St. Wilhelmer Talbachs dargestellt. Es zeigt sich, dass die Standrohrspiegelhöhe der vorfluternahen Messstelle durch den Verlauf des Hochwassers im Vorfluter geprägt ist. Während die Scheitelwasserstände (hier am Beispiel der GWMS 1) des ersten Peak bei allen übrigen Grundwassermessstellen größer sind, als die des zweiten, zeigt sich für die Messstelle 10 der umgekehrte Fall.

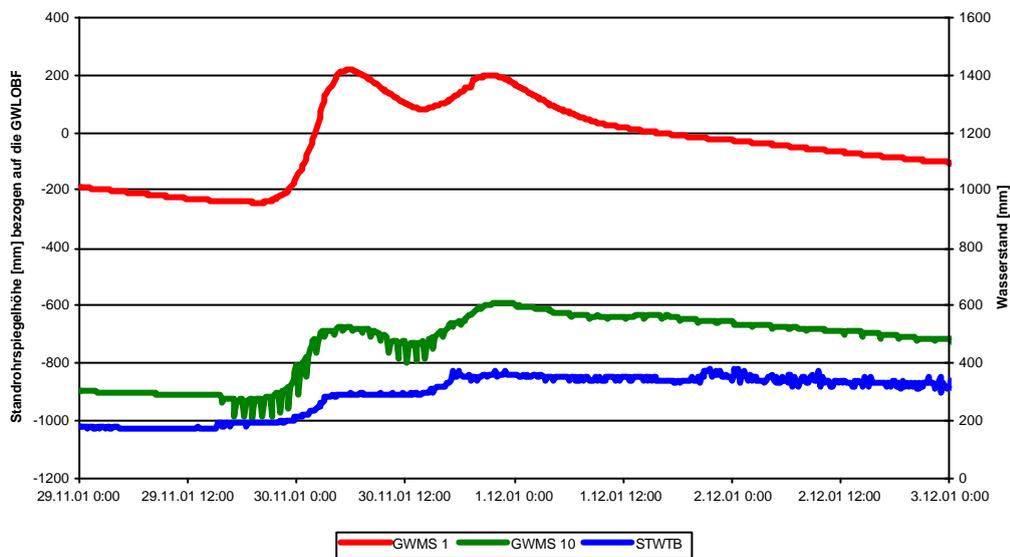


Abb. 4.47: Standrohrspiegelhöhen der GWMS 1 und 10 und Wasserstände des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeobachtung.

Der zweite Peak der Standrohrspiegelhöhe der GWMS 10 sowie der abfallende Ast der Ganglinie ist durch die Beeinflussung des Vorfluters geprägt. Die Wasserstände des Vorfluters wurden nicht in der senkrechten Verlängerung der GWMS 10 zum Talbach gemessen. Die Wasserstände im Talbach liegen an dieser verlängerten Stelle tiefer als die Standrohrspiegelhöhen.

4.4.3 Diskussion

Die im Kapitel 4.4.1 dargestellte Beprobung des Niederschlags ergab eine nicht erwartete Variabilität der chemischen Parameter. Deutlich sind zwei Teilniederschlagsphasen, gekennzeichnet durch die Intensitätsverläufe, zu erkennen. Es ist anzunehmen, dass es sich hierbei um zwei rasch aufeinanderfolgende Niederschlagsfronten handelt, was durch die Ergebnisse der Anionen und Kationen bestätigt wird. Zu Beginn beider Ereignisse wurden erhöhte Konzentrationen des Niederschlagswassers festgestellt, die sich im weiteren Verlauf auf die erwarteten Werte von 0,1-0,2 mg/l reduzierten. Die Variation zeigte sich auch in den Deuteriumwerten. Diese ist auf Fraktionierungseffekte des Niederschlags zurückzuführen. So ist ein „Leichterwerden“ des Niederschlags mit zunehmender Niederschlagsdauer mit dem Mengeneffekt zu begründen. Während eines Ereignisses unterliegen die schwereren Isotope zuerst der Ausregnung, so dass die Niederschlagsproben eines Ereignisses mit der Zeit leichter werden (MOSER&RAUERT 1980). Das isotopische „Schwererwerden“ der Proben während der zweiten Niederschlagsphase ist somit auf das Ausregnen einer zweiten Niederschlagsfront zurückzuführen.

Das ausgeglichene Verhalten der GWMS 4, was sich sowohl im Verlauf der Anionen und Kationen, des Silikats und des Deuteriumgehaltes widerspiegelt, bestätigt die Annahme, dass der Grundwasserleiter von einer relativ undurchlässigen Schicht überdeckt wird. In keinem der untersuchten Parameter ist eine extreme Beeinflussung durch Niederschlagswasser zu verzeichnen. Wie im Kap. 4.1 beschrieben wurde, ist die überdeckende Schicht jedoch nicht ganz undurchlässig. Der leichte Rückgang der Silikat- und Calciumkonzentrationen, sowie das Ansteigen des Nitrats lässt auf die Beteiligung von oberflächennahen Komponenten schließen. Die Ursache dieser Beeinflussung kann durch zwei Prozesse verursacht worden sein. Zum einen ist es denkbar, dass Wasser, welches im oberen Bodenhorizont gespeichert ist, durch das Infiltrieren des Niederschlags im Verlauf des Ereignisses mobilisiert, und dem Grundwasser zugeführt wird. Zum anderen ist es denkbar, dass aufgrund des Ansteigens des Wasserspiegels in gespannte Verhältnisse hinein, das Grundwasser entlang der Bohrlochwandung aufsteigt, und sich mit dem Bodenwasser vermischt, was zu den oben beschriebenen Reaktionen führen kann. Ein eindeutiger Beleg für eine der Prozessvorstellungen konnte allerdings nicht gefunden werden.

Bei den Messstellen 9 und 10 war, verursacht durch technischen Probleme, ein Eindringen von Niederschlagswasser festzustellen. Dies lässt sich eindeutig mit dem Verlauf der Deuteriumwerte belegen. In Abb. 4.48 zeigt sich, dass für beide GWMS die Werte auf Niederschlagsniveau abfallen.

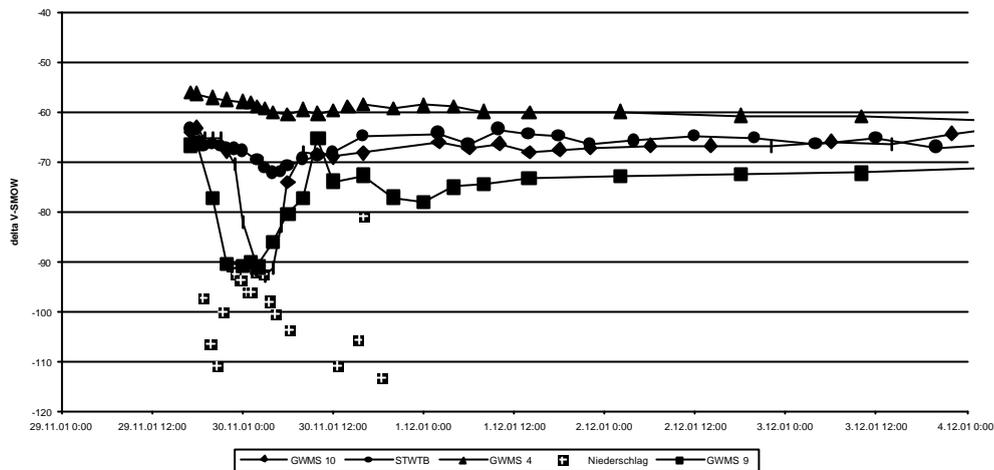


Abb. 4.48: Vergleich der Deuteriumwerte der Messstellen 4, 9, 10, des St. Wilhelmer Talbachs und des Niederschlags.

Bei der Messstelle 9 ist dies für beide Niederschlagsphasen der Fall, was sich ebenfalls im Verlauf der Anionen und Kationen ausdrückt. Im Fall der GWMS 10 war jedoch festzustellen, dass während des zweiten Peaks keine so deutlichen Verdünnungen zu erkennen waren, wie bei der GWMS 9. Zusätzlich sind die Reaktionen der Wasserinhaltsstoffe (Abb. 4.32 und Abb. 4.37) sowie die Isotopensignatur (Abb. 4.42) gegen Ende der Beprobung nicht gleich mit denen der anderen GWMS. Während Messstelle 4 und 9 in den Anionen und im Silikat eine ansteigende Tendenz erkennen lassen, verhält sich die Messstelle 10 konstanter. Bei einem direkten Vergleich mit den Konzentration des Talbachs zeigte sich eine hohe Übereinstimmung, so dass von einer Interaktion zwischen der GWMS 10 und dem Talbach gesprochen werden kann. Aufgrund der topographischen Gegebenheiten wurde eine Modellvorstellung der Interaktion zwischen Talbach und Grundwasserkörper entwickelt (Abb. 4.49).

Interaktion St. Wilhelmer Talbach mit vorfluternaher GWMS 10

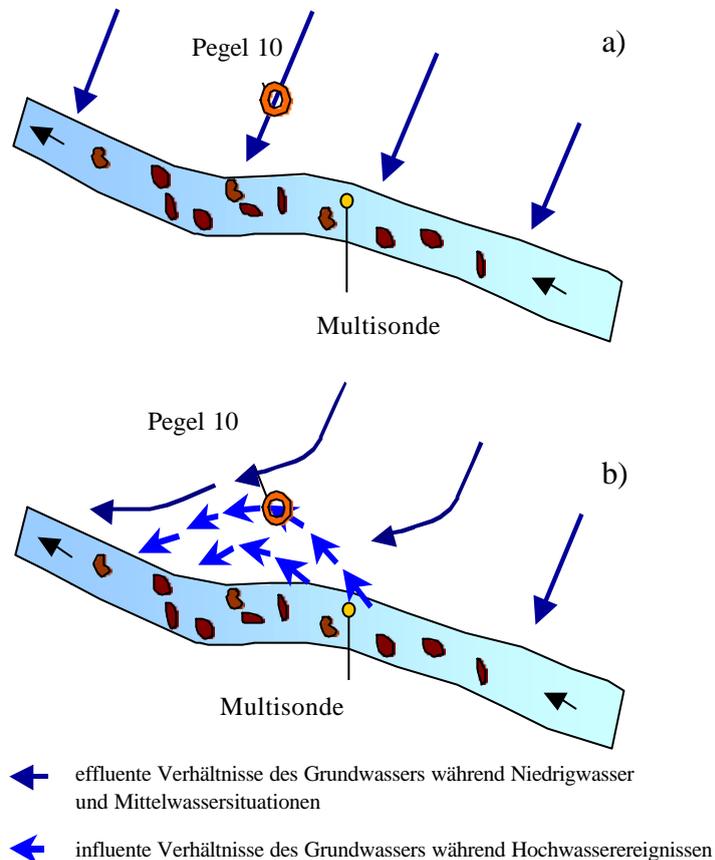


Abb. 4.49: Modellvorstellung der Interaktion Vorfluter-Grundwasserkörper. a) Situation Mittelwasser und Niedrigwasser; b) Situation Hochwasserereignis

Im Fall von Niedrigwasser oder Mittelwasser herrschen effluente Grundwasserverhältnisse vor. Der Wasserspiegel des Talbachs liegt unterhalb des Grundwasserspiegels, und es stellt sich ein Gefälle in Richtung Vorfluter ein. Während Hochwassersituationen steigt der Wasserstand im Vorfluter soweit an, dass sich besonders an Flussbiegungen der hydraulische Gradient umkehrt, und es zu influenten Verhältnissen kommt. Eine Dreikomponententrennung, die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher vorgestellt wird, mit den Tracern Silikat und Deuterium, ergab maximale Mischungsanteil von 61 % Vorfluterwasser in der GWMS 10. Dieser Mischungsanteil erscheint zunächst recht hoch, SOULSBY et al. (1998) fanden jedoch in einer Untersuchung zur Hydrochemie seichter Grundwässer in einem schottischen Einzugsgebiet Mischungsanteile in einer vorfluternahen Grundwassermessstelle von bis zu 90 % Oberflächenwasseranteil.

Die Reaktionen des Feuchtflächenentwässerungsgrabens zeigten die erwarteten Vorstellungen. Der Feuchtflächenentwässerungsgraben, zu Basisabflusszeiten zu 100% gespeist von dem quellartigen Grundwasseraustritt, reagiert mit kurzzeitigen Verdünnungseffekten für fast alle Parameter auf das Niederschlagsereignis. Allerdings waren die Verdünnungen nicht in dem Maße, wie sie erwartet wurden, und erreichen wieder zügig die Vorereigniskonzentrationen.

Der ungewöhnliche Anstieg der Chloridkonzentration von 1,5 mg/l auf über 3 mg/l des Talbachs zu Beginn des Ereignisses ist auf den Einsatz von Streusalz zurückzuführen. Dieses wurde wenige Tage zuvor auf der den Talbach begleitenden Straße ausgebracht.

4.4.4 Fazit

Es zeigte sich durch die Ergebnisse der Laboranalysen, dass eine zeitlich hochaufgelöste Niederschlagsbeprobung wichtige Informationen für die Bewertung des Niederschlagsinputs liefern kann. Besonders für die Deuteriumwerte ist eine hohe zeitliche Variabilität festzustellen, die bei der folgenden Ganglinienseparation zu berücksichtigen ist.

Aufgrund der Konzentrationsverläufe der hydrochemischen Parameter der GWMS 4 während des Niederschlagsereignisses, die nur eine geringe Veränderung der Wasserinhaltsstoffe und Isotopensignaturen zeigte, wurde die Annahme bestätigt, dass die den Aquifer überlagernde Schicht relativ undurchlässig ist. Die dennoch auftretenden Veränderungen, und hier besonders der Anstieg der Nitratwerte, kann auf die Beteiligung einer Bodenwasserkomponente zurückgeführt werden, welche durch langsam infiltrierendes Niederschlagswasser mobilisiert wurde. Mit den Analysewerten wurde die Grundlage geschaffen für die nachfolgenden Ganglinienseparationen, die der Quantifizierung der beteiligten Komponenten dient. Für die Parameter der Grundwassermessstellen 9 und 10 zeigten sich Verdünnungserscheinungen, die unerwartet auftraten. Durch die Beobachtungen auf dem Testfeld und die Analyse der Schnee- und Niederschlagsproben, sowie des Wassertemperaturverlaufs konnte die direkte Beeinflussung der Messstelle belegt werden. Alle Indizien sprechen für die Annahme, dass aufgrund technischer Probleme, Niederschlags- und Schneeschmelzwasser direkt in die Messstelle eingedrungen sind, und nicht etwa über schnelle Infiltrationsprozesse. Die trotz dieser Problematik analysierten Proben lieferten, besonders für die GWMS 10, nach dem Ende der Beeinflussung wichtige Informationen durch Verlauf der hydrochemischen Parameter. Mit Hilfe dieser Werte konnte eindeutig belegt werden, dass die vorfluternahe Grundwassermessstelle 10 in direkter Interaktion mit dem St. Wilhelmer Talbach steht, und während Hochwasserereignissen ein Austausch zwischen Vorfluter und Grundwasser stattfindet.

4.5 Ganglinienseparationen

Für die GWMS 4 und 9, sowie für den Feuchtflächenentwässerungsgraben wurden Ganglinienseparationen zur Abflusskomponententrennung mit verschiedenen Tracern durchgeführt. Die theoretischen Hintergründe dieses Verfahrens wurden bereits im Kap. 3.2 näher erläutert. Die Separationen wurden mit Hilfe der Zwei- und Dreikomponententrennung durchgeführt, deren Ergebnisse im Folgenden beschrieben werden. Es ist bei den Separationen der Grundwassermessstellen festzuhalten, dass die Ergebnisse Mischungsanteile des Wassers in der jeweiligen GWMS darstellen, und nicht als Abflussanteile im herkömmlichen Sinn zu verstehen sind.

4.5.1 Grundwassermessstelle 4

Die Verläufe der Konzentrationen der Anionen und Kationen, des Silikats und des Deuteriums während der Ereignisbeprobung wurden im Kap. 4.4 erläutert und diskutiert. Es ergaben sich aus den Analysen sehr ausgeglichene Werte für die Anionen Chlorid und Sulfat und für die Kationen Natrium, Kalium, Magnesium, so dass für diese Parameter keine Separation sinnvoll erscheint. Veränderungen zeigten sich beim Nitrat und Calcium, jedoch erfüllen diese Parameter aufgrund ihrer vielseitigen Wechselwirkungen im Boden nicht die im Kap. 3.2 beschriebene Bedingung (4), d.h. sie zeigen kein konservatives Verhalten, und sind somit für die Separation nicht geeignet.

Die Silikatwerte weisen während des Ereignisses eindeutige Konzentrationsveränderungen auf. Die Konzentrationen dieses Parameters gehen von 2,5 mg/l auf 1,9 mg/l zurück und erreichen am Ende der Ereignisbeprobung wieder die Ausgangswerte. Bedingung (1), dass sich die Konzentrationen des Tracers in den Abflusskomponenten unterscheiden müssen, ist ebenfalls gegeben. Silikat ist zudem als nahezu konservativer Tracer zu betrachten (vgl. Kap. 3.2.3.8).

Die Deuteriumwerte der GWMS 4 gehen von anfänglich -56‰ auf $-60,5\text{‰}$ während des Ereignisses zurück, steigen zwar kurzzeitig wieder an, fallen aber gegen Ende auf $-61,7\text{‰}$ ab. Durch das Auftragen der Tracerkonzentration gegen den Grundwasserstand (Abb. 4.50 und 4.51), vergleichbar mit dem Auftragen gegen den Abfluss, zeigt sich sowohl für Silikat als auch für Deuterium eine Hystereseschleife. Dies deutet auf das Vorhandensein einer weiteren Abflusskomponente hin. Somit ist die Bedingung (2) nicht mehr erfüllt. Aufgrund dieser Tatsache wurde von einer Zweikomponententrennung abgesehen und eine Dreikomponententrennung durchgeführt, die eine Berücksichtigung einer dritten Komponente ermöglicht.

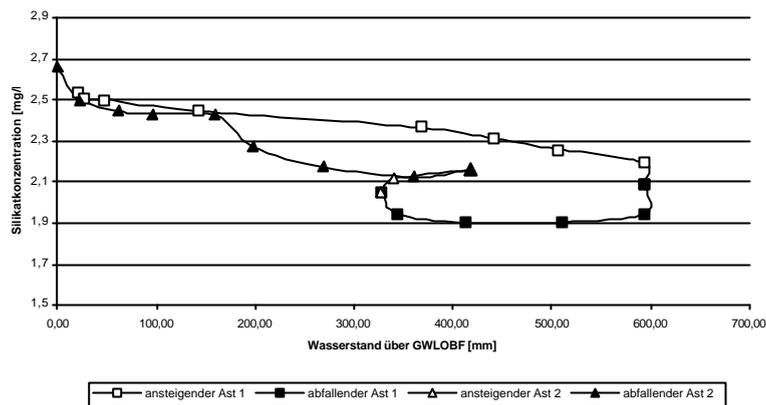


Abb. 4.50: Zeitlicher Verlauf des Tracers Silikat für die Ereignisbeobachtung der GWMS 4

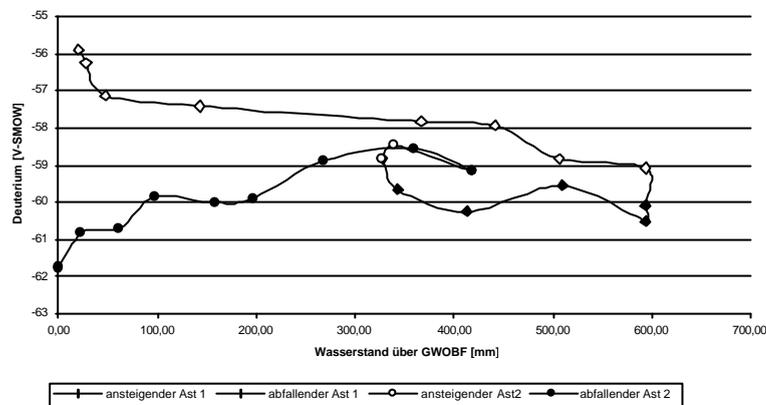


Abb. 4.51: Zeitlicher Verlauf des Tracers Deuterium für die Ereignisbeobachtung der GWMS 4

Dreikomponententrennung

Um die Dreikomponententrennung mit Hilfe der Tracer Silikat und Deuterium durchführen zu können, müssen zunächst die end member Konzentrationen der beteiligten Abflusskomponenten X_{direkt} , X_{zwischen} und X_{basis} bestimmt werden. Diese werden in einem Mischungsdiagramm für beide Tracer dargestellt. Abbildung 4.52 zeigt, dass die Tracer kein kollineares Verhalten aufweisen, d.h. sie „spannen“ im Mischungsdiagramm ein Dreieck auf, somit ist die Bedingung (6) erfüllt und es kann eine Dreikomponentenseparation zur Anwendung kommen.

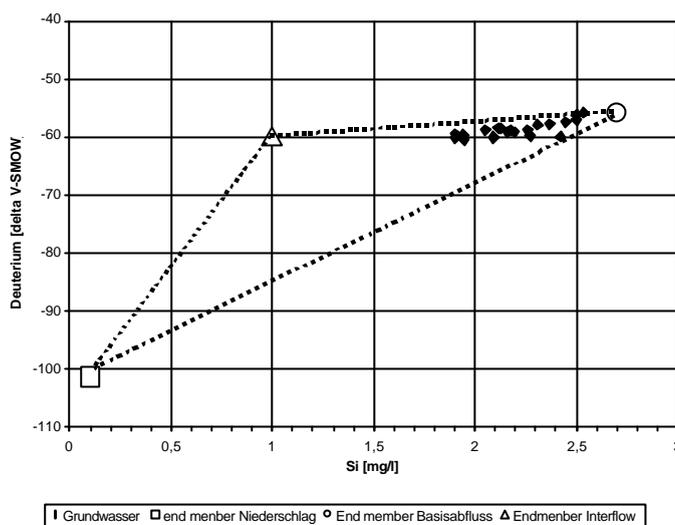


Abb. 4.52: Mischungsdiagramm der Tracer Silikat und Deuterium für die Dreikomponententrennung der Grundwassermessstelle 4

Für den Tracer Silikat wird aufgrund eines relativ schnellen Lösungsgleichgewichtes und gemessener Analysewerten, die end member Konzentration des Niederschlags mit einem Wert von 0,1 mg/l angenommen. Als Wert für die Basisabflusskomponente wird 2,7 mg/l, ein gemittelter Wert aus den vorrausgegangenen Stichtagbeprobungen, festgelegt.

