Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Gunter Adolph

Abflussdynamik und natürliche Tracer zur Beschreibung der Gebietsreaktion



Diplomarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Chr. Leibundgut Freiburg im Breisgau, Februar 2005 Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Gunter Adolph

Abflussdynamik und natürliche Tracer zur Beschreibung der Gebietsreaktion

Referent: Prof. Dr. Chr. Leibundgut Koreferent: Dr. J. Lange

Freiburg im Breisgau, Februar 2005

Titelbild: Deutscher Flusskrebs am Selzenbächle.

Vorwort

An erster Stelle dieser Diplomarbeit steht der Dank. Hinter einem abgeschlossenen Studium stehen viele helfende Hände. Ich möchte mich bei all denjenigen bedanken, die geholfen haben, die Freude und Lust an dieser Arbeit aufrecht zu erhalten und durch ihre Kritik und ihr Verständnis eine wertvolle Stütze waren.

Besonderer Dank gilt natürlich meiner Familie, ohne deren finanzielle und mentale Unterstützung dies alles nicht möglich gewesen wäre. Des Weiteren möchte ich meiner Frau Danke sagen, für ihr Verständnis und ihren Humor, mit denen Sie meinen Launen begegnet ist.

Dr. Jens Lange möchte ich für die Anregung zu dieser Arbeit danken. Durch sein Interesse und den fachlichen Beistand wurden dem Fortschritt dieser Arbeit stets neue Impulse verliehen.

Für die hilfreiche Ergänzung meiner Betreuung durch PD Dr. Stefan Uhlenbrook bin ich sehr dankbar.

Bei den Installationsarbeiten im Gelände hatte ich große Unterstützung durch Emil Blattmann, dem an dieser Stelle gedankt sei.

Dank auch an PD Dr. Andreas Matzarakis und dem Umwelt-Bundesamt für die Bereitstellung der Meteorologischen Daten.

Herzlichen Dank auch an Franz Kienle und Andy Jörg für die hilfreiche Fertigstellung der Metallteile bzw. Holzteile für den Messquerschnitt Selzenbächle und Engebächle.

Auch der Gemeinde Wittnau und Horben, sowie dem Ringlihof sei für die Erlaubnis zur Durchführung der Messkampagnen auf ihrem Grund gedankt.

Für kritische Anmerkungen, mentalen Ausgleich, Mithilfe beim Einbau der Abflusskiste und viele weitere Kleinigkeiten danke ich Stefan Eppert.

Zu guter Letzt sage ich danke fürs Korrekturlesen, insbesondere an Andrea, Gernot, Nicole, Laurin und Thomas.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverze	ichnis	I
Verzeichnis	der Abbildungen im Text	III
Verzeichnis	der Tabellen im Text	VI
Verzeichnis	der Abbildungen im Anhang	VII
Verzeichnis	der Tabellen im Anhang	VIII
Verzeichnis	der Abkürzungen und Einheiten	IX
Verzeichnis	der verwendeten Formeln	XI
Zusammenf	assung	XII
Abstract	-	XIV
1 Einleitu	ng	1
1.1 Pro	blemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Sta	and der Forschung	2
2 Method	ik	8
2.1 Me	sssonden	8
2.1.1	Wasserstand	9
2.1.2	Temperatur	10
2.1.3	Leitfähigkeit	10
2.1.4	Fazit	11
2.2 Na	türliche Tracer	12
2.2.1	Natrium	12
2.2.2	Kalium	12
2.2.3	Calcium und Magnesium	13
2.2.4	Chlorid	13
2.2.5	Nitrat	14
2.2.6	Sulfat	14
2.2.7	Silikat	15
2.2.8	Fazit	15
2.3 Be	rechnung der P-Q-Beziehung	16
2.3.1	Glasbach	17
2.3.2	Engebächle	19
2.3.3	Selzenbächle	21
2.3.4	Zipfeldobelbach	22
2.3.5	Katzensteigbach	23
2.3.6	Fazit	24
2.4 Nie	ederschlag	25
2.4.1	Niederschlagserfassung für das Untersuchungsgebiet des	
Glasba	ches	25

	2.4.2 Niederschlagserfassung für die Untersuchungsgebiete		
	Selzenbächle und Engebächle		
	2.4.3 Niederschlagserfassung für die Untersuchungsgebiete		
	Kat	zensteigbach und Zipfeldobelbach	25
	2.4.	4 Fazit	
3	Die	Untersuchungsgebiete	27
3	5.1	Katzensteigbach	27
3	.2	Zipfeldobelbach	
3	.3	Glasbach	31
3	.4	Selzenbächle	
3	5.5	Engebächle	
3	6.6	Fazit	35
4	Erg	ebnisse der Stichtagsbeprobung	
4	.1	Zusammenhang zwischen Hydrochemie und Abfluss	
4	.2	Fazit und Diskussion	44
5	Ten	nperatur- bzw. Leitfähigkeitslängsprofile	50
5	5.1	Interpretation und Vergleich	51
	5.1.	1 Glasbach	51
	5.1.	2 Engebächle	52
	5.1.	3 Selzenbächle	53
5	5.2	Fazit und Diskussion	54
6	Res	ultate der Messkampagne	56
6	5.1	Niederschlagsfreie Perioden	57
	6.1.	1 Vergleich der Dürreperiode 2003 am Glasbach mit 2004	58
	6.1.	2 Fazit und Diskussion	63
	6.1.	3 Vergleich der niederschlagsfreien Perioden 2004	64
	6.1.	4 Fazit und Diskussion	68
6	5.2	Niederschlagsereignisse	70
6	5.3	Fazit und Diskussion	80
6	6.4	Statistische Auswertung der Messergebnisse	
6	5.5	Fazit und Diskussion	94
7	Sch	lussbemerkungen und Empfehlungen	95
7	. 1	Messmethodik	95
7	.2	Stichtagsbeprobung	95
7	.3	Temperatur- und Leitfähigkeitslängsprofile	96
7	7.4 Unterschiede zwischen den Einzugsgebieten		
Lite	eratur	verzeichnis	98
Anł	nang		104
Ehr	enwä	ortliche Erklärung	129

Verzeichnis der Abbildungen im Text

Abbildung 1-1: Abfluss als Komponente des terrestrischen Wasserkreislaufs	
(verändert aus Mendel 2000).	3
Abbildung 1-2: Veränderung der Trockenwetterauslauflinie aufgrund von	
Landnutzungsänderung (JOHNSON & MEGINNIS 1960).	4
Abbildung 1-3: Abfluss und Leitfähigkeit während eines lang anhaltenden	
Niederschlagsereignisses (aus WETZEL 2003)	5
Abbildung 1-4: Temperaturverhalten zweier Quellen im Bruggaeinzugsgebiet	
(Nach Uhlenbrook 1999)	6
Abbildung 1-5: Illustration der Niedrigwasser-Kenngrössen SummeD, MaxD,	
SummeV und MaxV anhand einer fiktiven Abflussganglinie (blau). Qs =	
Abflussschwellenwert	
(http://www.bwg.admin.ch/themen/wasser/d/nwstat.htm)	7
Abbildung 2-1: Sonde mit Bachflohkrebsen bzw. Messinggitter 1	1
Abbildung 2-2: P-Q-Beziehung Glasbach 1	8
Abbildung 2-3: Gerinnequerschnitt Glasbach 1	8
Abbildung 2-4: P-Q-Beziehung Engebächle 1	9
Abbildung 2-5: Gerinnequerschnitt Engebächle 2	20
Abbildung 2-6: P-Q-Beziehung Selzenbächle 2	21
Abbildung 2-7: Gerinnequerschnitt Selzenbächle 2	21
Abbildung 2-8: P-Q-Beziehung Zipfeldobelbach 2	22
Abbildung 2-9: Gerinnequerschnitt Zipfeldobelbach 2	22
Abbildung 2-10: P-Q-Beziehung Katzensteig 2	<u>23</u>
Abbildung 2-11: Gerinnequerschnitt Katzensteig 2	<u>23</u>
Abbildung 3-1: Einzugsgebiete des Zipfeldobelbaches und des	
Katzensteigbaches als Teileinzugsgebiete der Brugga	30
Abbildung 3-2: Ländliches Einzugsgebiet des Glasbachs bei Eintritt in das	
Stadtgebiet (nach: Landesvermessungsamt Baden-Württemberg 1987)3	32
Abbildung 3-3: Links: Einzugsgebiet des Engebächle; rechts: Einszugsgebiet	
des Selzenbächle; grün: der jeweilige Waldanteil	33
Abbildung 4-1: Kationen der Wasserproben der verschiedenen Bäche 3	36
Abbildung 4-2: Anionen der Wasserproben der verschiedenen Bäche	37
Abbildung 4-3: Korrelation zwischen den Ionenkonzentrationen und dem	
Abfluss am Glasbach	38
Abbildung 4-4: Niederschlag, Leitfähigkeit, Abfluss und Sulfat-, Natrium-,	
Magnesium- und Calciumkonzentrationen der gesamten Messperiode 200)4
am Glasbach	39

Abbildung 6-15: Zusammenhang zwischen max. Direktabfluss bzw. max.	
Ereignisabfluss und max. Niederschlagsintensität am Katzensteigbach	85
Abbildung 6-16: Zusammenhang zwischen max. Direktabfluss bzw. max.	
Ereignisabfluss und max. Niederschlagsintensität am Selzenbächle	85
Abbildung 6-17: Zusammenhang zwischen max. Direktabfluss bzw. max.	
Ereignisabfluss und max. Niederschlagsintensität am zipfeldobelbach	86
Abbildung 6-18: Zusammenhang zwischen maximalem Direktabfluss und der	
Ereignisdauer	86
Abbildung 6-19: Zusammenhang zwischen maximaler Abkühlung und	
maximaler Niederschlagsintensität.	87
Abbildung 6-20: Zusammenhang zwischen der quantitativen	
Temperaturänderung und der Niederschlagsmenge	87
Abbildung 6-21: Zusammenhang zwischen Abflussvolumenspende und	
Ereignisdauer	88
Abbildung 6-22: Zusammenhang zwischen Abflussvolumenspende und	
maximalem Direktabfluss für den Glasbach	89
Abbildung 6-23: Bestimmtheitsmaße verschiedener Korrelationen in	
Abhängigkeit der verschiedenen Bäche	89

Verzeichnis der Tabellen im Text

Tabelle 2-1: Technische Daten der Messsonden (GUWANG 2003)	9
Tabelle 2-2: Anpassungsparameter und Güte der P-Q Beziehung der Bäche .	24
Tabelle 3-1: Landnutzung der Untersuchungsgebiete	27
Tabelle 4-1: Bestimmtheitsmaße der Abfluss-Ionenkonzentrations-	
Korrelationen	44
Tabelle 4-2: Bestimmtheitsmaße der Temperatur-Ionenkonzentrations-	
Korrelationen	46
Tabelle 4-3: Bestimmtheitsmaße der Leitfähigkeit-Ionenkonzentrations-	
Korrelationen	46
Tabelle 6-1: Gewässerkundliche Hauptzahlen der Untersuchungsgebiete	56
Tabelle 6-2: Niedrigwasserstatistik	57
Tabelle 6-3: Parameter der Niedrigwasseruntersuchung	58
Tabelle 6-4: Gewässerkundliche Hauptzahlen und Klimadaten für den	
Glasbach	61
Tabelle 6-5: Vergleich der niederschlagsfreien Perioden 2003 mit 2004	62
Tabelle 6-6: Niederschlagsfreie Periode 1	64
Tabelle 6-6: Niederschlagsfreie Periode 1 Tabelle 6-7: Niederschlagsfreie Periode 2	64 66
Tabelle 6-6: Niederschlagsfreie Periode 1Tabelle 6-7: Niederschlagsfreie Periode 2Tabelle 6-8: Niederschlagsfreie Periode 3	64 66 68
Tabelle 6-6: Niederschlagsfreie Periode 1Tabelle 6-7: Niederschlagsfreie Periode 2Tabelle 6-8: Niederschlagsfreie Periode 3Tabelle 6-9: Parameter der Niederschlagsstatistik.	64 66 68 70
Tabelle 6-6: Niederschlagsfreie Periode 1Tabelle 6-7: Niederschlagsfreie Periode 2Tabelle 6-8: Niederschlagsfreie Periode 3Tabelle 6-9: Parameter der Niederschlagsstatistik.Tabelle 6-10: Leerlaufkoeffizienten der Einzugsgebiete.	64 66 68 70 72
Tabelle 6-6: Niederschlagsfreie Periode 1Tabelle 6-7: Niederschlagsfreie Periode 2Tabelle 6-8: Niederschlagsfreie Periode 3Tabelle 6-9: Parameter der Niederschlagsstatistik.Tabelle 6-10: Leerlaufkoeffizienten der Einzugsgebiete.Tabelle 6-11: Minimale und maximale Konzentrationszeiten.	64 66 68 70 72 79
Tabelle 6-6: Niederschlagsfreie Periode 1.Tabelle 6-7: Niederschlagsfreie Periode 2.Tabelle 6-8: Niederschlagsfreie Periode 3.Tabelle 6-9: Parameter der Niederschlagsstatistik.Tabelle 6-10: Leerlaufkoeffizienten der Einzugsgebiete.Tabelle 6-11: Minimale und maximale Konzentrationszeiten.Tabelle 6-12: Wertebereich des Bestimmtheitsmaßes und deren Interpretation	64 66 70 72 79
 Tabelle 6-6: Niederschlagsfreie Periode 1 Tabelle 6-7: Niederschlagsfreie Periode 2 Tabelle 6-8: Niederschlagsfreie Periode 3 Tabelle 6-9: Parameter der Niederschlagsstatistik Tabelle 6-10: Leerlaufkoeffizienten der Einzugsgebiete Tabelle 6-11: Minimale und maximale Konzentrationszeiten Tabelle 6-12: Wertebereich des Bestimmtheitsmaßes und deren Interpretatior (nach SCHLITGEN 2000) 	64 66 70 72 79 1 83
 Tabelle 6-6: Niederschlagsfreie Periode 1	64 68 70 72 79 1 83 91
 Tabelle 6-6: Niederschlagsfreie Periode 1	64 66 70 72 79 1 83 91 92

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

Abbildung A 1: Portabler Abflussmesskoffer	104
Abbildung A 2: Tracereinspeisung am Zipfeldobelbach	104
Abbildung A 3: Niederschlagsmessgerät beim Ringlihof	105
Abbildung A 4: Abflussereignis am Selzenbächle	105
Abbildung A 5: Auslauflinie Engebächle	106
Abbildung A 6: Auslauflinie Katzensteigbach	106
Abbildung A 7: Auslauflinie Zipfeldobelbach	107
Abbildung A 8: Auslauflinie Selzenbächle	107
Abbildung A 9: Auslauflinie Glasbach	108
Abbildung A 10: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der	
niederschlagsfreien Periode 2 am Glasbach	108
Abbildung A 11: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der	
niederschlagsfreien Periode 3 am Glasbach	109
Abbildung A 12: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der	
niederschlagsfreien Periode 2 am Selzenbächle.	109
Abbildung A 13: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der	
niederschlagsfreien Periode 3 am Selzenbächle.	110
Abbildung A 14: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der	
niederschlagsfreien Periode 2 am Zipfeldobelbach.	110
Abbildung A 15: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der	
niederschlagsfreien Periode 3 am Zipfeldobelbach.	111
Abbildung A 16: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der	
niederschlagsfreien Periode 2 am Katzensteigbach.	111
Abbildung A 17: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der	
niederschlagsfreien Periode 2 am Engebächle	112
Abbildung A 18: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der	
niederschlagsfreien Periode 3 am Engebächle	112

Verzeichnis der Tabellen im Anhang

Tabelle A 1: Korrelationsmatrix der niederschlagsfreien Perioden Teil 1 113
Tabelle A 2: Korrelationsmatrix der niederschlagsfreien Perioden Teil 2 114
Tabelle A 3: Korrelationsmatrix der niederschlagsfreien Perioden Teil 3 115
Tabelle A 4: Korrelationsmatrix für die Trockenperiode 2003 am Glasbach 116
Tabelle A 5: Korrelationsmatrix für die niederschlagsfreien Perioden von 1995
bis 1997 am Katzensteigbach 117
Tabelle A 6: Parameter Niederschlagsereignis 1
Tabelle A 7: Parameter Niederschlagsereignis 2
Tabelle A 8: Parameter Niederschlagsereignis 3
Tabelle A 9: Parameter Niederschlagsereignis 4
Tabelle A 10: Parameter Niederschlagsereignis 5 122
Tabelle A 11: Parameter Niederschlagsereignis 6123
Tabelle A 12: Parameter Niederschlagsereignis 7 124
Tabelle A 13: Parameter Niederschlagsereignis 8
Tabelle A 14: Parameter Niederschlagsereignis 9 126
Tabelle A 15: Parameter Niederschlagsereignis 10
Tabelle A 16: Parameter Niederschlagsereignis 11

Verzeichnis der Abkürzungen und Einheiten

Abfluss	Q	[l/s]; [m³/s]
Abflussschwellenwert	Qs	[l/s]
Anpassungsparameter aus	C	[m ^{1/3} /o]
Energieliniengefälle und Stricklerbeiwert	G	[111 /8]
Bestimmtheitsmaß	r²	[-]
Deutsche Industrie Norm	DIN	
Deutscher Verband für Wasser- und		
Kulturbau	DVVVK	
Durchmesser	Ø	[mm]
Grundhöhe der Sonde	h ₀	[cm]
Höchster gemessener Abfluss	HHQ	[l/s]
Höchster gemessener Abfluss einer	ЦО	[]/0]
bestimmten Periode	ΠQ	[//5]
Höhe über Normal Null	ü. NN	[m]
Logger Data Manager	LDM	
Maximale Unterschreitungsdauer	MaxD	[min]; [h]
Maximales Abflussdefizit	MaxV	[m³]
Mittelwert der monatlichen HQs	MHQ	[l/s]
Mittelwert der monatlichen NQs	MNQ	[l/s]
Mittlerer Abfluss einer bestimmten	MO	[]/e]
Periode	IVIQ	[//3]
Niederschlag		[mm]
Niederschlagsintensität		[mm/10min]
Niedrigster gemessener Abfluss	NNQ	[l/s]
Niedrigster gemessener Abfluss einer	NO	[]/e]
bestimmten Periode	NQ	[#3]
Potentia Hydrogenii	pH-Wert	[-]
spezifische Leitfähigkeit		[µS/cm];
	Lf	[10µS/cm];
		[mS/cm]
Summe Abflussdefizit	SummeV	[m³]
Summe Unterschreitungsdauer	SummD	[min]; [h]
Temperatur	T; Temp.	[°C]
Umwelt Bundesamt	UWB	
Wasser und Boden Atlas	WaBoA	
Wassersäule	WS	[cm]
Wasserstand - Abflussbeziehung	P-Q	

Wasserstand, Pegel	P; W; h	[cm]; [m]
Wert über dem 85 % der gemessenen	095	[]/0]
Abflusswerte liegen	Q05	[//5]
Wert über dem 90 % der gemessenen	000	[]/0]
Abflusswerte liegen	Q90	[//5]
Wert über dem 95 % der gemessenen	005	[]/0]
Abflusswerte liegen	Q95	[//S]

Verzeichnis der verwendeten Formeln

Manning-Strickler Formel.	16
Formel zur Abflussberechnung aus dem Diracimpuls	16
Manningstrickler Formel für einen Rechteckquerschnitt	17
P-Q-Beziehung Glasbach für h< 6.8 cm	17
Manningstrickler Formel für einen Trapezquerschnitt	19
Chemische Zusammensetzung von Amphibolit	35
Korrelationskoeffizient	83
	Manning-Strickler Formel. Formel zur Abflussberechnung aus dem Diracimpuls. Manningstrickler Formel für einen Rechteckquerschnitt. P-Q-Beziehung Glasbach für h< 6.8 cm. Manningstrickler Formel für einen Trapezquerschnitt. Chemische Zusammensetzung von Amphibolit. Korrelationskoeffizient.

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es mit Hilfe der Parameter Abfluss, spezifische Leitfähigkeit, Temperatur und chemischer Analyse von Wasserproben, fünf verschiedene Einzugsgebiete vor allem hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Landnutzung zu charakterisieren. Die Einzugsgebiete liegen in der näheren Umgebung von Freiburg. Alle Untersuchungsgebiete befinden sich auf kristallinem Untergrund. Die vorherrschende Landnutzung besteht aus Weideland und Wald. Zipfeldobelbach und Glasbach sind vollständig bewaldet. Das Engebächle weist einen Waldanteil von 88,68 %, der Katzensteigbach von 74,90 % und das Selzenbächle von 24,67 % auf. Biologisch zählen die Gneisbäche infolge ihrer hohen hydromorphologischen Stabilität und ihrer geringen Sanddrift in Verbindung mit ihrem ausgeprägten Reichtum an morphologischen Strukturen (hohe Substrat-Diversität) zu den in Bezug auf das Makrozoobenthos artenreichsten Bächen des Landes (BRAUKMANN 1998).

Zur Verwirklichung der Zielsetzung wurde an den Bächen ein analytisch beschreibbarer Messquerschnitt installiert. Die spezifische Leitfähigkeit, die Temperatur und der Wasserstand wurden mit den neuartigen Sonden, den so genannten Divern von der Firma Eijkelkamp/Van Essen, in einminütiger Messwertaufzeichnung erhoben. Anschließend wurde für jeden Querschnitt eine P-Q-Beziehung erstellt, mit welcher der Abfluss berechnet wurde. Insgesamt wurden 43 Wasserproben auf ihre Konzentration an natürlichen Tracern analysiert, die auf ihren Zusammenhang mit Abfluss, spezifischer Leitfähigkeit, Temperatur und den jeweiligen Waldanteil untersucht wurden. Zusätzlich wurden Temperatur- und Leitfähigkeitslängsprofile an den Bächen durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit konnten drei niederschlagsfreie Perioden und elf Niederschlagsereignisse an allen Untersuchungsgebieten aufgezeichnet und untersucht bzw. verglichen werden. Dazu wurde für die Niederschlagsereignisse und für die niederschlagsfreien Perioden eine Korrelationsmatrix erstellt. Zusätzlich wurden die extreme Dürre 2003 am Glasbach und ehemals am Katzensteigbach erhobene Daten mit in die Untersuchung aufgenommen. Dabei wurde die Sommerperiode 2003 mit der von 2004 am Glasbach verglichen.

Es konnten eindeutige P-Q-Beziehungen aufgestellt werden, wobei sich gezeigt hat, dass Materialien der Grund- und Seitenverbauung, die einen einheitlichen Rauhigkeitsbeiwert aufweisen, besser geeignet sind als solche mit uneinheitlichen.

Bestimmende Größe für die Leitfähigkeit ist bei allen Bächen das Calcium. Beim Glasbach, Enge- und Selzenbächle gehört das Magnesium ebenfalls dazu. Durch die Stichtagsbeprobungen konnten die Gebiete in zwei Cluster aufgeteilt werden, nämlich in die höher gelegenen Gebiete Katzensteigbach und Zipfeldobelbach und in die näher bei Freiburg und tiefer gelegenen Gebiete Glasbach, Selzenbächle und Engebächle. Das Untersuchungsgebiet des Selzenbächles ist das am intensivsten genutzte Gebiet (extensive Weidelandnutzung). Dies spiegelt sich in den im Vergleich zu den anderen Gebieten höheren Nitrat-, Chlorid-, und Kaliumwerten wider. Dennoch zeugen alle gemessenen Werte von einer geringen Belastung der einzelnen Bäche. Die langfristigen Schwankungen der Calcium- und Sulfatkonzentration am Engebächle und Glasbach konnten mit der kontinuierlichen Erfassung der spezifischen Leitfähigkeit nachgebildet werden.

Beim Vergleich der Dürre 2003 mit den Daten von 2004 am Glasbach ist festzustellen, dass trotz höherer Niederschlagssummen 2004 niedrigere NQ-Werte in diesem Sommerhalbjahr zu verzeichnen waren. Dies kann zum einen an der Messmethodik von 2003 liegen oder zum anderen daran, dass die Folgen der extremen Dürre 2003 zum Teil erst 2004 zum Vorschein kamen.