Die Abschätzung der Silikatkonzentration der Interflowkomponente gestaltet sich recht schwierig, aufgrund der fehlenden Proben aus diesem Bereich. Es wird angenommen, dass es sich bei der Interflowkomponente um Bodenwasser handelt, das durch infiltrierendes Niederschlagswasser bzw. Schneeschmelzwasser mobilisiert wird. Lösungsversuche unter Laborbedingungen von KIENZLER (2001) mit Substraten des Bruggaeinzugsgebietes ergaben Silikatkonzentrationen von 0,5-0,8 mg/l nach einer Kontaktzeit von wenigen Stunden, bis hin zu 2-2,5 mg/l bei einer Verweilzeit von einigen Tagen. Da die genaue Verweilzeit des Bodenwassers nicht zu bestimmen ist, wird ein mittlerer Wert von 1 mg/l angenommen.

Im Fall des Tracers Deuterium wurde für den Niederschlag zunächst ein Wert von $-101,34\text{‰}$ als bulk mean angesetzt. In der späteren Berechnung wird allerdings, ermöglicht durch die zeitlich hochaufgelöste Niederschlagsbeprobung, nicht das bulk mean sondern das mengengewichtete incremental mean (vgl. Kap. 3.2.2) verwendet, um die im Niederschlag zeitlich variablen Isotopengehalte zu berücksichtigen. Als end member des Basisabflusses wird der erste Messwert des Grundwassers herangezogen, der $-55,89\text{‰}$ beträgt. Die end member Konzentration des Zwischenabflusses wird für Deuterium mit -60‰ festgelegt. Dieser hohe Wert ist vermutlich durch schon früher gefallenem schwereren Niederschlag verursacht worden. Wochenproben der Klimastation Katzensteig bestätigen diese Annahme. Der Mittelwert des Isotopengehalts von Juni bis Ende November beträgt $-57,62\text{‰}$.

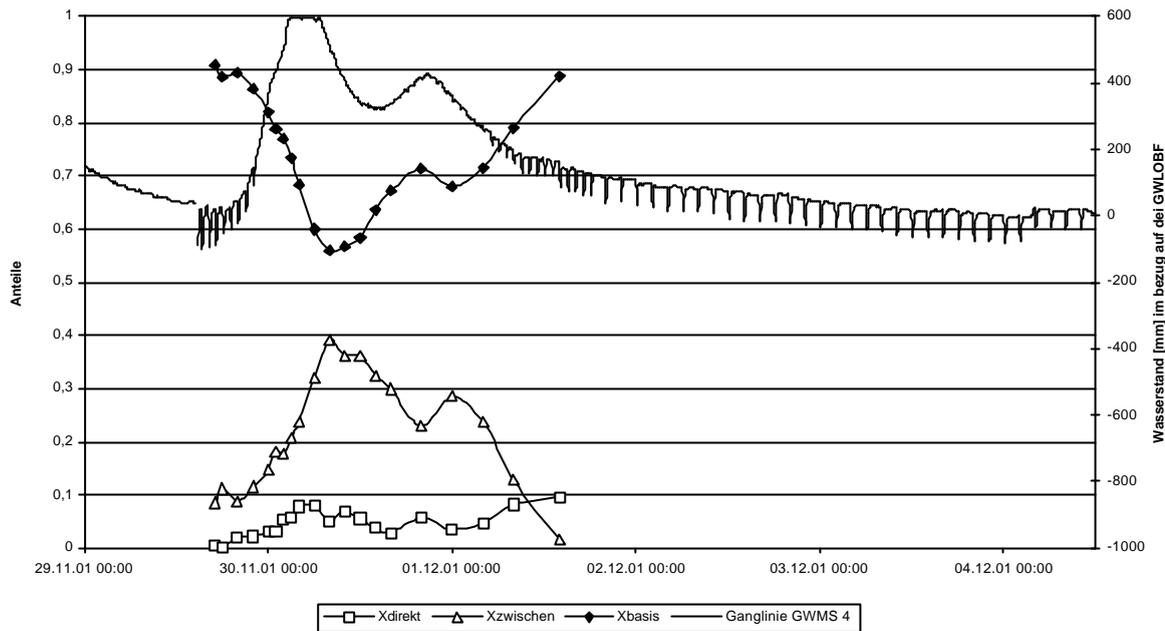


Abb. 4.53: Mischungsanteile der GWMS 4

Der Anteil des Basisabflusses (X_{basis}) beträgt nach der Berechnung zu Beginn der Beprobung knapp 91 %, der des Zwischenabflusses (X_{zwischen}) beläuft sich auf 9 % (Abb. 4.53). Nach Ereignisbeginn sinkt der Basisabflussanteil auf bis zu 56 % ab, zu Gunsten des Zwischenabflusses und des Niederschlagsanteils. Letzterer erreicht während des Ereignisses einen maximalen Anteil von 8 %, jedoch gegen Ende der Beprobung ist ein Ansteigen bis zu 10 % festzustellen. Hingegen nimmt im Verlauf des Ereignisses die Zwischenabflusskomponente ab, und fällt gegen Ende auf nahezu Null. Nach der Beendigung beider Niederschlagsphasen erreicht der Basisabflussanteil annähernd wieder die Ausgangswerte mit 89 %. Die Dreikomponententrennung mit Deuterium und Silikat ergibt über das gesamte Ereignis mittlere Mischungsanteile von 5 % Niederschlag, 22 % Zwischenabfluss und 75% Basisabflussanteil.

4.5.2 Grundwassermessstelle 9

Für die Grundwassermessstelle 9 ergaben sich, wie bei der GWMS 4, für die Tracer Silikat und Deuterium Hystereseschleifen, die allerdings nicht so deutlich ausgeprägt sind (vgl. Abb.A32 und Abb.A33 im Anhang). Dennoch lassen sie auf mehr als zwei beteiligte Komponenten schließen, was zumindest eine Dreikomponententrennung erfordert. Die end member Bestimmung für das Grundwasser orientierte sich am ersten Messwert der Ereignisbeprobung. Als Deuteriumwert wird -66% und als Silikatwert $2,7 \text{ mg/l}$ festgelegt.

Die end member Konzentrationen des Niederschlags liegen wie bei der Separation der GWMS 4 bei $-101,34 \text{ ‰}$ für Deuterium und $0,1 \text{ mg/l}$ für Silikat.

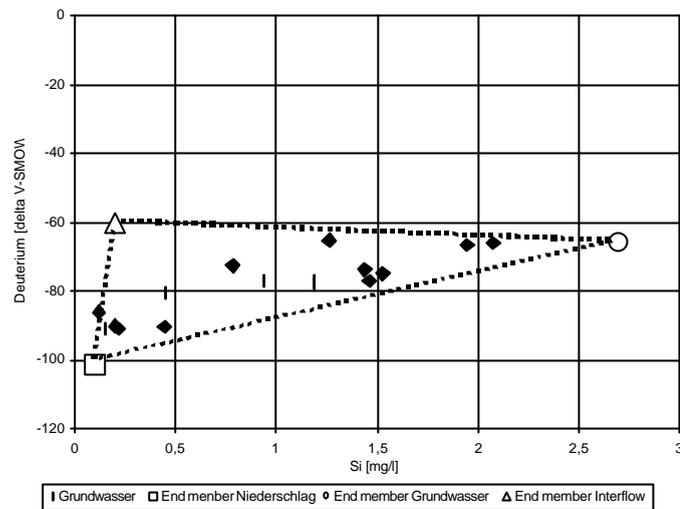


Abb. 4.54: Mischungsdiagramm der Tracer Silikat und Deuterium für die Dreikomponententrennung der Grundwassermessstelle 9

Werte der Zwischenabflusskomponente orientierten sich bei dieser Separation an den Analysewerten der Schneeprobe vom 28.11.2001. Diese Probe weist aufgrund von Fraktionierungseffekten einen Deuteriumwert von -60 ‰ auf. Die end member Konzentration für Silikat wurde, im Gegensatz zur Zwischenabflusskomponente der GWMS 4, mit einem niedrigeren Wert festgelegt. Er beträgt $0,2 \text{ mg/l}$. Dieser ist begründet durch die kürzere Verweilzeit im Boden, die sich durch die geringmächtigere überdeckende Schicht ergibt. Sie beträgt in der unmittelbaren Umgebung der Messstelle 40 cm im Gegensatz zu den Überdeckungsmächtigkeiten an der GWMS 4, die bis zu 70 cm betragen. Die Ergebnisse sind aufgrund der geringen Konzentrationsunterschiede zwischen der end member Konzentration des Niederschlags und der Interflowkomponente kritisch zu betrachten. So dürfen die Mischungsanteile der Direkt- und Zwischenabflusskomponente nicht als Absolutwerte herangezogen werden, vielmehr sollen sie zusammengenommen die kurzfristige Niederschlags- und Bodenwasserbeeinflussung beschreiben.

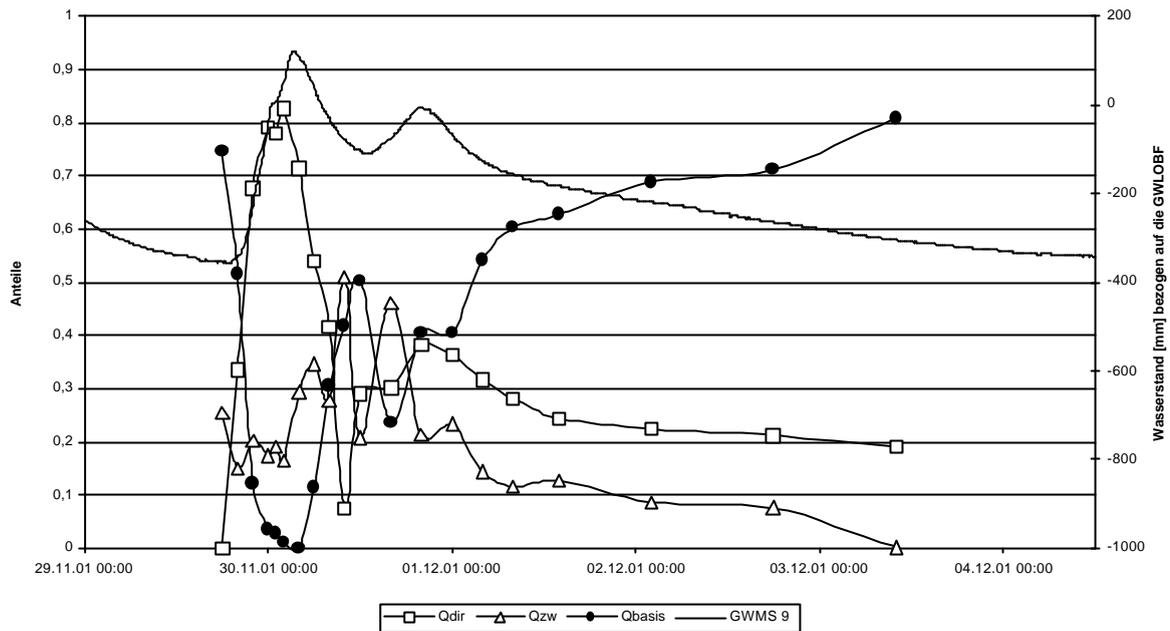


Abb. 4.55: Grundwasseranteile der Dreikomponententrennung der GWMS 9

Die Grundwasseranteile gehen bereits vor dem Hauptpeak von 75 % auf fast Null zurück. Im Gegenzug steigt der Niederschlagsanteil auf über 82 %, dieser fällt im weiteren Verlauf bis auf 19 % ab. Die Zwischenabflusskomponente weist starke Schwankungen auf. Von anfänglich 25 % sinkt der Anteil zunächst ab, und erreicht mit leichter Zeitverzögerung zum ersten Peak einen Anteil von 51 %, und geht am Ende auf Null zurück. Über den gesamten Zeitraum ergibt die Separation im Mittel einen Anteil von 40 % für die Niederschlagskomponente, 21 % für die schnelle Zwischenabflusskomponente und für das Grundwasser einen Anteil von 39 %.

4.5.3 Ganglinienseparation der Sättigungsfläche

Zur quantitativen Abflusskomponententrennung und zum Nachweis der Bedeutung des Piston-Flow Prozesses für die Bildung schneller Abflusskomponenten wurde am Entwässerungsgraben der Sättigungsfläche ein Messwehr eingerichtet (vgl. Kap. 3.3.5). Anhand der Analysedaten und der Abflusswerte wurde für den Sättigungsflächenabfluss zunächst eine Zweikomponententrennung durchgeführt. Dies ist für den Sättigungsflächenabfluss zulässig, da sich im Verlauf der Parameter keine ausgeprägten Hystereseschleifen zeigen, und somit davon ausgegangen werden kann, dass es sich nur um zwei beteiligte Abflusskomponenten handelt.

4.5.3.1 Zweikomponententrennung

Die Komponententrennung für die Sättigungsfläche wurde mit den Parametern Deuterium, Silikat und *SumKat* durchgeführt. Der Parameter *SumKat* stellt die Summe aller gemessenen Kationen in der Einheit [mmol(eq)/l] dar. Dazu zählen, wie im Kap. 3.2.3 beschrieben, Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium. Die end member Konzentrationen wurden wie folgt festgelegt. Für die Parameter Deuterium und *SumKat* wurde für den Niederschlagsinput das incremental mean (vgl. Kap. 3.2.2) berechnet. Für die Silikatkonzentration im Niederschlag wurde der Wert 0,1 mg/l festgesetzt. Die end member Konzentrationen des Grundwassers wurden über das gesamte Ereignis konstant gehalten. Sie ergeben sich unter Berücksichtigung der Vorereigniskonzentrationen und sind in Tab. 4.4 dargestellt.

Tab. 4.4: End member Konzentrationen der Zweikomponententrennung

End member	Niederschlag	Grundwasser
Deuterium	-101,34	-66,63
Silikat	0,1	3,9
SumKat	0,129	0,74

Die Separationen ergaben durchweg hohe Anteile für die Grundwasserkomponente (93-100%) zu Beginn des Ereignisses. Bei allen Separationen zeigt sich eine Abnahme des Basisabflusses während beider Niederschlagsteilphasen. Die Anteile sinken auf 60-76 % ab. Nach Beendigung des Niederschlagsinputs erreichen sie wieder die Ausgangsanteile. Beispielhaft wird der Verlauf des Grundwasseranteils für den Tracer Silikat in Abb. 4.56 dargestellt.

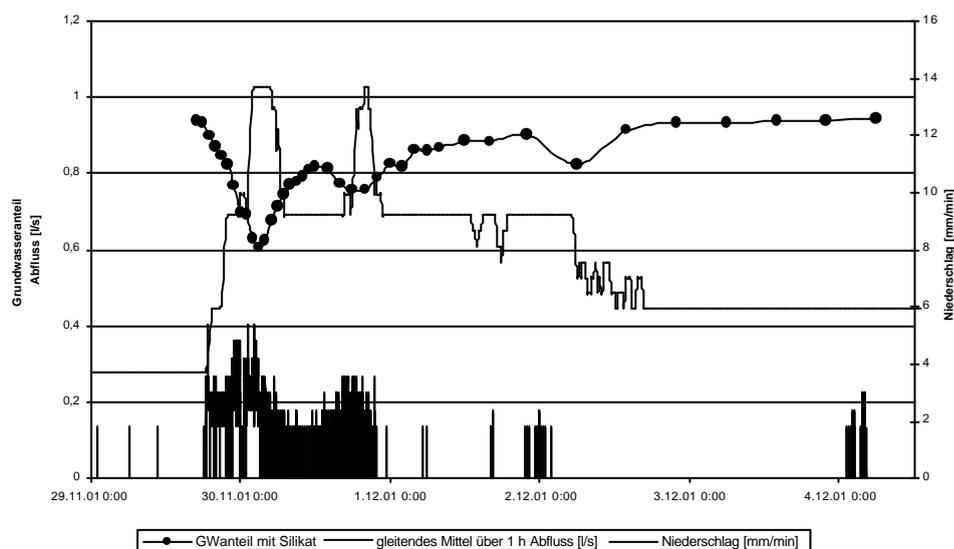


Abb. 4.56: Verlauf des Grundwasseranteils im Sättigungsflächenabfluss unter Verwendung des Tracers Silikat

Zum Vergleich der unterschiedlichen Tracer wurden die mittleren Grundwasseranteile während des Ereignisses berechnet. Deuterium ergab mit 91 % den höchsten Grundwasseranteil, gefolgt von *SumKat* mit 83 % und Silikat mit einem Anteil von 82 %. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurde eine Wasserhaushaltsbilanz der Sättigungsfläche aufgestellt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4.5 aufgeführt. Zunächst wird das Gesamtabflussvolumen für den gesamten Zeitraum als Summe der am Messwehr ermittelten Abflüsse (vgl. Kap...) berechnet. Diese Abflussfülle beläuft sich auf 231,78 m³. Danach erfolgt die Berechnung des zum Abfluss gelangten Grundwasservolumens durch die Multiplikation der ermittelten Grundwasseranteile mit den Abflüssen. Durch Differenzenbildung von Gesamtabflussvolumen und Grundwasservolumen ergibt sich jenes Wasservolumen, welches durch Niederschlag der Sättigungsfläche zugeführt worden sein muss. Unter Berücksichtigung des registrierten Niederschlags am temporär installierten Niederschlagsmesser von 40 mm wird eine Fläche errechnet, die bei vorgegebener Niederschlagsmenge unter der Annahme eines Abflussbeiwertes von 1 die berechnete Abflussfülle liefert. Diese fiktive Sättigungsfläche wird in einem nächsten Schritt mit der im Gelände kartierten Fläche verglichen. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.57 dargestellt.

Tab. 4.5: Auswertung der Zweikomponententrennung und der Bilanzierung des Sättigungsflächenabflusses

	Deuterium	Silikat	SumKat
mittlerer Grundwasseranteil	91%	82%	83%
Berechnete Sättigungsfläche [m ²] bei N=40 mm	563	868	852
Differenz zur kartierten Sättigungsfläche von 860 m ²	-297	8	-8
Volumen des Grundwassers [m ³]	209,37	197,17	197,78
Volumen des Niederschlags [m ³]	22,51	34,70	34,09
Gesamtabflussvolumen [m ³]	231,87	231,87	231,87

Mit den Tracern Silikat und *SumKat* ergeben sich bei Grundwasseranteilen von 82 bzw. 83 % fiktive Sättigungsflächen von 868 m² bzw. 852 m². Diese errechneten Flächen liegen mit einer Abweichung von nur je 8 m² sehr nah an der kartierten Fläche von 860 m². Für die Berechnung mit Deuterium wird die Sättigungsfläche mit 563 m² deutlich unterschätzt.

4.5.3.2 Quantifizierung des zusätzlichen Grundwasseranteils

Die Quantifizierung des Grundwasseranteils am Sättigungsflächenabfluss mit der Methode der Ganglinienseparation ergab, wie oben beschrieben, einen sehr hohen Anteil von über 80 %. Im Hinblick auf die Fragestellung nach der Auswirkung eines lateralen piston flow Prozesses ist die durch das Niederschlagsereignis zusätzlich hervorgerufene Erhöhung des

Grundwasserabflusses von besonderem Interesse. Hierzu wurde eine weitere Bilanzierung durchgeführt. Die Gesamtabflussfülle des untersuchten Ereignisses vom 29.11.01 17:00h bis 04.12.01 6:00h beträgt 231,87 m³. Das Volumen des auf die Sättigungsfläche gefallenen Niederschlags beläuft sich bei einer kartierten Fläche von 860 m² auf insgesamt 34,8 m³. Hinzu gezählt werden muss das Volumen der noch vorhandenen Schneedecke, die im Verlauf des Ereignisses komplett zum Abschmelzen kam. Bei einer Mächtigkeit von 3 cm und einer mittleren Schneedichte von 500 kg/m³ errechnet sich ein Wasseräquivalent nach DYCK&PESCHKE(1995) von 15 mm. Bezogen auf die Fläche von 860 m² ergibt sich ein Schneevolumen von 12,9 m³. Als Summe aus Niederschlagswasser und Schnee wird ein Volumen von 47,7 m³ bestimmt. Vor Niederschlagsbeginn wurde am Messwehr ein konstanter Abfluss von 0,277 l/s gemessen. Dieser Wert stellt den Basisabflusswert des Entwässerungsgrabens dar und ist somit identisch mit dem Ausfluss des Quellbereichs der Sättigungsfläche. Wird dieser Abfluss über die gesamte Zeitspanne des Ereignisses konstant gehalten, errechnet sich ein Volumen von 109,74 m³.

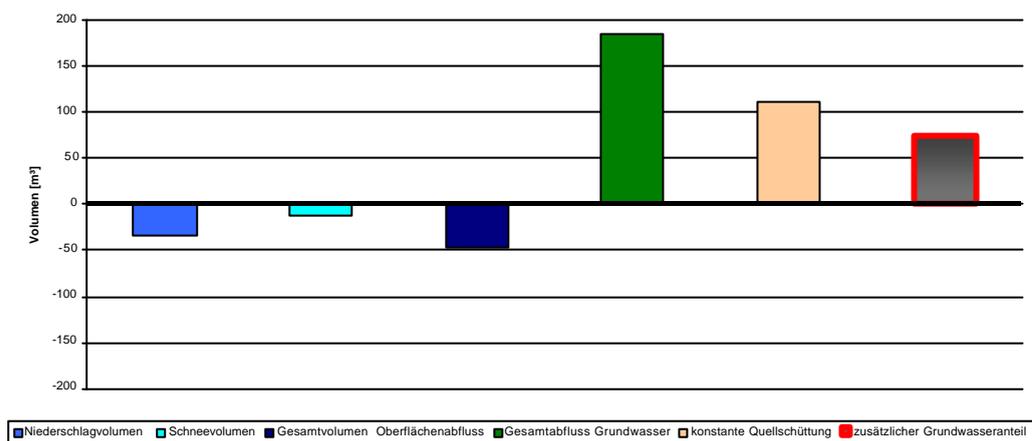


Abb. 4.57: Bilanzierung des zusätzlichen Grundwasserabflusses der Sättigungsfläche

Aus der Differenz der Gesamtabflussfülle und des Volumens der konstanten Quellschüttung ergibt sich ein Volumen von 122,14 m³, bestehend aus Niederschlagswasser und zusätzlichem Grundwasser. Nach Abzug des Oberflächenwassers (Niederschlagsvolumen und Schneevolumen) resultiert ein zusätzliches Grundwasservolumen von 74,43 m³. Wird dieses Volumen auf einen mittleren Abflusswert zurückgerechnet, ergeben sich 0,189 l/s. Dieser Abfluss entspricht 68,23 % der konstanten Quellschüttung. Der zusätzlich zum konstanten Quellabfluss erzeugte Grundwasserabfluss hat einen Anteil von 32,09 % am Gesamtabfluss.

In Abb. 4.58 zeigt sich der zeitliche Abflussverlauf in Bezug auf den Niederschlag und die Reaktionen der Standrohrspiegelhöhen der GWMS 9. In die Darstellung aufgenommen wurde

der Grundwasserabfluss, der über die Zweikomponententrennung mit dem Tracer Silikat separiert wurde. Es zeigt sich deutlich eine direkte Grundwasserantwort auf das Niederschlagsereignis. Besonders zu Zeiten an denen sich nahe der Sättigungsfläche (Messstelle 9) gespannte Grundwasserverhältnisse zeigen, ist eine Zunahme des Grundwasserabflusses zu verzeichnen. Diese Zunahme setzt zeitgleich mit den Niederschlagsphasen ein. Im weiteren Verlauf sinkt die Standrohrspiegelhöhe der GMWS 9 unter die Grundwasserleiteroberfläche ab, und es stellen sich wieder freie Grundwasserverhältnisse ein. Der Niederschlagsimpuls vom 02.12.01 bewirkt kein Ansteigen der Standrohrspiegelhöhe über die GWLOBF, was sich an der zeitlich verzögerten Reaktion des Abflusses erkennen lässt.

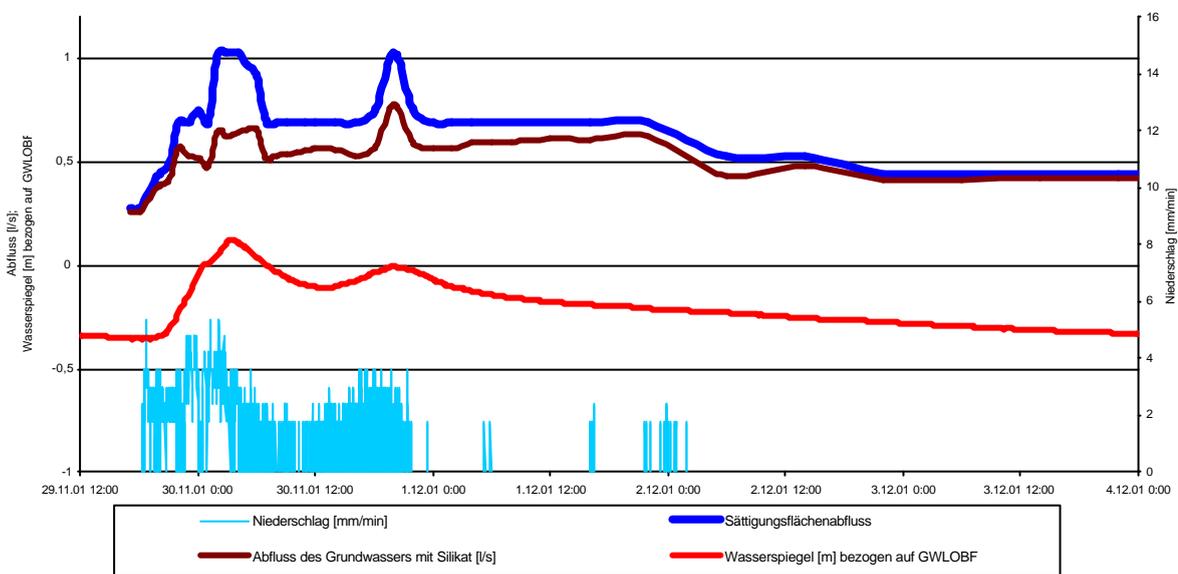


Abb. 4.58: Abfluss des Grundwasseranteils im Vergleich zur Grundwassersituation der sättigungsflächennahen GWMS 9

4.5.4 Diskussion

Die Ergebnisse der Dreikomponententrennung für die GWMS 4 bestätigen eindeutig die Annahme, dass es sich bei der den Grundwasserkörper überdeckenden Schicht, um eine in Relation zum Aquifer gesehen, weniger durchlässige Schicht handelt. Zwar zeigten sich im Verlauf des Ereignisses auch in dieser Messstelle leichte Verdünnungen einzelner Parameter, es konnte jedoch gezeigt werden, dass es sich hierbei um, bereits im Boden gespeichertes Wasser handelt, welches durch infiltrierendes Niederschlagswasser mobilisiert wird. Der geringe Anteil an Niederschlagswasser lässt sich mit Makroporen erklären, die zu einer raschen Infiltration befähigen. Allerdings ist dieser Anteil mit 8% gering. Einen größeren

Anteil stellt das mobilisierte Bodenwasser mit bis zu 40 % dar. Es nimmt entgegengesetzt zur Reaktion der Niederschlagskomponente gegen Ende des Niederschlags ab. Das höher mineralisierte Bodenwasser wurde durch infiltriertes lösungsärmeres und isotopisch leichteres Niederschlagswasser ersetzt. Ein weiterer Beleg für diese Theorie, ist die Reaktion des Nitrats. Es reagiert auf einsetzenden Niederschlag mit einer unmittelbaren Konzentrationserhöhung. Diese kann nur mit einer Beteiligung von Bodenwasser begründet werden.

Die Separation der GWMS 9 belegte die im Kap. 4.4 bereits diskutierten Vermutungen der direkten Beeinflussung durch Niederschlags- und Schneeschmelzwasser. Die zu Beginn hohen Grundwasseranteile im Wasser der GWMS sinken während des Niederschlagsereignisses auf Null ab, steigen jedoch gegen Ende der Beprobungsphase wieder auf über 80 % an. Auch für diese Messstelle wurde eine Bodenwasserkomponente separiert, die sich in ihrem Verlauf als sehr variabel darstellt. Diese Komponente darf nicht als absoluter Anteil angesehen werden, da sich die Tracerkonzentrationen der end member Konzentration von Niederschlag und Bodenwasser nur gering unterscheiden. Vielmehr sollte sie zusammen mit der Niederschlagskomponente als Abschätzung der schnellen Komponenten verstanden werden.

Die Ganglinienseparation des Feuchtflächenentwässerungsgrabens ergab durchgängig hohe Grundwasseranteile, die im Abfluss der Sättigungsfläche nicht zu erwarten waren. So ergaben sich durchschnittliche Grundwasseranteile von 82 % für Silikat und bis 91 % für Deuterium. Eine Beeinflussung durch Niederschlagswasser ist am Verlauf fast aller Parameter deutlich zu erkennen (Abb. 4.33, 4.38 und 4.43). Allerdings erreicht das Niederschlagswasser lediglich einen maximalen Anteil von 40 % während der Niederschlagsereignisse.

Für die Bilanzierungen des Sättigungsflächenabflusses ergaben sich sehr gute Ergebnisse bei der Betrachtung der Tracer Silikat und *SumKat*. Sie zeigen beide eine Abweichung zur kartierten Fläche von weniger als 1 %. Die Größe der Fläche wird allerdings für den Tracer Deuterium um 34 % unterschätzt. Diese Unterschätzung der Sättigungsfläche und demzufolge die Überschätzung des Grundwasseranteils kann mit der noch vorhandenen Schneedecke auf dem Testfeld begründet werden. Die analysierte Schneeprobe ergab einen Deuteriumwert von -67,89 ‰. Dieser ist im Verhältnis zum Niederschlag schwerer und liegt im Bereich der Deuteriumwerte des Grundwassers. Daraufhin wurde eine Dreikomponententrennung mit den Tracern Silikat und Deuterium durchgeführt. Auf diese Separation wird in dieser Arbeit jedoch nicht detailliert eingegangen. Der Schnee auf dem Testfeld wurde als dritte Komponente mit den end member Konzentrationen von -67 ‰ für Deuterium und von 0,2 mg/l für Silikat festgelegt. Letzterer lässt sich mit der längeren Kontaktzeit des Wassers mit dem Boden begründen. Die Ergebnisse der Grundwasseranteile liegen erstaunlich nahe an denen der Zweikomponententrennung mit Silikat. Die Abweichungen liegen i.d.R. unter

0,5%, wobei eine generelle Unterschätzung des Grundwasseranteils bei der Abtrennung mit Deuterium im Vergleich zur Abtrennung mit Silikat festzustellen ist. Für das separierte Grundwasser mit der Dreikomponententrennung ergab sich ein Anteil von 80 % (Abb. 4.59).

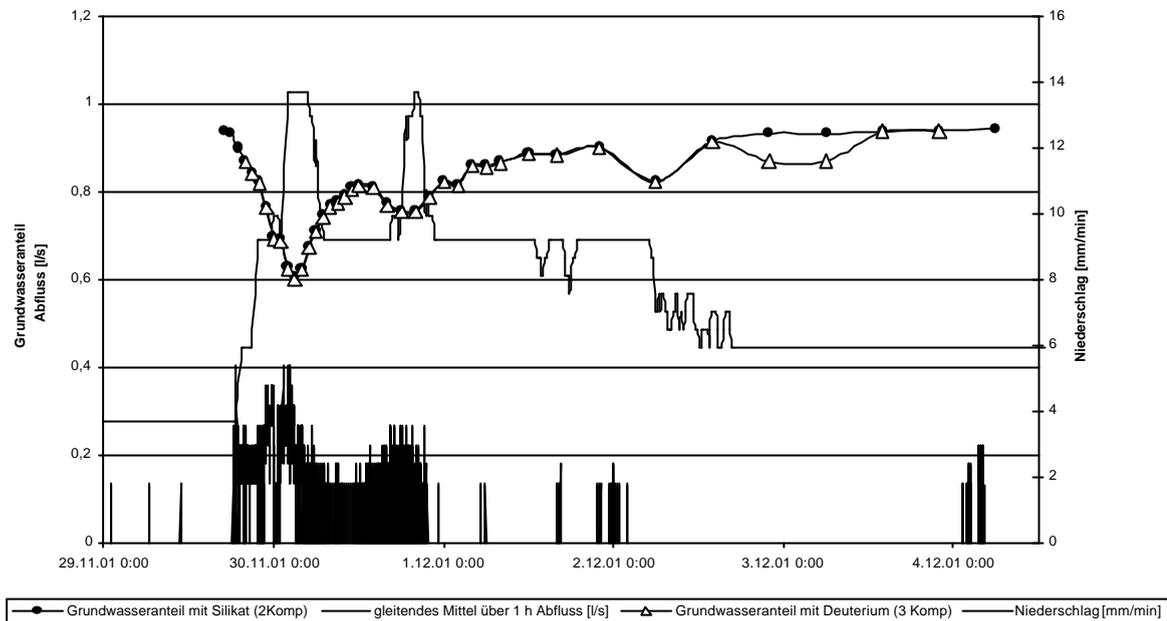


Abb. 4.59: Grundwasseranteile der Zweikomponententrennung mit Silikat und der Dreikomponententrennung mit Deuterium

Die Ganglinienseparationen ergaben durchweg einen hohen Anteil an Vorereigniswasser im Sättigungsflächenabfluss. Zur Quantifizierung des zusätzlich durch das Ereignis generierten Grundwasseranteils wurde eine Gesamtbilanz der Wasseranteile aufgestellt. Aufgrund der recht konstanten Abflüsse der Sättigungsfläche zu Basisabflusszeiten (vgl. Kap.4.2.4) ist davon auszugehen, dass im Bereich des Quellaustritts im hinteren Bereich der Sättigungsfläche der Grundwasserspiegel sich nahezu ständig im gespannten Bereich befindet. Der Grundwasserleiter ist an dieser Stelle nur oberflächlich angeschnitten, so dass bei einem Absinken eines freien Grundwasserspiegels die Quellsschüttung deutlich zurückgehen bzw. ganz versiegen müsste. Dieser Quellaustritt liefert zu Trockenwetterphasen den gesamten Abfluss der Sättigungsfläche. Vom Gesamtvolumen wurde sowohl dieser konstante Basisabflusswert als auch die Ereigniswasserkomponenten abgetrennt. Als resultierendes Volumen ergab sich der zusätzliche Grundwasserabfluss, der im Mittel rund 30 % des Gesamtabflusses und rund 70% des konstanten Grundwasserabflusses beträgt. Bedingt durch den im Quellbereich vorliegenden Aquiferaufbau, mit einer gespannten Grundwassersituation, kann die Abflusserhöhung nur auf durch Druckmechanismen induzierte piston flow Prozesse zurückgeführt werden. Unter Verwendung der Gleichung von Darcy muss bei gleichbleibender hydraulischer Durchlässigkeit das Produkt aus durchflossener Querschnittsfläche und hydraulischem Gefälle einen um 70 % höheren Wert

annehmen, um das Abflussvolumen zu erreichen. Durch die sich bereits im gespannten Bereich befindenden Grundwasserstände ist eine derartiger Grundwasseranstieg bei ungespannten Verhältnissen auszuschließen. Um dennoch die Abflusserhöhung zu erklären, muss der hydraulische Gradient erhöht werden. Der zusätzlich ermittelte Grundwasserabfluss kann somit nur über einen Anstieg des Drucks erklärt werden. Diese Druckausbildung zeigt sich, wie im Kap. 4.3 beschrieben, für das gesamte Profil, vom Hang bis hin zur Sättigungsfläche. Ausgelöst durch das Niederschlagsereignis bildeten sich entlang des Profils an allen GWMS gespannte Wasserstände aus. Diese ermöglichten einen durchgängigen, sich über die gesamte Talauere erstreckenden, lateralen piston flow Prozess. Es kann also davon ausgegangen werden, dass der überwiegende Teil des zusätzlich generierten Grundwasserabflusses über piston flow Prozesse hervorgerufen wurde.

4.5.5 Fazit

Durch die Anwendung der Methode der Ganglinienseparation ließen sich an den unterschiedlichen Messstellen während der Ereignisbeprobung mehrere wichtige Erkenntnisse erzielen. Die Grundwassermessstelle 4 bestätigte den, aufgrund der Bodenansprache, erwarteten hohen Anteil an Grundwasser mit einer Beteiligung von mobilisiertem Bodenwasser und nur sehr geringen direkten Niederschlagswasseranteilen. Somit lässt sich belegen, dass der rasche Anstieg der Standrohrspiegelhöhe, nicht auf rasch infiltrierendes Niederschlagswasser zurückzuführen ist.

Ebenfalls konnte mit der Anwendung dieser Separationsmethode gezeigt werden, dass es sich bei den Verdünnungen der Wasserinhaltsstoffe in den Messstellen 9 und 10 eindeutig um direkt in das Messrohr einlaufendes Niederschlags- und Schneeschmelzwasser handelt.

Für den Sättigungsflächenabfluss ergaben sich sehr hohe Grundwasseranteile. Anhand einer Bilanzierung der Gesamtvolumina konnte ein zusätzlicher Grundwasserabfluss ermittelt werden. Dieser Anteil beträgt rund ein Drittel des Gesamtabflusses. Aufgrund der Aquifereigenschaften im sättigungsflächennahen Bereich und den Erkenntnissen aus Kap. 4.3.2, dass eine Druckübertragung im Talauenbereich während des Ereignisses stattfindet, ist davon auszugehen, dass der überwiegende Anteil dieses zusätzlichen Abflusses durch piston flow generiert wird.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Zur Untersuchung der Hang- und Talauengrundwasserdynamik wurde im Bereich des St. Wilhelmer Tales ein Testfeld mit 10 Grundwassermessstellen eingerichtet. Die Ergebnisse der Untergrunderkundungen, der hydrologischen Untersuchungen durch Stichtagsbeprobungen und der Intensivmesskampagne wurden in den jeweiligen Kapiteln im Einzelnen ausführlich dargestellt und diskutiert. So war es auf der Basis der erhobenen Daten und deren Auswertungen möglich, detaillierte Informationen zur Grundwasserdynamik und Druckwellenausbreitung im Aquifer zu erhalten. In diesem Kapitel sollen nun die Ergebnisse abschließend zusammengefügt, und Schlussfolgerungen, die sich aus den Untersuchungen ergaben, dargestellt werden.

Die Untergrunderkundungen mittels Bodensondierungen ergaben für den Untersuchungsbereich einen zusammenhängenden kiesigen Aquifer, der von einer bis zu einem Meter mächtigen schluffigen Aquitarde überlagert wird. Bis zu einer Maximalteufe der Sondierungen von zwei Metern wurde der Aquifer nicht durchörtert. Kornverteilung und Feinbodenansprache erhaben eine hydraulische Durchlässigkeiten für die Aquitarde von $2,3 \cdot 10^{-7}$ m/s und $1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Für den Aquifer resultieren aus der Bodenansprache Werte von $3,2 \cdot 10^{-5}$ m/s. Aquitarde und Aquifer sind lateral und vertikal durch deutliche Litho- und Strukturvarianzen gekennzeichnet. Dies bestätigte sich auch durch die an den GWMS durchgeführten Pumpversuche.

Die Ganglinien der Standrohrspiegelhöhen aller Grundwassermessstellen ergaben einen hohen Zusammenhang mit den Niederschlägen. So lieferten Korrelations- und Regressionsberechnungen mittlere bis starke Zusammenhänge zwischen den Anstiegen der Standrohrspiegelhöhen und dem Vorregenindex, der ein Maß der Gebietsvorfeuchte darstellt, sowie mit der Niederschlagsmenge, als Charakteristik des Niederschlagsereignisses. Um die zeitliche Reaktion der Standrohrspiegelerhöhung der Grundwassermessstellen besser zu beschreiben, und somit gespannte und ungespannte Verhältnisse zu berücksichtigen, wurden die statistischen Auswertungen zusätzlich mit den Anstiegsraten der Standrohrspiegelhöhen durchgeführt. Diese Auswertungen ergaben schlechtere Korrelationen mit zunehmender Entfernung vom Hang. Dies deutet auf eine nachlassende Niederschlagsbeeinflussung der Standrohrspiegelhöhen bei zunehmender Entfernung vom Grundwasserneubildungsgebiet hin. Diese lateral zunehmenden Dämpfungen und Phasenverschiebungen können nur mit lateralen Fließvorgängen oder Druckübertragungen erklärt werden. Die Untersuchungen ergaben weiterhin, dass die Standrohrspiegelhöhen von den vorausgegangen Wasserständen, der Gebietsvorfeuchte und der Niederschlagscharakteristik, wie Niederschlagsmenge und Niederschlagsintensität, abhängen. Aufgrund der eingeschränkten Ereignisanzahl sind allerdings nur Angaben über die Größenordnungen möglich, und es wird in weiteren Untersuchungen zu klären sein, in wieweit eine Kombination dieser Faktoren für die

Reaktionen der Standrohrspiegelhöhen verantwortlich ist. Die routinemäßigen Beprobungen der Grundwassermessstellen und Oberflächengewässer ergaben, dass die Grundwasserproben aus einem zusammenhängenden Grundwasserkörper stammen, dessen hydrochemische Zusammensetzung aufgrund seiner Überdeckung nur geringfügig von Niederschlagsereignissen beeinflusst wird. Die hydrochemischen Signaturen der untersuchten Quelle und des daraus resultierenden Entwässerungsgrabens zeigten eine zu den Grundwassermessstellen unterschiedliche Zusammensetzung. Es ist anzunehmen, dass sich der Einzugsbereich der Quelle von dem der GWMS unterscheidet und im tieferliegenden Hangbereich zu suchen ist. Dies zeigte sich deutlich an den hohen Silikatkonzentrationen, den höheren elektrischen Leitfähigkeiten und konstanten Wassertemperaturen.

Um das räumliche Verhaltensmuster der Standrohrspiegelhöhen zu beschreiben, wurden Rangfolgen des Scheiteleintretens und Verzögerungszeiten der Messstellen untereinander gebildet. Anhand dieser zeigte sich die Heterogenität des Untergrundes eindrucklich. Während die Standrohrspiegelhöhen der GWMS des Profils 1 relativ zeitgleich reagieren, und geringe Verzögerungszeiten aufweisen, zeigt sich für das Profil 2 zuerst eine Zunahme der Verzögerungszeiten in Richtung Terrasse, gefolgt von einer Abnahme in Richtung Vorfluter. Hier offenbaren sich die unterschiedlichen Reaktionen der beiden Profile. Während die Druckübertragung des ersten Profils, vom Hang über die Terrasse bis hin zur Sättigungsfläche durchgehend funktioniert, ist am Profil 2 diese durch weniger intensiv reagierende GWMS stellenweise unterbrochen. An der vorfluternahen Grundwassermessstelle sind sogar kontinuierlich ungespannte Grundwasserverhältnisse zu verzeichnen. Das Profil 1 ist komplett durch die Hanggrundwasserdynamik kontrolliert, wohingegen das Profil 2 zusätzlich im vorfluternahen Bereich (GWMS 10) eine Interaktion zwischen Grundwasser und Oberflächengewässer zeigt.

Die Analysewerte der Stichtagsproben ließen eine räumliche Konzentrationsveränderung vom Hang in Richtung Vorfluter erkennen. Silikat wies ein Ansteigen der Konzentrationen von über 1,5 mg/l entlang des Fließweges auf, während für Magnesium und Calcium, aufgrund der Stoffeigenschaften, eine Abnahme der Konzentrationen zu verzeichnen war. Die Ergebnisse der hydrochemischen Parameter lassen auf langsame Fließbewegungen im Untergrund schließen, die um Größenordnungen niedriger liegen müssen, als die geringen Verzögerungszeiten der Standrohrspiegelhöhen. Aufgrund der Durchlässigkeiten und der hydraulischen Gradienten kann eine in diesem Geschwindigkeitsbereich liegende Fließgeschwindigkeit ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse der räumlichen Betrachtung zeigen eindrucklich die Heterogenität des Untergrundes in enger räumlicher Nachbarschaft. Während die Druckwellenausbreitung vom Hang bis in vorfluternahe Bereiche am Profil 1 stattfinden kann, ist diese am Profil 2 nicht durchgängig festzustellen.