Bei den untersuchten niederschlagsfreien Perioden zeigte sich, dass die Landnutzung einen wesentlichen Einfluss auf die erhobenen Parameter hatte. Es stellte sich heraus, dass die Ausgeglichenheit der Systeme für vorliegende Zeitreihen in folgender Reihenfolge abnahm: Selzenbächle – Engebächle – Glasbach. Daraus und aus den NQ Werten und Verhältnissen wird ersichtlich, dass der Wald Niedrigwasser verschärfend wirkt.

Die verschiedenen Einzugsgebiete reagierten sehr unterschiedlich auf die einzelnen Niederschlagsereignisse. Es konnte ein Zusammenhang zwischen Abflussverhalten bzw. maximalem Direktabfluss und Waldanteil der verschiedenen Einzugsgebiete nachgewiesen werden. Zu beachten ist, dass dieser Arbeit nur ein Messzeitraum von ca. fünf Monaten zugrunde liegt. Längerfristige Untersuchungen könnten weitere Einblicke und Ergebnisse liefern. Dennoch hat diese Arbeit einen wesentlichen Beitrag zum besseren Verständnis längerfristiger Prozesse in der Abflussdynamik geliefert.

Schlüsselworte:

Hoch aufgelöste Tracermessungen; langfristige Prozesse; unterschiedliche Landnutzung (Weide und Wald); Stichtagsbeprobung; Temperatur- und Leitfähigkeitslängsprofile; Abflussdynamik bei niederschlagsfreien Perioden, Niederschlagsereignissen.

Abstract

The objective of this study was the comparison of five small catchments especially in respect to their different land use. This was accomplished by examination of the integrative parameters discharge, electric conductivity, temperature and solute concentration. The catchments are located close to Freiburg. The investigated areas are all together on crystalline ground. Their main land use is forestry and pasture. Zipfeldobelbach and Glasbach are completely forested. 88,68 % of the Engebächle catchment is forested, as well as 74,90 % of the Katzensteigbach and 24,67 % of the Selzenbächle. Because of little sand drift and high diversity along the river bed, the streams harbour many different botanical and zoological species (BRAUKMANN 1998).

In order to capture runoff dynamics some gauging weirs with customized geometrical profiles were installed. Electrical conductivity, temperature and water levels were recorded in a temporal resolution of one minute. This was done by the new Diver (Firma Eijkelkamp/Van Essen). Based on tracer measurements the water-level discharge relationship was calculated. Natural tracer concentrations were analysed in 43 water samples. The correlation between those measurements and discharge, electrical conductivity, temperature and the proportion of forest was calculated for each catchment. In addition, profiles of temperature and electrical conductivity were measured along the rivers. Three phases with non rainfall and eleven precipitation events could be observed during the measurement period. Those were compared and analysed in a correlation matrix. Additional information from the extreme drought on the Glasbach in 2003 and old data from the Katzensteigbach was also included. The drought at the Glasbach in 2003 was compared with the data from 2004.

In general, explicit mathematical relations between water-levels and discharges could be generated. It could be shown that materials with uniform roughness parameters are more suitable for the construction of the gauging profile.

The electrical conductivity was mostly determined by the concentration of calcium. This was evident in all streams. Magnesium also correlated well with the electrical conductivity in the streams of Glasbach, Engebächle and Selzenbächle. As a result of appointed date samples, the catchments could be divided into the two different clusters due to their mean elevation. One cluster consists of the catchments Katzensteigbach and Zipfeldobelbach, and the other

one of Glasbach, Engebächle and Selzenbächle, which are the closest to Freiburg.

Among all investigated catchments, the Selzenbächle is subject to the most intensive agricultural use (extensive pasture land).

This is shown by higher nitrate, chloride and potassium concentrations in comparison to the other catchments. Nevertheless, overall contamination is low. The variations of calcium and sulphate concentration on the Engebächle and Glasbach were in good agreement to the continuous measurement of electrical conductivity.

Comparing the drought in 2003 and data from 2004 from the Glasbach, it became evident that the dry period in 2003 resulted in higher minimum discharges even though total precipitation was lower. This could be either the effect of measurement inaccuracies in discharge volumes of 2003, or the delayed influence of empty storages in 2004.

The periods without precipitation show that the land use has a significant influence on the measured parameters. The systems reaction on these periods was different. For example, the catchment reaction from the Selzenbächle was not as extreme as the reaction of Engebächle and the Glasbach.

This discharge decreasing influence of forested areas during periods of no precipitation was reflected by the low water discharges in comparison to the other catchments.

The different catchments react very variable to the several events. In this study it was found that there is a significant correlation between the maximum discharge and the part of forest in the catchments. But keep in mind that this study is founded on only five month measurements. So longer observation periods might give further information.

Anyhow this study made a substantial contribution to understanding long-term processes of runoff dynamics.

Key words:

High resolution tracer measurements; long term processes; different land use (pasture and forest); appointed date samples; temperature and electrical conductivity profiles along the river; runoff dynamics in non precipitation periods, precipitation events.

1 Einleitung

Ein Ziel der experimentellen Hydrologie ist, mit möglichst wenig Messaufwand und geringen Kosten fundierte Kenntnisse über die zu untersuchenden Einzugsgebiete zu erlangen. Parameter, bzw. Tracer wie elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, Wasserproben am Gebietsauslass und Abfluss "sammeln" auf ihrem Weg zum Pegel Informationen. Dies entspricht im Wesentlichen dem Konvergenzansatz. Der Name leitet sich von der bekannten Tatsache ab, dass der oberirdische und unterirdische Abfluss an einer Stelle, dem Einzugsgebietsdurchbruch, konvergiert. Um eine flächendeckende Aussage machen zu können, geht es also darum, die in den Abflusswerten gespeicherte Information aufzuschlüsseln und den Teilflächen im Einzugsgebiet zuzuordnen (LEIBUNDGUT 1984). Dies setzt fundierte Kenntnis der Einzugsgebiete voraus. Im Wesentlichen gilt es die Geofaktoren (stabile Einzugsgebietsfaktoren) und die Landnutzung zu kennen. Die Entschlüsselung der im Abfluss gespeicherten Informationen nach Menge und physikalischen, chemischen und isotopischen Parametern erlaubt das Erkennen der Funktionsweise des Systems (LEIBUNDGUT 1984).

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Aufgrund der Witterung des Sommers 2004 konnte das ursprüngliche Ziel der Diplomarbeit nicht erreicht werden. Die Anfangs festgelegte Zielsetzung beinhaltete eine Niedrigwasseranalyse an fünf kleinen Einzugsgebieten mit verschiedener Landnutzung. Zusätzlich sollten die Trockenphasen mit der extremen Dürre 2003, gemessen am Glasbach, verglichen werden. In der Messperiode, die dieser Arbeit zugrunde liegt, konnte nur eine Trockenphase im September beobachtet werden. Insgesamt konnten nur drei länger andauernde niederschlagsfreie Perioden aufgezeichnet werden. Außerdem sind die Daten des Glasbaches von 2003 lücken- und fehlerhaft.

Aufgrund der Datengrundlage sollten nun Unterschiede des Abfluss-, Temperaturund Leitfähigkeitsverhalten, der verschiedenen Einzugsgebiete, während der niederschlagsfreien ausgewählter Perioden und während Ereignisse herausgearbeitet werden. Besonders im Hinblick auf die unterschiedliche Landnutzung der Untersuchungsgebiete sollten Verhaltensmuster und Besonderheiten aufgezeigt werden. Eine weitere Fragestellung ist, ob mit diesem relativ einfachen Ansatz, Messung nur am Gebietsauslass, Prozesskenntnis für eine prozessorientierte Modellierung erlangt werden kann.

So kamen in der vorliegenden Diplomarbeit neuartige Sonden zum Einsatz, die in hoher zeitlicher Auflösung Wasserstand, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit aufzeichnen. Im Zeitraum von April bis September 2004 wurden an fünf Bächen des südlichen Schwarzwaldes Pegel installiert und kontinuierliche Messungen der oben genannten Parameter durchgeführt. Zusätzlich wurden Temperatur- und Leitfähigkeitslängsprofile zum besseren Verständnis der Abflussbildung erstellt. Die analysierten Wasserproben geben Anhaltspunkte über den geologischen Untergrund, den Grad der Verwitterung, den Anteil an Grundwasser und teilweise über anthropogene Einflüsse.

Stark verlinkt ist dieses Thema mit der Wasserqualität, da Temperatur und Leitfähigkeit zu den physikalischen Parametern der Wasserqualität gehören (DOSTINE 2001). So kann eine Erhöhung der Leitfähigkeit nach einem Niederschlagsereignis ein Hinweis auf Oberflächenabfluss von Weideland sein.

1.2 Stand der Forschung

Der Wasserabfluss ist eine Komponente des natürlichen terrestrischen Wasserkreislaufs (siehe Abbildung 1-2). Laut KENNEL (2004) wirken auf die Höhe des Abflusses eines Einzugsgebietes verschiedene Faktoren ein. Neben Höhe, Intensität und räumlicher Verteilung des Niederschlagsereignisses, neben Größe und Geomorphologie des Einzugsgebietes, Morphologie des Gewässers sowie Jahreszeit bzw. Witterungsvorgeschichte (Füllungsgrad des sind Bodenwasserspeichers durch vorhergehende Niederschläge) dies insbesondere die physikalischen Bodeneigenschaften (Wasserdurchlässigkeit, Wasserspeicherfähigkeit, Lage einer Stauschicht bzw. des Grundwasserspiegels) sowie die Art und Weise der Landnutzung. Die Frage ob (naturnaher) Wald Hochwasser mindernd wirken kann, wird angesichts der in der Regel hohen Versickerungs- und Speicherleistung in der Fachliteratur zumindest für kleinere Einzugsgebiete und kleinere Hochwasser fast durchgehend bejaht (MÖßMER 2003). Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt auch FRANKENBERGER (2000) in seiner Studie aus Indiana, in der er vier verschiedene Landnutzungen hinsichtlich des Abflusses untersucht hat. So zeigt er, dass der Abfluss nach einem 100 mm Niederschlag von verdichteten Flächen zu Weizen- und Sojabohnenfeldern, zu Gras- und zu Waldflächen signifikant abnimmt. Wird in die Vergangenheit geschaut, so kann laut MENDEL (2000) aus verschiedenen historischen und prähistorischen Indizien abgeleitet werden, dass vermehrte Sedimentation seit der Eisenzeit auf häufigere und stärkere Hochwasser infolge von Waldrodungen zurückzuführen ist.



Abbildung 1-1: Abfluss als Komponente des terrestrischen Wasserkreislaufs (verändert aus MENDEL 2000).

Direkte wissenschaftliche Erkenntnisse zu Wirkungen unterschiedlicher Vegetationsdecken oder Landnutzungsarten auf den Abfluss werden in erster Linie mit folgenden Methoden gewonnen (KENNEL 2004):

- Infiltrationsexperimente auf kleinen Bodenflächen (bis wenige m², für Wald erstmals 1897 von Ebermayer; nach MENDEL 2000);
- Beregnungsexperimente auf größeren Flächen mit natürlichen Vegetationsdecken (typisch ca. 100 m²; KARL und TOLDRIAN 1973);
- Forsthydrologische Vergleichsstudien in unterschiedlich bewaldeten kleinen Wassereinzugsgebieten (typisch ca. 10 bis 2.000 ha; erstmals seit 1903 im Sperbel- und Rappengraben von ENGLER; ENGLER 1919).

Die Ergebnisse werden üblicherweise als Abflussbeiwerte angegeben. Das ist der jeweilige Anteil der aufgebrachten oder gemessenen Niederschlagsmenge, der als Oberflächenabfluss (bei Beregnungsexperimenten) oder als Direktabfluss (bei Einzugsgebietsuntersuchungen) gemessen wird (KENNEL 2004).

• Als weitere Methode wäre noch die Modellierung mit distribuierten und semidistribuierten Modellen zu nennen (u.a. Larsim, WASIM-ETH).

Erhöhte Infiltration vermindert Oberflächenabfluss, Abschwemmung von Schadstoffen, Erosion und fördert die Grundwasserneubildung. Die besten

Seite 4

Infiltrationsbedingungen finden sich in grobkörnigen Böden und in aut strukturierten feinkörnigen Böden. Letztere können sich vor allem in weitgehend ungestörten Bereichen mit hohem Vegetationsbedeckungsgrad und hoher biologischer Aktivität wie natürlichen Mischwäldern oder Wiesen entwickeln (NIEHOFF 2001). Es ist allgemein bekannt, dass die Wasseransprüche der unterschiedlichen Vegetationsdecken Weide-Waldland bei und den Grundwasserhaushalt, aus dem die meisten Bäche gespeist werden, stark beeinflussen können. Berichte aus Nord-Carolina (USA) zeigen an, dass das Abholzen eines Laubwaldes samt Unterholz im Berggelände den Abfluss der Bäche dort stark erhöht hat. Umgekehrt wurde im Staate Ohio (USA) festgestellt, dass das Aufforsten eines kleinen Einzugsgebietes mit Fichten den Abfluss der Bäche merklich reduzierte (JOHNSON & MEGINNIS 1960).



Abbildung 1-2: Veränderung der Trockenwetterauslauflinie aufgrund von Landnutzungsänderung (JOHNSON & MEGINNIS 1960).

Abbildung 1-2 veranschaulicht die Änderung der Trockenwetterauslauflinie durch Änderungen in der Landnutzung. Hierbei wurden die Trockenwetterlinien vor und nach einer Rodung aufgenommen. Die Trockenwetterlinie zeigt an, wie der Grundwasserstrom über eine längere Trockenperiode absinkt. Die Differenz zwischen den Trockenwetterlinien von vor und nach den Eingriffen ermöglicht eine Abschätzung der Einflüsse von forstlicher Landnutzungsänderung auf den Beitrag des Grundwassers zum Niedrigwasserabfluss. So ist aus der Abbildung 1-2 ersichtlich, dass der Abfluss vor der Rodung wesentlich schneller auf ein niedrigeres Niveau sinkt als danach. Dies wird im Wesentlichen auf die erhöhte Verdunstung der Vegetation zurückgeführt. Diese Erkenntnis wurde in zahlreichen Studien verifiziert und ist in den Lehrbüchern der Hydrologie wiederzufinden (u.a. DYCK/PESCHKE).

Die kontinuierliche Messung der spezifischen Leitfähigkeit und der Temperatur in Zusammenhang mit der Abflusserfassung bietet eine gute Möglichkeit zur Untersuchung hydrologischer Fragestellungen. Vorteile der Verwendung von spezifischer Leitfähigkeit und Temperatur als Tracer sind die vergleichsweise einfache und damit schnell und relativ kostengünstig einsetzbare Messtechnik. Vor allem in Entwicklungsländern ist das ein entscheidender Vorteil gegenüber Experimenten mit künstlichen Tracern, deren Durchführung wesentlich höhere Kosten verursacht und die auch in der Aus- und Bewertung der Ergebnisse mehr Wissen und Erfahrung benötigen (KEHINDE 1992). Als Limitierung bzw. als zwingende Randbedingungen zur Verwendung dieser Summentracer gelten fundierte Kenntnisse der geologischen Beschaffenheit des Untersuchungsraumes sowie signifikante Änderung der Parameter mit dem Abfluss. Letzteres ist in der Regel eine Limitierung der Größe des Einzugsgebietes. Zusätzlich sollten zur Validierung der gemessenen Werte, je nach Fragestellung, begleitende Untersuchungen von beispielsweise Hauptionen oder Isotopen durchgeführt werden.

Generell fällt die Leitfähigkeit mit Starkniederschlagsereignissen und steigt beim Zurückfallen des Abflusses auf den Basisabfluss (RINGROSE ET AL. 2001). In der Stadthydrologie kann man den sog. "first flush" (vergleiche GUWANG 2004) beobachten, welches ein Ansteigen der Leitfähigkeit in der ersten Welle durch Abschwemmung von Depositionen bedeutet. Die Frage ist, ob ähnliches in ländlichen Einzugsgebieten zu beobachten ist.

Die Leitfähigkeit als geogener Tracer eignet sich, um Angaben über die Herkunftsräume des Abflusses zu treffen. So konnte WETZEL (2003) verschieden schnelle Fließwege des Niederschlagswassers anhand der Leitfähigkeit ausweisen.



Abbildung 1-3: Abfluss und Leitfähigkeit während eines lang anhaltenden Niederschlagsereignisses (aus WETZEL 2003).

Die in Abbildung 1-3 erst niedrige Leitfähigkeit und zum Ende des Ereignisses hin hohe Leitfähigkeit, wird von WETZEL (2003) wie folgt gedeutet. Bei Beginn des Ereignisses kommt vorzugsweise Wasser über schnelle Fließwege zum Abfluss, am Ende vermehrt solches langsamer Fließwege und damit längerer Kontaktzeiten.

Der Tagesgang der Temperatur hängt sehr stark mit der Beschattung und damit mit der Landnutzung zusammen. In kleinen Einzugsgebieten ist die Beschattung die wichtigste forstwissenschaftliche Variable, die die Wassertemperatur beeinflusst (TETI 2004). Die kontinuierliche Erfassung der Temperatur kann an Grundwasseraustritten Informationen über den Herkunftsraum bzw. das Fließsystem des Wassers geben (siehe Abbildung 1-4).



Abbildung 1-4: Temperaturverhalten zweier Quellen im Bruggaeinzugsgebiet (Nach UHLENBROOK 1999).

Der Wissensstand bei Niedrigwasserperioden beschränkt sich im Wesentlichen auf rein statistische Analysen von hydrologischen Daten, hauptsächlich Abfluss und davon abgeleitete Parameter sowie deren Regionalisierung. Auch weit verbreitet sind Untersuchungen der Wasserqualität in Zusammenhang mit Niedrigwasser.

Weitaus häufiger als beim Hochwasser werden beim Niedrigwasser mehrere Merkmale wie das Eintrittsdatum, die Größe des Abflusses und seine Dauer gemeinsam angesprochen, da mit Niedrigwasseruntersuchungen das gesamte Ausmaß des Wassermangels erfasst werden soll (MANIAK 1997). Zur Zeit beschränkt sich die Niedrigwasserstatistik auf die in Abbildung 1-5 erklärten Parameter und auf Parameter, die aus der Dauerkurve abgeleitetet werden.



Abbildung 1-5: Illustration der Niedrigwasser-Kenngrössen SummeD, MaxD, SummeV und MaxV anhand einer fiktiven Abflussganglinie (blau). Qs = Abflussschwellenwert (http://www.bwg.admin.ch/themen/wasser/d/nwstat.htm).

Wasserqualität und Biodiversität hängen von vielen Einflussfaktoren ab. Es ist unwahrscheinlich, dass spezifisch ermittelte Zusammenhänge auf andere Gebiete eins zu eins übertragen werden können. Die Forschung sucht nach Methoden, die Beeinträchtigung der Wasserqualität durch die urbane Entwicklung zu minimieren. Wasserbeeinträchtigungen, die über die Landnutzung verursacht werden, sind schwierig zu erfassen, da es sich im Allgemeinen nicht um Punktquellen, sondern um diffuse Quellen handelt.

2 Methodik

Die vorliegende Arbeit umfasst einen großen experimentellen Teil, in dem an fünf verschiedenen Bächen mit mikroskaligen Einzugsgebieten von April bis September 2004 Gerinnequerschnitte und Niederschlagstotalisatoren installiert und regelmäßige Messungen von Abfluss, Wasserstand, Leitfähigkeit, Temperatur und Wasserproben vorgenommen wurden. In diesem Kapitel werden die Messmethoden des Niederschlags, des Abflusses, der Leitfähigkeit, der Temperatur und der Laboranalysen eingehend beschrieben, wobei sich die Wasserstandsmessungen im Wesentlichen auf die Vorreiterarbeit von GUWANG (2004) beziehen. Anschließend folgt die statistische Auswertung der erhobenen Daten und deren Interpretation. Um weitere Gebietsinformationen zu bekommen, wurden an zwei verschiedenen Tagen Temperatur- und Leitfähigkeitslängsprofile an den Bächen vorgenommen.

2.1 Messsonden

Es wurden die Sonden der Firma Eijkelkamp/Van Essen verwendet. Eingesetzt wurden der Barodiver, welcher den Luftdruck und die Lufttemperatur aufzeichnet, und die CTD-Diver, welche Druck, Temperatur und Leitfähigkeit in einem internen Logger speichern können. Das Messintervall wurde auf eine Minute getaktet, damit eine möglichst hohe zeitliche Auflösung erreicht wird. Durch diese Taktung mussten die Diver alle 11,1 Tage ausgelesen werden. Technische Daten der Sonden siehe Tabelle 2-1. Die Auslesung erfolgte mit Hilfe eines Laptops mit entsprechender Schnittstelle. Bei jeder Auslesung wurde per Hand der Wasserstand am Referenzmesspunkt, die Temperatur und die Leitfähigkeit mittels eines Leitfähigkeitsmessgerätes LF 92 der Firma WTW gemessen. Außerdem wurde der Abfluss mittels dem portablen Abflussmessgerät von der Firma Sommer nach der Tracerverdünnungsmethode gemessen, um anschließend die jeweilige P-Q-Beziehung zu ermitteln.

Spezifikationen		CTD-Diver	Barodiver
Маßе		Länge 260 mm, Ø 22 mm	Länge 125 mm, Ø 22 mm
Betriebstemperatur		- 20 °C bis + 80 °C	- 20 ° C bis + 80 °C
Speicherkapazität		3 * 16000 Messwerte	2 * 24000 Messwerte
	Messprinzip	Dehnmessstreifen-Brücken	Dehnmessstreifen-Brücken
Druck	Messbereich	950 – 1950 cm WS	950 – 1100 cm WS
	Genauigkeit	0,1 % typ., 0,2 % max. (1–2 cm)	0,1 % typ., 0,2 % max.(1–2 cm)
	Messprinzip	Halbleiter	Halbleiter
Temperatur	komp. Bereich	- 20 °C bis + 80 °C	- 10 °C bis + 40 °C
	Genauigkeit	0,1 ° C	ca. 0,1 °C
	Messprinzip	4 Elektroden	-
Leit- fähigkeit	Messbereich	0 – 5 mS/cm	-
	Genauigkeit	1 % vom Bereich (50 µS/cm)	-

Tabelle 2-1: Technische Daten der Messsonde	n (GUWANG 2003) .
---	---------------------------

2.1.1 Wasserstand

Da die Sonden im Gewässer die Summe aus Atmosphärendruck und Wassersäule aufzeichnen, ist eine Kompensation mit dem Luftdruck erforderlich. Messtechnisch war es nicht möglich, an jedem Pegel einen Barodiver zu installieren, daher mussten die Luftdruckdaten des Meteorologischen Institutes Freiburg und des UWB vom Standort Schauinsland mit einbezogen werden. Nicht bei jedem Gerinnequerschnitt war es möglich, die Sonden in völlia geschwindigkeitsberuhigte Zonen einzubringen, deshalb wird durch die einminütigen Messwertaufzeichnung der Wellengang mit aufgezeichnet. Dieser führt zu 1 - 2 cm großen Schwankungen. Durch Aggregierung zu 10-Minuten-Werten konnten diese Schwankungen relativiert werden. Die ausgelesenen Druckdaten der Messsonden sollten mittels der Barometeraufzeichnungen durch die Software (Logger Data Manager, LDM) kompensiert werden. Jedoch traten dabei, wie auch schon bei der Arbeit von GUWANG (2004), regelmäßig Schwierigkeiten auf, die schließlich eine manuelle Kompensation in einem Tabellenkalkulationsprogramm erforderten. Das Gleiche betrifft die gemessenen Barometerdaten, weshalb die Luftdruckdaten der nächsten Klimastationen verwendet wurden. Für die genaue Bestimmung der jeweiligen Wassertiefe

musste ein Abgleich mit den von Hand gemessenen Referenz-Wassertiefen erfolgen. Dabei wurde die Differenz der Messwerte der Sonde und der Handmessung zum Zeitpunkt der Auslesung zu der jeweiligen aufgezeichneten Wassertiefe dazugezählt. Grund dafür ist, dass die Sonde den Wasserstand nicht an der Höhe Null misst, sondern selbst eine Höhe h_0 besitzt.