Die Ende November durchgeführte Ereignisbeprobung bestätigte zunächst die Annahmen der Bodensondierungen und Stichtagsbeprobungen, dass es sich bei der den Aquifer überlagernden Schicht um eine Aquitarde handelt. Es offenbarten sich aber auch die

technischen Grenzen und Probleme einer Intensivbeprobung, besonders vor dem Hintergrund einer noch vorhandenen Schneedecke auf dem Testfeld. Für die am Hangfuß gelegene GWMS konnte eine zeitlich gering variable Reaktion der hydrochemischen Parameter ohne direkte Beeinflussung durch Niederschlagswasser bestätigt werden. Hingegen stellt sich für die anderen Messstellen, bedingt durch technische Probleme, ein direkter Einfluss durch Schneeschmelz- und Niederschlagswasser heraus. Dieser konnte jedoch mit Hilfe der hydrochemischen Parameter und Isotopenwerte eindeutig berücksichtigt werden. Durch den Vergleich der vorfluternahen Messstelle und dem Talbach ergab sich eine Interaktion des Grundwassers mit dem Oberflächengewässer. Mischungsberechnungen ergaben Anteile an Vorfluterwasser von bis zu 61 % in der GWMS. Die Analysewerte dieser Ereignisbeprobung stellen die Grundlage für die folgenden Quantifizierungen der Abflusskomponenten dar.

Die durchgeführten Ganglinienseparationen bestätigten zum einen die durch die vorausgegangenen Untersuchungen und Analysen aufgezeigten Vermutungen, und befähigten zum anderen zur Bestimmung der Abflussanteile und Quantifizierung des Sättigungsflächenabflusses. Die Separationen mit den Tracern Silikat, dem Summenparameter der Kationen SumKat, und Deuterium ergaben Grundwasseranteile während der Ereignisbeprobung von mehr als 80 %. Die errechnete Sättigungsfläche, bestimmt über die sich ergebenden Niederschlagsanteile, stimmte sehr gut mit der im Gelände kartierten Fläche überein. Durch die Aufstellung der Wasserhaushaltsbilanz der Sättigungsfläche konnte ein Anteil von etwa 30 % an zusätzlichem Grundwasserabfluss ermittelt werden, der bedingt durch das Niederschlagsereignis aus dem Aquifer herausgedrückt wird. Diese Erhöhung des Grundwasserabflusses kann aufgrund der lokalen Untergrundverhältnisse, auf Druckübertragungsmechanismen zurückgeführt werden. Es bleibt allerdings zu klären in wie weit bereits in der Feuchtfläche, z.B. in Mulden, gespeichertes Vorereigniswasser an dieser Grundwasserkomponente beteiligt ist.

Folgende Voraussetzungen sprechen für die Existenz einer lateralen Druckübertragung, ausgehend vom Hang in Richtung Vorfluter. Das Blockschuttfeld im oberen Hangbereich stellt ein großes potentiell infiltrationsfähiges Gebiet mit sehr hohen hydraulischen Durchlässigkeiten dar. In diesem Bereich kann Niederschlagswasser schnell in den Untergrund gelangen, und an der Basis des Blockschuttes über diskrete Fließwege rasch an den Übergangsbereich von Blockschutt zu Hanggrundwasserleiter herangeführt werden, und in diesem Bereich akkumulieren. Durch die Bodensondierungen konnte ein zusammenhängender Hang- und Talauenaquifer festgestellt werden. Zusätzlich wird dieser von einer hydraulisch undurchlässigeren Schicht, einer Aquitarde, überdeckt. Die Anstiege der Standrohrspiegelhöhen setzen mit geringer Verzögerungszeit zu den Niederschlagsereignissen ein und die Standrohrspiegelhöhen der Grundwassermessstellen des Profils 1 weisen während einzelner Niederschlagsereignisse durchgehend gespannte Verhältnisse auf, so dass eine Druckübertragung möglich ist. Interpolationen des räumlichen Verhaltens der Standrohrspiegelhöhen zeigten eindeutig eine Wellenausbreitung vom Hang in

Richtung Vorfluter. An der hangfußnahen Grundwassermessstelle konnte mit einem konstanten Verlauf der hydrochemischen Parameter die direkte Beeinflussung durch Ereigniswasser ausgeschlossen werden. Durch die Quantifizierung des Sättigungsflächenabflusses wurde ein zusätzlicher Grundwasserabfluss während gespannter Grundwasserverhältnisse am Profil 1 ermittelt.

Alle diese Indizien sprechen für das Vorhandensein einer lateralen Druckübertragung. Allerdings zeigten die Untersuchungen auch die räumliche Heterogenität des Untergrundes. So konnte für das Profil 2 eine durchgängige Druckübertragung über das gesamte Testfeld nicht nachgewiesen werden. Jedoch zeigten die hydrochemischen Analysen, dass eine Interaktion zwischen vorfluternahem Grundwasserleiter und Talbach im Hochwasserfall auftritt.

Das Blockschutfeld stellt das vermutete Grundwasserneubildungsgebiet der lateralen Druckübertragung dar. Besonderes Interesse gilt daher den Fließwegen innerhalb des Blockschuttetes und vor allem im Übergangsbereich von Blockschutfeld und Hang- bzw. Talauenaquifer. Dieser Bereich ist für die Entstehung der lateralen Prozesse von essentieller Bedeutung. An dieser Stelle wäre der Einsatz von künstlichen Tracern und geophysikalischen Erkundungsmethoden zur Klärung der Untergrundverhältnisse vielversprechend. Geophysikalische Methoden könnten ebenfalls wichtige Informationen zur Mächtigkeit des Aquifers liefern, der aufgrund der technischen Möglichkeiten nicht vollständig erfasst werden konnte. Weiterhin wäre auf experimentellem Wege zu klären, wie hoch die diffusen Wassereinträge aus dem Talaquifer in den Vorfluter während Niederschlagsereignissen anzusetzen sind. Die Untersuchungen der Sättigungsfläche ergaben hohe Grundwasseranteile während Niederschlagsereignissen., wobei dieser Anteil in einer weiteren Studie mit geeigneten Methoden verifiziert werden muss. Dazu kann eine weitere Grundwassermessstelle direkt am Quellbereich der Sättigungsfläche oder eine Ereignisbeprobung mit abgedeckter Fläche hilfreich sein.

Exemplarisch konnten im Bereich des Testfeld Druckübertragungsmechanismen nachgewiesen werden. Ein weiterer Schritt muss die regionale Übertragung der Ergebnisse auf größere Gebiete, wie z.B. das Dreisameinzugsgebiet sein. Die oben aufgeführten Voraussetzungen stellen Auswahlkriterien für Flächen mit piston flow Prozess als mögliche schnelle Abflusskomponente dar. Mit Hilfe einer Raumgliederung können Bereiche mit gut ausgebildeten Talauen mit ausreichender Überdeckung, steilen Hängen mit sich am Hangfuß verändernder Hangneigung und schuttreichen Infiltrationsgebieten ausgewiesen werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit konnten zu einer deutlichen Verbesserung des Prozessverständnisses im Hinblick auf die Grundwasserdynamik am Hangfuß und der Talau im Bruggaeinzugsgebiet beitragen. Nur über die Kombination unterschiedlicher Methoden und dem Einsatz verschiedener geogener Tracer konnten die dominanten Abflussbildungsprozesse im Bereich des Testfeldes identifiziert werden. Dennoch warfen die Ergebnisse neue Fragestellungen auf, die in weiteren Studien zu klären sein werden.

6. Literaturverzeichnis

- AG BODEN (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl., Nachdr., Hrsg. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland, Hannover.
- BAUMGARTNER, A. & H.J. LIEBSCHER (1996): Allgemeine Hydrologie - quantitative Hydrologie, 2. Auflage, Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- BERGMANN, H., J. FRANK, T. HARUM, W. PAPESCH, D. RANK, G. RICHTIG & H. ZOJER (1996): „Abflußkomponenten und Speichereigenschaften, Konzeptionen und Auswertemethoden“. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 48, Heft1/2, 27-45.
- BIESKE, E. (1968): Nold Brunnenfilterbuch, J.F. Nold & Co., Darmstadt.
- BOS, M.G. (1978): Discharge Measurement Structures, Int. Inst. For Land Reclamation and Improvement, Wageningen.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2000): Hydrologischer Atlas von Deutschland, 1. Lieferung, Bonn.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2002): Daten zur Umwelt 2000, Entwicklung des pH-Wertes im Niederschlag, (URL: <http://www.umweltbundesamt.org/dzu/Y00388.html>, 2002-03-25), Bonn.
- BURROUGH, P.A. & R.A. MCDONNELL (1998): Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, New York.
- BUTTLE, J.M. & K. SAMI (1992): Testing the groundwater ridging hypothesis of streamflow generation during snowmelt in a forested catchment; *Journal of Hydrology*, 135, 53-72.
- CHRISTOPHERSEN, N.C., NEAL, C., HOOPER, R.P., VOGT, R.D., ANDERSEN, S. (1990): Modelling Streamwater Chemistry as a Mixture of Soilwater End-Members-A Step towards Second-Generation Acidification Models, *Journal of Hydrology*, 116, 307-320.
- DIN 4049, Teil 3 (1994): Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Beuth Verlag, Berlin.
- DEUTSCHES NATIONALKOMITEE FÜR DAS INTERNATIONALE HYDROLOGISCHE PROGRAMM (IHP) DER UNESCO UND DAS OPERATIONELLE HYDROLOGISCHE PROGRAMM (OHP) DER WMO (1992): International Glossary of Hydrology, Version Englisch/Deutsch, 2. Auflage, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2001): Witterungsreport / Express, Jahrgang 3, Heft September-Dezember 2001, Geschäftsfeld Klima- und Umweltberatung, Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach am Main.

- DYCK S. & G. PESCHKE (1995): Grundlagen der Hydrologie, Verl. für Bauwesen, Berlin.
- FEGER, K.-H., H. KÖHLER & M. ARMBRUSTER (1999): Beeinflussung der Wasserqualität in einem bewaldeten Einzugsgebiet durch biogeochemische Stoffumsetzungen in bachnahen Böden, Forstw. Cbl. 118, 345-354, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin.
- FVA (1994): Erläuterungen zu den Standortskarten des Forstbezirks Kirchzarten. Forstliche Versuchsanstalt Freiburg (FVA), Abteilung Botanik und Standortkunde, Freiburg i. Br.
- GENSER, H. (1997): Geologischer Abriss über die Vorbergzonen des südöstlichen Oberrheingebietes, in: Freiburger Geographische Hefte, Nr. 36, Hrsg.: Mäckel, R. & B. Metz, Selbstverlag des Inst. für Physische Geographie der Universität Freiburg i. Br.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1981): Erläuterungen zur geologischen Karte von Freiburg im Breisgau und Umgebung 1:50000. 2. Auflage, Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1990): Erläuterungen zur geologischen Karte Blatt 8114 Feldberg 1:25000. 2. verbesserte Auflage, Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1995): Symbolschlüssel Geologie und Bodenkunde Baden-Württemberg, Informationen 5, Hrsg. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i. Br.
- GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER (2002): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Physikalische, chemische und bakteriologische Verfahren, Losebl.-Ausgabe, Hrsg. Fachgruppe Wasserchemie in d. Gesellschaft Deutscher Chemiker im Gemeinschaft mit dem Normenausschuß Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Wiley-VCH, Weinheim.
- GUNKEL, G. (1996): Renaturierung kleiner Fleißgewässer, Ökologische und ingenieurtechnische Grundlagen, Gustav Fischer Verlag, Jena.
- GUTKNECHT, D. (1996): „Abflüßentstehung an Hängen – Beobachtungen und Konzeptionen“. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*. 48, Heft 5/6, 134-144.
- HÄDRICH, F. & K. STAHR (1997): Die Böden in der Umgebung von Freiburg im Breisgau, in: Freiburger Geographische Hefte, Nr. 36, Hrsg.: Mäckel, R. & B. Metz, Selbstverlag des Inst. für Physische Geographie der Universität Freiburg i. Br.
- HERSCHY, R.W. (1978): Hydrometry, Principles and Practices, Wiley and Sons, Chichester.
- HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie, 5. überarbeitete und erweiterte Auflage, Enke Verlag, Stuttgart.

- HOOPER, R.P. & C.A. SHOEMAKER (1986): A Comparison of Chemical and Isotopic Hydrograph Separation, *Water Resources Research*, 22, No.10, 1444-1454.
- JAYATILAKA, C.J. & R.W. GILLHAM (1996): "A deterministic-empirical model of the effect of the capillary fringe on near-stream area runoff 1. Description of the model". *Journal of Hydrology*, 184, 299-315.
- JAYATILAKA, C.J., R.W. GILLHAM, D.W. BLOWES & R.J. NATHAN (1996): "A deterministic-empirical model of the effect of the capillary fringe on near-stream area runoff 2. Testing and application". *Journal of Hydrology*, 184, 317-336.
- KIENZLER, P.M. (2001): Experimentelle Untersuchungen zur chemischen Zusammensetzung oberflächennaher unterirdischer Abflusskomponenten im Bruggaeinzugsgebiet, Diplomarbeit am Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i. Br. (unveröffentlicht).
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ (LFU) BADEN-WÜRTTEMBERG (1999): Hochwasserabfluss-Wahrscheinlichkeiten in Baden-Württemberg. Oberirdische Gewässer/ Gewässerökologie, Band 54, Karlsruhe.
- LANDESHYDROLOGIE (1982): Handbuch für die Abflussmengenmessung, Mitteilungen Nr.4, Landeshydrologie, Bundesanstalt für Umweltschutz (CH), Bern.
- LAUDON, H. & O. SLAYMAKER (1997): Hydrograph separation using stable isotopes, silica and electrical conductivity: an alpine example, *Journal of Hydrology* 201, 82-101.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (1982): Grundwasser, Richtlinien für Beobachtung und Auswertung, Teil 1, Grundwasserstand. Woeste-Druck und Verlag, Essen.
- LEIBUNDGUT, CH. (1984): Zur Erfassung hydrologischer Messwerte und deren Übertragung auf Einzugsgebiete verschiedener Dimensionen. *Geomethodica* 9, Veröffentlichung des 9. Basler Geomethodischen Colloquiums, 141-170.
- LINDENLAUB, M. (1998): Abflusskomponenten und Herkunftsräume im Einzugsgebiet der Brugga, Dissertation, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg i. Br.
- MANIAK, U. (1997): Hydrologie und Wasserwirtschaft, eine Einführung für Ingenieure, 4. überarb. und erw. Aufl., Springer Verlag, Berlin.
- METZ, B. (1997): Glaziale Formen und Formungsprozesse im Schwarzwald, in: Freiburger Geographische Hefte, Nr. 36, Hrsg.: Mäkel, R. & B. Metz, Selbstverlag des Inst. für Physische Geographie der Universität Freiburg i. Br.
- MOSER, H. & W. RAUERT (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie. Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 8, Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- OGUNKOYA, O.O. & A. JENKINS (1993): Analysis of storm hydrograph and flow pathways using a three-component hydrograph separation model, *Journal of Hydrology*, 142, 71-88.

- PARLOW, E. & ROSNER, H.-J. (1997): Das Klima des Oberrheingrabens, in: Freiburger Geographische Hefte, Nr. 36, Hrsg.: Mäckel, R. & B. Metz, Selbstverlag des Inst. für Physische Geographie der Universität Freiburg i. Br.
- REHFUESS, K. (1990): Waldböden, Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung, 2. völlig bearbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Paul Parey, Hamburg.
- REKLIP (1995): Klimaatlas Oberrhein Mitte-Süd, Atlas Climatique du Fossé Rhéan Méridional, Zürich-Offenbach-Strasbourg.
- RICHTER, W. & W. LILLICH (1975): Abriss der Hydrogeologie, Schweizerbart Verlag, Stuttgart.
- ROSER, S. (2001): Flächendetaillierte Weiterentwicklung des prozessorientierten Einzugsgebietsmodells TAC und Visualisierung der Modelergebnisse in einem dynamischen GIS, Diplomarbeit am Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i. Br. (unveröffentlicht).
- RUMP, H.H. (1998): Laborhandbuch für die Untersuchung von Wasser, Abwasser und Boden, 3. völlig überarb. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim.
- SCHACHTSCHABEL, H. et al. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde, 13. durchgesehene Auflage, Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHEYTT, T & F. HENGELHAUPT (2001): Auffüllversuche in der Wassergesättigten und ungesättigten Zone – ein Vergleich unterschiedlicher Verfahren, in: Grundwasser, Heft 2 Juni 2001, Hrsg. Fachsektion Hydrogeologie in der deutschen Geologischen Gesellschaft, Springer Verlag, Heidelberg.
- SCHLITGEN, R. (1990): Einführung in die Statistik, Analyse und Modellierung von Daten, 2. Auflage, Oldenbourg Verlag, München.
- SCHREINER, M. & F.W. DENZ (1994): Erläuterungen zu den Standortskarten des Forstbezirks Kirchzarten, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt, Abteilung Botanik und Standortkunde, Freiburg.
- SCHREINER, M. & K. KREYSING (1998): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 4, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Springer Verlag, Berlin.
- SCHRÖDER, R. (1994): Technische Hydraulik, Kompendium für den Wasserbau, Springer Verlag, Berlin.
- SKLASH, M.G. & R.N. FARVOLDEN (1979): The role of groundwater in storm runoff; *Journal of Hydrology*, 43, 45-65.
- SOULSBY, C. et al. (1998): "Hydrogeochemistry of shallow groundwater in an upland Scottish catchment". *Hydrological Processes*, 12, 1111-1127.

TRUTRACK (2002): Home Page, Manufactures of Data Loggers and Weather Stations, URL: <http://www.trutrack.com/wt-hr.html>, 2002-01-07).

UHLENBROOK S. & CH. LEIBUNDGUT (1997): Abflussbildung bei Hochwasser, *Wasser und Boden*, 9, 13-22.

UHLENBROOK, S. (1999): Untersuchungen und Modellierung der Abflussbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet, Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 10, Inst. für Hydrologie Universität Freiburg i. Br., Freiburg i. Br.

WELS, CH., R.J. CORNETT & B.D. LAZERTE (1991): Hydrograph Separation: A Comparison of Geochemical and Isotopic Tracers, *Journal of Hydrology*, 122, 253-274.

Persönliche Mitteilungen:

ZOLLINGER, G. (2001): Institut für Physische Geographie der Universität Freiburg i. Br.

Anhang A

Tab. A1: Allgemeine Angaben zu den Grundwassermessstellen

GWMS Nr.	Einbau-datum	RW	HW	Höhe [m+NN]	Sond. Nr.	Sond.-tiefe [m]	Messstellentiefe [m]	Logger Nr.
1	10.9.01	3422791	5306230	797,4	20	1,8	1,47	108037
2	11.9.01	3422751	5306217	795,3	22	1,8	1,64	106040
3	12.9.01	3422807	5306245	797	23	1,9	1,39	106035
4	12.9.01	3422862	5306245	798,7	15	2	1,69	107077
5	14.9.01	3422828	5306270	797,7	25	1,9	1,51	106035
6	19.9.01	3422856	5306291	801,9	30	1,9	1,5	107074
7	19.9.01	3422880	5306254	801,5	17	2	1,46	106046
8	20.9.01	3422837	5306229	797,9	34	1,9	1,53	107078
9	29.10.01	3422799	5306201	796	44	1,75	1,44	106049
10	29.10.01	3422724	5306207	795	46	1,75	1,4	106037

Tab. A2: Übersicht der Pumpversuche

	Kurzpumpversuch im instationären Zustand			Mittelwert (Kurzpumpversuche)	Entnahmemenge
Datum	20.09.01	31.10.01	21.11.01	-	21.11.01
GWMS	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
1	5,75E-07	-	-	5,75E-07	-
2	6,14E-07	-	1,48E-07	3,81E-07	-
3	1,46E-06	-	-	1,46E-06	1,30E-04
4	9,35E-08	-	1,25E-07	1,09E-07	-
5	2,41E-07	-	-	2,41E-07	-
6	1,06E-07	-	-	1,06E-07	-
7	5,63E-09	-	-	5,63E-09	-
8	8,16E-08	-	6,53E-08	7,34E-08	-
9	-	4,05E-09	-	4,05E-09	-
10	-	2,50E-08	-	2,50E-08	-

Tab. A3: Übersicht der Niederschlagsereignisse mit einer Gesamtmenge >10mm der Klimastation Katzensteig im Untersuchungszeitraum. Die markierten Ereignisse mit Hilfe einer Regressionsbeziehung mit der Klimastation Zastler rekonstruiert.