Die Messsonden erfassten von den Daten wurden in ein abgeglichen. Tabellenkalkulationsprogramm überführt, kompensiert und Anschließend wurden die Daten auf Konsistenz überprüft (Vergleich mit Handmessungen, Erklärung für Ausreißer...) und grafisch dargestellt. Um die oben beschriebenen Schwankungen zu eliminieren, wurden die Daten zu 10-Minuten-Werten aggregiert. Zudem produzierten die kompensierten Daten einen nicht unbedingt reproduzierbaren Tagesgang, was, exemplarisch gemessen am Glasbach, nicht nachzuweisen war. In der Literatur finden sich aber Angaben über Tagesgänge bedingt durch die Verdunstung der Vegetation. Ebenso wurde am Testfeld Hofsgrund in einer anderen experimentellen Arbeit am Institut für Hydrologie Freiburg ein Tagesgang des Abflusses nachgewiesen.

2.1.2 Temperatur

Temperatur ist ein wichtiger Summentracer. Temperaturmessungen an Oberflächengewässern bieten die Möglichkeit, Wasserausbrüche aus der Tiefe zu lokalisieren (Käss 1992). Allerdings wird die Temperatur durch jahreszeitliche Schwankungen, Tagesschwankungen, Exposition, unkontrollierbare Zuflüsse, Niederschlag, Beschattung, Wiederaustritte versickerten Bachwassers und durch den Strahlungsinput beeinflusst. Hinzu kommen anthropogene Einflüsse wie Abwärme, Gewässerbaumaßnahmen oder die Abholzung von Ufervegetation, die unnatürliche Erwärmungen des Wassers zur Folge haben (BARUS 1996). Die Wassertemperatur ist ein Faktor, der nahezu alle physikalischen, chemischen und biologischen Vorgänge im Gewässer beeinflusst (DVWK 227/1993). Deshalb ist die Bestimmung der Temperatur zur Beurteilung und Interpretation der übrigen Parameter sowie der im Gewässer ablaufenden Prozesse unerlässlich.

Die Temperaturmessdaten der Sonden stimmten bis \pm 0.1°C mit den Handmessungen überein.

2.1.3 Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit ist abhängig von der Temperatur des Wassers, der Konzentration und dem Dissoziationsgrad der Elektrolyte, der Wertigkeit der Ionen und der Wanderungsgeschwindigkeit der verschiedenen Ionenarten in Feldrichtung. Um eine Temperaturabhängigkeit zu vermeiden, werden die Werte auf die so genannte spezifische Leitfähigkeit umgerechnet, d.h. auf eine Referenztemperatur von 25 °C. Mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit ist schnell eine Aussage über den Gesamtgehalt an gelösten Salzen in einem Gewässer zu bekommen. Nach DVWK (227/1993) kann als grobe Näherung gelten: 1000 µS/cm entsprechen ca. 1000 mg/l gelöste Feststoffe (Abdampfrückstand der filtrierten Probe). Hohe Salzbelastungen haben auf die verschiedenen Nutzungen der Fließgewässer nur nachteilige Wirkungen, dies gilt insbesondere für Niedrigwasserzeiten. Die Nutzung zu Bewässerungszwecken kann bereits durch einen Gesamtgehalt von 500 mg/l in Frage gestellt sein (DVWK 227/1993). Diese Salze können einen natürlichen Ursprung haben (z.B. Verwitterung von Gesteinen) oder menschlicher Herkunft sein (z.B. Streusalz, Industrieabwässer, Abschwemmung von Gülle). Die Leitfähigkeit natürlicher Mittelgebirgsbäche auf kristallinem Untergrund sind in der Regel gering. Die Messsonden haben eine Messgenauigkeit von \pm 50 µS/cm. Laut Herstellerangaben sind sie daher nicht für Messungen in derartigen Bächen geeignet. Ein weiteres Problem, welches weit größere Schwankungen hervorruft, stellt die biologische Aktivität der Bachflohkrebse (gammarus) dar. Dies konnte aber mit Hilfe von Messinggittern behoben werden (siehe Abbildung 2-1).



Abbildung 2-1: Sonde mit Bachflohkrebsen bzw. Messinggitter.

2.1.4 Fazit

Die Sonden der Firma Eijkelkamp/Van Essen wurden ursprünglich für Messungen in Grundwasserrohren entwickelt. Dennoch sind sie für die Pegelmessungen in beruhigten Zonen geeignet. Die Luftdruckmessung sollte am gleichen Ort wie die Wasserstandsmessung stattfinden. So ist aus den Standardwerken der Meteorologie (vergleiche u.a. KRAUS 2000, ROEDEL 1992) zu entnehmen, dass der Luftdruck horizontal, zumindest bei in dieser Studie betrachteten Entfernungen, als sehr konstant anzusehen ist. Konvektivereignisse können allerdings kleinräumig so genannte Gewitternasen im Luftdruckverlauf bilden. Diese könnten mit vorliegender Messnetzdichte unter Umständen nicht vollständig erfasst werden. Zusätzlich sind regelmäßige Referenzmessungen erforderlich, am besten zu unterschiedlichen Tageszeiten, um gegebenenfalls die Tagesgänge des Wasserstandes nachzuvollziehen. Die einminütige Auflösung der Messdaten ist fraglich, da sie riesige Datenmengen produziert und große Schwankungen hervorruft. Die Temperaturmessung ist sehr gut für diese Art von Fließgewässern geeignet, die Unterschiede zur Referenzmessung betrugen weniger als 0,2 °C. Das Leitfähigkeitsmessprinzip ist weniger gut geeignet, wegen mangelnder Messgenauigkeit. Jedoch existieren von der Firma Eijkelkamp/Van Essen, Sonden die den Messbereich von 0 bis 1,4 mS/cm abdecken. Es gilt zu prüfen ob diese Sonden besser für solch gering mineralisierte Bäche geeignet sind, oder ob die Messung der spezifischen Leitfähigkeit mit Sonden, denen ein anderes Messsystem zugrunde liegt, bessere Ergebnisse liefert.

2.2 Natürliche Tracer

Alle Wasseranalysen wurden im Labor des Institutes für Hydrologie, Freiburg durchgeführt. Bis zur Analyse wurden die Proben bei 4°C und unter Lichtabschluss gelagert.

Alle Hauptionen (Natrium, Kalium, Magnesium, Calcium, Chlorid, Nitrat, Sulfat) wurden mit Hilfe der Ionenchromatographie bestimmt. Verwendet wurde der Ionenchromatogroaph DX500 der Firma Dionex (vergleiche DIDSZUN 2004). Die Wasserproben wurden vor der Analyse mit einem 40 µm-Filter gefiltert. Je Probencharge wurde das Gerät mit Hilfe von 12 Standards kalibriert. Die Standardabweichung liegt sowohl bei den Kationen als auch bei den Anionen bei rund 4%. Ausnahme bildet Chlorid hier liegt sie bei ca. 10%. Die Standardabweichung wurde über zur Kontrolle zwischen den Proben verteilte mitgemessene Kalibrierlösungen bestimmt, wobei aus den Kalibrierlösungen zufällig ausgewählt wurde.

2.2.1 Natrium

Natrium wird im Boden sehr schwach gebunden, leicht ausgewaschen und damit sehr mobil. Hauptquelle des Natriums ist neben der Plagioklasverwitterung der Eintrag über den Niederschlag. Wobei dieser in Meeresnähe deutlich größer ist. Im Binnenland werden ca. 1,6 bis 10 kg/(ha a) über den Niederschlag eingetragen, des Weiteren können große Mengen über das Ausbringen von Wirtschaftsdünger, z.B. Rindergülle eingetragen werden (SCHACHTSCHABEL 1992). Durch die Streusalzung im Winter können ebenfalls erhebliche Mengen eingetragen werden.

2.2.2 Kalium

Die Verwitterung von Orthoklasen, Glimmern und Amphibolen ist die Hauptquelle des Kaliums. Es ist der Nährstoff, der in der Regel den höchsten Gehalt in Pflanzen aufweist. In der Bodenlösung treten Kaliumgehalte von 1 – 100 mg/l auf (SCHACHTSCHABEL ET AL. 1992). Durch die Kaliumfixierung in den Tonmineralen des Mineralbodens liegen große Anteile des Ions in nichtaustauschbarer Form vor,

so dass Kalium nur gering ausgewaschen wird. Das organische Material der oberen Bodenschichten kann allerdings Kalium nicht fixieren, so dass vermehrte Auswaschung während eines Niederschlagsereignisses auf Fließwege im Oberboden schließen lässt. Das Kalium der primären Minerale wie Feldspäte und Glimmer unterliegt im globalen System vielfältigen Umsetzungen wie Auswaschung und Fixierung. Ein starker Kaliumeintrag findet durch die Ausbringung von Gülle statt (WENNINGER 2002). Der Eintrag aus Freilandniederschlag beträgt 2 bis 11 kg/(ha a) (REHFUESS 1990).

2.2.3 Calcium und Magnesium

Magnesium und Calcium sind wichtige Nährelemente für Pflanzen und Tiere. Sie gehören zu den wichtigsten Erdalkalimetallen und sind die bedeutendsten Kationenarten in den Fließgewässern (BARUS 1996). Calcium und Magnesium haben bei der Härtebestimmung des Wassers die größte guantitative Bedeutung (MORTIMER 1976). Ein Wasser mit hoher Härte hat keinen direkten negativen Einfluss auf die Gesundheit. Im Gegenteil - eine gewisse Wasserhärte wirkt sich positiv auf die Zahn- und Knochenbildung aus (DVWK 228/1996). Magnesium stammt aus der chemischen Verwitterung von z.B. Dolomit, Biotit und Cordierit. Die Bodenlösung enthält 4 – 10 mg Mg/l. Magnesium wird, abhängig von Sickerwassermenge und pH-Wert, relativ leicht ausgewaschen (SCHACHTSCHABEL 1992). Die Hauptquelle des Calciums in Gebieten mit kristallinem Untergrund liegt in der Verwitterung von Plagioklasen, Pyroxenen und Amphibolen. In anderen Gebieten kommen außerdem noch Calcit, Dolomit und Gips hinzu. Durch die leichte Verwitterbarkeit dieser Minerale kommt es in Böden selten zum Calciummangel. Die Bodenlösung enthält in der Regel über 20 mg Ca/l. Bei hohen Calciumgehalten wird Calcium am stärksten von allen Ionen ausgewaschen. Der Eintrag des Freilandniederschlages beläuft sich bei Calcium auf 2 bis 11 kg/(ha a) und bei Magnesium auf 1 bis 2 kg/(ha a) (REHFUESS 1990).

2.2.4 Chlorid

Das anorganische Chlorid ist ein hochmobiles Ion und in allen Binnengewässern enthalten. Dort liegen seine Konzentrationen generell im mg/l-Bereich (HÜTTER 1990). Durch die hohe Mobilität und aufgrund des kleinen Ionenradius unterliegt das Chlorid kaum der Adsorption. Nach BREHM & MEIJERLING (1990) ist das gesamte Chlorid der Fließgewässer allochton. Der größte Teil stammt aus den Böden und dem Grundgestein der Wassereinzugsgebiete. Aus dem Niederschlag erfolgt im Binnenland ein Eintrag von 5-20 kg/(ha a) (SCHACHTSCHABEL 1992). Erhöhte Chloridgehalte gelten als Verschmutzungsindikator. Liegt ein hoher, nicht geogen bedingter Chloridgehalt vor, kann man bei einem gleichzeitigen Anstieg anderer Verschmutzungsindikatoren wie erhöhte Permanganatzahl, Ammonium-, Nitrat-, Nitrit-, und Phosphationen, von einer Verunreinigung des Wassers durch Abwässer ausgehen.

2.2.5 Nitrat

Nach SCHWOERBEL (1987) kommt der Stickstoff in Gewässern in vielerlei Verbindung vor, anorganisch als Nitrat, Nitrit, und Ammonium, organisch als Zwischenstufe des mikrobiellen Eiweißabbaus, als Exkretionsprodukte tierischer Konsumenten sowie in freien Verbindungen, in Aminosäuren oder Enzymen. Als Element ist Stickstoff in den Ausgangsgesteinen der Böden nur in sehr geringen Konzentrationen vorhanden. Je nach Sauerstoffgehalt des Gewässers überwiegt die Nitrifizierung, Denitrifizierung oder Ammonifizierung. Quellen von Stickstoff sind die Zufuhr von Dünger, atmosphärische Deposition, Biomasse, mikrobielle Mineralisierungsprozesse und Einträge über den Niederschlag. Nach REHFUESS (1990) beträgt der Stickstoffeintrag aus dem Freilandniederschlag 5 bis 30 kg/(ha a). Ebenso kann es zu einer Stickstofffixierung durch Bakterien, die sog. Rhizobien in Symbiose mit Leguminosen, kommen. Bei der Trinkwasseraufbereitung muss darauf geachtet werden, dass der Grenzwert von 50 mg/l Nitrat eingehalten wird, da bei Säuglingen, die weniger als 6 Monate alt sind, im Gefolge einer zu hohen Nitrataufnahme eine Methämoglobinämie (Blausucht) auftreten kann (DVWK 227/1993).

2.2.6 Sulfat

Schwefel liegt in Gesteinen überwiegend als Sulfid vor und wird im Verlauf der Verwitterung zu Sulfat oxidiert. Aufgrund der guten Löslichkeit von Sulfaten wird dieses Ion sehr leicht ausgewaschen (SCHACHSCHABEL 1992). Die Verwitterung von Magmatiten liefert nur wenig Sulfat, da ihr Schwefelgehalt mit 0,02 – 0,3 % gering ist (SCHACHTSCHABEL 1992). Pyrit- und Sulfiderze sowie Gipsgesteine sind dagegen wichtige lokale Schwefelquellen. Sulfat ist ebenso wie Nitrat an biochemischen Umsätzen im Ökosystem beteiligt. Im Gegensatz zum Nitrat sind jedoch die Prozesse der Dynamik vielfältiger (FEGER 1999). Geologisch bedingte Einflüsse spielen beim Sulfatgehalt eine große Rolle, wobei allerdings zusätzlich eine Immission aus der Atmosphäre mit sulfat- und schwefelsäurehaltigen Niederschlägen, die teilweise anthropogen bedingt sein können, in Betracht gezogen werden muss (BARUS 1996). Der Sulfateintrag aus Freilandniederschlägen beträgt durchschnittlich 8 bis 28 kg/(ha a) (REHFUESS). Sofern geogene Ursachen ausgeschlossen werden können, ist Sulfat als Indikator für anthropogene Verunreinigungen geeignet. Nach DVWK (228/1996) können größere Mengen Sulfate beim Menschen zu Organschäden führen. Die perorale Aufnahme von 50 g Magnesiumsulfat (Bittersalz) wirkt sogar tödlich.

2.2.7 Silikat

Silicium ist nach 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 (SCHACHSCHABEL 1992). Silikat stammt hauptsächlich aus der Verwitterung der Minerale Feldspat, Glimmer, Pyroxen, Amphibol und Olivin (WENNINGER 2002). Der Gehalt an wasserlöslichem Silikat steigt sowohl mit zunehmender Temperatur, als auch mit abnehmenden pH-Werten. Neben diesen Parametern bestimmt auch der Phosphatgehalt die Silikatverfügbarkeit, da Phosphat und Silikat um die gleichen Adsorptionsplätze konkurrieren. Eine Phosphatdüngung führt zu einer erhöhten Silikatverfügbarkeit (SCHACHTSCHABEL 1992). Silikat ist ein geogener Tracer, dessen Konzentration in der jeweiligen Abflusskomponente bestimmt wird durch die Verwitterungsprozesse der Gesteinsmatrix des Herkunftsraumes (WENNINGER 2002). Verglichen mit anderen Wasserinhaltsstoffen sind die Silikatkonzentrationen weniger variabel. Aus diesen Gründen wurde Silikat in zahlreichen Studien zur Abflusskomponententrennung verwendet (vergleiche UHLENBROOK 1999). 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).

Die Analyse des gelösten Silikats erfolgte mit dem Photometer Aqua Mate der Firma Spectronic/Unicam in Anlehnung an DIN 38405/21. Gemessen wird die Extinktion des blauen Molybdato-Kieselsäure-Komplexes bei 820 nm, welche proportional zur Silikatkonzentration ist (vergleiche DIDSZUN 2004). Vor der Messung wurde das Gerät mit sechs Standards geeicht. Zusätzlich wurden bei jedem Messdurchgang neben den acht Proben zwei Standards zur Kontrolle mitgemessen. Die Standardabweichung der Silikatbestimmung liegt bei rund 0,22 mg/l, der prozentuale Fehler liegt bei ca. 5% und ist bei 3 mg/l am höchsten.

2.2.8 Fazit

Insgesamt wurden 43 Wasserproben analysiert. Die Fehler der Analysen bewegen sich in den selben Bereichen, wie bei anderen experimentellen Arbeiten (vergleiche WENNINGER 2002, DIDSZUN 2004). Somit wird die Methodik der Ionenchromatographie und der Silikatanalyse als geeignet erachtet, um die jeweiligen Konzentrationen der natürlichen Tracer zu bestimmen.

2.3 Berechnung der P-Q-Beziehung

Um zu einer analytischen Form der Wasserstand–Durchfluss–Beziehung zu gelangen, wird angenommen, dass sie sich grundsätzlich als Potenzfunktion darstellen lässt (DYCK/PESCHKE 1995). Die Manning-Strickler-Formel, welche aus Potenzprodukten aufgebaut ist, hat sich für solche Anwendungen am besten behauptet (SCHRÖDER 1994).

Formel 2-1: Manning-Strickler Formel.

 $Q = A * k_{st} * I^{1/2} * R_{hy}^{2/3}$

A Querschnitt [m²]
k_{st} Stricklerbeiwert [m^{1/3}/s]
I Energieliniengefälle [-]
R_{hy} hydraulischer Radius [m]
Q Durchfluss [m³/s]

Die Grundlage dieser Funktion bilden die experimentell erworbenen Einzelmessungen des Abflusses zu verschiedenen Wasserständen. Die Abflüsse wurden mit Hilfe der Salzverdünnungsmethode bestimmt. Eine bestimmte Salzmenge wurde punktuell eingespeist. Unterhalb der Einspeisestelle, nachdem von vollständiger Durchmischung ausgegangen werden kann, erfolgt die kontinuierliche Aufzeichnung der Leitfähigkeit. Über eine Eichgerade wird anschließend die Salzkonzentration errechnet. Über folgende Funktion wird der zu jedem Zeitschritt gehörende Abfluss berechnet:

Formel 2-2: Formel zur Abflussberechnung aus dem Diracimpuls.

т	m	zugegebene Tracermenge [kg]
$Q = \frac{m}{t}$	c(t)	Konzentration während der Messung [mg/l]
$\int (c(t) - c_0) dt$	c0	Hintergrundkonzentration [mg/l]
0	Q	Durchfluss [m³/s]

Weitere Vorraussetzung für die Anwendung dieser Formel ist stationäres Fliessen, d.h. der Abflussquerschnitt darf sich nicht über die Zeit ändern. Der Niedrigwasserbereich konnte bei allen Messstationen gut nachgebildet werden. Die Hochwasserspitzen fielen auf Einzelereignisse und Gewitter, was dazu führte, dass keine Abflussmessungen zu den aufgezeichneten Spitzenpegelwerten durchgeführt werden konnten. Die Messquerschnitte waren so eingerichtet, dass sich der Querschnitt in der Regel nicht änderte. Somit wird zu Grunde gelegt, dass das Energieliniengefälle, welches beim stationären Fließen gleich dem Sohlgefälle
ist, ebenso wie der Stricklerbeiwert während der Messperiode konstant ist. Es wird versucht den Stricklerbeiwert und das Energieliniengefälle als konstanten Faktor über eine Anpassung an die gemessenen Pegel- und Abflusswerte zu erhalten. Die Breiten-/Tiefenverhältnisse natürlicher Querschnitte sind weit entfernt von hydraulisch günstigen Querschnitten. Flüsse haben Breiten vom 10- bis 40-fachen der Wassertiefe, ihre Querschnittsformen sind vielgestaltig und analytisch nicht beschreibbar (LECHER ET AL. 2001). Aus diesem Grund wurde der natürliche Querschnitt der einzelnen Bäche in eine analytisch beschreibbare Form umgestaltet.

Folgende Abflusskurven wurden für die jeweiligen Messquerschnitte der verschiedenen Bäche ermittelt:

2.3.1 Glasbach

Wie schon in der vorangegangenen Arbeit von GUWANG (2004) mussten hier zwei Kurven angepasst werden. Wie aus Abbildung 2-2 ersichtlich ist, kann im Niedrigwasserbereich davon ausgegangen werden, dass der Stricklerbeiwert und das Energieliniengefälle konstant ist, während es bei Wasserständen über 6,8 cm durch vermehrte Geschiebeführung und teilweise Sohlumlagerungen zu Diskontinuitäten kommt. Ab einem Wasserstand von 6,8 cm konnte keine gute Anpassung der Formel 2-3 mit konstantem G erreicht werden. Ab diesem Pegelstand folgt die P-Q-Beziehung einer Polynomfunktion zweiten Grades. Begründet wird dies damit, dass sich mit steigender Höhe die Rauhigkeit ändert. Wie aus Abbildung 2-3 ersichtlich wurden zur Gestaltung des Gerinnequerschnittes nur Materialien aus dem Bachlauf verwendet.

Formel 2-3: Manningstrickler Formel für einen Rechteckquerschnitt.

	b	Breite [m]
$(b*h)^{\frac{2}{3}}$	h	Pegel [m]
$Q = b * h * G * \left\{ \frac{3 + h}{2 * h + b} \right\}$	G	Anpassungsparameter aus Energieliniengefälle
		und Stricklerbeiwert [m ^{1/3} /s]
	Q	Durchfluss [m³/s]

Formel 2-4: P-Q-Beziehung Glasbach für h< 6.8 cm.

 $Q = 3225 * h^2 - 157,39 * h$ h Pegel [m] Q Durchfluss [m³/s]



Abbildung 2-2: P-Q-Beziehung Glasbach.



Abbildung 2-3: Gerinnequerschnitt Glasbach.

2.3.2 Engebächle

Am Engebächle wurde ein Trapezquerschnitt installiert. Leider wurde das Bauwerk von der ortsansässigen Feuerwehr kurzzeitig abgebaut, so dass es zu Datenlücken kam. Durch das zehntägige Ausleseintervall konnte verhindert werden, dass sich nennenswerte Sedimentablagerungen während der Messkampagne gebildet haben. Dies bedeutet, dass auch hier die Konstanz des Messquerschnittes gesichert ist und die Manning-Strickler Formel verwendet werden kann. Es kam folgende Umformung zum Einsatz:

Formel 2-5: Manningstrickler Formel für einen Trapezquerschnitt.



Pegel [m] Anpassungs-Parameter aus Energieliniengefälle und Stricklerbeiwert [m^{1/3}/s] Durchfluss [m³/s]

Daraus konnte die P-Q- Beziehung (siehe Abbildung 2-4) aufgestellt werden.



Abbildung 2-4: P-Q-Beziehung Engebächle.



Abbildung 2-5: Gerinnequerschnitt Engebächle.

Da die Druckmessung abhängig von der Geschwindigkeit des umströmenden Mediums ist, wurde die Sonde in einer Vertiefung eingebracht. Hiermit wird gewährleistet, dass die Sonde die Werte in einer geschwindigkeitsberuhigten Zone aufzeichnet.

2.3.3 Selzenbächle

Der Gerinnequerschnitt des Selzenbächle besteht aus drei Tiefbausteinen und zwei Metallverstrebungen (siehe Abbildung 2-7). Durch die Seiten- und Grundverbauung mit denselben Materialien ist der Parameter G über die gesamte Pegelhöhe konstant. Zur Erstellung der P-Q-Beziehung wird die Formel 2-3 verwendet.



Abbildung 2-6: P-Q-Beziehung Selzenbächle.



Abbildung 2-7: Gerinnequerschnitt Selzenbächle.

2.3.4 Zipfeldobelbach

Im Zipfeldobelbach wurde eine Messkiste in das Bachbett eingebracht. Durch den somit entstandenen Messquerschnitt kann die Formel 2-3 zur Abflussberechnung herangezogen werden. Während der Messperiode fand keine Sedimentablagerung im Querschnitt statt. Folglich kann die umgeformte Manning-Strickler Formel über den Anpassungsparameter G über die gesamten Pegelschwankungen angepasst werden.



Abbildung 2-8: P-Q-Beziehung Zipfeldobelbach



Abbildung 2-9: Gerinnequerschnitt Zipfeldobelbach

2.3.5 Katzensteigbach

Aufgrund des weitestgehend naturbelassenen Bachquerschnittes konnte keine eindeutige Konstanz in der Rauhigkeit erzielt werden. Die Verbauung befindet sich nur auf einer Seite und somit ändert sich der Rauhigkeitsparameter mit steigendem Wasserspiegel. Für G konnte eine lineare Funktion (siehe Tabelle 2-2) gefunden werden, welche dann in die Formel 2-3 eingesetzt wurde. Wie aus Abbildung 2-10 ersichtlich kann mit konstantem G kein guter Fit erreicht werden.



Abbildung 2-10: P-Q-Beziehung Katzensteig



Abbildung 2-11: Gerinnequerschnitt Katzensteig

2.3.6 Fazit

Die Messergebnisse lassen darauf schließen, dass die Abflussquerschnitte Engebächle, Selzenbächle und Zipfeldobelbach, bei denen nicht nur die Seiten, sondern auch der Bachgrund verändert wurden, besser geeignet sind um eine eindeutige P-Q-Beziehung aufzustellen. Der Gerinnequerschnitt am Katzensteigbach, welcher rechts eine Blechverbauung und links eine Natursteinmauer hat, erwies keinen konstanten Parameter G, was wahrscheinlich auf eine nicht konstante Rauhigkeit zurückzuführen ist. Ebenso zeigte sich dies am Glasbach, bei welchem uneinheitliche Steine zur Seitenbebauung verwendet wurden. Für die Aufstellung der P-Q-Beziehung mit Hilfe der Manning-Strickler-Formel eignen sich Bebauungen, die nicht nur die Seite sondern auch den Grund mit demselben Material oder mit Materialien ähnlicher Stricklerbeiwerte bedecken und somit eine konstante Rauhigkeit aufweisen, bedeutend besser als andere. Dennoch werden bei allen Bächen gute Bestimmtheitsmaße für die P-Q-Beziehung erreicht. Der kleine Wert für G am Glasbach erklärt sich durch die geringere Steigung im Vergleich zu den anderen Bächen. Das Selzenbächle mit seiner Betonverbauung und das Engebächle mit einem Holzguerschnitt zeigen ähnliche Größen für G. Als Rauhigkeitsbeiwert konnte für das Engebächle 96 m^{1/3}/s, für den Querschnitt des Selzenbächles 76 m^{1/3}/s und für den des Zipfeldobels 42 m^{1/3}/s berechnet werden. Dies entspricht den Literaturwerten (vergleiche LECHER ET AL. 2001), die für Betonverbauungen zwischen 50 und 100 $m^{1/3}/s$ schwanken. Der niedrige Rauhigkeitsbeiwert am Pegel des Zipfeldobelbaches erstaunt angesichts der glatten Oberfläche der Messkiste. Eine Erklärung hierfür könnte der Einfluss des sehr rauen Bachbettes oberhalb der Messkiste sein. Da der Glasbach und der Katzensteigbach keine konstante Rauhigkeit aufweisen konnten keine Rauhigkeitsbeiwerte berechnet werden.

Gebiet	Anpassungsparameter G	Bestimmtheitsmaß r ²
Glasbach	0,34*	0,98
Zipfeldobelbach	1,55	0,92
Katzensteigbach	G = 5.8411 * h - 0.0538	0,99
Selzenbächle	2,20	0,98
Engebächle	2,13	0,95

(* gilt nur für den Bereich von h < 6.8 cm)

2.4 Niederschlag

Für die Niederschlagsmessung wurden drei verschiedene Niederschlagsstationen verwendet.

2.4.1 Niederschlagserfassung für das Untersuchungsgebiet des Glasbaches

Bei der Niederschlagserfassung für das Einzugsgebiet des Glasbaches wird der Niederschlag des Meteorologischen Institutes Freiburgs, gemessen auf dem Chemiehochhaus, verwendet. Bei dem Niederschlagsmessgerät handelt es sich um eine Wippe der Marke Vausala QM101 mit einer Auffangfläche von 200 cm² und einer Auflösung von 0,2 mm Niederschlag pro Impuls. Alle zehn Minuten wird die kumulierte Anzahl der Impulse abgespeichert.

2.4.2 Niederschlagserfassung für die Untersuchungsgebiete Selzenbächle und Engebächle

Die Niederschlagsstation der Einzugsgebiete Selzenbächle und Engebächle befindet sich in etwa in der Mitte der beiden Einzugsgebiete (siehe roter Punkt in Abbildung 3-3). Zum Einsatz kommt hier ein Niederschlagstotalisator der Firma Ott mit einer Auffangfläche von 200 cm². Die Messung des Niederschlages erfolgt über das Wägeprinzip mit einem Speicherintervall von einer Minute und einer Auflösung von 0,01 mm.

2.4.3 Niederschlagserfassung für die Untersuchungsgebiete Katzensteigbach und Zipfeldobelbach

Bei den Einzugsgebieten Katzensteig und Zipfeldobel wird der Niederschlag am Gebietsauslass des Katzensteigbaches gemessen (siehe Abbildung 3-1). Es wird hier eine Niederschlagswippe der Firma Thies verwendet. Die Auflösung beträgt 0,1 mm bei einer Auffangfläche von 200 cm². Die Messwertspeicherung erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie am Meteorologischen Institut. In Anbetracht der Kumulierung der Niederschlagsmessimpulse beträgt die zeitliche Auflösung der Aufzeichnung der Niederschlagsintensität zehn Minuten. Für die weitere Auswertung wurde – in Anpassung an das Minutenintervall der Abflussmessung – der 10–Minuten-Messwert durch zehn geteilt und den zehn Minuten die dem Messzeitpunkt vorausgehen zugeordnet siehe auch GUWANG (2004).

2.4.4 Fazit

Insgesamt wurden drei Niederschlagsmessstationen für fünf Gebiete verwendet. Die Station am Ringlihof, welche für die Gebiete Selzenbächle und Engebächle verwendet wird, befindet sich im unteren Drittel der beiden Einzugsgebiete. Sie kann als repräsentativ angenommen werden, da sie sich relativ in der Mitte der Zugrichtung der Wetterfronten befindet. Für den Zipfeldobelbach standen keine Niederschlagsmessstationen zu Verfügung, zusätzlich erschwerte hier der Wald eine repräsentative Messung, weswegen auf die Niederschlagstation am Katzensteigbach zurückgegriffen wurde. Diese befindet sich am Gebietsauslass des Katzensteigbaches, was sicherlich zu einem Fehler bei der Übertragung auf die Gebiete führt. Ebenso wie das Einzugsgebiet des Zipfeldobelbaches ist das des Glasbaches vollständig bewaldet, was eine Niederschlagsmessung erschwert. Aus der Arbeit von GUWANG (2004) kann entnommen werden, dass kein allzu großer Fehler entsteht, wenn die Daten des Meteorologischen Institutes, gemessen auf dem Chemiehochhaus, übertragen werden. Alle Niederschlagsmesser erzeugen in ihrer Umgebung eine Deformation des Windfeldes, die bei Regen zu einem Fehler von 2 bis 5 % führt (DYCK/PESCHKE 1995). Zusätzlich treten im Sommer oft kleinräumige Konvektivereignisse auf, die unter Umständen nicht aufgezeichnet werden. Trotz dieser Unsicherheiten wird die räumliche Verteilung der Niederschlagsstationen, im Vergleich zu anderen experimentellen Untersuchungen, als gut erachtet.

3 Die Untersuchungsgebiete

Die Gebiete Katzensteigbach, Zipfeldobelbach und Glasbach wurden in die Untersuchung aufgenommen, weil hier schon Forschungsarbeiten unternommen wurden und somit eine gewisse Datengrundlage vorhanden ist. Die Gebiete Selzenbächle und Engebächle wurden aufgrund ihrer verschiedenen Landnutzung ausgesucht. Aufgrund des Hochwasserrückhaltebeckens existieren am Selzenbächle auch einige Gebietsinformationen. Wenn das Augenmerk auf die Zeigerorganismen gerichtet wird, kann die Wassergualität grundsätzlich als gut bezeichnet werden. Es wurden während der Messkampagne in allen fünf Bächen ständig Invertebraten, wie Köcherfliegenlarven (trichoptera), Bachflohkrebse (gammarus), Planarien (dugesia gonocephala) und Steinfliegen (plecopteren) gefunden. Im Glasbach wurde zusätzlich die Flussnapfschnecke (ancyclus fluvialis) beobachtet und im Selzenbächle wie auch im Engebächle konnte der deutsche Flusskrebs (astacus astacus) gesichtet werden. Biologisch zählen die Gneisbäche infolge ihrer hohen hydromorphologischen Stabilität und ihrer geringen Sanddrift in Verbindung mit ihrem ausgeprägten Reichtum an morphologischen Strukturen (hohe Substrat-Diversität) zu den in Bezug auf das Makrozoobenthos artenreichsten Bächen des Landes (BRAUKMANN 1998).

	EZG Größe [km ²]	Waldanteil [%]	Wiesenanteil [%]
Katzensteigbach	1,37	74,90	25,10
Zipfeldobelbach	1,17	100,00	0,00
Glasbach	1,40	100,00	0,00
Selzenbächle	1,99	24,67	75,33
Engebächle	1,72	88,68	11,33

	~ 4				
labelle	3-1:	Landnutzung	der	Untersuchung	sgebiete.

3.1 Katzensteigbach

Das Versuchsgebiet befindet sich rund 20 km nordöstlich von Freiburg i. Br. und liegt zwischen Feldberg (1493 m ü. NN) und dem Schauinsland (1284 m ü. NN) im westlichen Bereich des Hochschwarzwaldes. Durch die glaziale Überprägung des Gebietes in der Würmeiszeit finden sich dort einige der am besten erhaltenen Kare des Schwarzwaldes. So auch das Katzensteigkar, das dem untersuchten Gerinne seinen Namen verleiht. Das Einzugsgebiet des Katzensteigbaches umfasst mit einer Fläche von 1,37 km² den gesamten Karbereich und reicht hinunter bis auf eine Höhe von 770 m ü. NN. Die Karwände und die oberen Talflanken werden hauptsächlich aus Diatxiten und Orthogneisen gebildet, die im Bereich der südwestlichen Karwand von einem einzelnen Blei-Erzgang

durchzogen werden (GEYER & GWINNER 1991). Außer den kristallinen Gesteinen dominieren quartäre Füllungen das geologische Bild. Der Kargrund besteht aus holozänen Verfüllungen, die am Karausgang von einer würmeiszeitlichen Endmoräne umgrenzt werden. Die Talfüllungen des Katzensteigabfalls ins St. Wilhelmer Tal werden von Moränenmaterial aus der Würmeiszeit gebildet (GEOLOGISCHE KARTE VON FREIBURG UND UMGEBUNG 1981).

Die Bodenbildung auf den Hang- und Kuppenflächen führte zu Böden des Braunerdetypus, wobei die Varietäten der Moder- und Humusbraunerde dominieren (GÄßLER 1995). Die Erosionslagen der Karwände sind mit flachgründigen Syrosemen und Rankern bedeckt, während sich in den Muldenlagen Stagnogleye entwickelten. Die sandigen Lagen der Endmoränen führen vereinzelt zu Podsolen (HÄDRICH ET AL. 1980). Die anzutreffenden Bodentypen besitzen eine mittlere bis große Wasserspeicherfähigkeit (100-200 I/m³) und aufgrund des hohen Grobporenanteils, sehr hohe Infiltrationsraten (STAHR 1979).

Das Klima des Untersuchungsraumes ist ein typisches Mittelgebirgsklima der gemäßigten Breiten. Das lokale Klima, insbesondere das Klimaelement Niederschlag, ist bestimmt durch die Geländeform und Höhenlage. Die dominierenden Winde aus westlicher Richtung bringen advektiv feuchte Luftmassen heran, die beim Aufsteigen abregnen (TRENKLE 1989). Der mittlere langjährige Jahresniederschlag im Katzensteigeinzugsgebiet kann mit 1800 mm angenommen werden. Die Niederschlagsverteilung über das Jahr weist ein Maximum durch konvektive Gewitterereignisse im Juli und August auf und ein zweites Maximum im Januar, welches sich vorwiegend aus festem Niederschlag zusammensetzt (AL BAHRANI 1977).

Der Karboden des Katzensteigkars sowie vereinzelte Flächen unterhalb der Karschwelle sind waldfrei und werden hauptsächlich für die Viehweidewirtschaft genutzt, wohingegen die Karwände, bestanden mit lichtem Mischwald, und die oberen Talflanken des Steilabfalls ins St. Wilhelmer Tal forstwirtschaftlich genutzt werden (Nadelwald). Obwohl im Forstgesetz von 1833 die Waldweide verboten musste während der Erstellung eines Temperaturwurde, und Leitfähigkeitslängsprofiles festgestellt werden, das Selbiges noch praktiziert wird. Der Anteil der Waldnutzung beträgt etwa 75 % der Fläche. Die Besiedelung des Gebietes ist sehr dünn, es befinden sich nur vereinzelte Gehöfte bzw. Wohnhäuser im Einzugsgebiet.

Der Katzensteigbach wird von Quellen an den Rändern der Karwände gespeist, diese leiten das Wasser durch die Karmulde, dort kommt es zu einzelnen Vernässungen. Die Quellen haben eine konstante Schüttung und werden aus einem hochliegenden Kluftgrundwasserleiter gespeist, der auf eine durch die anstehenden Gneise und Diatexite verlaufende Stör- und Schwächezone zurückzuführen ist (GÄßLER 1995). Geochemische Untersuchungen der Quellen weisen zusätzlich auf oberflächennahe Komponenten hin. Aufgrund von Auswertungen von ¹⁸O-Daten (siehe SCHWEGLER 1995) liegt das Tributärgebiet der Quellen durchschnittlich auf etwa 1150 m ü. NN. Inwieweit Grundwasservorkommen in den Schuttdecken der tieferen Lagen vorhanden sind, lassen sich laut GÄßLER (1995) nur Vermutungen anstellen. Die hohe Reliefenergie in Verbindung mit der wahrscheinlich guten Wasserwegsamkeit innerhalb des Hangschuttes lassen vermutlich nur in den Muldenlagen Grundwasseransammlungen zu. Gleichzeitig könnte das reiche Niederschlagsdargebot für eine ständige Wiederauffüllung sorgen. In Anbetracht der morphologischen Gegebenheiten könnten sich größere Ansammlungen von Grundwasser in der ehemals vom Gletscher übertieften Karmulde befinden.

Mit einer Grundleitfähigkeit des Abflusses von rund 65 bis 85 μ S/cm kann das Oberflächengewässer als sehr gering mineralisiert bezeichnet werden. Wie eine Profilmessung der el. Leitfähigkeit während einer Trockenwettersituation vom 21.07.04 ergab, findet keine wesentliche Zu- oder Abnahme der spezifischen Leitfähigkeit auf dem Weg vom Zusammenfluss der Quellen bis zur Messstelle statt. Der maximale Unterschied der Leitfähigkeit betrug 5 μ S/cm, was im Wesentlichen den Messergebnissen von GÄßLER (1995) entspricht und im Rahmen der Messgenauigkeit liegt. Bedeutende Reaktionen mit dem Gerinnebett können daher ausgeschlossen werden.

3.2 Zipfeldobelbach

Das Untersuchungsgebiet des Zipfeldobelbaches liegt ca. 10 km östlich von Freiburg Bereich kristallinen Grundgebirges südlichen im des im Hochschwarzwald. Das Gebiet des Zipfeldobelbaches sowie auch das des Katzensteigbaches sind Teilgebiete des Bruggaeinzugsgebietes (siehe Abbildung 3-1). Wie der Name Dobel sagt handelt es sich hier um ein enges eingeschnittenes Tal. Aus der geologischen Karte ist zu entnehmen, dass das Einzugsgebiet einheitlich aus Diatexiten besteht. aesamte Mit einer Einzugsgebietsgröße von 1,17 km² gehört auch dieser Untersuchungsraum in den mikroskaligen Bereich.



Abbildung 3-1: Einzugsgebiete des Zipfeldobelbaches und des Katzensteigbaches als Teileinzugsgebiete der Brugga.

Die Bodenbildungstypen und das Klima werden ausführlich am Beispiel des Katzensteigeinzugsgebietes beschrieben, sie treffen im Wesentlichen auch auf das Gebiet des Zipfeldobelbaches zu.

Die gesamte Fläche des Untersuchungsraumes ist bewaldet, wobei der untere Teil durch Mischwald repräsentiert wird, der mit zunehmender Höhe in Nadelwald übergeht.

Der Zipfeldobelbach wird von verschiedenen Quellen gebildet, von denen vier Quellen gefasst sind. Von den vier Quellen wird eine konstante Menge zur Wasserversorgung nach Oberried geleitet (WASSERMEISTER OBERRIED 2004).

Der Abfluss wies eine spezifische Leitfähigkeit von 70 bis 90 μ S/cm, in der Zeit von April bis September 2004 auf, weswegen auch hier das Oberflächengewässer als sehr gering mineralisiert bezeichnet werden kann.

3.3 Glasbach

Das Einzugsgebiet des Glasbachs liegt an der Westflanke des Rosskopfs (737 m ü. NN) im Nordosten von Freiburg und reicht bis in den Stadtteil Herdern (Vergleiche Abbildung 3-2). In dieser Studie wurde nur der obere Teil des Einzugsgebietes betrachtet. Somit wird der direkte städtische Einfluss nicht weiter in die Betrachtung miteinbezogen. Die Messstelle befindet sich auf 310 m ü. NN. Das Untersuchungsgebiet des Glasbachs umfasst eine Fläche von 1,4 km² und liegt im kristallinen Grundgebirge, das hier vorwiegend aus Paragneis mit einzelnen Amphiboliteinlagerungen besteht (GEOLOGISCHE KARTE VON FREIBURG UND UMGEBUNG 1996).

Klimatisch gesehen ist das Einzugsgebiet des Glasbaches zweigeteilt. Im oberen Teil liegen die mittleren langjährigen Niederschläge aufgrund des orographischen Einflusses zwischen 1000 und 1250 mm (MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG; LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (Hersg.) 2001). Im Stadtgebiet fallen im Jahresmittel 956 mm Niederschlag und die mittlere Lufttemperatur beträgt 10,8 °C (Messperiode 1961-1990, www.klimadiagramme.de 2004).

Der Bach verläuft in einem steilen Kerbtal, das vollständig bewaldet ist, wobei sich Verbauungen im Wesentlichen auf diejenigen Bereiche beschränkt, an denen der Bach Waldwege kreuzt. Aus dem vorherrschenden Gestein entwickelten sich vorwiegend lehmige bis sandig lehmige Böden (EGGER 2003).

Im naturbelassenen Einzugsgebiet des Glasbaches ist die Abflussreaktion auf Niederschlagsereignisse verzögert und gedämpft aufgrund der Speichereigenschaften des Einzugsgebietes. Die Interzeption kann Ereignisse von mehreren Millimetern abfangen (GUWANG 2004).



Abbildung 3-2: Ländliches Einzugsgebiet des Glasbachs bei Eintritt in das Stadtgebiet (nach: LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1987)

Die relativ hohen gemessenen spezifischen Leitfähigkeiten, zwischen 150 und 350 μ S/cm, sind in Anbetracht des kristallinen Grundgebirges erstaunlich. Wie schon bei GuWANG (2004) werden auch innerhalb dieser Studie einige Wasserproben chemisch analysiert. Die hohe Leitfähigkeit kann durch den großen Anteil der jeweils zweiwertigen Ionen Calcium und Sulfat erklärt werden. Die erhöhte Calciumkonzentrationen könnten auf die fortgeschrittene Verwitterung der biotitreichen Paragneise zurückzuführen sein, während die erhöhte Sulfatkonzentration anthropogenen Ursprungs sein könnte (atmosphärische Schwefeldeposition aus dem Zeitalter der Industrialisierung) (GUWANG 2004).

3.4 Selzenbächle

Das Einzugsgebiet des Selzenbächles befindet sich ca. 5 km südlich von Freiburg. Mit einer Größe von 1,99 km² stellt es das größte Untersuchungsgebiet dar. Der höchste Punkt des Untersuchungsraumes beträgt ca. 900 m ü. NN. Die Gebiete Selzenbächle und Engebächle befinden sich zwischen Horben und Wittnau (siehe Abbildung 3-3). Die vier Gemeinden Merzhausen, Au, Sölden und Wittnau liegen hintereinander aufgereiht in einem von Nord nach Süd bis ca. 400 m ü. NN allmählich ansteigenden Tal der Vorbergzone, während die Gemeinde Horben sich hiervon topographisch deutlich abhebt. Sie liegt östlich des erwähnten Talverlaufes auf einem Plateau zwischen dem "Illenberg" (642 m ü. NN) und der "Eduardshöhe" (859 m ü. NN) im Schauinslandgebiet und ist damit die höchstgelegenste Gemeinde der Verwaltungsgemeinschaft Hexental (www. verwaltungsgemeinschaft-hexental.de). Ebenso wie die oben besprochenen Untersuchungsgebiete liegt das des Selzenbächles im kristallinen Grundgebirge. Repräsentiert wird selbiges durch Metatexite mit Graniteinlagerungen. Lediglich im Quellgebiet herrschen Diatexite vor.

Der Hauptbodentypus in diesem Bereich stellt die Braunerde dar, die stellenweise podsolig ist und aus sandigen lehmigen Schuttdecken hervorgeht. Diese Böden sind gekennzeichnet durch gute Wasserdurchlässigkeit, im stark geneigten Gelände mit vorherrschend vertikaler Sickerwasserbewegung und lateralem Wasserabzug im Untergrund (MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG; LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.) 2001).



Abbildung 3-3: Links: Einzugsgebiet des Engebächle; rechts: Einszugsgebiet des Selzenbächle; grün: der jeweilige Waldanteil.

Die Jahresmitteltemperatur liegt in der Vorbergzone zwischen 9,0 - 9,5 °C, die Niederschlagsmengen erreichen Jahresmittelwerte zwischen 900 und 950 mm, in den Höhenlagen bis 1200 mm (<u>www.verwaltungsgemeinschaft-hexental.de</u>).

Die Landnutzung beschränkt sich im Wesentlichen auf Mischwald, ca. 25 %, und Weide mit extensiver Viehbewirtschaftung (Ziegen und Kühe), ca. 75 %.

Der Abfluss zeigte während der Messkampagne eine spezifische Leitfähigkeit von 140 bis 180 µS/cm und somit ist auch dieser Bach zu den gering mineralisierten Oberflächengewässern zu zählen.

3.5 Engebächle

Das Einzugsgebiet des Engebächle umfasst eine Größe von 1,72 km² und eine maximale Höhe von ca. 850 m ü. NN. Aus der GEOLOGISCHEN KARTE (1996) ist zu entnehmen, dass sich das Untersuchungsgebiet ebenfalls im kristallinen Grundgebirge befindet, wobei es grob in drei Regionen unterteilt werden kann. Im Quellgebiet herrschen Diatexite mit einer einzelnen Amphibioliteinlagerung vor, während im mittleren Teil des Einzugsgebietes Metatxite mit Graniteinlagerungen anzutreffen sind. Der untere Teil wird durch Para- und Orthogneise mit einzelnen Graniteinlagerungen geprägt.

Aus dem WABOA (2004) ist zu entnehmen, dass die Hauptbodenart der des Einzugsgebietes des Selzenbächles entspricht. Lediglich am Auslass des Gebietes finden sich Parabraunerde und Braunerde aus lößlehmhaltigen Deckschichten über kristallinem Grund. Letzterer Bodentyp ist gekennzeichnet durch wasserdurchlässige Böden. Im geneigten Gelände mit wechselndem, von Hangneigung, Nutzung und Klima abhängigem Oberflächenabfluss.

Näheres zu vorherrschendem Klima und Lage siehe Selzenbächle.

Im Gegensatz zum Untersuchungsgebiet des Selzenbächle besteht die Landnutzung im Engebächle Gebiet zu knapp 89 % aus Mischwald und lediglich zu ca. 11 % aus Weide. Der Untersuchungsraum des Engebächles ist sehr langgezogen, während der des Selzenbächles eher rundlichen Charakter aufweist.

Die spezifische Leitfähigkeit schwankte hier zwischen 130 und 240 µS/cm, was mit der Leitfähigkeit des Glasbaches vergleichbar ist. Auch die Wasserbeschaffenheit ist der des Glasbaches ähnlich; so weist das Wasser des Engebächles die zweithöchsten Konzentrationen an den zweiwertigen Ionen Calcium und Sulfat auf, womit auch hier die höhere Leitfähigkeit begründet sein könnte.