Ns Nr.	Beginn	Ende	Dauer [min]	Ns Menge [mm]	Intensität [mm/10min]	Intensität [mm/h]	Intensität max. [mm/10min]
157	7.11.01 0:50	7.11.01 7:40	420	10,7	0,25	1,53	0,9
159	7.11.01 14:40	7.11.01 23:40	550	11,7	0,21	1,28	0,6
163	8.11.01 11:50	8.11.01 17:10	330	12,0	0,36	2,18	1,3
187	28.11.01 8:50	28.11.01 14:00	320	12,6	0,39	2,36	0,7
176	22.11.01 13:50	22.11.01 21:40	480	12,7	0,26	1,59	0,9
181	25.11.01 6:40	25.11.01 17:20	650	12,7	0,20	1,17	0,8
154	31.10.01 17:30	31.10.01 20:00	160	13,1	0,82	4,91	1,9
125	7.10.01 1:00	7.10.01 10:40	590	17,7	0,30	1,80	1,6
98	19.9.01 15:20	20.9.01 6:50	940	19,5	0,21	1,24	0,7
117	3.10.01 21:20	4.10.01 3:10	360	22,4	0,62	3,73	2,9
91	16.9.01 19:00	17.9.01 13:20	1100	25,5	0,23	1,39	0,8
213	29.12.01 4:10	29.12.01 23:20	1160	35,9	0,31	1,86	1,4
190	29.11.01 18:20	30.11.01 21:40	1650	41,0	0,25	1,49	0,8
79	13.9.01 17:50	14.9.01 9:00	910	45,5	0,50	3,00	2,8
212	28.12.01 2:10	29.12.01 1:00	1370	49,9	0,36	2,19	0,8

Tab. A4: Ereignisübersicht GWMS 1

Ereignis Nr.	Beginn	Beginn_Wst. GWOBF [mm]	Peak_Wst. GWOBF [mm]	Anstiegszeit [h]	Anstiegshöhe [mm]	Diff. NS_Beginn Pegel_Beginn [h]
1	13.9.01 23:00	-294	410	05:30	704	05:10
2	16.9.01 1:20	-141	164	13:20	305	02:20
3	19.9.01 20:30	-119	68	12:30	187	05:10
4	20.9.01 21:00	-40	-2	04:20	38	03:50
5	24.9.01 2:00	-173	-154	07:00	19	05:40
6	3.10.01 21:50	-355	-135	10:20	220	00:30
7	7.10.01 2:30	-306	-120	13:00	186	01:30
8	24.10.01 0:10	-478	-157	17:30	321	07:10
9	31.10.01 18:40	-448	-282	16:10	166	01:10
10	6.11.01 20:00	-501	22	14:50	523	04:00
11	7.11.01 17:20	-56	120	06:10	176	16:30
12	8.11.01 14:40	-47	269	03:40	316	08:10
13	13.11.01 7:00	-252	-220	15:20	32	05:00
14	22.11.01 17:10	-409	-358	11:40	51	03:20
15	25.11.01 15:10	-407				08:30
16	27.11.01 9:30	-307	-149	11:10	158	07:00
17	28.11.01 12:20	-235	-184	08:20	51	03:30
18	29.11.01 20:30	-240	217	09:20	457	02:10
19	30.11.01 13:50	84	199	07:50	115	13:50

Tab. A5: Ereignisübersicht der Niederschläge

Ns Nr.	Beginn	Ende	Dauer [min]	Ns Menge [mm]	Intensität [mm/10min]	Intensität max. [mm/10min]	7-d-VRI
79,00	13.9.01 17:50	14.9.01 9:00	910,00	45,50	0,50	2,80	37,01
85-91	15.9.01 23:00	17.9.01 13:20	1680,00	42,20	0,25	2,40	47,83
98,00	19.9.01 15:20	20.9.01 6:50	940,00	19,50	0,21	0,70	35,98
101,00	20.9.01 17:10	20.9.01 22:00	300,00	9,20	0,31	1,40	35,98
106,00	23.9.01 20:20	24.9.01 7:50	700,00	7,30	0,10	0,40	17,68
117,00	3.10.01 21:20	4.10.01 3:10	360,00	22,40	0,62	2,90	16,01
125,00	7.10.01 1:00	7.10.01 10:40	590,00	17,70	0,30	1,60	15,02
139-149	23.10.01 17:00	25.10.01 19:50	1330,00	29,10	0,22	1,00	14,36
154,00	31.10.01 17:30	31.10.01 20:00	160,00	13,10	0,82	1,90	3,76
156,00	6.11.01 16:00	6.11.01 22:00	370,00	5,60	0,15	0,30	3,99
157-160	7.11.01 0:50	8.11.01 4:40	1260,00	24,80	0,20	0,90	21,14
161-163	8.11.01 6:30	8.11.01 17:10	440,00	13,40	0,30	1,30	21,14
170,00	13.11.01 2:00	13.11.01 16:30	880,00	4,90	0,06	0,10	11,62
176,00	22.11.01 13:50	22.11.01 21:40	480,00	12,70	0,26	0,10	0,15
181-184	25.11.01 6:40	26.11.01 2:20	820,00	13,40	0,16	0,80	15,36
185,00	27.11.01 2:30	27.11.01 19:40	1040,00	9,80	0,09	0,50	12,76
187,00	28.11.01 8:50	28.11.01 14:00	320,00	12,60	0,39	0,10	16,78
190,00	29.11.01 18:20	30.11.01 21:40	1650,00	41,00	0,25	0,80	27,25

Tab. A6: Zur Interpretation des empirischen Korrelationskoeffizienten (nach SCHLITTEGEN 1990)

Emp. Korrelationskoeffizient $ r $	Bestimmtheitsmaß r^2	Interpretation
0,0	0,0	kein Zusammenhang
0-0,5	0,0-0,25	schwacher Zusammenhang
0,5-0,8	0,25-0,64	mittlerer Zusammenhang
0,8-1	0,64-1	starker Zusammenhang
1	1	perfekter Zusammenhang

Tab. A7: Korrelationen Ereignisbeginn. Die gelb unterlegten GWMS gehören zum Profil 1, die grauen zum Profil 2

Korrel.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
P1	1,00	0,85	0,98	0,85	1,00	0,96	0,96	0,89	0,83	0,68
P2	0,85	1,00	0,86	0,62	-1,00	0,80	0,99	0,64	0,75	0,31
P3	0,98	0,86	1,00	0,96		0,87	1,00	0,86	0,87	0,60
P4	0,85	0,62	0,96	1,00	0,89	0,42	0,36	0,78	0,90	0,77
P5	1,00	-1,00		0,89	1,00					
P6	0,96	0,80	0,87	0,42		1,00	0,59	1,00		
P7	0,96	0,99	1,00	0,36		0,59	1,00	0,99		
P8	0,89	0,64	0,86	0,78		1,00	0,99	1,00	0,41	1,00
P9	0,83	0,75	0,87	0,90				0,41	1,00	0,72
P10	0,68	0,31	0,60	0,77				1,00	0,72	1,00

Korrelationskoeffizient r

0,00	kein Zusammenhang
0-0,5	schwacher Zusammenhang
0,5-0,8	Mittlerer Zusammenhang
0,8-1	starker Zusammenhang
1,00	perfekter Zusammenhang

Tab. A8: Korrelationen der Scheitelwasserstände. Die gelb unterlegten GWMS gehören zum Profil 1, die grauen zum Profil 2

Korrel.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
P1	1,00	0,99	0,98	0,91	1,00	1,00	0,21	1,00	0,94	0,89
P2	0,99	1,00	0,96	0,90	1,00	1,00	0,79	0,93	0,96	0,87
P3	0,98	0,96	1,00	0,92		0,99	-0,11	0,95	0,99	0,82
P4	0,91	0,90	0,92	1,00	0,96	0,82	0,79	0,91	0,93	0,89
P5	1,00	1,00		0,96	1,00					
P6	1,00	1,00	0,99	0,82		1,00	0,87	1,00		
P7	0,21	0,79	-0,11	0,79		0,87	1,00	0,87	1,00	
P8	1,00	0,93	0,95	0,91		1,00	0,87	1,00	0,92	1,00
P9	0,94	0,96	0,99	0,93			1,00	0,92	1,00	0,72
P10	0,89	0,87	0,82	0,89				1,00	0,72	1,00

Korrelationskoeffizient r

0,00	kein Zusammenhang
0-0,5	schwacher Zusammenhang
0,5-0,8	mittlerer Zusammenhang
0,8-1	starker Zusammenhang
1,00	perfekter Zusammenhang

Tab. A9: Korrelationen der Anstiegszeiten. Die gelb unterlegten GWMS gehören zum Profil 1, die grauen zum Profil 2

Korrel.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
P1	1,00	0,33	0,44	0,95	1,00	0,87	1,00	-0,06	0,43	-0,67
P2	0,33	1,00	0,62	0,70	1,00	0,41	0,89	-0,04	0,70	0,96
P3	0,44	0,62	1,00	0,97		0,41	0,91	-0,46	0,96	0,99
P4	0,95	0,70	0,97	1,00	0,62	0,86	0,94	-0,44	0,94	0,80
P5	1,00	1,00		0,62	1,00					
P6	0,87	0,41	0,41	0,86		1,00	1,00	0,91		
P7	1,00	0,89	0,91	0,94		1,00	1,00	0,58	1,00	
P8	-0,06	-0,04	-0,46	-0,44		0,91	0,58	1,00	-0,44	-1,00
P9	0,43	0,70	0,96	0,94			1,00	-0,44	1,00	0,61
P10	-0,67	0,96	0,99	0,80				-1,00	0,61	1,00

Korrelationskoeffizient r

0,00	kein Zusammenhang
0-0,5	schwacher Zusammenhang
0,5-0,8	mittlerer Zusammenhang
0,8-1	starker Zusammenhang
1,00	perfekter Zusammenhang

Tab. A10: Korrelationen der Anstiegsraten. Die grau unterlegten GWMS gehören zum Profil 1, die hellgelben zum Profil 2

Korrel.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
P1	1,00	0,71	0,58	0,69	1,00	0,08	0,45	0,83	0,62	-0,23
P2	0,71	1,00	0,50	0,59	-1,00	0,89	0,85	-0,15	-0,45	0,99
P3	0,58	0,50	1,00	0,84		0,81	0,61	0,07	-0,22	0,07
P4	0,69	0,59	0,84	1,00	0,98	0,42	0,69	0,42	0,28	0,46
P5	1,00	-1,00		0,98	1,00					
P6	0,08	0,89	0,81	0,42		1,00	0,58	0,56		
P7	0,45	0,85	0,61	0,69		0,58	1,00	0,75	1,00	
P8	0,83	-0,15	0,07	0,42		0,56	0,75	1,00	0,93	1,00
P9	0,62	-0,45	-0,22	0,28			1,00	0,93	1,00	-0,33
P10	-0,23	0,99	0,07	0,46				1,00	-0,33	1,00

Korrelationskoeffizient r

0,00	kein Zusammenhang
0-0,5	schwacher Zusammenhang
0,5-0,8	mittlerer Zusammenhang
0,8-1	starker Zusammenhang
1,00	perfekter Zusammenhang