3.6 Fazit

Die fünf Untersuchungsgebiete weisen alle eine ähnliche Geologie, Größe, biologische Artenzusammensetzung der Invertebraten und klimatische Eigenschaften auf. Hinsichtlich ihrer Landnutzung unterscheiden sich die Gebiete deutlich, von maximal 100 % bis minimal ca. 25 % Waldanteil. Das Katzensteiggebiet stellt den niederschlagsreichsten Untersuchungsraum dar, was auch damit übereinstimmt, dass der Bach den höchsten Basisabfluss aufweist. Näheres zum Abflussverhalten der einzelnen Gebiete siehe Kapitel 6. Auffällig ist, dass die Einzugsgebiete mit der durchschnittlich höchsten spezifischen Leitfähigkeit beide Amphiboliteinlagerungen aufweisen, womit die höheren Leitfähigkeiten möglicherweise auch über dessen Verwitterungsprodukte erklärbar sind.

Formel 3-1: Chemische Zusammensetzung von Amphibolit.

	$A = Na^+, K^+$
A ₀₋₁ X ₂ Y ₅ [(OH, F) ₂ /Z ₈ O ₂₂]	X = Ca ²⁺ , Na ⁺ , Mg ²⁺ , Fe ²⁺ ,
	Mn ²⁺
	$Y = Mg^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Al^{3+},$
	Fe ³⁺ , Ti ⁴⁺
	$Z = Si^{3+}, Al^{3+}$

Auch hier lässt sich keine Erklärung für die erhöhte Sulfatkonzentration finden lässt. Die anthropogene Beeinflussung (siehe Glasbach) könnte eine mögliche Erklärung sein.

4 Ergebnisse der Stichtagsbeprobung

Zur allgemeinen Charakterisierung der Hydrochemie werden Wasserproben entnommen und im Labor untersucht. In der Regel werden die anorganischen Hauptbestandteile der Bachproben analysiert. Dies sind die Kationen Natrium, Kalium, Magnesium, Calcium und die Anionen Chlorid, Nitrat und Sulfat. Da sich alle fünf Untersuchungsräume auf kristallinem Grund befinden, erschien eine Silikatbestimmung sinnvoll.



Abbildung 4-1: Kationen der Wasserproben der verschiedenen Bäche.

Werden die Ionenkonzentrationen mit den Grundleitfähigkeiten verglichen; so ist festzustellen, dass die am geringsten mineralisierten Bäche (Katzensteigbach und Zipfeldobelbach) auch die geringsten Ionenkonzentrationen aufweisen. Ausnahme bildet das Chlorid, dort weist das Engebächle die geringsten und das Selzenbächle die höchsten Konzentrationen auf. Wie aus Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 ersichtlich sind die Konzentrationen der einzelnen Ionen während der gesamten Messperiode relativ konstant.



Abbildung 4-2: Anionen der Wasserproben der verschiedenen Bäche.

Eine Ausnahme bildet die Calciumkonzentration am Engebächle und Glasbach. Diese unterliegt Schwankungen von bis zu 6,17 mg/l am Glasbach und bis zu 7,37 mg/l am Engebächle. Zusätzlich zur Calcium- schwankt auch die Sulfatkonzentration bei den Proben des Glasbaches von 21,82 mg/l bis 29,58 mg/l. Dennoch befinden sich alle Analyseergebnisse weit entfernt von den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung.

4.1 Zusammenhang zwischen Hydrochemie und Abfluss

Werden die Ionenkonzentrationen gegen den Abfluss aufgetragen, so ist zu erwarten das die geogenen Inhaltsstoffe mit zunehmendem Abfluss abnehmen, da vermehrt Ereigniswasser zum Abfluss kommt, welches eine kürzere Verweilzeit im System hat als Vorereigniswasser. In Abbildung 4-3 bis Abbildung 4-9 sind die Korrelationen der verschiedenen Ionen mit dem Abfluss für die einzelnen Bäche dargestellt. Zusätzlich geht aus diesen Graphiken hervor, dass bei allen untersuchten Bächen Kalium in den niedrigsten und Calcium in den höchsten Konzentrationen vorliegt.



Abbildung 4-3: Korrelation zwischen den lonenkonzentrationen und dem Abfluss am Glasbach.

Werden die Abflüsse, die am Tag der Probenahme gemessen wurden, gegen die Ionenkonzentrationen aufgetragen, so besteht kein Zusammenhang zwischen Abfluss und der jeweiligen Konzentration der Ionen. Es sind relativ geringe Schwankungen bei Kalium und Chlorid zu beobachten, wohingegen die Calciumund Sulfatwerte im Vergleich dazu großen Schwankungen unterworfen sind.



Abbildung 4-4: Niederschlag, Leitfähigkeit, Abfluss und Sulfat-, Natrium-, Magnesium- und Calciumkonzentrationen der gesamten Messperiode 2004 am Glasbach.

Die oben beschriebenen Schwankungen am Glasbach lassen sich, wie in Abbildung 4-4 dargestellt, mit den Schwankungen des Abflusses erklären. So führen nur länger anhaltende Niederschläge zu einer Abflussreaktion über 60 l/s und zu einer sichtbaren Verdünnung der Sulfat- und Calciumkonzentration. Bei den Magnesium und Natriumkonzentrationen ist das gleiche Muster in abgeschwächter Form zu erkennen.



Abbildung 4-5: Korrelation zwischen den lonenkonzentrationen und dem Abfluss am Katzensteigbach.

Deutlich zu sehen ist in Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6 die geringe Mineralisation der höchstgelegenen Bäche. Beim Katzensteigbach ist keine Systematik der Konzentrationsänderung der Ionen mit dem Abfluss zu erkennen. Die geringsten Schwankungen zeigen Kalium und Magnesium. Den größten Zusammenhang zeigt hier Chlorid mit $r^2 = 0,36$.



Abbildung 4-6: Korrelation zwischen den lonenkonzentrationen und dem Abfluss am Zipfeldobelbach.

Katzensteigbach

Am Zipfeldobelbach zeigt sich schon eine etwas größere Dynamik. Hier ergeben sich mittlere Zusammenhänge bei Nitrat mit $r^2 = 0,46$, Sulfat mit $r^2 = 0,56$, Magnesium mit $r^2 = 0,46$ und Calcium mit $r^2 = 0,40$. Ebenso wie bei den oben besprochenen Bächen ist die Kaliumkonzentration am geringsten und die des Calciums am höchsten.



Abbildung 4-7: Korrelation zwischen den Ionenkonzentrationen und dem Abfluss am Engebächle.

Beim Engebächle ist nur bei Natrium mit $r^2 = 0,44$ ein mittlerer Zusammenhang gegeben, alle anderen Ionen zeigen einen schwachen bis gar keinen Zusammenhang mit dem Abfluss, der am jeweiligen Probeentnahmetag vorlag. Die Ionenkonzentrationen entsprechen denen des Glasbaches mit Ausnahme des Sulfates.



Abbildung 4-8: Niederschlag, Leitfähigkeit, Abfluss und Sulfat-, Natrium-, Magnesium- und Calciumkonzentrationen der gesamten Messperiode 2004 am Engebächle.

Werden, wie in Abbildung 4-8 dargestellt, die Konzentrationen der natürlichen Tracer im gesamt Verlauf der Messkampagne betrachtet, ist festzustellen, dass auch hier nur lang anhaltende Niederschläge zu einer Verdünnung der Calciumund Sulfatkonzentration führen. Am 07.07.2004 ist am Engebächle eine Besonderheit zu beobachten. So sind die Kaliumwerte 6,84-fach, die Chloridwerte 1,42-fach und die Nitratwerte 3,13-fach erhöht wie an den anderen Messtagen. Im Feldtagebuch wurde an diesem Tag "extremer Güllegeruch" am Gewässer notiert.



Abbildung 4-9: Korrelation zwischen den Ionenkonzentrationen und dem Abfluss am Selzenbächle.

Werden die Ionenkonzentrationen des Selzenbächles betrachtet, so ist festzustellen, dass sie sich zwischen Katzensteigbach, Zipfeldobelbach und Glasbach, Engebächle befinden. Dies entspricht den Leitfähigkeitsmessungen. Das Selzenbächle zeigt einen mittleren Zusammenhang für Natrium mit $r^2 = 0,61$, Magnesium mit $r^2 = 0,51$ und Calcium mit $r^2 = 0,57$. Die Nitrat- und Chloridwerte liegen hier ca. doppelt so hoch wie bei den anderen Einzugsgebieten. Zusätzlich sind hier die höchsten Kaliumkonzentrationen zu verzeichnen. In Abbildung 4-10 sind die Ionenkonzentrationen von Nitrat, Chlorid, Sulfat und Calcium in ihrem Verlauf mit den kontinuierlich erhobenen Parametern der gesamten Messperiode dargestellt. Erhöhte Nitrat- und Chloridwerte sind nach lang anhaltenden Niederschlägen zu verzeichnen.



Abbildung 4-10: Niederschlag, Leitfähigkeit, Abfluss und Sulfat-, Chlorid-, Nitrat- und Calciumkonzentrationen der gesamten Messperiode 2004 am Selzenbächle.

4.2 Fazit und Diskussion

Tabelle 4-1 veranschaulicht die erhaltenen Bestimmtheitsmaße der Korrelationen der verschiedenen Ionenkonzentrationen mit dem Abfluss. Es ist keine Systematik für eine Ionenart zu erkennen. Im Großen und Ganzen spiegelt die Tabelle eine recht geringe Abhängigkeit der gemessenen Ionen vom Abfluss wieder.

	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Silikat	Natrium	Kalium	Magnesium	Calcium
Glasbach	0,03	0,11	0,03	0,06	0,16	0,02	0,10	0,04
Katzensteigbach	0,36	0,10	0,03	0,21	0,41	0,03	0,03	0,00
Zipfeldobelbach	0,11	0,46	0,56	0,01	0,27	0,02	0,46	0,40
Engebächle	0,10	0,00	0,02	0,11	0,44	0,01	0,05	0,08
Selzenbächle	0,01	0,13	0,01	0,06	0,61	0,05	0,51	0,57

Tabelle 4-1: Bestimmtheitsmaße der Abfluss-Ionenkonzentrations-Korrelationen.

Der größte Zusammenhang zeigt sich beim Selzenbächle für Natrium mit r² = 0,61 und für Calcium mit $r^2 = 0.57$ und beim Zipfeldobelbach für Sulfat mit $r^2 = 0.56$. Was allen Bächen gemeinsam ist, ist der geringe Zusammenhang zwischen Abfluss und Kaliumkonzentration. Verwunderlich scheint die geringe Abhängigkeit der Silikatkonzentration vom Abfluss. Dabei ist zu bemerken, dass dies keine hochaufgelöste Ereignisbeprobung ist, sondern Proben an den Auslesetagen entnommen wurden, ungeachtet dessen, ob ein Ereignis statt fand oder nicht. So können die Wasserproben, die bei höherem Abfluss genommen wurden, aus erhöhtem Basisabfluss bestehen, was die Konstanz der Silikatkonzentration erklären würde. Werden die Abbildung 4-4 und die Abbildung 4-8 betrachtet, so ist festzustellen, dass die Ionen Sulfat, Natrium, Magnesium und Calcium eine systematische Schwankung mit dem Abfluss aufweisen. Dies konnte bei den anderen Bächen nicht festgestellt werden. Die Einzugsgebiete mit gleicher Höhenlage weisen somit ein charakteristisches Verhalten auf. So ist aus den Daten zu entnehmen, dass der Glasbach (100 % bewaldet) und das Engebächle (88,68 % bewaldet) eine einheitliche Reaktion im oben genannten Ionenverhalten aufweisen. Im Gegensatz dazu zeigt das Selzenbächle (24,67 % bewaldet) bei diesen Ionen keine Reaktion. Dies könnte durch den höheren Waldanteil begründet sein. So könnte argumentiert werden, dass zu niederschlagsfreien Zeiten und nach kleineren Ereignissen in den stark bewaldeten Gebieten überwiegend tieferes Grundwasser zum Abfluss kommt. Erst nach lang anhaltenden Niederschlägen sind zusätzliche Abflussprozesse beteiligt, die die in Abbildung 4-4 und Abbildung 4-8 dargestellten geogenen Tracerkonzentrationen verdünnen. Dieser Effekt zeigt sich stärker beim ganz bewaldeten Glasbach. Am Selzenbächle ist festzustellen, dass die Chlorid- und Nitratkonzentrationen nach Ereignissen bzw. mit dem Ereignispeak (dritte Ionenprobe von rechts in Abbildung 4-10) ansteigen. Dies könnte auf Oberflächenabfluss von den extensiv genutzten Hängen deuten. Dass die Konzentrationsunterschiede beim Calcium und Sulfat und bei den Bächen Engebächle Selzenbächle in unterschiedlichen Deckschichten oder in Lösseinwehungen begründet ist, erscheint angesichts der Tatsache, beide Einzugsgebiete direkt nebeneinander dass liegen, unwahrscheinlich.

Allerdings könnten die Waldgebiete aufgrund von Kalkungsmaßnahmen eine erhöhte Calcium- und Magnesiumkonzentration des Bachwassers aufweisen (FEGER ET AL. 2000), was aber laut FORSTAMT FREIBURG (2004) in diesen Gebieten zum gegebenen Zeitpunkt nicht der Fall war.

Zwischen der Temperatur und den Ionenkonzentrationen bestehen nur schwache bis mittlere Zusammenhänge (siehe Tabelle 4-2). Hier zeigt sich eine größere Ähnlichkeit der beiden höher gelegenen Einzugsgebiete als zwischen den

Zipfeldobelbach

Engebächle

Selzenbächle

0,01

0,84

0,33

0,13

0,33

0,02

anderen. So hat die unterschiedliche Landnutzung einen geringeren Effekt als die ähnliche Lage der Einzugsgebiete.

	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Silikat	Natrium	Kalium	Magnesium	Calcium
Glasbach	0,01	0,14	0,01	0,05	0,01	0,34	0,01	0,04
Katzensteigbach	0,26	0,32	0,38	0,06	0,06	0,46	0,05	0,01
Zipfeldobelbach	0,47	0,58	0,49	0,07	0,16	0,09	0,02	0,01
Engebächle	0,17	0,12	0,01	0,06	0,01	0,08	0,02	0,01
Selzenbächle	0,28	0,01	0,03	0,04	0,13	0,53	0,19	0,22

Tabelle 4-3 zeigt die Bestimmtheitsmaße der Leitfähigkeit-Ionenkonzentrationen. Durch die Tabelle wird deutlich, dass Calcium in allen Bächen die leitfähigkeitsbestimmende Größe ist. Beim Glasbach, Enge- und Selzenbächle gehört Magnesium ebenfalls dazu. So ist festzuhalten, dass die Leitfähigkeit in Zusammenhang mit den Härtebildnern Calcium und Magnesium als geeignete geogene Tracer zur Untersuchung der Abflussbildung erachtet werden kann. Vorrausetzung für dieses Verhalten ist nach WETZEL (2003) eine einheitliche auch Geologie der Gebiete. So zeigt sich hier. dass die fünf Untersuchungsgebiete in zwei Klassen aufgeteilt werden können: in die höher gelegenen Untersuchungsräume Katzensteigbach und Zipfeldobel und in die tiefer gelegenen Engebächle, Selzenbächle und Glasbach.

				U				
	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Silikat	Natrium	Kalium	Magnesium	Calcium
Glasbach	0,85	0,34	0,66	0,15	0,86	0,05	0,93	0,94
Katzensteigbach	0,11	0,00	0,03	0,02	0,19	0,04	0,03	0,37

0,01

0,23

0,43

0,01

0,24

0,73

0,03

0,51

0,28

0,18

0,83

0,65

0,43

0,53

0,83

Tabelle 4-3: Best	immtheits	smaße d	er Leitfäl	nigkeit-lo	onenkonze	ntrations	-Korrelatione	n.
	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Silikat	Natrium	Kalium	Magnesium	Cal

0,12

0,13

0.04

Zusätzlich ist festzustellen, dass sowohl am Glasbach wie auch am Engebächle die Chloridkonzentration maßgeblich die Leitfähigkeit beeinflusst. Selbiges gilt für Glasbach und Selzenbächle im Falle des Natriums.

Das Untersuchungsgebiet des Selzenbächle scheint, nach den während der Gebietsarbeit gewonnen Beobachtungen, das anthropogen ausgeprägteste Gebiet zu sein. Dies spiegelt sich in den höheren Nitrat-, Chlorid- und Kaliumwerten im Vergleich zu den anderen Gebieten wieder. Auf den Hängen des Selzenbächles findet extensive Ziegen- und Kuhweidehaltung statt. Die Weiden enden zum Teil direkt am Bach bzw. gehen über diesen. Dies kann die höheren Werte erklären.

Soll die Erhöhung der Nitrat-, Kalium- und Chloridwerte am 7.7.04 am Egebächle näher betrachtet werden, so ist es notwendig das Abflussgeschehen mit einzubeziehen.



Abbildung 4-11: Ereignis am Engebächle.

Aus Abbildung 4-11 ist ersichtlich, dass vor der Probenahme ein längeres Niederschlagsereignis lag. So könnte diese Konzentrationserhöhung durchaus auf Abschwemmungen von der extensiven Viehweide zurückzuführen sein, welche sich ca. 300 m oberhalb des Pegels befindet. Allerdings ist zu vermerken, dass der Leitfähigkeitsanstieg erst auftrat, nachdem der Abfluss schon fast wieder Vorereignisniveau erreicht hatte. Somit ist nicht auszuschließen, dass die Gewässerbelastung nicht mit dem Niederschlagsereignis in Verbindung steht. Da am Tag der Probenahme ein starker "Güllegeruch" am Bach festgestellt wurde, ist von einer anthropogenen Belastung auszugehen. Dies deckt sich mit den Messergebnissen, so findet nach WENNINGER (2002) ein starker Kaliumeintrag durch Gülle statt. Zusätzlich ist Gülle sehr reich an Ammonium, welches in Gewässern mit genügend hohem Sauerstoffgehalt in Nitrat mineralisiert wird. Ebenso untermauern die erhöhten Chloridwerte die These einer anthropogenen Beeinflussung. Die Leitfähigkeit ändert sich sprunghaft um ca. 100 µS/cm und



Abbildung 4-12: Chlorid, Sulfat und Nitratkonzentration in Abhängigkeit des Waldanteils.

Aus Abbildung 4-12 ist ersichtlich, dass der Waldanteil keine eindeutige Dämpfung der Sulfatkonzentration bewirkt. Werden die Punktescharen vom Katzensteigbach und Zipfeldobelbach, deutlich zu erkennen an den niedrigsten Konzentrationen, aus der Betrachtung ausgeschlossen, wird auch hier deutlich, dass die Sulfatkonzentration mit dem Waldanteil steigt. Die Chloridkonzentration ist in den stärker bewaldeten Einzugsgebieten durchweg geringer, selbes gilt für die Nitratkonzentration (Ausnahme: die anthropogene Belastung am 07.07.04 am Engebächle). Dies kann auch darauf zurückgeführt werden kann, dass am Selzenbächle, dem Gebiet mit nur ca. 25 % Waldanteil, die intensivste Nutzung stattfindet.



Abbildung 4-13: Calcium-, Magnesium- und Natriumkonzentrationen in Abhängigkeit des Waldanteils.

Aus Abbildung 4-13 geht hervor, dass der Waldanteil keinen Einfluss auf die Natrium und Magnesiumkonzentration zu haben scheint, selbst wenn die zwei Punktescharen mit den niedrigsten Konzentrationen außer Acht gelassen werden. Beim Calcium zeigt sich die oben beschriebene Abhängigkeit zwischen Waldanteil und Calciumgehalt bei den höher mineralisierten Bächen deutlich.

Durch die Ergebnisse der Stichtagsbeprobung können die fünf Untersuchungsgebiete in zwei Cluster eingeteilt werden. In das höher gelegene mit den Bächen Katzensteigbach und Zipfeldobelbach und in die tiefer gelegenen Gebiete Glasbach, Selzenbächle und Engebächle.

5 Temperatur- bzw. Leitfähigkeitslängsprofile

Flusslängsprofile werden gemessen, um weitere Informationen der Bachsysteme zu erhalten. Die Leitfähigkeit und die Temperatur bieten sich als einfach messbare Größen mit vergleichsweise großem Informationswert an. Als Voruntersuchung wurden an den Bächen Zipfeldobelbach, Katzensteigbach und Glasbach Längsprofile ohne definierten Abstand gemessen. Beim Katzensteigbach sowie am Zipfeldobelbach konnten keine interessanten Beobachtungen verzeichnet werden, weswegen sie aus einer weiteren Untersuchung ausgeschlossen wurden. Die Leitfähigkeit änderte sich hier nur unwesentlich im Verlauf des Profils. Hingegen wurden an den restlichen drei Bächen räumlich hochaufgelöste Längsprofile erstellt. Dabei wurde alle 20 m eine Messung vorgenommen. Die Messungen fanden beim Glasbach am 29.09.04 bei einem Abfluss von 2,29 l/s, beim Engebächle am 28.07.04, bei einem Abfluss von 5,51 l/s und am 29.09.04 bei einem Abfluss von 2,43 l/s statt. Das Selzenbächle wurde am 08.08.04, bei einem Abfluss von 17,85 l/s und ebenfalls am 29.09.04 bei einem Abfluss von 18,1 I/s beprobt. Die angegebenen Abflüsse sind Mittelwerte des Abflusses, die über die Dauer, die zur Erstellung des Längsprofiles notwendig war, ermittelt wurden.



5.1 Interpretation und Vergleich

Abbildung 5-1: Temperaturlängsprofile.

5.1.1 Glasbach

Das Profil des Glasbaches zeigt anfangs einen kontinuierlichen Anstieg der Temperatur auf, etwa nach 380 m sinkt die Temperatur um 0,5 °C, ohne dass ein weiterer Bachlauf dem Hauptgerinne zufließt. Da in diesem Teil des Baches mehrere Brunnen entlang des Gerinnes gesichtet werden, ist davon auszugehen, dass hier tieferes, kälteres und höher mineralisiertes Grundwasser zuströmt. Diese Theorie wird durch das Leitfähigkeitsprofil (siehe Abbildung 5-2) gestützt. 680 m nach der ersten Messung ist wieder ein Sprung in der Temperatur und der Leitfähigkeit zu beobachten. Auch hier kann davon ausgegangen werden, dass tieferes Grundwasser zufließt. Anschließend steigt die Temperatur weitgehend kontinuierlich an. Die Temperaturerhöhung bei 1200 m kommt durch die Umleitung des kompletten Glasbaches in den Krottenweiher zustande. Nur im Teich direkt ist eine Erhöhung der Temperatur um 0,5 °C zu verzeichnen. Zu bemerken ist, dass der Messtag kein Strahlungstag war, dies bedeutet, dass der Einfluss des Teiches auf die Temperatur bei Strahlungswetter um einiges höher liegen kann. Auch die drei aktiven Zuflüsse, die der Glasbach an diesem Tag aufwies, zeigten keinen großen Einfluss auf die Temperatur des Hauptgerinnes. Die Zuflüsse sind als "Ausreißer" gut anhand der Leitfähigkeitsprofile erkennbar. Bei der Leitfähigkeit zeigte der erste Zufluss mit einer um 19 µS/cm höheren Leitfähigkeit aufgrund seines geringen Abflusses ebenfalls keine Auswirkung. Hingegen erzeugte der Zufluss bei 1480 m mit seiner Leitfähigkeit von 136 µS/cm eine deutliche Erniedrigung der Leitfähigkeit des Glasbaches um 13 µS/cm. Erst nach Zufließen eines weiteren Zulaufes mit einer sehr viel höheren Leitfähigkeit (326 µS/cm) pendelte die Leitfähigkeit des Glasbaches sich wieder bei 245 µS/cm ein.

5.1.2 Engebächle

Am Engebächle wurden zwei Längsprofile erstellt, wobei das erste Längsprofil bachaufwärts das zweite bachabwärts abgelaufen wurde. Somit sind sie aufgrund der Tagesgangsystematik nicht ideal miteinander vergleichbar. Das Profil welches am 28.07.04 aufgenommen wurde, liegt durchschnittlich um 2 °C höher als jenes vom 29.09.04, was daran liegt, dass der 28.07.04 ein heißer Strahlungstag war und der Himmel am 29.09.04 vollständig bewölkt war und immer wieder etwas Regen einsetzte. Dennoch zeigen beide Kurven die ersten 1900 m ein ähnliches Temperaturverhalten. Anschließend wird das Verhalten in Temperatur und Leitfähigkeit durch die vorherrschenden anthropogenen Einflüsse geprägt. Der Bach wird durch einen See geleitet und an der Stöckenmühle sind die Eingriffe nicht genauer quantifizierbar. Allerdings sind deutliche Sprünge, besonders am 29.09.04, in der Leitfähigkeit ab diesem Teil des Baches sichtbar. Die fünf Zuflüsse zwischen 500 m und 1500 m erhöhen die Leitfähigkeit an beiden Tagen, was durch den Sprung in der Leitfähigkeit bei ca. 900 m deutlich sichtbar wird. Die Leitfähigkeit am 29.09.04 liegt um durchschnittlich ca. 15 µS/cm höher als am 28.07.04. Dies stimmt mit der Theorie überein, dass bei niedrigerem Abfluss, dieser hauptsächlich aus Basisabfluss, d.h. aus tieferem, höher mineralisiertem Grundwasser besteht. Einzelne Bereiche mit Grundwasserzuströmen zu lokalisieren, wie sie beim Glasbach aus dem Profil abgelesen werden können, ist hier nicht möglich. Die Temperaturerniedrigung nach 700 m (Beginn des Profils
vom 28.07.04) kommt durch den See (Grundablass), durch welchen der Bach an dieser Stelle fließt, zustande. Weiterhin ist der Sprung der Temperatur ab 1800 m interessant. Ab diesem Punkt verlaufen die beiden Profile gegenläufig. Am 28.07. steigt und am 29.09. sinkt die Temperatur in diesem Bereich.

5.1.3 Selzenbächle

Auch beim Selzenbächle wurden zwei Profile erarbeitet. Wie schon beim Engebächle, wurde an einem Strahlungstag (08.08.04) und an einem bewölkten Tag (29.09.04) gemessen. Die Temperatur liegt am zuerst aufgenommenen Profil um durchschnittlich 3 °C höher als am 29.09.04. Dies liegt am höheren Strahlungsinput. Die Ursache für das unterschiedliche Ansteigen der Temperatur der beiden Profile ab ca. 1250 m könnte durch Beschattungseffekte hervorgerufen werden. Da dieser Effekt am bewölkten 29.09.04 nicht in gleichem Ausmaß zu beobachten ist. Das anschließende Abfallen der Temperatur (ab 1500 m) kann durch Wasserzufluss aus tieferem Grundwasser begründet werden. Diese Annahme wird durch das Leitfähigkeitsprofil gestützt, welches ab 1500 m bei beiden Messtagen einen Sprung um mehr als 10 µS/cm aufweist. Da der Abfluss an beiden Tagen nahezu gleich war, ist auch das Leitfähigkeitsprofil nahezu identisch. Die ersten beiden Sprünge in der Leitfähigkeitsgrafik werden durch Zuflüsse mit höherer Leitfähigkeit hervorgerufen. Der dritte Sprung bei 400 m, von ca. 100 auf 120 µS/cm, kann auf die dort, direkt über den Bachbereich verlaufende Kuhweide, zurückzuführen sein. Es wurden Kuhfäkalien neben und direkt im Gewässer gesichtet.



Abbildung 5-2: Leitfähigkeitslängsprofile

5.2 Fazit und Diskussion

Die Leitfähigkeitsprofile können in soweit interpretiert werden, dass im oberen steilen Teil der Einzugsgebiete Selzenbächle und Engebächle noch kein oder weniger tiefes, höher mineralisiertes Grundwasser zuströmt und dieses erst im mittleren Teil dazu fließt. Daraus folgt, dass im mittleren Teil der Profilkurve auch jeweils die höchste Steigung herrscht. Wenn von der anthropogenen Störung beim Engebächle abgesehen wird, trifft diese Annahme bei den Gebieten im Hexental zu. Das Hauptgerinne des Glasbaches zeigt die größte Steigung am Anfang, wobei hier die Leitfähigkeit nach dem ersten deutlichen Sprung erst einmal wieder

sinkt und nach dem zweiten Sprung relativ konstant bleibt. Die Ursache könnte darin liegen, dass die Grundwasserzutritte eher lokaler Natur sind, wohingegen die Zutritte beim Engebächle und Selzenbächle diffus über eine längere Bachstrecke sein könnten. Bei niedrigem Abfluss wird dieser vorwiegend aus dem Basisabfluss gebildet, welcher durch längere Aufenthaltszeiten höher mineralisiert sein kann. Da unter anderem die Kontaktzeit zwischen dem Wasser und dem Gestein z.B. die Silikatkonzentration bestimmt, sind die höchsten Konzentrationen in tiefen Grundwasserkörpern zu erwarten, in denen das Wasser längere Zeit verweilt und viele Bruchstellen von silikatischen Mineralien vorhanden sind (WOLOCK & HORNBERGER 1989, PETERS ET AL. 1998). Diese Theorie stimmt mit den Messergebnissen des Engebächles überein. Die spezifische Leitfähigkeit ist an abflussarmen Tagen signifikant höher als an Tagen mit höherem Abfluss. Die Temperatur kann, falls überhaupt möglich, nur in Zusammenhang mit der Leitfähigkeit oder anderen Parametern eindeutig interpretiert werden. Da die Temperatur vielen Einflüssen unterliegt (siehe 2.1.2), ist eine eindeutige Interpretation schwierig, besonders durch die gegenseitige Überlagerung der verschiedenen Einflüsse. Zusätzlich ist zu vermerken, dass die Längsprofile am Engebächle das erste Mal bachaufwärts und dann bachabwärts abgelaufen wurden. So sind sie nicht ideal vergleichbar und diese Tatsache erschwert die Temperaturinterpretation.

Die beiden benachbarten Einzugsgebiete Engebächle und Selzenbächle zeigen eine unterschiedliche Temperaturentwicklung von der Quelle bis zum Pegel auf. Die Profile des 28.07.04 (Engebächle) und des 08.08.04 (Selzenbächle) können nicht miteinander verglichen werden, da die durchschnittliche Lufttemperatur am 28.07.04 24,6 °C betrug und am 08.08.04 27,1 °C. Werden die Profile des 29.09.04 betrachtet, so ist festzustellen, dass die Quelltemperaturen der beiden Bäche sich entsprechen. Anschließend steigt die Temperatur des Selzenbächles schneller an als die des Engebächles (nur bis ca. 2200 m betrachtet, ab dort keine Bewaldung und anthropogen beeinflusst). Dies könnte in der unterschiedlichen Beschattung begründet sein. Es könnte aber auch darin die Ursache haben, dass das Engebächle vorwiegend aus tieferem Grundwasser gespeist wird, wohin gegen beim Selzenbächle noch andere Abflussprozesse, oberflächennäher, beteiligt sein könnten, die sich entsprechend stärker erwärmen. Wird der Abfluss betrachtet, so ist festzustellen, dass die Gebiete mit höherem Waldanteil die geringeren Abflüsse aufweisen.

6 Resultate der Messkampagne

Die zu analysierenden Messdaten stammen aus der Messperiode April 2004 bis September 2004. Am Glasbach konnte zur Auswertung noch der Messzeitraum vom 20. Juli 2003 bis 31. Oktober 2003 hinzugezogen werden. Da im Rahmen vorangegangener Diplomarbeiten am Katzensteigbach Pegel installiert waren, konnte auch hier auf alte Daten, von Juli 1995 bis Juni 1997, zurückgegriffen werden. Im Folgenden werden elf Niederschlagsereignisse und drei niederschlagsfreie Perioden pro untersuchtem Einzugsgebiet aus dem Messzeitraum 2004 näher untersucht. Außerdem wurde die extreme Trockenperiode 2003 am Glasbach und die Niedrigwassersituationen 1995 bis 1997 am Katzensteigbach in die Untersuchung mit aufgenommen.

Es konnten folgende gewässerkundliche Hauptzahlen, genormt auf die Gebietsfläche ermittelt werden:

[l/(skm²)]	HQ	MHQ	MQ	MNQ	NQ
Glasbach 2004	94,24	47,31	4,39	1,78	0,92
Glasbach 2003	35,09	17,13	3,54	2,45	2,44
Glasbach gesamt	94,24	33,90	4,01	2,08	0,92
Engebächle	16,30	11,33	3,78	2,03	1,47
Selzenbächle	64,21	44,46	14,63	9,37	7,92
Zipfeldobelbach	74,64	49,83	23,17	16,55	9,20
Katzensteigbach 2004	125,72	91,36	38,81	20,47	14,81
Katzensteigbach 95-97	369,26	144,42	37,58	19,07	1,25
Katzensteigbach gesamt	369,26	135,28	37,80	19,31	1,25

Das Verhältnis von MQ-Selzenbächle zum MQ-Engebächle beträgt 3.93, das des HQ-Selzenbächle zum HQ-Engebächle 3,94, das des MNQ-Selzenbächle zum MNQ-Engebächle 4,62 und das des NQ-Selzenbächle zum NQ-Engebächle 5,39.

6.1 Niederschlagsfreie Perioden

Die im Stand der Forschung genannten Parameter zur Niedrigwasseranalyse scheinen für kurze Messreihen nicht geeignet. Ein Problem stellt die Ermittlung des Schwellenwertes Qs dar. So werden in der Literatur (vergleiche MANIAK 1997) Parameter wie 0,15 bis 0,3 MQ, 90 bis 98 % der Dauerkurve als Schwellenwert angegeben.

Betrachtungszeitraum: 14/06/04 bis 13/09/04							
	Katzensteigbach	Katzensteigbach Zipfeldobelbach Glasbach Eng					
0,5*MQ [l/s]	25,89	13,56	2,81	3,26	14,56		
Q95 [l/s]	24,37	14,05	2,63	3,16	19,23		
Q90 [l/s]	25,90	19,22	2,76	3,68	20,33		
Q85 [l/s]	27,36	20,11	2,89	4,22	21,26		
Abflussdefizit [m ³]	2792,69	1039,37	245,83	807,31	1915,30		
Summe der	322,50	311,67	320,83	281,33	323,50		
Unterschreitungs-							
dauer [h]							

Tabelle 6-2: Niedrigwasserstatistik.

Da der Betrachtungszeitraum in der Sommersaison liegt, ergibt nur Q85 sinnvolle Ergebnisse. Q85 ist der Abflusswert aus der Dauerkurve über dem 85 % der Werte liegen. Aufgrund dessen beziehen sich Abflussdefizit und Summe der Unterschreitungsdauer auf Q85, wobei durch diese Statistik nur eine Niedrigwasserperiode ausgewiesen werden konnte. Diese herkömmliche Statistik bezieht sich nur auf den Abfluss bzw. auf davon abgeleitete Parameter. Um mehr Prozessverständnis in der Analyse zu berücksichtigen wurden in angewandter Untersuchung folgende Parameter mit einbezogen:

Parameter	Beschreibung
Trockenperiodendauer	Niederschlagsfreie Zeit in [h]
Exponent der Trendlinie des Abflusses	Steigung der Geraden, die in
	halblogarithmischer Darstellung aus der an den
	Abfluss angepassten Exponentialfunktion
	erhalten wird. Je kleiner dieser Exponent ist,
	desto schneller nähert sich die Gerade null.
Steigung der Trendgeraden der	Beschreibt den netto Temperaturanstieg über
Wassertemperatur	den Betrachtungszeitraum.
Vorereignisabfluss	Abfluss zu Beginn der niederschlagsfreien
	Periode in [l/(skm ²)].
Endereignisabfluss	Abfluss am Ende der niederschlagsfreien
	Periode in [l/(skm ²)].
Differenz Anfangs- Endabfluss	In [l/(skm²)]
Prozent Endabfluss von Anfangsabfluss	In [%]
Mittlere Amplitudenverschiebung	Mittlere Amplitudenverschiebung zwischen dem
	Tagesgang der Wasser- und der Lufttemperatur
	in [min].
Maximale Amplitude der Wassertemperatur	Differenz zwischen Maximum und Minimum des
	Tagesganges der Wassertemperatur in [°C].
Maximale Wassertemperatur	In [°C].
Maximale Lufttemperatur	In [°C].
Leitfähigkeit	Die Leitfähigkeit wird als quantitativer
	Parameter benutzt, solange dies aus den Daten
	möglich ist. Es werden Korrelationen zwischen
	Abfluss und Leitfähigkeit aufgestellt.

Tabelle 6-3: Parameter der Niedrigwasseruntersuchung	Tabelle 6-3:	Parameter de	r Niedrigwasseru	intersuchung.
--	--------------	--------------	------------------	---------------

Aufgrund des regenreichen Sommers 2004 existiert ein zu geringer Stichprobenumfang, von drei niederschlagsfreien Perioden, um eine Statistik aufzustellen. Es gibt keine festen Regeln, wie umfangreich eine Stichprobe sein sollte. Fest steht nur, dass der Stichprobenfehler mit der Größe einer Zufallstichprobe abnimmt. In der Forschungspraxis bestimmen meistens witterungsbedingte, sachliche, personelle, zeitliche und finanzielle Restriktionen den Stichprobenumfang. Es wurde eine Korrelationsmatrix erstellt, welche im Anhang beigelegt ist. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs und weil sich die Ergebnisse aus der Messperiode 2004 nicht mit den alten Daten verifizieren ließ, wurde von einer Interpretation abgesehen.

6.1.1 Vergleich der Dürreperiode 2003 am Glasbach mit 2004

Aus den Daten von GUWANG (2004) konnten vier niederschlagsfreie Perioden ausgewiesen werden (siehe Abbildung 6-1). Unter den sich häufenden extremen

Witterungsereignissen der letzten Dekaden zeichnet sich der Sommer 2003 in meteorologischer Hinsicht durch eine außergewöhnlich lange anhaltende Hochdruckwetterlage aus, die vielen Regionen Europas neue Temperaturmaxima und Niederschlagsminima bescherte. Trotz dieser Gegebenheiten wurden am Glasbach 2004 niedrigere Abflusswerte ermittelt als 2003.



Abbildung 6-1: Daten des Glasbaches 2003.

Wie aus Abbildung 6-1 ersichtlich, reichen die gefallenen Niederschläge nicht aus um den Abfluss längerfristig zu erhöhen. Zusätzlich ist aus der Grafik die Problematik der Leitfähigkeitsmessung (vergleiche Methodikteil) ersichtlich und die extrem hohen Temperaturen im Juli und August.



Abbildung 6-2: Daten des Glasbaches 2004

Wird die Messperiode 2003 mit 2004 verglichen, so ist festzustellen, dass 2004 wesentlich mehr Niederschlagsereignisse zu verzeichnen sind, die Luft- und Wassertemperatur geringer ist und die verschiedenen Ereignisse höheren Abfluss liefern. Vergleichbare Niederschlagsereignisse liefern 2004 drei- bis vierfach so hohe Abflussspitzen wie 2003. Das HQ zu NQ Verhältnis liegt 2003 bei 14:1 und 2004 bei 102:1. Der MQ 2003 ist bei 4,95 l/s und 2004 bei 6,15, was einer Differenz von 1,20 l/s entspricht.

	HQ [l/s]	MQ [l/s] NQ [l/s]			
Juli 2003	12,83	5,03	3,4	13	
August 2003	16,60	4,33	3,4	12	
September 2003	17,36	4,45	3,4	13	
Oktober 2003	49,13	5,97	3,4	12	
Mai 2004	19,63	6,62	3,9	97	
Juni 2004	131,94	11,52	2,8	35	
Juli 2004	94,88	5,15	2,1	5	
August 2004	79,98	4,91	2,2	2,20	
September 2004	4,77	2,56 1,2		29	
HQ 2003	49,13	Niederschlag 2003	272,84		
MQ 2003	4,95	Niederschlag 2004	Niederschlag 2004 [mm]		
NQ 2003	3,42	Max. Wassertemp.2	003 [°C]	20,62	
HQ 2004	131,94	Min. Wassertemp. 2	003[°C]	4,34	
MQ 2004	6,15	Max. Wassertemp. 2	2004[°C]	19,01	
NQ 2004	1,29	Min. Wassertemp. 2	004[°C]	4,90	
HQ Gesamt	131,94	Max. Lufttemp. 2003[°C] 3			
MQ Gesamt	5,62	Min. Lufttemp. 2003	[°C]	-0,08	
NQ Gesamt	1,29	Max. Lufttemp. 2004	4[°C]	32,20	
		Min. Lufttemp. 2004	[°C]	5,00	

Tahollo 6.4.	Gowässerkundlich	e Hauntzahlen	und Klimad	aton für don	Glashach
Tabelle 0-4.	Gewasserkununci	ie naupizamen	i unu Kiimau	aten fur den	Glasbach.

Aus Tabelle 6-4 geht hervor, dass das Jahr 2004 extremer ist als das Jahr 2003. Es treten höhere HQ- und niedrigere NQ-Werte auf. Eine wirkliche Niedrigwasserperiode setzte 2004 erst gegen September ein, wohingegen im Jahr 2003 diese von Juli bis Oktober zu beobachten ist. Erstaunlich sind die konstanten NQ-Werte in der Messperiode von GUWANG (2003). In vorliegender Messperiode ist eine kontinuierliche Abnahme der NQ-Werte ersichtlich.

Werden die niederschlagsfreien Perioden 2003 und 2004 miteinander verglichen (siehe Tabelle 6-5), so ist festzustellen, dass sie länger andauern, Ausnahme ist die Periode im September 2004, und dass die mittlere Amplitudenverschiebung signifikant größer ist. Zusätzlich liegen die Endabflusswerte höher als diejenigen, die im Sommer 2004 gemessen wurden. Die Differenz zwischen Anfangs- und Endabfluss liegt bei beiden Zeitreihen zwischen 0,30 und 2,00 l/s. Bei der extremen Hitzewelle im August 2003 ist die maximale Wassertemperatur um über 2 °C höher und die maximale Lufttemperatur um über 6 °C höher als die in 2004

gemessenen. Der Exponent der Trendlinie des Abflusses ist um eine Größenordnung größer als in allen anderen Untersuchungen am Glasbach.

Tabelle 6-5:	Veraleich de	er niederschlagsfreier	Perioden	2003 mit 2004.
	Torgioron ac	n meacroomagoneici		2000 mill 2004.

	Nieder- schlags- freie Periode 1 01.08.03 04:40 bis 11.08.03 11:30	Nieder- schlags- freie Periode 2 20.08.03 15:00 bis 28.08.03 08:20	Nieder- schlags- freie Periode 3 12.09.03 12:00 bis 23.09.03 01:00	Nieder- schlags- freie Periode 4 10.10.03 16:50 bis 19.10.03 17:30	Nieder- schlags- freie Periode 1 27.06.04 18:20 bis 30.06.04 23:50	Nieder- schlags- freie Periode 2 27.07.04 11:00 bis 02.08.04 11:50	Nieder- schlags- freie Periode 3 02.09.04 16:00 bis 10.09.04 21:00
Irockenperioden -dauer [h]	246,83	185,33	253,00	216,67	77,50	144,83	197,00
Exponent der Trendlinie des Abflusses	-0,00002	-0,0001	-0,0002	-0,0003	-0,0008	-0,0002	-0,0004
Steigung der Trendgeraden der Wassertemp.	0,0012	-0,001	0,0018	-0,004	-0,0014	0,0032	-0,0006
Vorereignis- abfluss [l/s]	4,17	4,49	5,04	6,55	4,67	3,48	4,44
Ereignisend- abfluss [l/s]	3,88	3,48	3,67	3,58	3,38	3,18	2,49
Differenz Anfangs- Endabfluss [l/s]	0,29	1,01	1.37	2,97	1,29	0,3	1,95
Prozent End- von Anfangsabfluss [%]	93,05	77,51	72,82	54,66	72,38	91,38	56,08
Mittlere Amplituden- verschiebung [min]	146	100	182,86	104,17	37,5	42,50	42,50
Max Amplitude der Wassertemp. [°C]	3,3	3,13	2,64	2,90	2,87	2,47	2,71
Maximale Wassertemp. [°C]	20,61	18,53	16,48	12,13	15,92	18,30	17,06
Maximale Lufttemperatur [°C]	37,41	30,27	30,25	18,56	27,60	31,20	29,80
Korrelation zwischen Leitfähigkeit und Abfluss	*	0,39	0,33	0,24	*	0,48	0,62

(* Leitfähigkeit messtechnisch bedingt unbrauchbar)

6.1.2 Fazit und Diskussion

Durch den Vergleich von 2003 mit 2004 ist ersichtlich, das es zwar 2003 wesentlich weniger Niederschlag am Glasbach gab, aber der Abfluss dennoch nicht ganz so tief fiel wie 2004. Angesicht dessen ist es fraglich, ob die Sommerperiode 2003 am Glasbach wirklich als Dürre angesprochen werden darf. Es kann natürlich auch so argumentiert werden, dass die Auswirkungen des zweifelsohne heißen Sommers 2003 sich erst 2004 bemerkbar gemacht haben. Die Vegetation kann in ihrer Wachstumsphase im Frühjahr die schon leeren Speicher weiter entleert haben und so kann ein Großteil des 2004 gefallenen Niederschlags nicht zum Abfluss gekommen sein. Wobei hier die Ganglinie in Abbildung 6-2 zeigt, dass der gefallene Niederschlag durchaus Abflussreaktionen bewirkte und zwar deutlich größere als 2003. So könnte es sein, dass die 2004 gefallenen Niederschläge zwar die oberen Bodenschichten aufsättigten, aber von dort durch die Vegetation und Abflussbildung aufgebraucht wurden. Die tieferen Speicher hätten dann nicht aufgefüllt werden können. Die ausgeprägtesten Niedrigwasserphasen sind sowohl 2003 als auch 2004 im September zu beobachten, obwohl dies nicht die wärmsten, allerdings die niederschlagsärmsten Perioden sind. Anzumerken ist, dass die Abflussdaten von GUWANG (2004) auf P-Q-Beziehung mit nur fünf Punkten zurückgeht, die eine den Niedrigwasserbereich nur bedingt abdecken. Den niedrigsten Abfluss konnte Guwang (2004) im Januar 2004 mit 2,2 l/s messen. Zusätzlich war der Gerinnequerschnitt nicht eindeutig definiert. So ist nicht auszuschließen, dass es sich um eine durch Messfehler bedingte Unsicherheit handelt. Zusätzlich wurden während der Erstellung der Längsprofile zahlreiche Brunnen entlang des Baches gesichtet. Inwieweit und wann hier Wasserentnahmen vollzogen werden, ist unklar. Die unterschiedlich gute Korrelation zwischen Leitfähigkeitserhöhung und Abflussabnahme könnten auf die verbesserte Messtechnik zurückzuführen sein (vergleiche Methodikteil).

Die mittlere Amplitudenverschiebung unterscheidet sich am signifikantesten bei den betrachteten Datenreihen. Dies könnte durch den höheren Energieinput im Sommer 2003 begründet sein. Das Einzugsgebiet wird stärker erhitzt und gibt dadurch die Energie länger an das Wasser ab. Aufgrund dessen könnten die Amplitudenverschiebungen länger sein. Wobei zu beachten ist, dass selbst im Oktober 2003 die Verschiebung, trotz geringerer Luft- und Wassertemperaturen, länger ist als 2004. Es könnte sein, dass die extremen, lang anhaltenden Temperaturen 2003 sich auf das tiefere Grundwasser auswirkten und dadurch auch noch im Oktober eine große mittlere Amplitudenverschiebung verursachten. Zusätzlich könnte die größere Verschiebung der Maxima und Minima durch die im Jahr 2003 höheren Abflüsse -ein größeres Wasservolumen muss erwärmt werden- begründet sein. So sind die Ereignisendabflüsse 2003 zwar durchgängig höher als 2004, befinden sich aber in der gleichen Größenordnung, weshalb dieser Einfluss als nicht eindeutig erachtet wird. Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Wassertemperatur durch vielfältige Einflüsse geprägt wird.