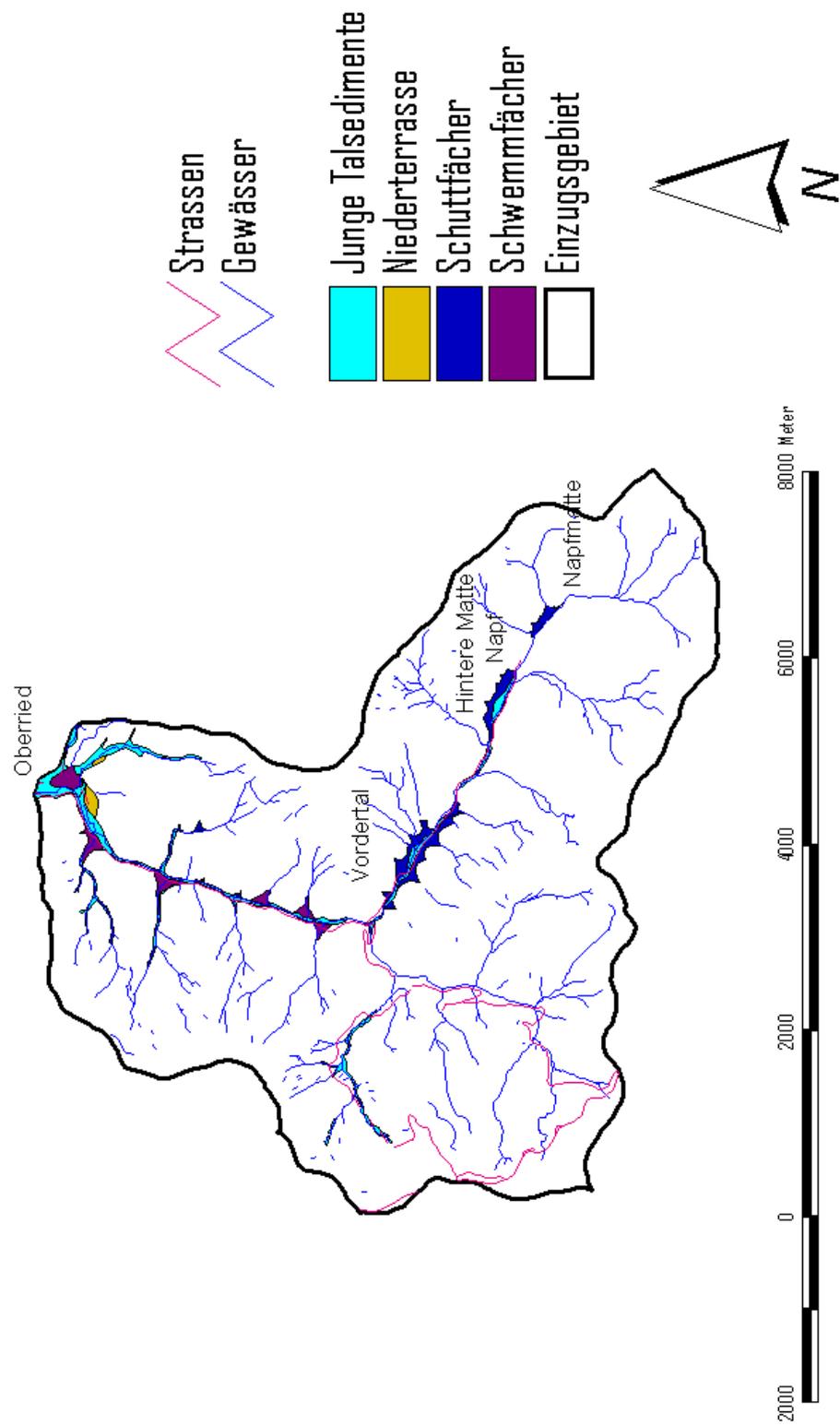


Abb. A1: Talauenbereiche im Bruggaeinzugsgebiet

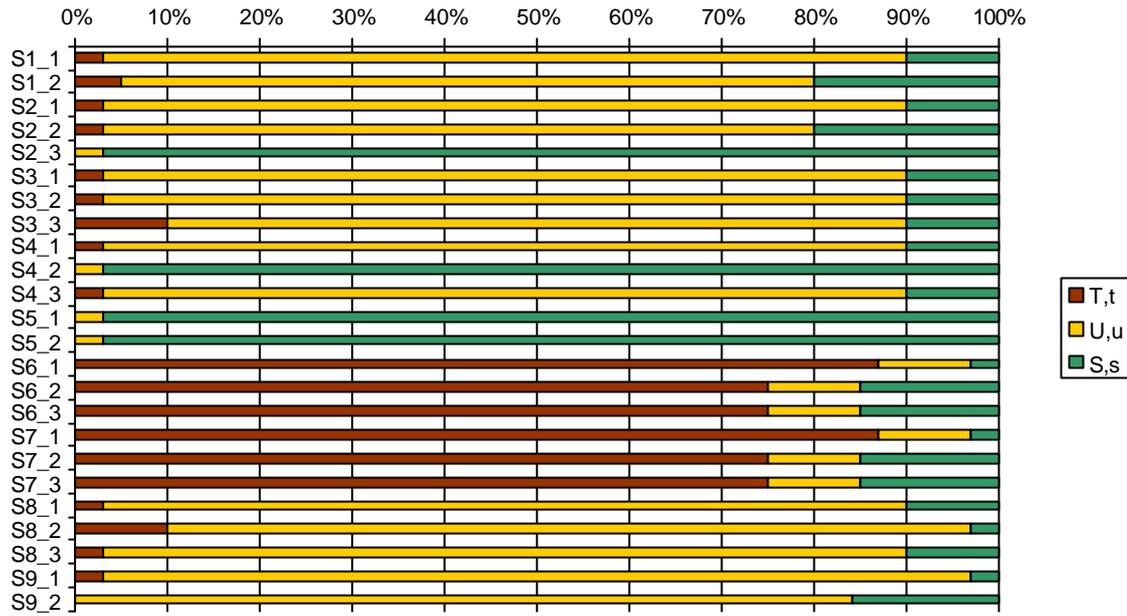


Abb. A2: Feinbodenanteile Sondierungen 1 bis 9

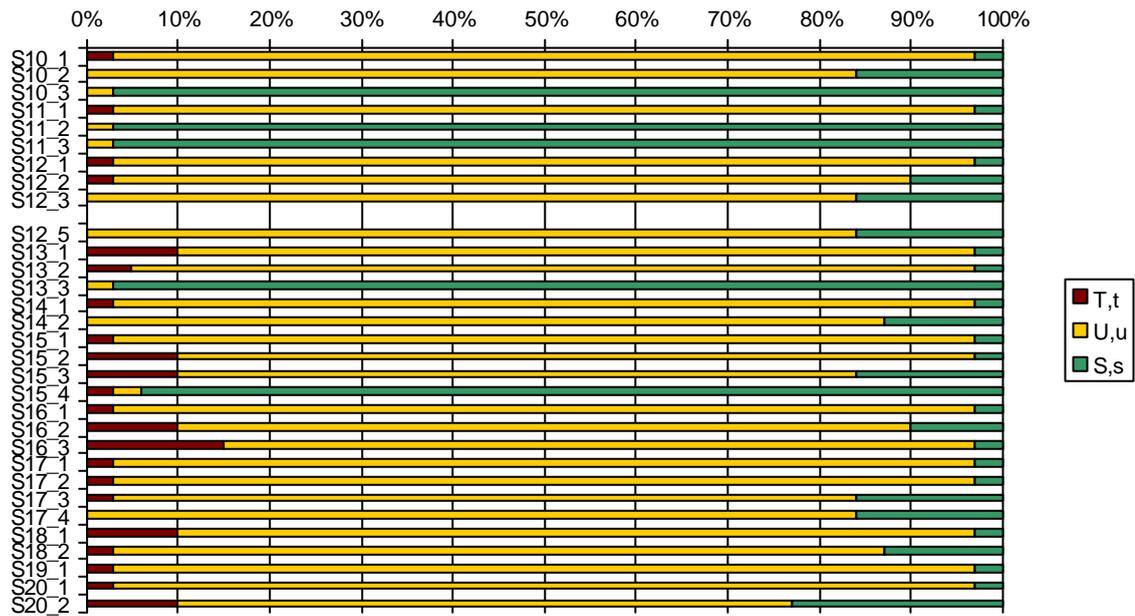


Abb. A3: Feinbodenanteile Sondierungen 10 bis 20

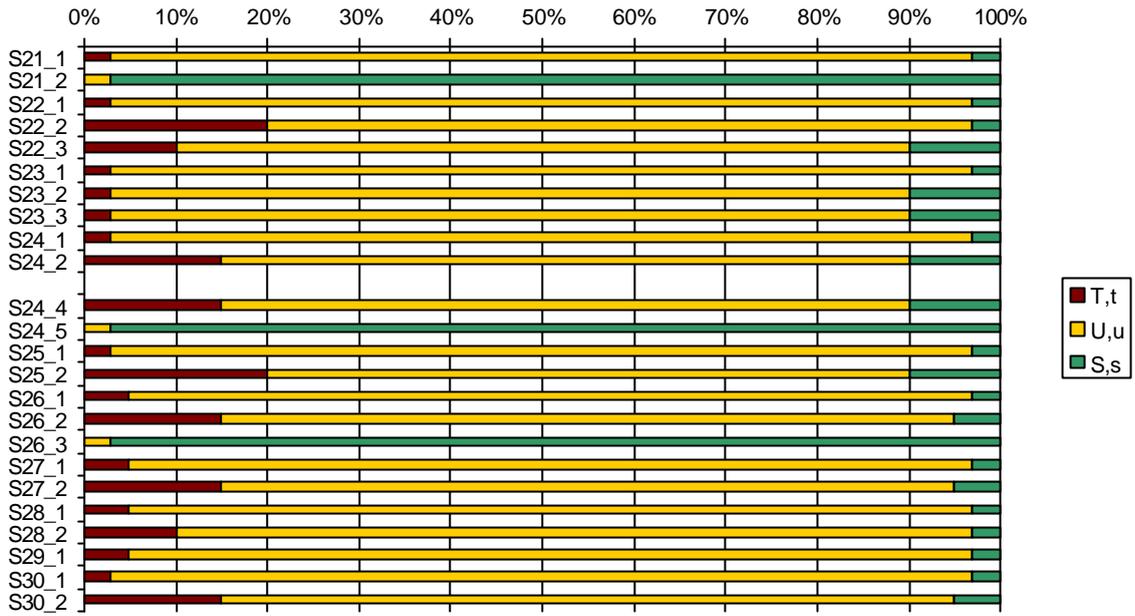


Abb. A4: Feinbodenanteile Sondierungen 21 bis 30

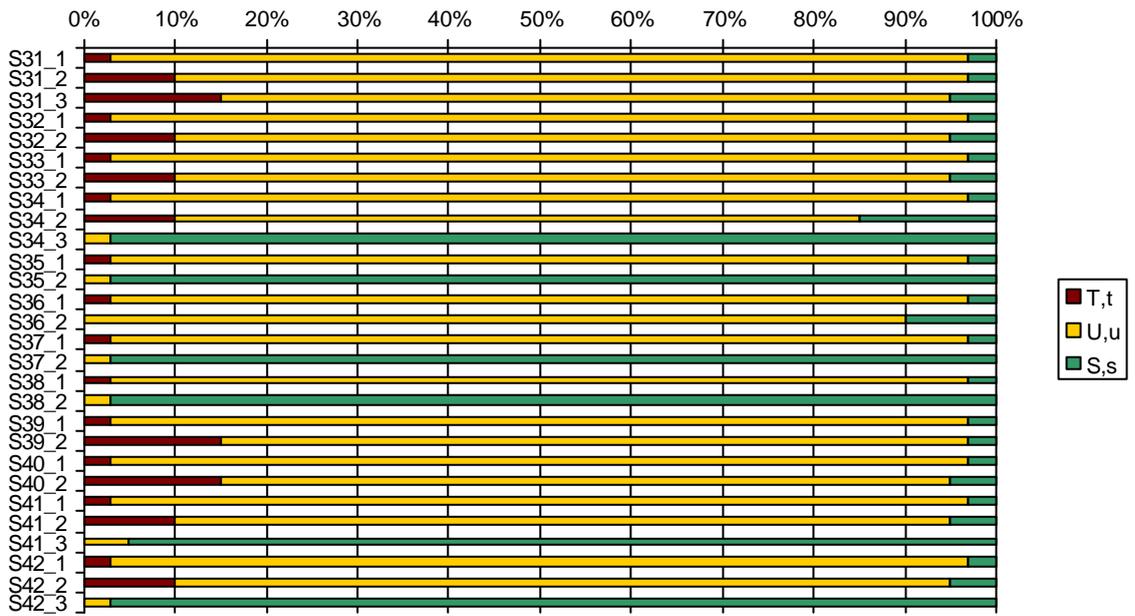


Abb. A5: Feinbodenanteile der Sondierungen 31 bis 42

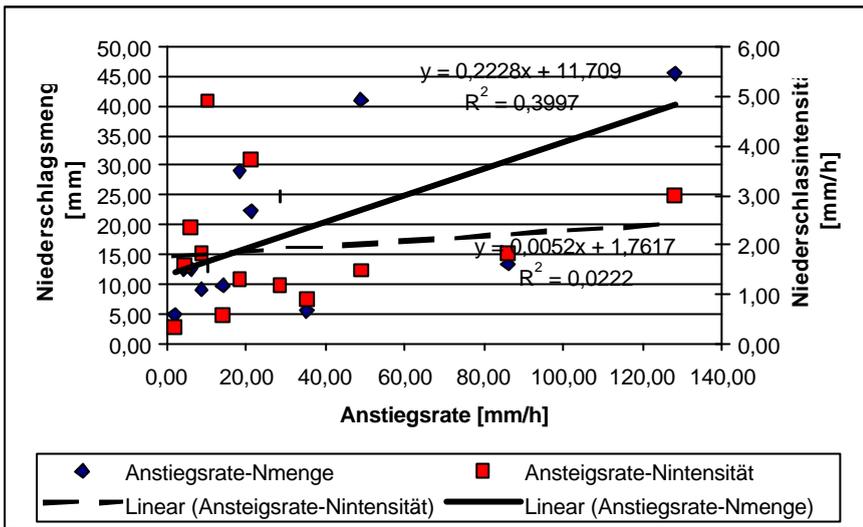


Abb. A6: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 1

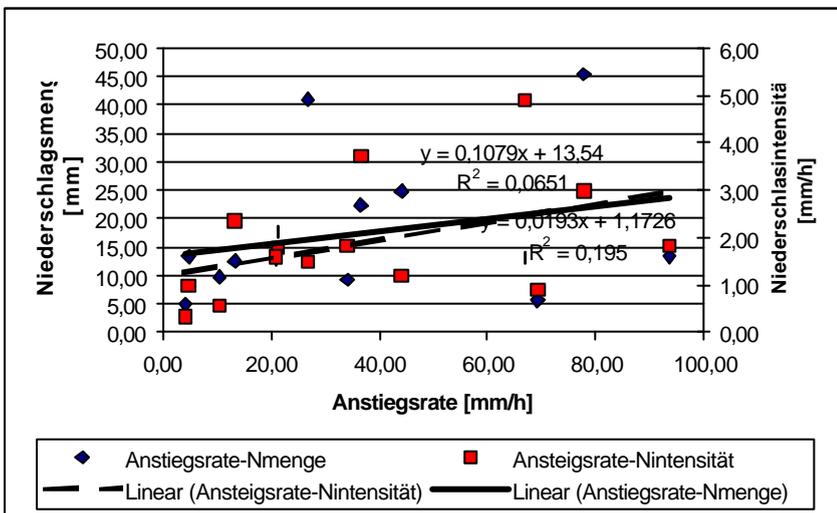


Abb. A7: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 2

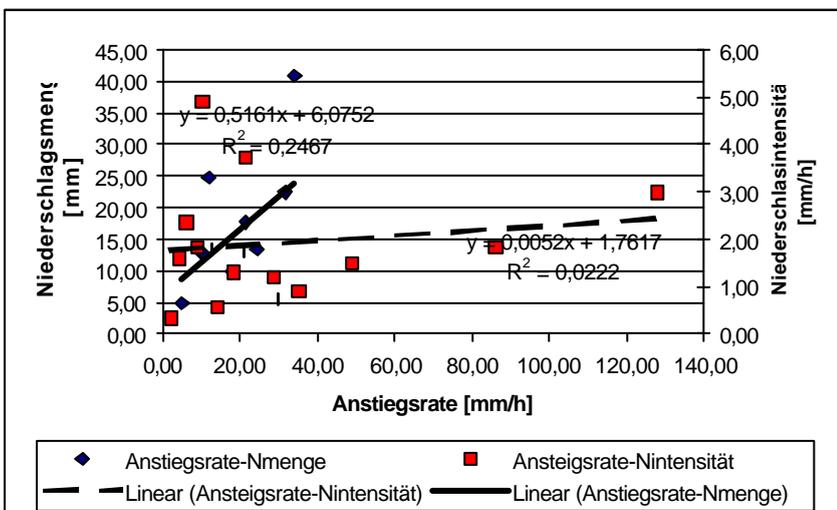


Abb. A8: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 3

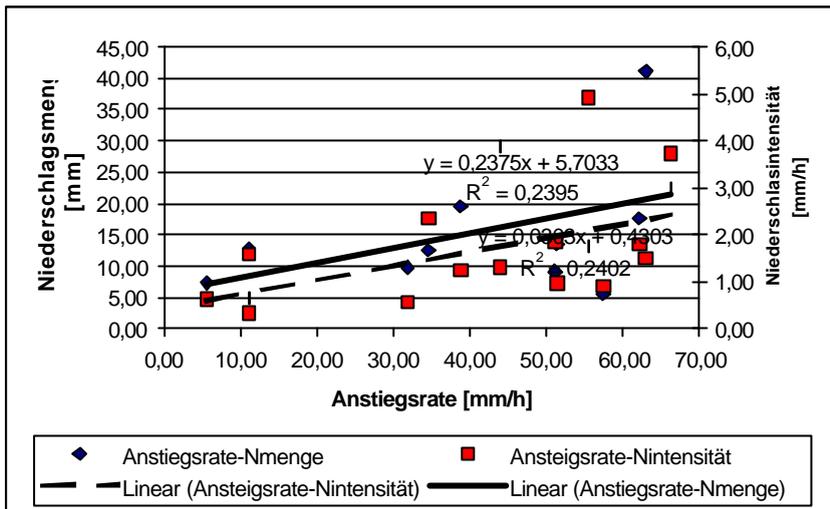


Abb. A9: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 4

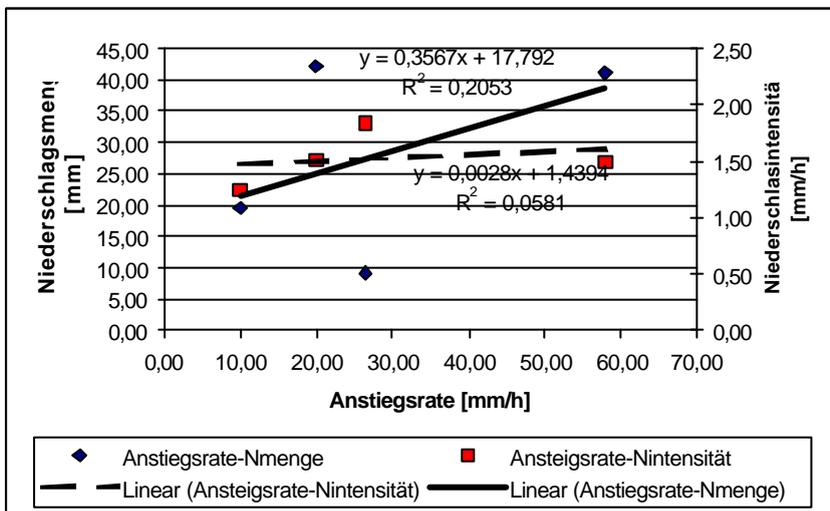


Abb. A10: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 5

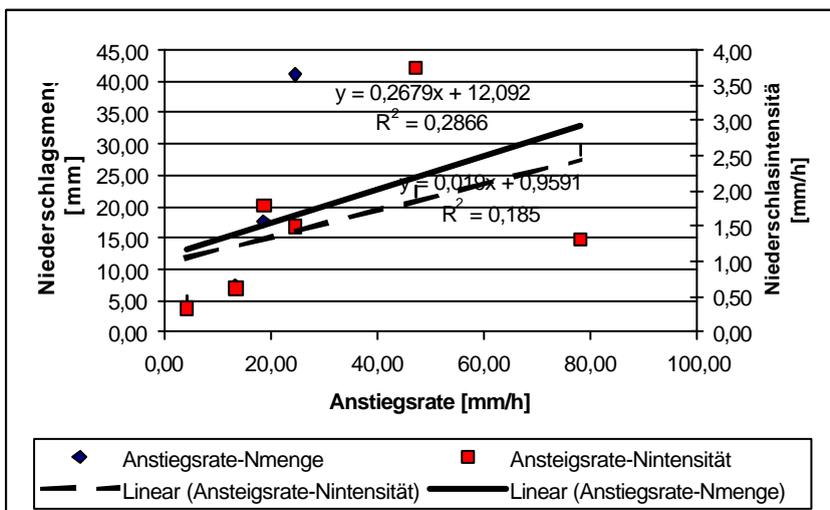


Abb. A11: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 6

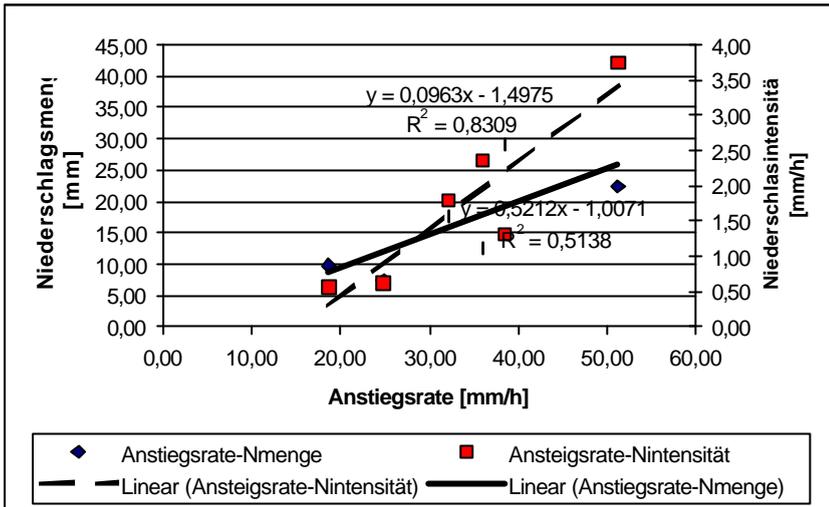


Abb. A12: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 7

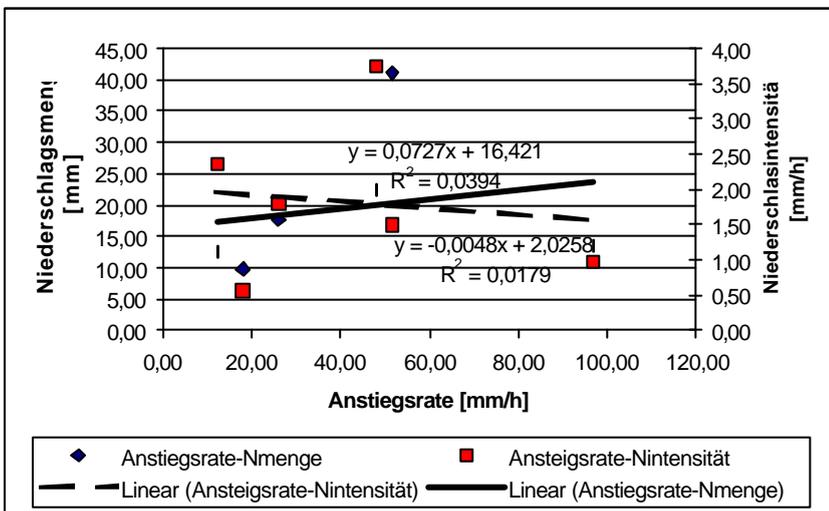


Abb. A13: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 8

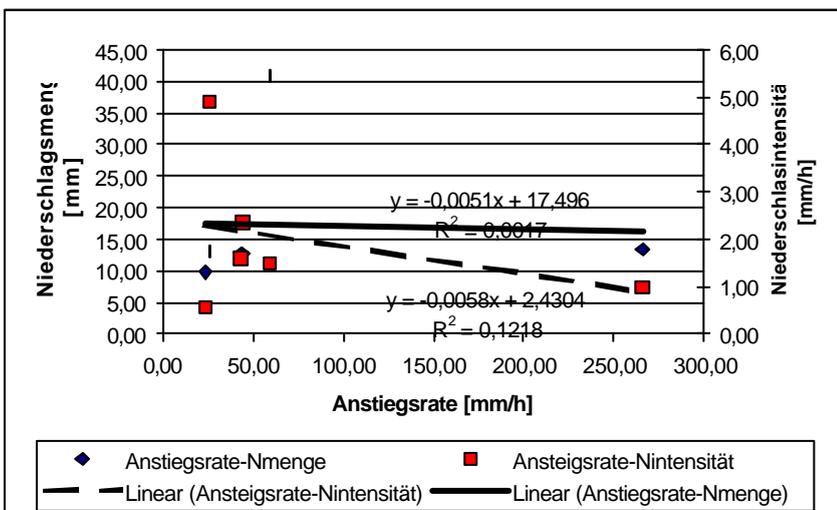


Abb. A14: Zusammenhang der Niederschlagscharakteristika mit der Anstiegsrate der GWMS 9

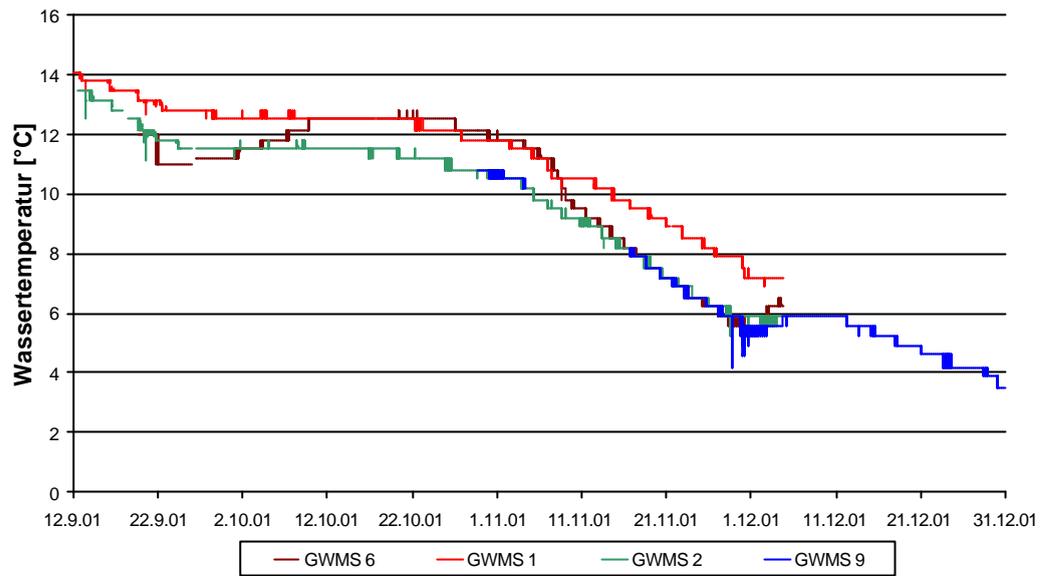


Abb. A15: Verlauf der Grundwassertemperaturen am Beispiel der GWMS 1, 2, 6 und 9

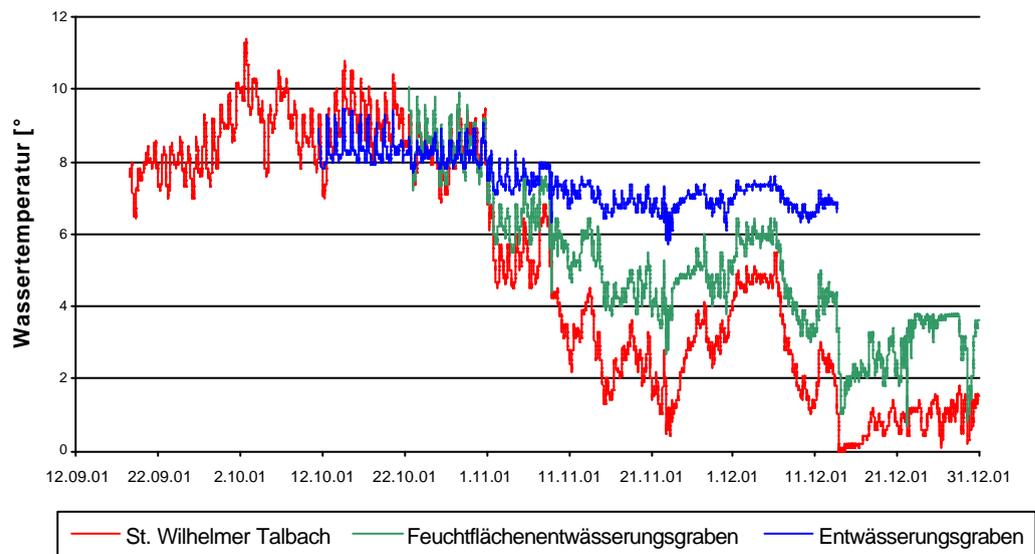


Abb. A16: Verlauf der Wassertemperaturen der Oberflächengewässer

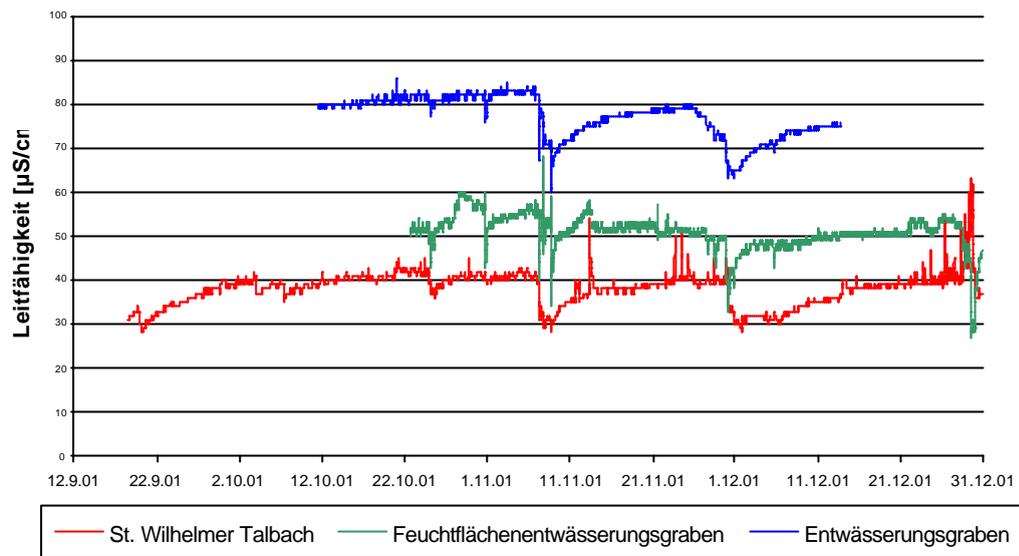


Abb. A17: Verlauf der Leitfähigkeiten der Oberflächengewässer.

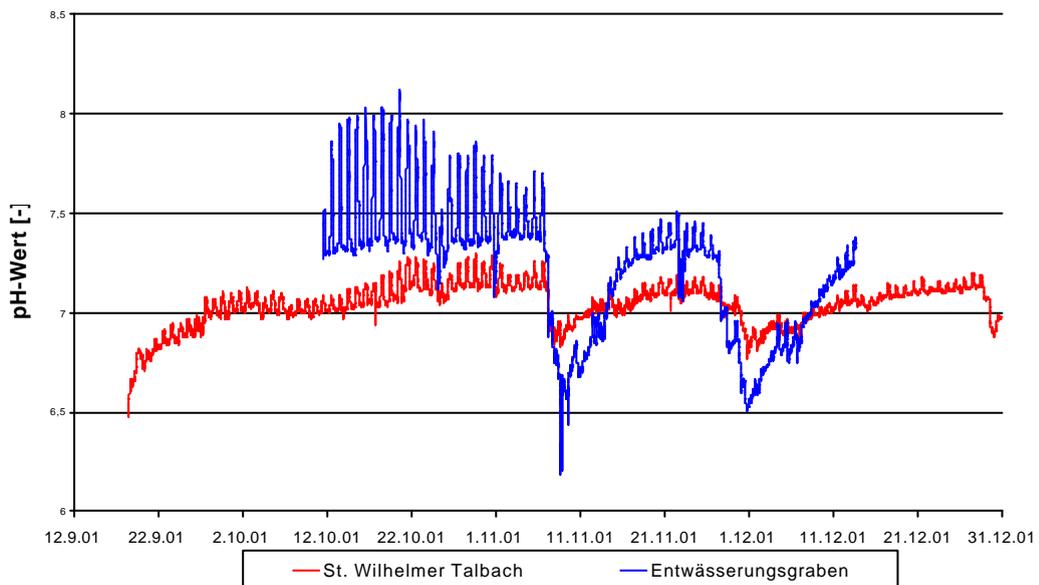


Abb. A18: Verlauf der pH-Werte der Oberflächengewässer

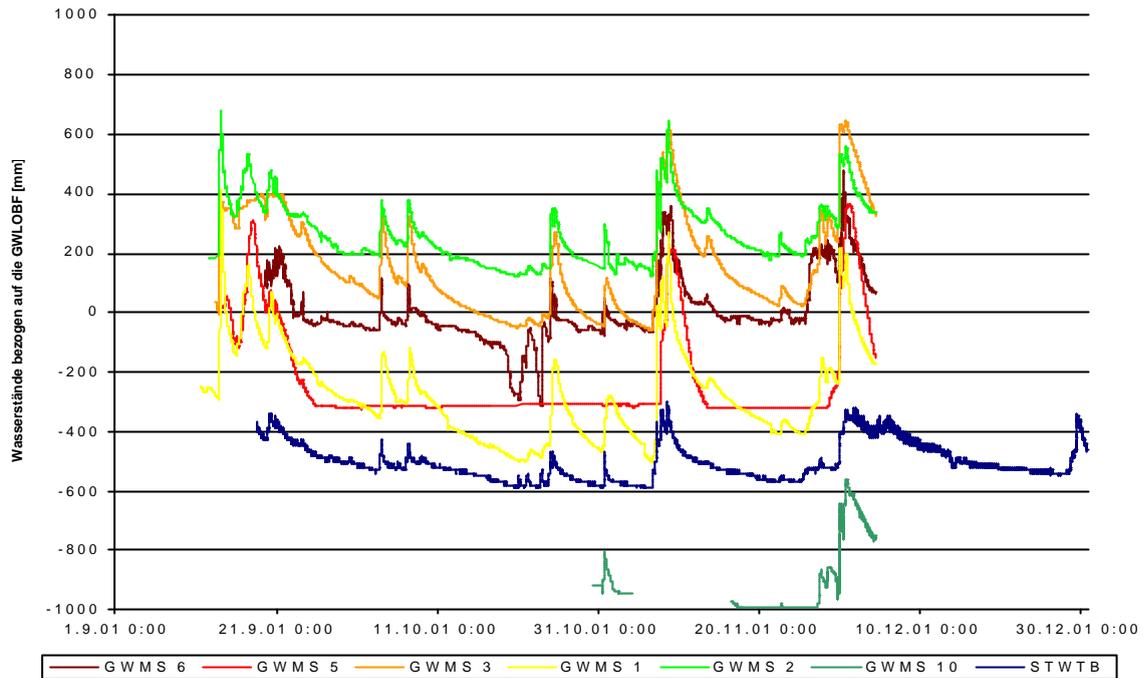


Abb. A19: Vergleich der Grundwasserganglinien des Profils 2 und des Talbaches bezogen auf die GWLOBF.

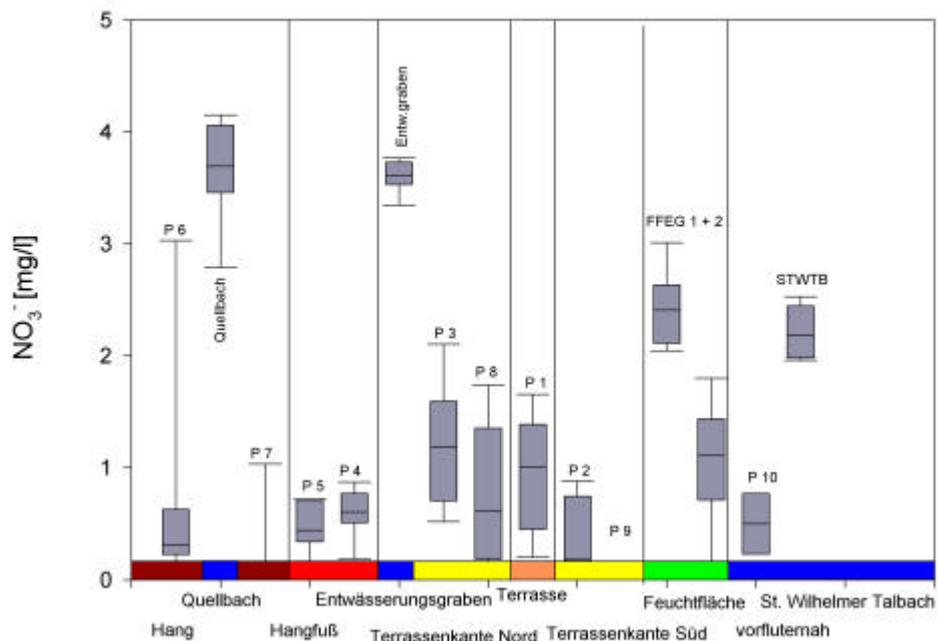


Abb. A20: Nitratkonzentrationen entlang des Testfeldes

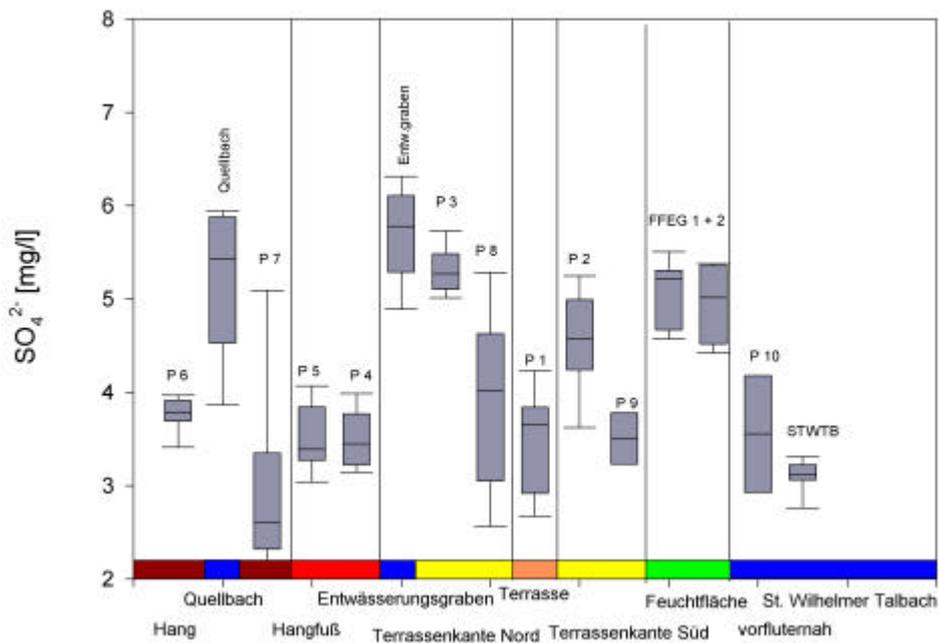


Abb. A21: Sulfatkonzentrationen entlang des Testfeldes

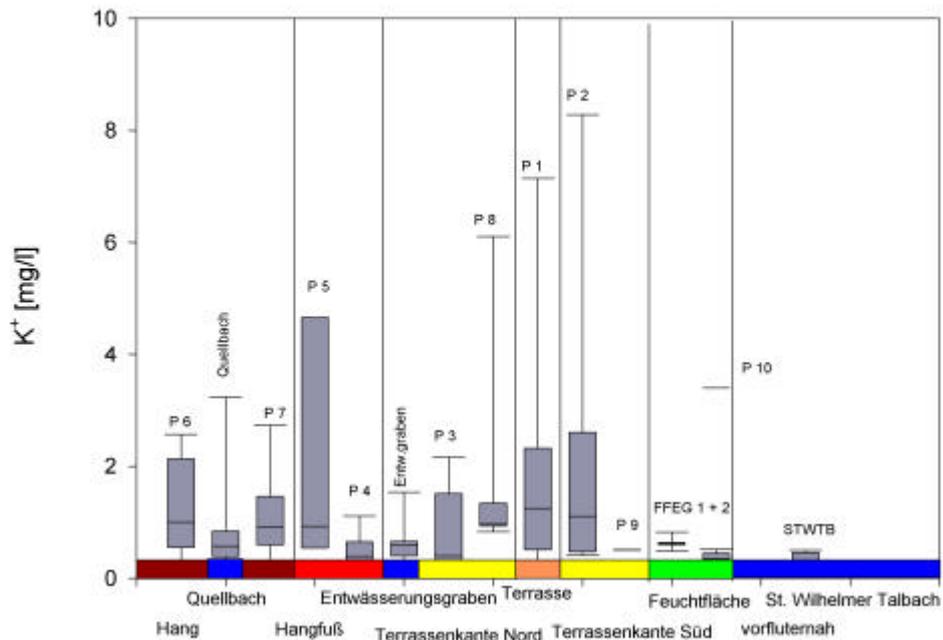


Abb. A22: Kaliumkonzentrationen entlang des Testfeldes

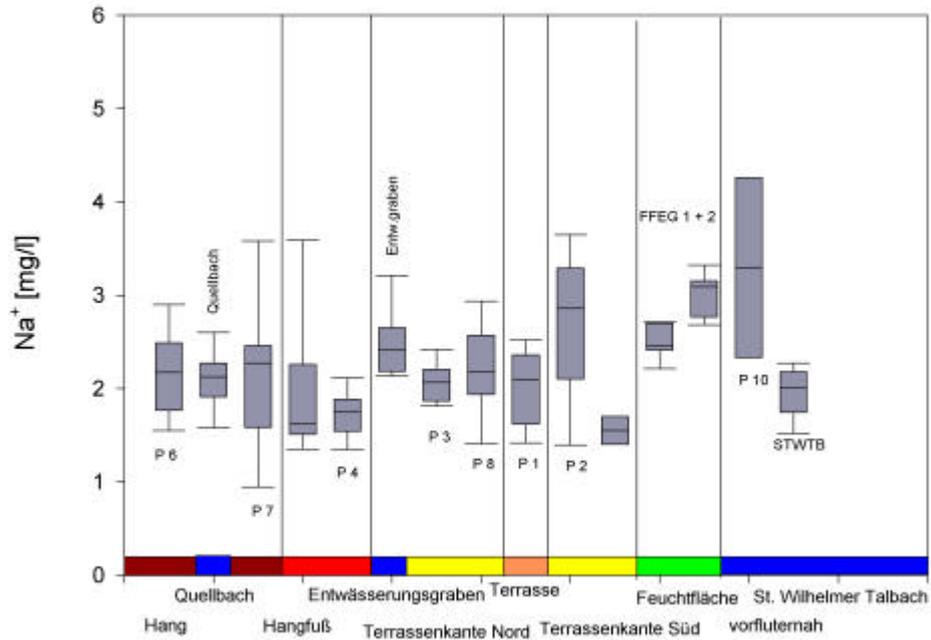


Abb. A23: Natriumkonzentrationen entlang des Testfeldes

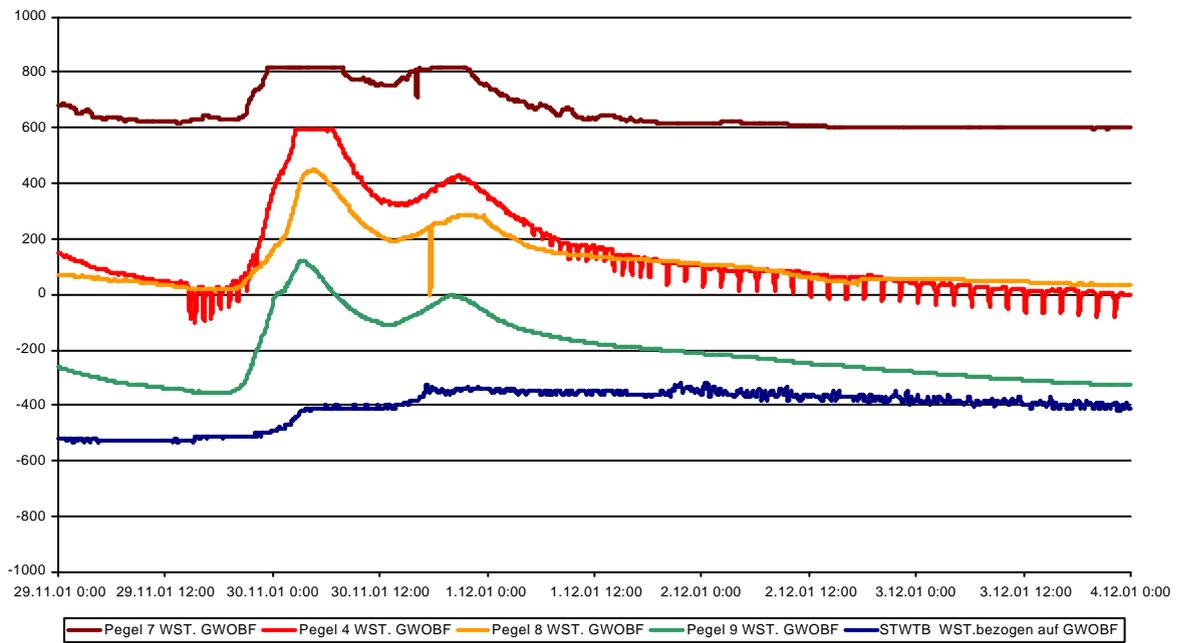


Abb. A24: Ganglinien der GWMS des Profils 1

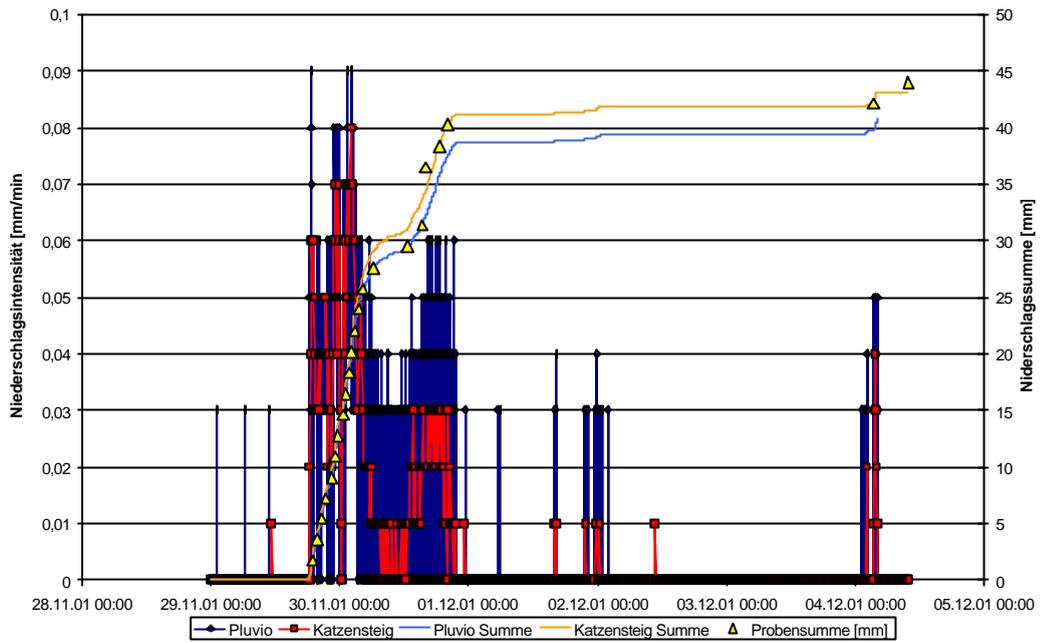


Abb. A25: Vergleich der Niederschlagsmessungen der Station Katzensteig, des Pluvio und der Beprobung

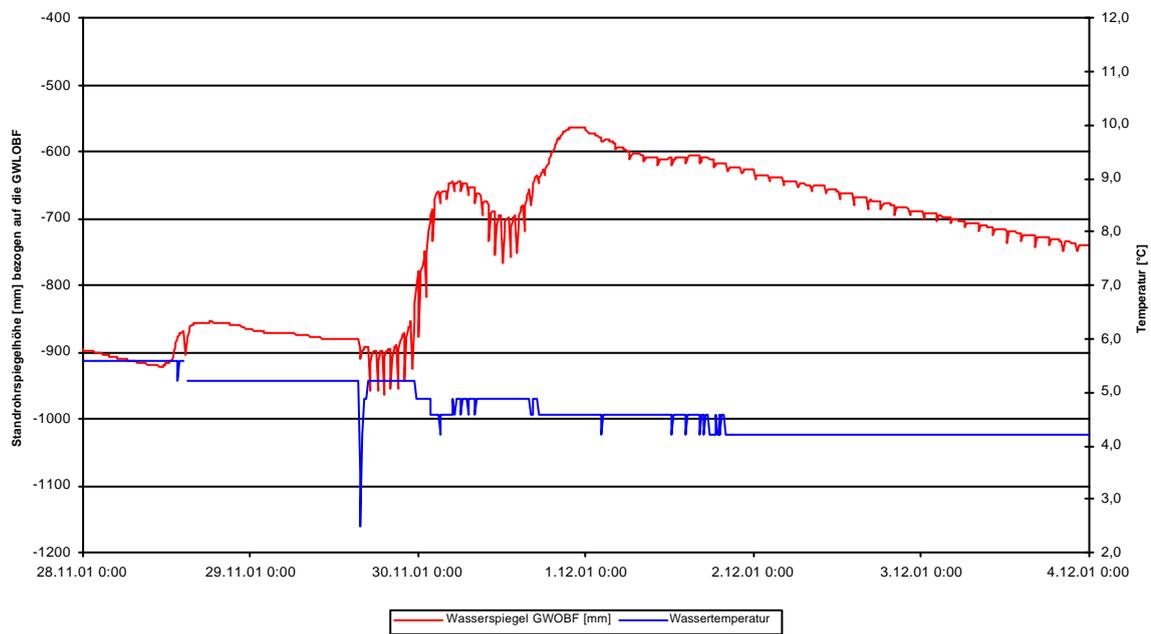


Abb. A26: Temperaturverlauf der GWMS 10 während der Ereignisbeprobung

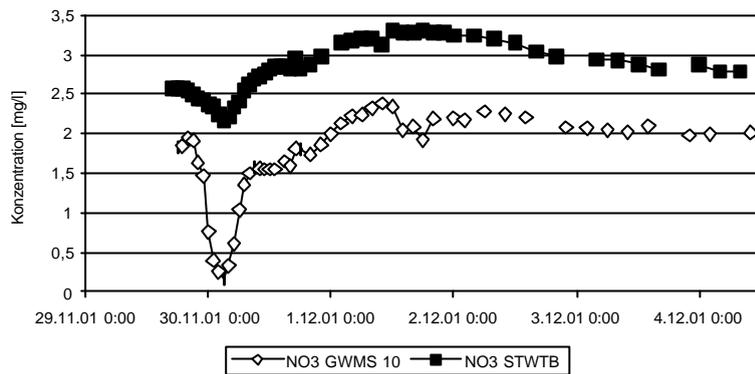


Abb. A27: Nitratkonzentrationen der GWMS 10 und des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeprobung

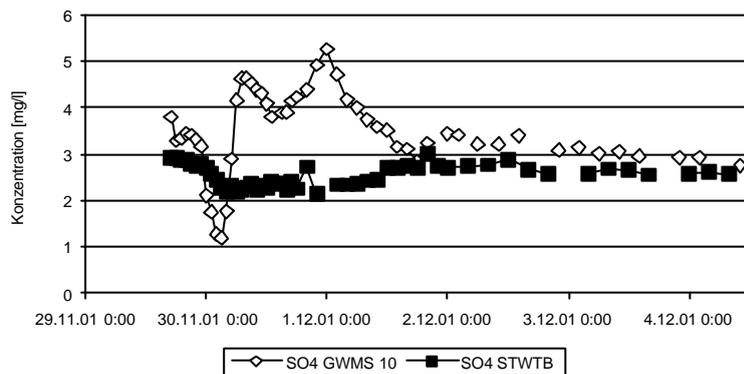


Abb. A28: Sulfatkonzentrationen der GWMS 10 und des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeprobung

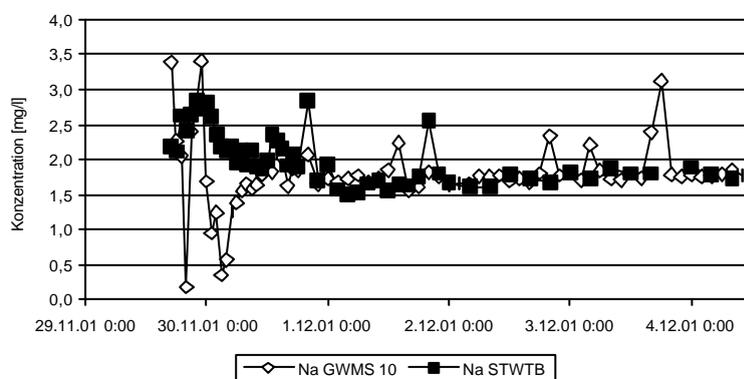


Abb. A29: Natriumkonzentrationen der GWMS 10 und des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeprobung

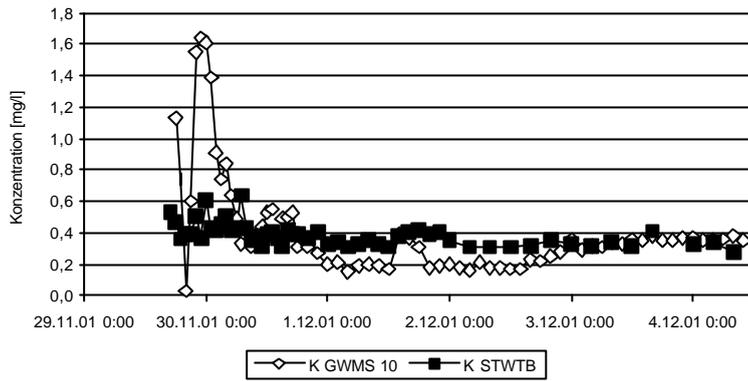


Abb. A30: Kaliumkonzentrationen der GWMS 10 und des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeobachtung

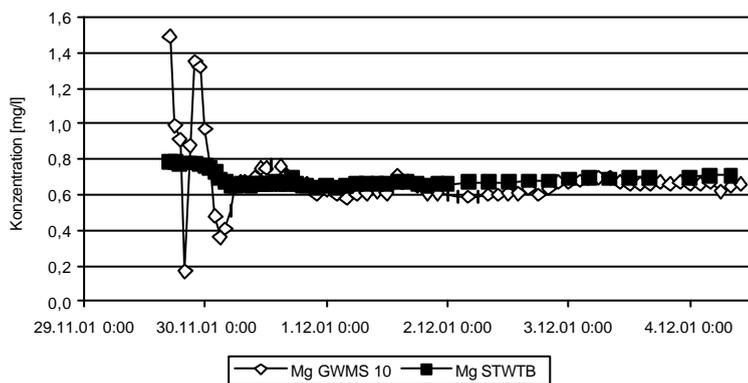


Abb. A31: Magnesiumkonzentrationen der GWMS 10 und des St. Wilhelmer Talbachs im Verlauf der Ereignisbeobachtung

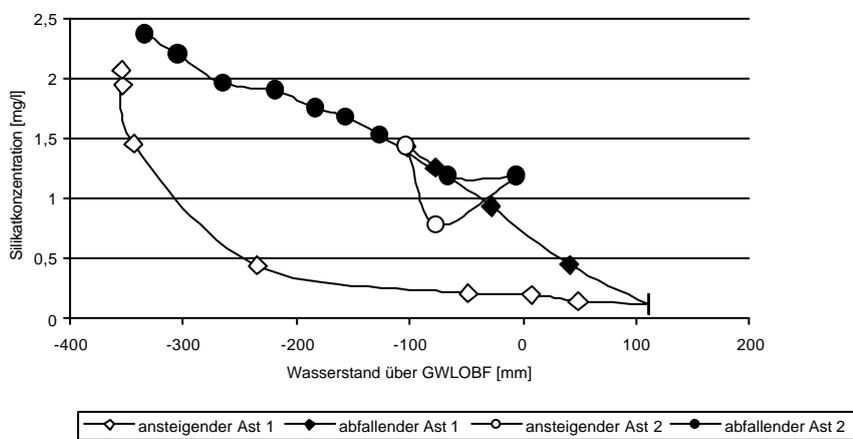


Abb. A32: Zeitlicher Verlauf des Tracers Silikat für die Ereignisbeobachtung der GWMS 9

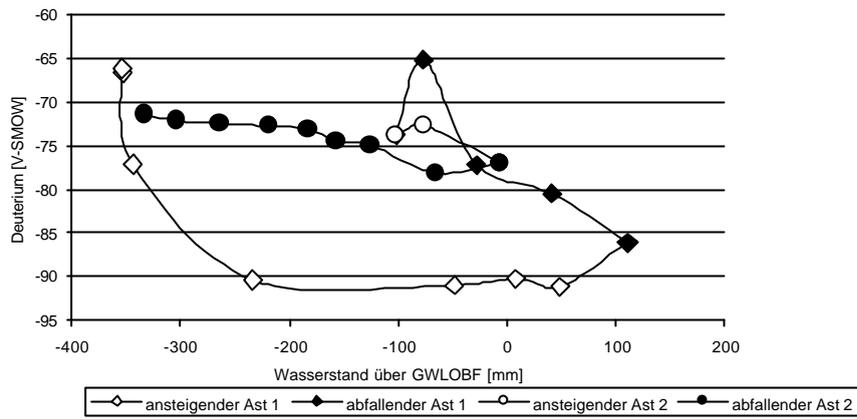


Abb. A33: Zeitlicher Verlauf des Tracers Deuterium für die Ereignisbeobachtung der GWMS 9

Anhang B

Grundwassermesssonden

Der WT-HR 1000 ist ein hoch auflösender Datenlogger mit drei Kanälen, ein Kanal für die Wasserhöhe und zwei Kanäle für die Temperaturen. Ein Temperatursensor befindet sich am unteren Ende der Messstrecke und zeichnet die Wassertemperatur auf, der andere befindet sich im Logger selbst und erfasst die Lufttemperatur. Der Sensor für die Messung der Wasserhöhe arbeitet kapazitiv. Er ist aus rostfreiem Stahl mit einem Messbereich von 1000 mm, einer Gesamtlänge von 1320 mm, einem Durchmesser von 20 mm und einem Gewicht von 975 g (Abb. B 1 und B 2). Die Auflösung beträgt ± 1 mm bei einer Arbeitstemperatur von 0°C bis +70°C (TRUTRACK 2002; [URL:http://trutrack.com/wt-hr.html](http://trutrack.com/wt-hr.html), 2002-01-07).