6.1.3 Vergleich der niederschlagsfreien Perioden 2004

Im Rahmen dieser Diplomarbeit konnten drei niederschlagsfreie Perioden an allen Bächen gleichzeitig aufgezeichnet werden. Wie in Punkt 6.1 aufgezeigt war es nicht möglich die Korrelationsmatrix zu interpretieren. Insofern beschränkt sich dieses Kapitel auf eine Beschreibung und einen Vergleich der gemessenen Niedrigwassersituationen. Um die Niedrigwassersituationen der verschiedenen Bäche untereinander vergleichen zu können wurden gleiche Zeitfenster betrachtet.

	Katzensteigbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle	Glasbach
Trockenperiodendauer [h]	77,50	77,50	77,50	77,50	77,50
Exponent der Trendlinie des Abflusses	-0,0004	-0,000001	-0,0003	0,0001	-0,0008
Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	-0,0001	-0,0015	-0,0016	-0,001	-0,0014
Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	26,20	24,08	3,58	14,11	3.34
Ereignisendabfluss [l/(skm²)]	22,39	24,86	3,12	13.09	2.41
Differenz Anfangs- Endabfluss [l/(skm²)]	3.81	-0,78	0,46	1,02	0,93
Prozent End- von Anfangsabfluss [%]	85,46	103,27	87,15	92,80	72,38
Mittlere Amplitudenverschiebung [min]	120	67,5	43,33	46,67	37,5
Max Amplitude der Wassertemperatur [°C]	3,86	2,37	3,26	3,12	2,87
Maximale Wassertemperatur [°C]	12,24	12,67	16,10	15,17	15,92
Maximale Lufttemperatur [°C]	24,50	24,50	27,60	27,60	27,60
Korrelation zwischen Leitfähigkeit und Abfluss	*	*	*	*	*

Tabelle 6-6: Niederschlagsfreie Periode 1.

(* Leitfähigkeit messtechnisch bedingt unbrauchbar)

Wird die Wassertemperatur betrachtet, so ist deutlich zu erkennen, dass die Bäche Zipfeldobelbach und Katzensteigbach die niedrigsten maximalen Wassertemperaturen aufweisen. Am Zipfeldobelbach fällt auf, dass der Abfluss während der niederschlagsfreien Periode nicht abnimmt, sondern im Gegenteil sogar zunimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier der Tagesgang des Abflusses größer ist als die Abflussabnahme (siehe Abbildung 6-3). Wobei zu erwähnen ist, dass das Abflussniveau ungefähr dem MQ entspricht. Das Verhältnis von MQ zum Ereignisendabfluss beträgt beim Katzensteigbach 1,7, beim Zipfeldobelbach 0,93, beim Selzenbächle 1,1, beim Engebächle 1,2 und beim Glasbach 1,8.



Abbildung 6-3: Niederschlagsfreie Periode 1 am Zipfeldobelbach.

Die Leitfähigkeitsmessung war in dieser Periode bei allen Untersuchungsgebieten unbrauchbar. Wird die lineare Trendgerade für die Wassertemperatur berechnet, so ist festzustellen, dass deren Steigung eine einheitliche Größenordnung aufweist.

Tabelle 6-7: Niederschlagsfreie Periode 2.

	Katzensteigbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle	Glasbach
Trockenperiodendauer [h]	144,83	144,83	144,83	144,83	144,83
Exponent der Trendlinie des Abflusses	-0,0004	-0,000002	-0,0002	0,00007	-0,0002
Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	0,0028	0,0025	0,0038	0,0029	0,0032
Vorereignisabfluss [l/(skm ²)]	25.62	15,48	3,94	11,81	2,64
Ereignisendabfluss [l/(skm ²)]	17,37	16,03	2,81	10,65	2,27
Differenz Anfangs- Endabfluss [l/(skm²)]	8,25	-0,55	1,13	1,16	0,37
Prozent End- von Anfangsabfluss [%]	67,81	103,53	71,59	90,17	85,95
Mittlere Amplitudenverschiebung [min]	141	90	64	83,33	42,50
Max Amplitude der Wassertemperatur [°C]	3,90	1,73	3,35	2,58	2,47
Maximale Wassertemperatur [°C]	14,76	14,58	19,31	17,00	18,30
Maximale Lufttemperatur [°C]	27	27	31,20	31,20	31,20
Korrelation zwischen Leitfähigkeit und Abfluss	0,58	0,00	0,24	0,00	0,48

Die zweite niederschlagsfreie Periode dauerte fast doppelt so lange an wie die erste. Wie in Abbildung 6-4 dargestellt ist das Abflussverhalten am Zipfeldobelbach ähnlich wie in der ersten Periode. Aber es ist eindeutig ein Anstieg der Wassertemperatur zu verzeichnen. Dies trifft auf alle Gebiete zu. Die mittlere Amplitudenverschiebung ist ebenfalls einheitlich länger in der zweiten untersuchten Phase.



Abbildung 6-4: Niederschlagsfreie Periode 2 am Zipfeldobelbach

Aufgrund der Schwankungen der Leitfähigkeit (vergleiche Abbildung 6-4) im letzten Drittel der Messperiode ergibt sich kein Zusammenhang zwischen Abfluss und Leitfähigkeit. Lässt man diesen Teil unberücksichtigt, so ergibt sich immerhin ein schwacher Zusammenhang von r² = 0,08. Der Zipfeldobelbach hat in dieser Periode die geringste maximale Wassertemperatur und weist ebenfalls die geringsten Schwankungen der Wassertemperatur auf. Das Verhältnis von MQ zum Ereignisendabfluss beträgt in dieser Periode beim Katzensteigbach 2,23, beim Zipfeldobelbach 1,4, beim Engebächle 1,3, beim Selzenbächle 1,4 und beim Glasbach 1,9.

Tabelle 6-8: Niederschlagsfreie Periode 3.

	Katzensteigbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle	Glasbach
Trockenperiodendauer [h]	197,00	197,00	197,00	197,00	197,00
Exponent der Trendlinie des Abflusses	-0,0003	-0,0002	-0,0004	-0,0002	-0,0004
Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	-0,0005	-0,0005	-0,008	-0,0008	-0,0006
Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	41,88	19,56	3,16	13,21	3,17
Ereignisendabfluss [l/(skm ²)]	28,59	18,62	1,83	11,73	1,78
Differenz Anfangs- Endabfluss [l/(skm²)]	13,29	0,94	1,33	1,48	1,39
Prozent End- von Anfangsabfluss [%]	68,28	95,19	58,01	88,81	56,08
Mittlere Amplitudenverschiebung [min]	146,25	112,00	67,27	86,67	42,50
Max Amplitude der Wassertemperatur [°C]	3,20	1,85	3,70	2,90	2,71
Maximale Wassertemperatur [°C]	12,35	13,97	17,83	15,85	17,06
Maximale Lufttemperatur [°C]	25,70	25,70	29,80	29,80	29,80
Korrelation zwischen Leitfähigkeit und Abfluss	*	0,06	0,45	0,37	0,62

(* Leitfähigkeit messtechnisch bedingt unbrauchbar)

Die dritte Phase (siehe Tabelle 6-8) dauerte am längsten an. Der Exponent der Trendlinie des Abflusses ist hier einheitlicher. Zusätzlich weist diese Periode die längste Amplitudenverschiebung zwischen den Minima und Maxima der Wasserund Lufttemperatur auf. Es konnten schwache bis mittlere Zusammenhänge zwischen dem Abfluss und der Leitfähigkeit aufgezeigt werden. Das Verhältnis von MQ zu Ereignisendabfluss beträgt in dieser Periode beim Katzensteigbach 1,4, beim Zipfeldobelbach 1,2, beim Engebächle 2,1, beim Selzenbächle 1,2 und beim Glasbach 2,5.

6.1.4 Fazit und Diskussion

Werden die drei Perioden verglichen, so ist festzustellen, dass die Amplitudenverschiebung mit der Trockenperiodendauer wächst. Die eigentlich zu erwartende Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom Abfluss konnte so nicht nachgewiesen werden. Dies könnte messtechnisch begründet sein, siehe Methodikkapitel. Werden allerdings die Daten von 1995 bis 1997 vom Katzensteigbach betrachtet, so ist daraus ersichtlich, dass auch hier mit völlig anderer Messmethodik keine besseren Bestimmtheitsmaße erreicht werden. Gemessen wurde damals mit Multisonden, die ermittelten Bestimmtheitsmaße lagen zwischen 0,18 und 0,65.

Nach ihrem Temperaturmaximum können Bäche eingeteilt werden. So werden nach SCHWOERBEL (1993) Bäche mit Maxima von 0 bis 17 °C als sommerkalte und Bäche mit Maxima von 17 bis 29 °C als sommerwarme Bäche bezeichnet. Zipfeldobelbach und Katzensteigbach fallen in erste Kategorie, wohingegen die anderen Untersuchungsgebiete in die zweite Kategorie fallen. TETI (2004) hält die Beschattung für einen der wichtigsten Effekte auf die Temperatur des Fliessgewässers. Werden die auf ähnlicher Höhe über NN liegenden Bäche miteinander verglichen, so ist dem im Wesentlichen zuzustimmen. Das Einzugsgebiet des Glasbaches ist vollständig bewaldet. So ist die maximale Wassertemperatur in allen drei Perioden am Engebächle höher als am Glasbach. Somit zeigt sich die klimatisierende Wirkung des Waldes bzw. des Gewässerrandstreifens auf die Wassertemperatur. Denn im Wesentlichen ist nicht die Landnutzung, sondern der Gewässerrandstreifen für die Beschattung des Gewässers verantwortlich. Mit dem Selzenbächle, bei dem eine noch höhere Temperatur erwartet werden würde, sind diese zwei Bäche nicht direkt vergleichbar. Denn die Temperatur ist natürlich zusätzlich vom Abfluss bzw. dem Volumen, das erwärmt werden muss, abhängig.

Der Parameter "Prozent End- von Anfangsabfluss" sagt etwas über das Auslaufverhalten des Systems aus. Je geringer der Parameter, desto schneller laufen die verschiedenen Speicher aus. Daraus folgt, dass die Ausgeglichenheit der Systeme bei niederschlagsfreien Perioden in folgender Reihenfolge abnimmt: Zipfeldobelbach – Selzenbächle – Engebächle – Katzensteigbach – Glasbach. Werden Zipfeldobelbach Katzensteigbach und aus der Betrachtung ausgeschlossen, so ist festzustellen, dass das Engebächle und der Glasbach stärker auf die niederschlagsfreien Perioden reagieren als das Selzenbächle. Dies könnte durch den niedrigeren Waldanteil im Gebiet des Selzenbächles begründet sein.

Werden die unter Punkt 6.1 beschriebenen Verhältnisse der gewässerkundlichen Hauptzahlen des Selzen- und Engebächles betrachtet, so ist festzustellen, dass das Verhältnis NQ-Selzenbächle zu NQ-Engebächle die größte Differenz aufweist. Dies kann insoweit interpretiert werden, dass der höhere Waldanteil am Engebächle zu Trockenzeiten dem Einzugsgebiet mehr Wasser entzieht als die Weidelandnutzung beim Selzenbächle. Des Weiteren werden beim Engebächle die Hochwasserspitzen gedämpft, was an dem im Vergleich zum Engebächle niedrigerem HQ ersichtlich ist. Ebenso wie das Engebächle weist der Glasbach sehr geringe MNQ auf, dies kann auf die 100 % Bewaldung zurückzuführen sein. Wird das Cluster Engebächle, Selzenbächle und Glasbach betrachtet, so sinkt mit steigendem Waldanteil der NQ. Dies gilt ebenso für die beiden höher gelegenen Gebiete. Im Wesentlichen entspricht das den im Stand der Forschung beschriebenen Studien.

6.2 Niederschlagsereignisse

Die Niederschlagsstatistik bezieht ihre Daten aus der Messperiode 2004. Es wurden insgesamt 55 Ereignisse ausgewertet. Die in Tabelle 6-9 erklärten Parameter wurden erhoben bzw. berechnet und anschließend gegeneinander korreliert:

Parameter	Beschreibung			
Niederschlagsmenge	In [mm].			
Maximale Intensität	Maximale Niederschlagsintensität [mm/10 min].			
Maximale Abkühlung	Differenz von Luft- und Wassertemperatur über			
	das Ereignis, anschließend davon die Differenz			
	des Maximalwerts vom Minimum.			
Quantitative Temperaturänderung	In [°C].			
Verdünnungseffekt	Die Leitfähigkeit wird als halbquantitativer			
	Parameter benutzt: 0 = Kein			
	Verdünnungseffekt, 1 = leichter V., 2 = mittlerer			
	V., 3 = starker V. Wobei 1 eine Verdünnung			
	kleiner 10 µS/cm, 2 eine Verdünnung zwischen			
	10 und 20 µS/cm, 3 eine Verdünnung größer 20			
	µS/cm und -1 nicht eindeutig aus den Daten			
	interpretierbar bedeutet.			
Vorereignisabfluss	In [l/(skm²)].			
Vorereignisabfluss Ereignisabflussvolumen	In [l/(skm²)]. Um relativ schnell und effektiv auf das			
Vorereignisabfluss Ereignisabflussvolumen	In [l/(skm²)]. Um relativ schnell und effektiv auf das Ereignisabflussvolumen zu kommen, wird hier			
Vorereignisabfluss Ereignisabflussvolumen	In [l/(skm ²)]. Um relativ schnell und effektiv auf das Ereignisabflussvolumen zu kommen, wird hier der Mittelwert über fünf Stunden vor dem			
Vorereignisabfluss Ereignisabflussvolumen	In [l/(skm ²)]. Um relativ schnell und effektiv auf das Ereignisabflussvolumen zu kommen, wird hier der Mittelwert über fünf Stunden vor dem Ereignis ermittelt und mit diesem anschließend			
Vorereignisabfluss Ereignisabflussvolumen	In [l/(skm ²)]. Um relativ schnell und effektiv auf das Ereignisabflussvolumen zu kommen, wird hier der Mittelwert über fünf Stunden vor dem Ereignis ermittelt und mit diesem anschließend ein Geradenabzug an der Ganglinie vollführt.			
Vorereignisabfluss Ereignisabflussvolumen	In [l/(skm ²)]. Um relativ schnell und effektiv auf das Ereignisabflussvolumen zu kommen, wird hier der Mittelwert über fünf Stunden vor dem Ereignis ermittelt und mit diesem anschließend ein Geradenabzug an der Ganglinie vollführt. Findet ein weiteres Ereignis vor Erreichen des			
Vorereignisabfluss Ereignisabflussvolumen	In [l/(skm ²)]. Um relativ schnell und effektiv auf das Ereignisabflussvolumen zu kommen, wird hier der Mittelwert über fünf Stunden vor dem Ereignis ermittelt und mit diesem anschließend ein Geradenabzug an der Ganglinie vollführt. Findet ein weiteres Ereignis vor Erreichen des gemittelten Vorereignisabflusses statt, wird die			
Vorereignisabfluss Ereignisabflussvolumen	In [l/(skm ²)]. Um relativ schnell und effektiv auf das Ereignisabflussvolumen zu kommen, wird hier der Mittelwert über fünf Stunden vor dem Ereignis ermittelt und mit diesem anschließend ein Geradenabzug an der Ganglinie vollführt. Findet ein weiteres Ereignis vor Erreichen des gemittelten Vorereignisabflusses statt, wird die für das jeweilige Gebiet ermittelte Auslauflinie			
Vorereignisabfluss Ereignisabflussvolumen	In [l/(skm ²)]. Um relativ schnell und effektiv auf das Ereignisabflussvolumen zu kommen, wird hier der Mittelwert über fünf Stunden vor dem Ereignis ermittelt und mit diesem anschließend ein Geradenabzug an der Ganglinie vollführt. Findet ein weiteres Ereignis vor Erreichen des gemittelten Vorereignisabflusses statt, wird die für das jeweilige Gebiet ermittelte Auslauflinie an den abfallenden Ast der Ganglinie			
Vorereignisabfluss Ereignisabflussvolumen	In [I/(skm ²)]. Um relativ schnell und effektiv auf das Ereignisabflussvolumen zu kommen, wird hier der Mittelwert über fünf Stunden vor dem Ereignis ermittelt und mit diesem anschließend ein Geradenabzug an der Ganglinie vollführt. Findet ein weiteres Ereignis vor Erreichen des gemittelten Vorereignisabflusses statt, wird die für das jeweilige Gebiet ermittelte Auslauflinie an den abfallenden Ast der Ganglinie angepasst. In [m ³].			
Vorereignisabfluss Ereignisabflussvolumen Maximaler Direktabfluss	In [l/(skm ²)]. Um relativ schnell und effektiv auf das Ereignisabflussvolumen zu kommen, wird hier der Mittelwert über fünf Stunden vor dem Ereignis ermittelt und mit diesem anschließend ein Geradenabzug an der Ganglinie vollführt. Findet ein weiteres Ereignis vor Erreichen des gemittelten Vorereignisabflusses statt, wird die für das jeweilige Gebiet ermittelte Auslauflinie an den abfallenden Ast der Ganglinie angepasst. In [m ³]. Differenz aus maximalem Ereignisabfluss und			
Vorereignisabfluss Ereignisabflussvolumen Maximaler Direktabfluss	In [I/(skm ²)]. Um relativ schnell und effektiv auf das Ereignisabflussvolumen zu kommen, wird hier der Mittelwert über fünf Stunden vor dem Ereignis ermittelt und mit diesem anschließend ein Geradenabzug an der Ganglinie vollführt. Findet ein weiteres Ereignis vor Erreichen des gemittelten Vorereignisabflusses statt, wird die für das jeweilige Gebiet ermittelte Auslauflinie an den abfallenden Ast der Ganglinie angepasst. In [m ³]. Differenz aus maximalem Ereignisabfluss und gemitteltem Vorereignisabfluss in [I/(skm ²)].			
Vorereignisabfluss Ereignisabflussvolumen Maximaler Direktabfluss Maximaler Ereignisabfluss	In [l/(skm ²)]. Um relativ schnell und effektiv auf das Ereignisabflussvolumen zu kommen, wird hier der Mittelwert über fünf Stunden vor dem Ereignis ermittelt und mit diesem anschließend ein Geradenabzug an der Ganglinie vollführt. Findet ein weiteres Ereignis vor Erreichen des gemittelten Vorereignisabflusses statt, wird die für das jeweilige Gebiet ermittelte Auslauflinie an den abfallenden Ast der Ganglinie angepasst. In [m ³]. Differenz aus maximalem Ereignisabfluss und gemitteltem Vorereignisabfluss in [l/(skm ²)]. In [l/(skm ²)].			

Tabelle 6-9: Parameter der Niederschlagsstatistik.

Um auf das Abflussvolumen zu kommen, muss eine Ganglinienseparation vorgenommen werden. Es stellt sich die Frage, wie dies zu erfolgen hat. Damit die Ereignisse vergleichbar sind, sollte dies in jedem Fall einheitlich geschehen. Es liegen keine Tracerdaten für die einzelnen Ereignisse vor. Die ermittelten Konzentrationszeiten nach Kirpich ergaben keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Sie lagen für alle Bäche viel zu niedrig zwischen 20 und 50 min. Da die abgeflossene Wassermenge nicht ihren Herkunftsräumen zugeordnet werden soll, ist der Geradenabzug ein geeignetes Mittel um effektiv die Abflussfülle einzelner Ereignisse zu berechnen. Ein Problem stellt das langsame Auslaufen der Speicher dar. So ist nicht immer gewährleistet, dass der Abfluss des zu untersuchenden Ereignisses wieder auf Vorereignisniveau gefallen ist, bevor erneut Niederschlag einsetzt (siehe Abbildung 6-5, rote Ellipse kennzeichnet erneut einsetzenden Niederschlag). Um diese Art von Ereignissen trotzdem auswerten zu können, wird von jedem Bach die Auslauflinie bestimmt. Dies erfolgt nach dem gleichen Verfahren, wie auch die Trockenwetterauslauflinie gebildet wird. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die abfallenden Äste nicht erst nach drei bis vier niederschlagsfreien Tagen, sondern bereits zwei Stunden nach Ende des Niederschlags verwendet werden. Dies kann dadurch gerechtfertigt werden, dass nicht das Leerlaufen des Grundwasserspeichers in den Trockenphasen bestimmt werden soll. Das Verfahren soll vielmehr dazu geeignet sein, aufgesetzte Niederschlagsereignisse zu analysieren, d.h. Ereignisse, die auf hohem Vorereignisabflussniveau stattfinden. Der hohe Vorereignisabfluss wird durch zuvor stattgefundene Ereignisse induziert. Die Trockenwetterauslauflinie geht davon aus, dass nur noch ein Speicher beteiligt ist. Besonders die Anfangsphase des Rückgangs resultiert aus einer Vielzahl von Prozessen im Einzugsgebiet. Hierin ist auch begründet, weshalb mit den "Trockenwetterrückgangslinien", die meist als Umhüllende von Rückgangsabschnitten abgeleitet werden, keine befriedigende Ergebnisse erzielt werden können (DYCK/PESCHKE 1995). Das Auslaufen der Speicher wird je nach Einzugsgebiet in drei oder zwei Speicher eingeteilt, d.h. es werden entsprechend der besten Güte Exponentialfunktionen an die Auslauflinien angepasst. Die einzelnen Auslauflinien sind im Anhang zu finden. In Tabelle 6-10 sind die verschiedenen Leerlaufkoeffizienten bzw. Rezessionskonstanten der Einzugsgebiete dargestellt.

	Katzensteigbach	Glasbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle
Leerlauf- koeffizient 1	-0,0008	-0,0012	-0,0002		
Leerlauf- koeffizient 2	-0,0003	-0,004	-0,0006	-0,0017	-0,0008
Leerlauf- koeffizient 3	-0,0001	-0,0002	-0,0002	-0,0005	-0,0005

Tabelle 6-10: Leerlaufkoeffizienten der Einzugsgebiete.

Der Leerlaufkoeffizient 3 beschreibt das Auslaufen des letzten beteiligten Der reziproke Wert Leerlaufkoeffizienten Speichers. des stellt die Speicherkonstante eines Linearspeichers dar. Somit können die Speichereigenschaften eines Aquifers damit abgeschätzt werden. Die Rezessionskonstante ist ein Maß für die Durchlässigkeit eines Aquifers. Für das Enge- und Selzenbächle konnten nur zwei Rezessionskonstanten gefunden werden. Beide Konstanten des letzten Speichers besitzen die selbe Größe. Ebenso sind die Auslaufkoeffizienten 3 des Glasbaches und des Zipfeldobelbaches identisch. Auffällig ist, dass sowohl der Glasbach als auch der Zipfeldobelbach im mittleren Speicher den kleinsten Koeffizienten aufweist, was die größte Steigung und damit das schnellste Entleeren bedeutet.

Abbildung 6-5 beschreibt die Anwendung der Auslauflinie und des Geradenabzugs.



Abbildung 6-5: Niederschlagsereignis am Selzenbächle.

Zusätzlich ist in Abbildung 6-5 eine Abkühlung der Wassertemperatur, die eine Stunde nach dem maximalen Niederschlagspeak auftritt, und ein Verdünnungseffekt der Leitfähigkeit, der nach einer Stunde und zehn Minuten auftritt, aufgrund des Konvektivereignisses zu erkennen. Die Abkühlung beträgt 2,98 °C und die Leitfähigkeit sinkt um 80 µS/cm. Der maximale Abfluss beträgt 72,28 l/s.



Abbildung 6-6: Niederschlagsereignis am Engebächle

Das selbe Ereignis am Engebächle ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Hier induzierte das Niederschlagsereignis einen maximalen Abfluss von 28,03 l/s. Der Abfluss fällt nach dem ersten Peak wesentlich weiter ab, als dies beim Selzenbächle der Fall ist. Es zeigt sich das gleiche Bild bei der zeitlichen Reaktion der Leitfähigkeit und der Temperatur. Die Wassertemperatur sinkt um 8,52 °C, die Leitfähigkeit um 110 μ S/cm. Auffällig ist die Schwankung der Leitfähigkeit nach Abklingen des Ereignisses. Diese Sonderheit konnte bei den meisten Ereignissen am Engebächle beobachtet werden.



Abbildung 6-7: Niederschlagsereignis am Glasbach

Am Glasbach (Abbildung 6-7) wurde ein geringerer Niederschlag und eine kleinere maximale Niederschlagsintensität aufgezeichnet. Trotzdem führte das Ereignis zu einer starken Abflusszunahme. So stieg der Abfluss auf maximal 94,88 l/s an. Die maximale Temperaturänderung betrug 9,74 °C und erfolgte 10 min nach dem Niederschlagspeak, zeitgleich erfolgte das Absinken der Leitfähigkeit um 100 μ S/cm.