Abb.: B1: Loggerbereich Messsonde WT-HR 1000 mit Deckel

Die Sondeneinheit zur Messung der Wasserhöhe besitzt einen kleinen negativen Temperaturkoeffizienten in Abhängigkeit von der Wassertemperatur. Bei vollständiger

Wasserhöhe (1000 mm) und einem Temperaturanstieg um 1°C wird der Logger einen Wasserstandsrückgang um 0,6 mm anzeigen. Bei gleichzeitiger Aufzeichnung der Wassertemperatur kann die Omnilog Software© den Wert für die Wasserhöhe kompensieren. Zusätzlich besitzt der Sensor einen kleinen positiven Temperaturkoeffizienten in Abhängigkeit zur Lufttemperatur. Bei einem Wasserstand von 0 mm und einem Anstieg der Lufttemperatur um 1°C registriert der Logger einen Wasserspiegelanstieg um 0,5 mm. Bei einer Aufzeichnung der Lufttemperatur kann dieser Fehler ebenfalls kompensiert werden (TRU TRACK 2002; [URL:http://trutrack.com/wt-hr.html](http://trutrack.com/wt-hr.html), 2002-01-07).

Der Nachteil besteht im erhöhten Datenaufkommen bei der Aufzeichnung beider Temperaturen. Da bei der Untersuchung jedoch auf eine möglichst genaue Wasserstandsmessung Wert gelegt wurde, wurden alle drei Kanäle aufgezeichnet, und somit die Wasserstände temperaturbedingt kompensiert.

Die Messung, sowohl der Wasser- als auch der Lufttemperatur erfolgt über einen Thermistor, einen temperaturabhängigen Widerstand, der eine Genauigkeit von $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ im Messbereich von 0°C bis $+70^{\circ}\text{C}$ besitzt. Der Temperaturbereich des Loggers liegt zwischen -30°C und $+70^{\circ}\text{C}$, die Speicherleistung umfasst bei einer Auflösung von 12 bit 16.000 Einzelwerte (TRU TRACK 2002; [URL:http://trutrack.com/wt-hr.html](http://trutrack.com/wt-hr.html), 2002-01-07).

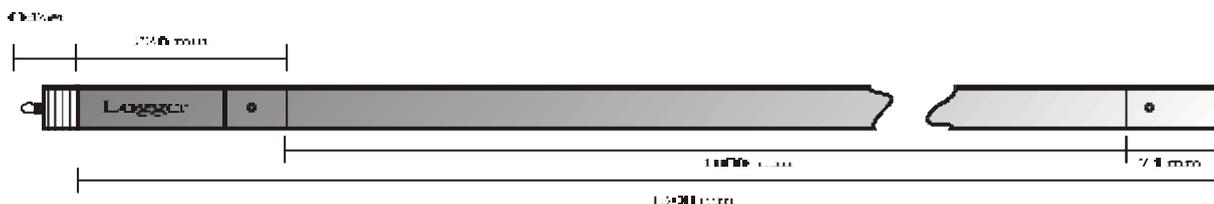


Abb.B2: Skizze der WT-HR Messsonde mit Längenangaben in mm

Die Messsonden wurden mit einem Deckel versehen, der die Grundwasserbeobachtungsstellen nach oben hin verschließt (vgl. Abbildung B3). Als Offset wird der Überstand oberhalb der Verschlusskappe des Loggers bis zur Geländeoberkante bezeichnet. Dieser Offset ist bei allen Grundwasserbeobachtungsstellen unterschiedlich und wird bei der Berechnung der Wasser- bzw. Flurabstände berücksichtigt. Die Berechnung des Flurabstandes setzt sich zusammen aus der Gesamtlänge der Messsonde inklusive Offset abzüglich des gemessenen Wasserstandes.

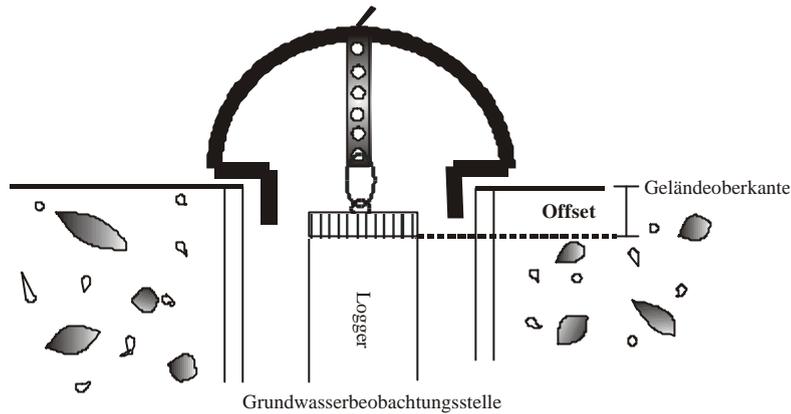


Abb. B3: Skizze des oberen Loggerbereiches mit Deckel

Messwehr

Die Messeinrichtung besteht aus einer Frontplatte aus ca. 2mm starkem Messing (ca. 50 cm·30 cm). An dieser Platte wurde im unteren und seitlichen Bereich Teichfolie fixiert, um ein seitliches vorbeifließen des Wassers am Messquerschnitt zu verhindern. Um einen horizontalen und beruhigten Wasserspiegel im oberstromigen Bereich zu erhalten, wurde eine 20 cm breite und 70 cm lange Metallplatte am Boden angebracht.

Die Querschnittsfläche des Messwehres setzt sich aus zwei Dreiecken mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln zusammen, für den unteren Abflussbereich besitzt sie einen spitzeren Winkel als für den Mittel- und Hochwasserbereich.

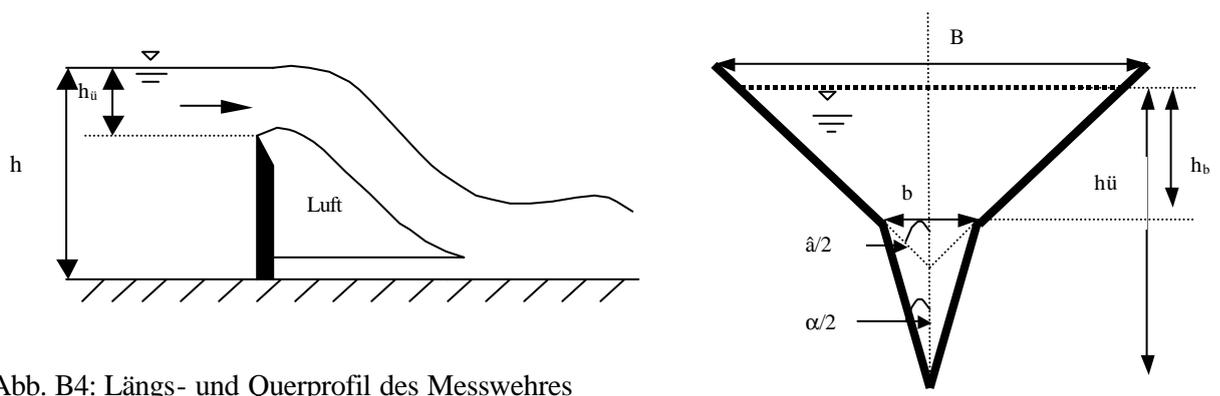


Abb. B4: Längs- und Querprofil des Messwehres

Die Spitze des unteren Dreiecks befindet sich 3 cm über der Gerinnesohle mit einem Öffnungswinkel (α) von 50° . Die Öffnung bildet bis zu einer Höhe von 5 cm ein Dreieck, das dann in ein Trapez übergeht. Der fiktive Winkel des Trapezes (β) beträgt 90° . Der Querschnitt

der Messingplatte bildet in diesem Bereich einen rechten Winkel und gegen die Luftseite wird durch das abschrägen um 60° ein vollkommener Abriss des Wasserstrahls erzielt. Bei dieser Bauweise konnten Wasserstände von 3 bis 17 cm aufgezeichnet werden, bei höheren Wasserständen wird der Messquerschnitt umspült. Die Wasserstände wurden mit einer Multisonde in 10 min Intervallen aufgezeichnet. Die Sonde besitzt eine Auflösung von ± 1 cm.



Abb. B5: Foto des eingebauten Messwehres mit Multisonde

Die Durchflussmengen lassen sich aufgrund der Geometrie des Messwehres berechnen. In Anlehnung an BOS (1978) und die Berechnungsformeln für „abgeschnittene dreieckige vollkommene Überfälle“, bei denen sich der Querschnitt aus einem kleinen Dreieck mit darüber liegendem Rechteck zusammensetzt, wurde die folgende Formel für den verwendeten Querschnitt entwickelt. Es ist bei vollkommenen Überfällen erlaubt, Abflüsse einzelner Bereiche des Querschnitts zu addieren, falls alle Bereiche einen freien Wasserspiegel besitzen (BOS 1978).

$$Q = m \frac{8}{15} \sqrt{2g} \cdot \left[\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot h_{ii}^{\frac{5}{2}} + \left(b + \frac{4}{5} \cdot (h_{ii} - h_b) \cdot \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \right) \cdot (h_{ii} - h_b)^{\frac{3}{2}} - \left(b + \frac{4}{5} \cdot (h_{ii} - h_b) \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \cdot (h_{ii} - h_b)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (\text{B.1})$$

- mit: Q = Abfluss [m³/s]
 μ = Überfallbeiwert [-]
 g = Erdbeschleunigung [m/s²]
 h_{ii} = Wasserhöhe über Wehrkrone [m]
 h_b = Höhe der Wehrkrone über Grund [m]
 α = Öffnungswinkel des Dreiecks [°]
 β = Öffnungswinkel des Trapezes [°]
 b = Breite der unteren Trapezseite [m]

durch Vereinfachung ergibt sich:

$$Q = m \frac{8}{15} \sqrt{2g} \cdot \left[\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot h_{ii}^{\frac{5}{2}} + \left(\tan\left(\frac{\beta}{2}\right) - \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \cdot (h_{ii} - h_b)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (\text{B.2})$$

Diese Formel setzt sich zusammen aus der Berechnung des Dreiecks für Wasserstände kleiner 8 cm und des darüber liegenden Trapezes für höhere Wasserstände.

Die Formel für einen dreieckigen Querschnitt lautet:

$$Q = m \frac{8}{15} \sqrt{2g} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot h_{ii}^{\frac{5}{2}} \quad (\text{B.3})$$

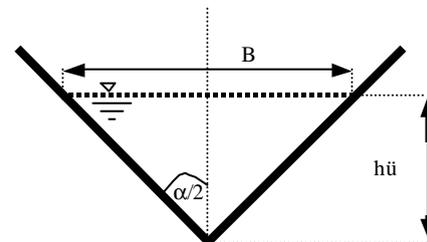


Abb. B6: Dimensionen eines Dreiecksprofils
(verändert nach: BOS 1978)

Die Formel für ein Trapezprofil:

$$Q = m \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot b \cdot h_{ii}^{\frac{3}{2}} \quad (\text{B.4})$$

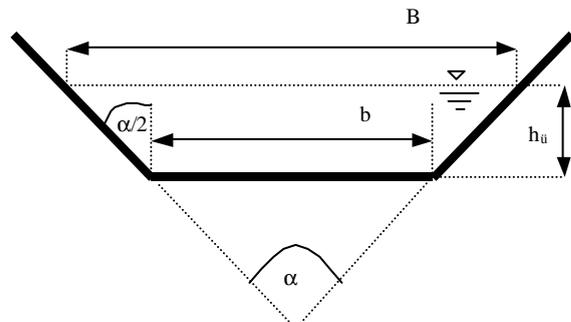


Abb. B7: Dimensionen eines Trapezprofils
(verändert nach: BOS 1978)

Diese Gleichungen gelten jedoch nur für ideale Randbedingungen, wie horizontale Lage der Überfallkante, beidseitige Belüftung des Überfallstrahls und eine ebene Strömung ohne seitlichen Einfluss.

Der Überfallsbeiwert μ des Wehrs beträgt nach SCHRÖDER (1994):

$$m = 0,6035 + 0,0813 \frac{h_u}{h} \quad (\text{B.5})$$

In der Literatur finden sich noch andere Werte, z.B. gibt HERSCHY (1978) für unterschiedliche Öffnungswinkel von 20° bis 100° μ -Werte von 0,592 bis 0,581 an.

Aufgrund der relativ geringen Auflösung der Messsonde und eventueller Ungenauigkeiten beim Messwehreinbau wurde darauf verzichtet, einen Überfallsbeiwert zu berechnen. Der μ -Wert wurde über auf volumetrische Messungen kalibriert.

Diese Messungen, dargestellt durch die Punkte in Abb. B 8, zeigen eine gute Übereinstimmung mit der berechneten potentiellen Regressionsbeziehung. Auf eine weitere Kalibrierung wurde daher verzichtet.

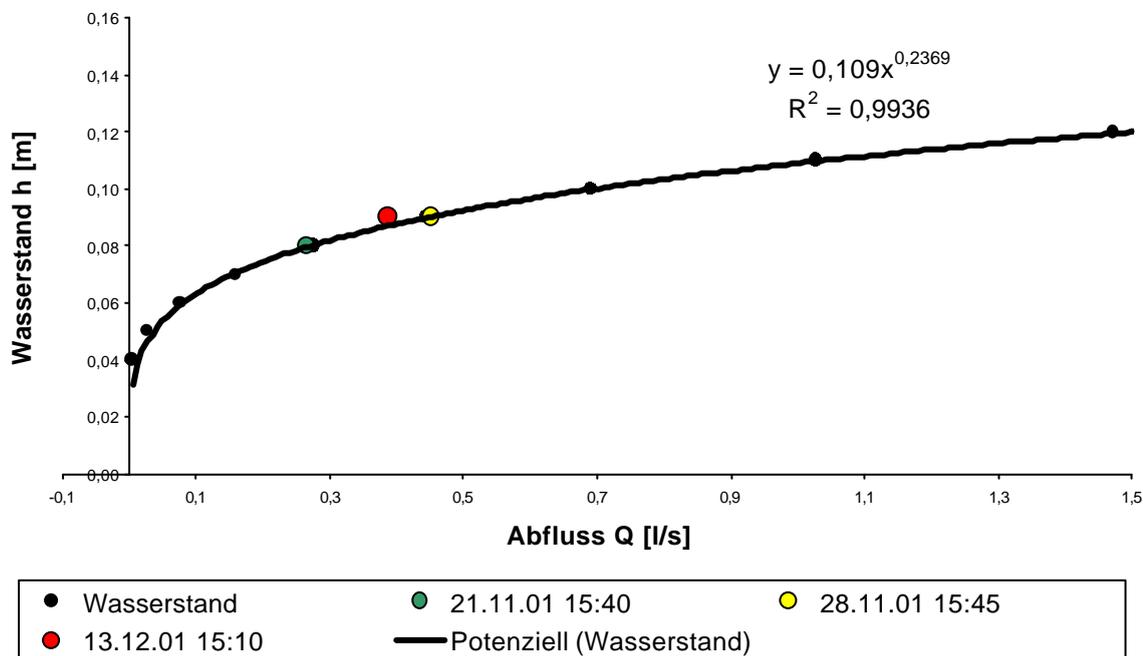
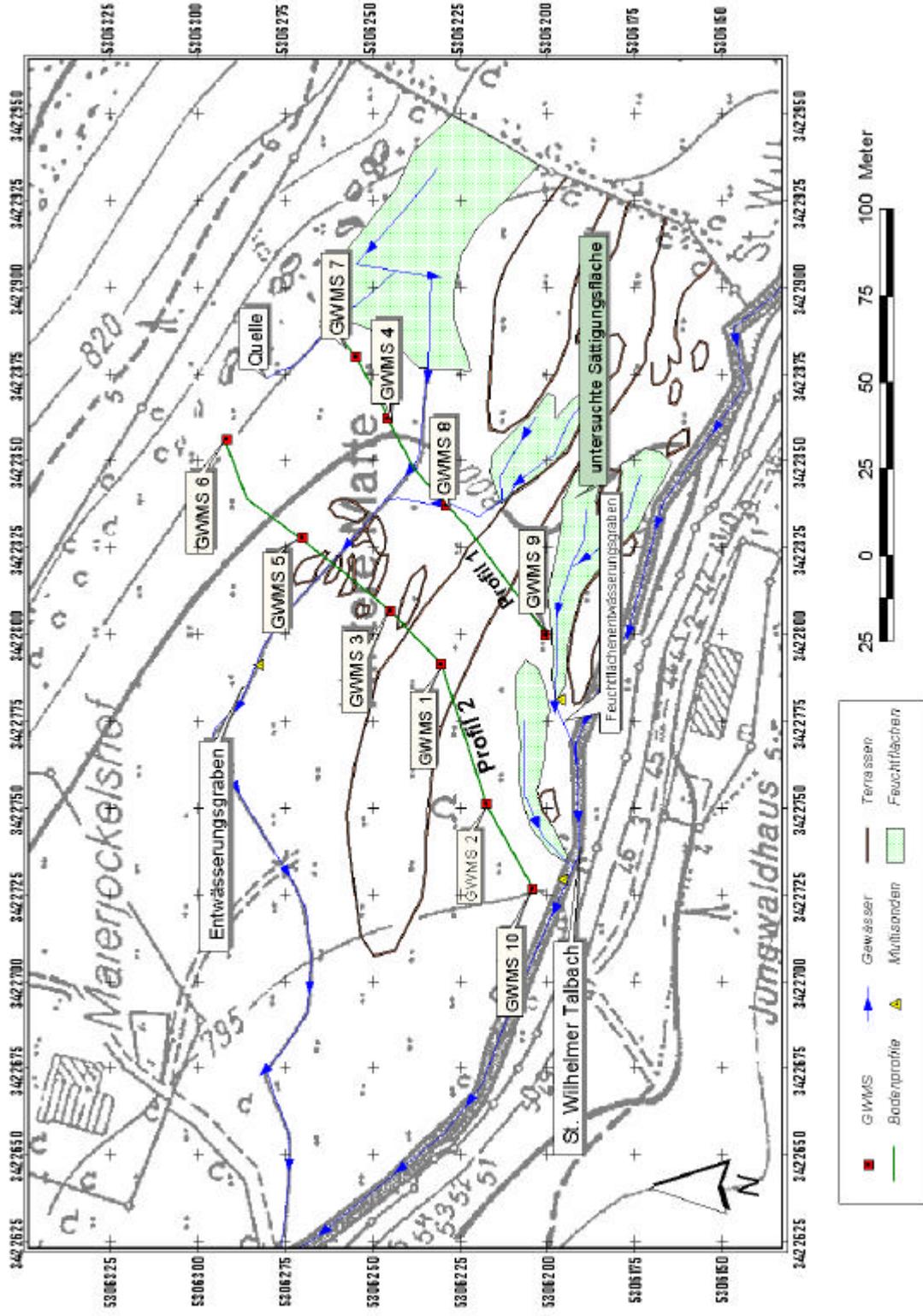


Abb. B8: Eichbeziehung des Messwehres

Untersuchungsgebiet: "Hintere Matte"



Ehrenwörtliche Erklärung:

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Freiburg, 30.04.2002

Jochen Wenninger