Abbildung 6-8: Niederschlagsereignis am Katzensteigbach.

Ein wesentlich abgeschwächteres Niederschlagsereinis wurde am Katzensteigbach aufgezeichnet (Abbildung 6-8). So erzeugte das Ereignis einen maximalen Abfluss von 55,95 l/s. Die Leitfähigkeitsmessung kann nicht interpretiert werden, da sie nicht mit der Referenzmessung übereinstimmt und um ca. 20 μ S/cm zu gering ist. Es konnte eine leichte Abkühlung von 0,11 °C eine Stunde und zehn Minuten nach dem größten Niederschlagspeak beobachtet werden.



Abbildung 6-9: Niederschlagsereignis am Zipfeldobelbach.

Wie schon beim Katzensteigbach war auch beim Zipfeldobelbach das Niederschlagsereignis und die daraus resultierende Abflussreaktion geringer als bei den näher an Freiburg gelegenen Bächen. Das Ereignis, dargestellt in Abbildung 6-9, induzierte keine sichtbare Temperaturänderung und die Leitfähigkeit wurde nur um 9,9 μ S/cm geringer. Dies erfolgte mit dem Anstieg des Abflusses, zehn Minuten nach dem ersten Niederschlagspeak.

In Abbildung 6-10 ist der Abkühlungseffekt am Selzenbächle für dieses Ereignis noch einmal dargestellt. Zusätzlich ist die Differenz der Luft- und Wassertemperatur abgebildet.



Abbildung 6-10: Differenz der Luft- Wassertemperatur am Selzenbächle.

Die Wassertemperatur ist abhängig von den klimatischen Verhältnissen. Um die verschieden gelegenen Gebiete hinsichtlich ihres Temperaturverhaltens vergleichen zu können wird der Parameter "Maximale Abkühlung" generiert. Hierbei wird versucht die klimatischen Effekte der Lufttemperatur auf die Wassertemperatur herauszurechnen bzw. zu minimieren.

Die Auswertung der einzelnen Niederschlagsereignisse sind im Anhang zu finden. Die Parameter Ereignisdauer, maximale Abkühlung, Verdünnungseffekt, maximale Direktabfluss und Abflussvolumenspende weisen keine eindeutige Abhängigkeit mit der Landnutzung bzw. dem prozentualen Waldanteil auf (vergleiche Abbildung 6-11).



Waldanteil [%]

Abbildung 6-11: Zusammenhang verschiedener Parameter mit dem Waldanteil

Der Katzensteigbach, welcher einen Waldanteil von ca. 75 % aufweist, zeigt die größte Spannweite der Werte bei der Abflussvolumenspende, dem maximalen Direktabfluss und der Ereignisdauer. Bei der maximalen Abkühlung hingegen weist er die geringste Variation auf. Wird die Differenz der Niederschlagsdauer

von der Gesamtereignisdauer gebildet, so werden die in nachfolgender Tabelle stehenden Werte erhalten. Diese werden als Konzentrationszeiten angenommen. Die Konzentrationszeit ist die Zeit, die ein Wasserteilchen vom entferntesten Punkt des Einzugsgebietes bis zum Gebietsauslass benötigt, und zwar nach Ende des Effektivniederschlags.

	Minimale Dauer	Froignic	Maximale Dauer	Ereignis	
	[min]	Eleigilis	[min]		
Engebächle	120	4	1860	11	
Glasbach	560	1	3540	5	
Katzensteigbach	480	5	2640	6	
Selzenbächle	280	1	1630	7	
Zipfeldobelbach	190	4	1260	6	

Tabelle 6-11: Minimale und maximale Konzentrationszeiten.

Wie aus Tabelle 6-11 ersichtlich schwanken die Konzentrationszeiten beträchtlich. Zusätzlich liefert nicht das gleiche Ereignis bei allen Gebieten die geringsten Zeiten bzw. die Maxima.

Werden die Bäche Katzensteigbach und Zipfeldobelbach betrachtet, so hat der Katzensteignach bei 91 % aller untersuchten Ereignisse den maximalen Direktabfluss. Bei den tiefer gelegenen Bächen hat das Selzenbächle bei 73 % und der Glasbach bei 27 % der Ereignisse den größeren maximalen Direktabfluss.

Wird betrachtet wie viel Niederschlag notwendig ist um in den jeweiligen Gebieten eine Abflussreaktion hervorzurufen, ist zu beachten, dass die Vorfeuchtebedingungen einen wesentlichen Einfluss haben.

Beim Zipfeldobelbach war das Niederschlagsereignis 1 (siehe Tabelle A 6) mit einer Niederschlagssumme von 1,90 mm das kleinste Ereignis, welches noch eine sichtbare Abflussreaktion hervorbrachte. Am Katzensteigbach reichten am 07.08.04 1,60 mm und am 8.08.04 schon 0,30 mm aus, um einen Peak in der Ganglinie zu verursachen. Wobei zu beachten ist, dass bei letzterem Ereignis schon eine Summe von 70,20 mm Niederschlag im Monat August gefallen waren und dass womöglich nicht das gesamte Niederschlagsereignis an der Niederschlagswippe aufgezeichnet wurde. Beim Selzenbächle erzeugten 1,40 mm im Mai keine sichtbare Reaktion des Abflusses. Am 07.08.04 reichten bereits 0,69 mm aus um den Abfluss anschwellen zu lassen. Allerdings wurde am 06.08.04 ein größeres Niederschlagsereignis mit 15,73 mm Niederschlag aufgezeichnet. Im September fielen insgesamt 6,22 mm Niederschlag, keines der Ereignisse erzeugte eine sichtbare Veränderung in der Ganglinie. Es wurde lediglich das Abflussniveau beibehalten, d.h. ein weiteres Absinken des Abflusses verzögert.

Niederschlagsereignisse mit Niederschlagssummen unter 1,00 mm erhöhten 2003 den Abfluss am Glasbach nicht. Gleiches Bild zeigte sich 2004. Am 18.07.04 induzierten 2,00 mm Regen keine Reaktion im Abflussgeschehen. Zuvor war eine niederschlagsfreie Zeit von ca. 4,5 Tagen. Das in der Niederschlagsstatistik aufgenommene Ereignis 1 erzeugte am Glasbach die geringste Reaktion. Im September fielen insgesamt 10,80 mm Niederschlag, die einzelnen Ereignisse mit 1,20 maximalen Intensitäten von mm erzeugten keine erkennbaren Abflussreaktionen. Es wurde lediglich, wie auch beim Selzenbächle, das Absinken Abflusses verzögert. Am Engebächle reichte am 20.07.04 des eine Niederschlagssumme von 0,83 mm aus, um den Abfluss anschwellen zu lassen. Wobei hier etliche Niederschlagsereignisse davor lagen, welche womöglich eine hohe Vorfeuchte bewirkten. Das erste Ereignis im September erzeugte eine gut sichtbare Abflussanschwellung um ca. 3 l/s. Die Niederschlagssumme betrug 2,11 mm.

6.3 Fazit und Diskussion

Die verschiedenen Einzugsgebiete reagieren sehr unterschiedlich auf die einzelnen Niederschlagsereignisse. Messtechnisch war eine höhere Messnetzdichte der Niederschlagsstationen im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht möglich. So entsteht ein nicht zu unterschätzender Fehler bei der Übertragung der einzelnen Niederschlagswerte auf die Gebiete. Der zeitliche Aspekt der Niederschlagspeaks ist somit nicht interpretierbar. Es muss bei jeder Arbeit ein Kompromiss zwischen repräsentativen Messstandorten und minimalen Kosten, Schutz vor Vandalismus, etc. getroffen werden.

Anfänglich stand nur eine Luftdrucksonde zur Verfügung, diese wurde auf dem Dach des Institutes für Hydrologie installiert. Wie schon bei GUWANG (2004) führte dies zu nicht reproduzierbaren Tagesgängen. Schlussendlich wurden die Luftdruckdaten des meteorologischen Institutes für die Kompensation der Bäche Engebächle, Selzenbächle, Glasbach und Zipfeldobelbach verwendet. Auch hier steckt eine grobe Annahme der Übertragbarkeit der Luftdruckveränderung dahinter, die zu einem gewissen Fehler führt.

Wird das in Abbildung 6-5 bis Abbildung 6-9 dargestellte Ereignis betrachtet, so ist keine einheitliche Reaktion der Waldgebiete zu beobachten. Da es sich bei diesem Ereignis um ein Konvektivereignis handelte, das im Bruggaeinzugsgebiet längst nicht die gleichen Ausmaße annahm wie in den stadtnahen Gebieten, ist die jeweilige Reaktion der Gebiete nicht direkt vergleichbar. So zeigte der Glasbach, der vollständig bewaldet ist, die größte Abflussreaktion. Weiterhin ist festzuhalten, dass das Engebächle und der Glasbach die höchste Verdünnung und die stärkste Abkühlung des Bachwassers aufzeigten. Dies liegt daran das beide einen geringen Vorereignisabfluss aufweisen und somit der abzukühlende bzw. zu verdünnende Wasserkörper klein ist im Vergleich zum Selzenbächle.

Um das Abflussvolumen und den Direktabfluss der verschiedenen Ereignisse zu berechnen, stehen verschiedene Mittel zur Verfügung. Für einige dieser Verfahren wird die Konzentrationszeit benötigt. Die verschiedenen empirischen Mittel, Verfahren nach Kirpich, Verfahren nach Carter, um die Konzentrationszeit zu berechnen liefern zu geringe Werte. Um den gesamten, durch das jeweilige Niederschlagsereignis, induzierten Abfluss zu erfassen, wurde der Geradenabzug als geeignetes Mittel erachtet. Dabei bleibt unberücksichtigt, ob es sich um Vorereignis, das durch Druckübertragung oder ähnliche Effekte generiert wird, oder Ereigniswasser handelt.

Um das Auslaufen der Speicher möglichst naturgetreu nachzubilden, wurden je nach Auslaufkurve zwei oder drei Exponentialfunktionen angepasst. Somit wird erreicht, dass jedes Einzugsgebiet individuell betrachtet werden kann und keine Mittelung der beteiligten Speicher zu Fehlern führt. Auffällig ist, dass der Glasbach und das Engebächle, die Einzugsgebiete mit hohem Waldanteil, die kleinsten Koeffizienten im mittleren Speicher aufweisen. Dies deutet auf eine schnellere Entleerung dieses Speichers, im Vergleich zu den anderen Gebieten hin.

Bei der Betrachtung, wie viel Niederschlag notwenig ist um in den jeweiligen Gebieten eine Abflussreaktion hervorzurufen, wird deutlich, dass die Waldgebiete höhere Niederschlagssummen benötigen als das Selzenbächle und der Katzensteigbach. Dies könnte an den höheren Interzeptionsund Bodenspeicherkapazitäten die im Allgemeinen Waldgebieten liegen, in vorherrschen. Dabei beschriebene Unsicherheit ist die oben der Niederschlagserfassung zu beachten. Zusätzlich spielen natürlich die unterschiedliche Einzugsgebietsform, die Vorfeuchtebedingungen, die Gewässernetzdichte, etc. eine wesentliche Rolle.





Abbildung 6-12: Anzahl der Ereignisse mit dem maximalen Direktabfluss für die Cluster Zipfeldobelbach, Katzensteigbach und Selzenbächle, Engebächle und Glasbach.

Aus Abbildung 6-12 geht hervor, dass der Katzensteigbach bei zehn von elf untersuchten Ereignissen den höheren maximalen Direktabfluss im Vergleich zum Zipfeldobelbach aufwies. Bei mittleren und kleinen Ereignissen ist der Unterschied nicht ganz so groß. Dies bedeutet, dass der Zipfeldobelbach durch seinen höheren Waldanteil eine bessere Retention aufweist als der Katzensteigbach.

Auch bei dem Cluster Selzenbächle, Engebächle und Glasbach ist dieser Effekt sichtbar. Wird nur das Engebächle und das Selzenbächle betrachtet, so ist festzustellen, dass das Selzenbächle mit seinen 22,67 % Wald eine wesentlich geringere Retention aufweist als das Engebächle. Der Glasbach weist dreimal einen höheren Direktabfluss auf als das Selzenbächle; dies liegt zum einen daran, dass einmal die Niederschlagsumme am Glasbach höher lag als am Selzenbächle und zum anderen können lokale Konvektivereignisse nicht ausreichend mit dem zugrunde liegenden Messnetz erfasst werden. Auch hier muss natürlich beachtet werden, dass dieser Effekt nicht ausschließlich auf die Landnutzung, sondern ebenso auf die Gebietsparameter zurückzuführen ist.

6.4 Statistische Auswertung der Messergebnisse

Die Untersuchung von Abhängigkeiten und Zusammenhängen zwischen objektiv existierenden Erscheinungen und Prozessen spielt in der Wissenschaft eine große Rolle (FÖRSTER & RÖNZ 1979). Durch die Korrelationsanalyse ergibt sich die Möglichkeit, die größtenteils komplex wirkenden Ursache–Wirkungs-Systeme tiefer zu betrachten.

Tabelle	6-12:	Wertebereich	des	Bestimmtheitsmaßes	und	deren	Interpretation	(nach
SCHLITO	GEN 20	00).						

Bestimmtheitsmaß r ²	Interpretation
0,00	"Kein Zusammenhang"
0,01 – 0,24	"Schwacher Zusammenhang"
0,25 – 0,64	"Mittlerer Zusammenhang"
0,65 – 0,99	"Starker Zusammenhang"
1,00	"perfekter Zusammenhang"

Tabelle 6-12 beschreibt, nach welchem System die Korrelationsmatrix ausgewertet wird. Mit diesem Analysetool wird der Zusammenhang zwischen zwei Datensätzen gemessen, die skaliert werden, um unabhängig von den jeweiligen Maßeinheiten zu sein. Die Korrelation der Grundgesamtheit gibt die Kovarianz zweier Datensätze, dividiert durch das Produkt aus deren Standardabweichungen, basierend auf folgender Formel, zurück.

Formel 6-1: Korrelationskoeffizient.

	r	Korrelationskoeffizient
$r = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} = \frac{\sum (x_i - \overline{x}) \cdot (y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \overline{x})^2} \cdot \sqrt{\sum (y_i - \overline{y})^2}}$	S _{xy}	Kovarianz
	S _x	Standardabweichung
	S _y	Standardabweichung

Verwendet wird die Korrelation, um zu bestimmen, ob sich zwei Messreihen gleich entwickeln, d.h. ob hohe Werte des einen Datensatzes den hohen Werten des anderen zugeordnet sind (positive Korrelation), ob niedrige Werte des einen Datensatzes den hohen Werten des anderen zugeordnet sind (negative Korrelation) oder ob die Werte der beiden Datensätze nicht einander zugeordnet sind (Korrelation nahe Null). Das Bestimmtheitsmaß gibt das Quadrat des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten zurück, entsprechend den in Y-Werten und X-Werten abgelegten Datenpunkten. Durch Anwenden des Bestimmtheitsmaßes werden negative Zahlen vermieden, was die Auswertung übersichtlicher gestaltet.



Abbildung 6-13: Zusammenhang zwischen max. Direktabfluss bzw. max. Ereignisabfluss und max. Niederschlagsintensität am Engebächle.

Das Engebächle weist den geringsten Zusammenhang zwischen Direktabfluss und maximaler Niederschlagsintensität mit $r^2 = 0,35$ auf. Das gleiche Ergebnis ergibt sich für den maximalen Ereignisabfluss mit $r^2 = 0,27$. Zusätzlich kann aus der Abbildung 6-13 entnommen werden, dass das Engebächle die geringsten maximalen Direktabflüsse zu verzeichnen hat.



Abbildung 6-14: Zusammenhang zwischen max. Direktabfluss bzw. max. Ereignisabfluss und max. Niederschlagsintensität am Glasbach.

Der Glasbach zeigt ebenfalls einen mittleren Zusammenhang zwischen maximalem Direktabfluss und maximaler Niederschlagsintensität. Auffällig ist, dass der maximale Ereignisabfluss für alle Ereignisse nur unwesentlich höher als der maximale Direktabfluss liegt. Der Zusammenhang liegt mit $r^2 = 0,50$ für den maximalen Direktabfluss und mit $r^2 = 0,49$ für den maximalen Ereignisabfluss höher als beim Engebächle.



Abbildung 6-15: Zusammenhang zwischen max. Direktabfluss bzw. max. Ereignisabfluss und max. Niederschlagsintensität am Katzensteigbach.

Auch der Katzensteigbach weist eine mittlere Abhängigkeit vom maximalem Direktabfluss von der Niederschlagsintensität mit $r^2 = 0,53$ und für den maximalen Ereignisabfluss mit $r^2 = 0,39$ auf.



Abbildung 6-16: Zusammenhang zwischen max. Direktabfluss bzw. max. Ereignisabfluss und max. Niederschlagsintensität am Selzenbächle.

Das Selzenbächle weist den stärksten Zusammenhang der in Abbildung 6-16 dargestellten Parameter auf. Für die Korrelation zwischen maximalem Direktabfluss mit der maximalen Niederschlagsintensität wird ein Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,80$ erreicht. Für die Korrelation zwischen maximalem Ereignisabfluss und der maximalen Niederschlagsintensität wird die Güte $r^2 = 0,74$ erreicht.



max. Niederschlagsintensität [mm/10min]



Der Zipfeldobelbach weist einen mittleren Zusammenhang zwischen den Parametern maximaler Direktabfluss und maximaler Niederschlagsintensität von r² = 0,59 und zwischen maximalem Ereignisabfluss und maximaler Niederschlagsintensität von r² = 0,52 auf.



max. Direktabfluss [l/s]

Abbildung 6-18: Zusammenhang zwischen maximalem Direktabfluss und der Ereignisdauer.

Die verschiedenen Bäche weisen keinen großen Zusammenhang zwischen dem maximalen Direktabfluss und der Ereignisdauer auf. Abbildung 6-18 bestätigt dies. Es ist festzuhalten, dass sowohl die Plots des Selzenbächle, als auch die des Zipfeldobelbaches einer Art Normalverteilung folgen.



max. Niederschlagsintensität [mm/10min]

Abbildung 6-19: Zusammenhang zwischen maximaler Abkühlung und maximaler Niederschlagsintensität.

In Abbildung 6-19 ist die Abhängigkeit des Parameters maximale Abkühlung von der maximalen Niederschlagsintensität dargestellt. Es ist keine signifikante Abhängigkeit der Parameter zu erkennen (vergleiche Tabelle 6-14). Werden allerdings nur die Punkte bis zu einer maximalen Niederschlagsintensität von 4 mm/10min betrachtet, so erhöht sich das Bestimmtheitsmaß beim Engebächle auf $r^2 = 0,65$, beim Selzenbächle auf $r^2 = 0,44$ und beim Zipfeldobelbach auf $r^2 = 0,67$.



Abbildung 6-20: Zusammenhang zwischen der quantitativen Temperaturänderung und der Niederschlagsmenge.

Das Selzenbächle weist die größte Abhängigkeit zwischen der quantitativen Temperaturänderung und der Niederschlagsmenge mit $r^2 = 0,78$ auf und der Zipfeldobelbach die geringste mit $r^2 = 0,08$. Die übrigen untersuchten Bäche zeigten mittlere Zusammenhänge auf.



Abflussvolumenspende [l/km²]

Abbildung 6-21: Zusammenhang zwischen Abflussvolumenspende und Ereignisdauer.

Aus Abbildung 6-21 geht hervor, dass die Bäche mit den höchstgelegenen Einzugsgebieten den größten Zusammenhang zwischen den Parametern Abflussvolumenspende und Ereignisdauer aufweisen. So liegt das Bestimmtheitsmaß beim Katzensteigbach bei $r^2 = 0,91$ und beim Zipfeldobelbach bei $r^2 = 0,73$. Die Trendgerade des Katzsteigbaches zeigt zudem die größte Steigung.




Einen starken Zusammenhang zwischen Abflussvolumenspende und maximalem Direktabfluss zeigt nur der Glasbach. Die anderen Bäche zeigen einen sehr schwachen Zusammenhang. Gleiches Bild ergibt sich für die Korrelation von Abflussvolumenspende und maximalem Ereignisabfluss.



Abbildung 6-23: Bestimmtheitsmaße verschiedener Korrelationen in Abhängigkeit der verschiedenen Bäche.

In Abbildung 6-23 sind die verschiedenen Bäche nach ihrem Waldanteil, von links nach rechts steigend, angeordnet. Ziel dieser Graphik ist es einen Zusammenhang zwischen Landnutzung und den Zusammenhängen zwischen Niederschlag und Temperaturänderung, Niederschlag und Verdünnungseffekt, maximaler Niederschlagsintensität und Verdünnungseffekt, Abflussvolumenspende und Temperaturänderung und zwischen Niederschlag und Abflussvolumenspende darzustellen. Aus der Abbildung ist zu entnehmen, dass keiner der abgebildeten Zusammenhänge signifikant mit Änderung des Waldanteils steigt bzw. abnimmt.

Allgemein ist zur Statistik zu erwähnen, dass die Parameter Vorereignisabfluss, maximale Abkühlung und der Verdünnungseffekt mit den anderen Parametern nur schwach bis überhaupt nicht korrelieren. Die Beziehung zwischen quantitativer Temperaturänderung und Ereignisabflussvolumen weist mittlere bis starke Zusammenhänge beim Glasbach mit $r^2 = 0,64$ und beim Selzenbächle mit $r^2 = 0,72$ auf. Wird die Beziehung zwischen quantitativer Temperaturänderung und maximalem Direktabfluss betrachtet, so sind mittlere bis hohe Bestimmtheitsmaße beim Engebächle mit $r^2 = 0,44$, beim Glasbach mit $r^2 = 0,58$ und beim Zipfeldobelbach mit $r^2 = 0,88$ zu beobachten. Ähnliches Bild ergibt sich beim maximalen Ereignisabfluss mit oben genanntem Parameter.

 Tabelle 6-13: Korrelationsmatrix der Niederschlagsereignisse Teil1.

	Bäche	Ereignisdauer [min]	Niederschlagsmenge [mm]	Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	Maximale Abkühlung	Quantitative Temperatur Änderung [°C]	Verdünnungseffekt	Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	Ereignisabflussvolumen [m³]	Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	Maximaler Ereignisabfluss [//(skm²)]	Abflussvolumenspende [l/km²]
Ereignisdauer [min]	Engebächle	1,00										
Ereignisdauer [min]	Glasbach	1,00										
Ereignisdauer [min]	Katzensteigbach	1,00										
Ereignisdauer [min]	Selzenbächle	1,00										
Ereignisdauer [min]	Zipfeldobelbach	1,00										
Niederschlagsmenge [mm]	Engebächle	0,00	1,00									
Niederschlagsmenge [mm]	Glasbach	0,67	1,00									
Niederschlagsmenge [mm]	Katzensteigbach	0,60	1,00									
Niederschlagsmenge [mm]	Selzenbächle	0,01	1,00									
Niederschlagsmenge [mm]	Zipfeldobelbach	0,43	1,00									
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	Engebächle	0,00	1,00	1,00								
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	Glasbach	0,09	0,39	1,00								
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	Katzensteigbach	0,36	0,40	1,00								
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	Selzenbächle	0,00	0,14	1,00								
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	Zipfeldobelbach	0,06	0,39	1,00								

Tabelle 6-14: Korrelationsmatrix der Niederschlagsereignisse Teil 2.

	Bäche	Ereignisdauer [min]	Niederschlagsmenge [mm]	Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	Maximale Abkühlung	Quantitative Temperatur Änderung [°C]	Verdünnungseffekt	Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	Ereignisabflussvolumen [m³]	Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²)]	Abflussvolumenspende [l/km²]
Maximale Abkühlung	Engebächle	0,03	0,07	0,10	1,00							
Maximale Abkühlung	Glasbach	0,59	0,56	0,30	1,00							
Maximale Abkühlung	Katzensteigbach	0,04	0,03	0,19	1,00							
Maximale Abkühlung	Selzenbächle	0,25	0,03	0,00	1,00							
Maximale Abkühlung	Zipfeldobelbach	0,01	0,00	0,32	1,00							
Quantitative Temperaturänderung [°C]	Engebächle	0,01	0,35	0,10	0,01	1,00						
Quantitative Temperaturänderung [°C]	Glasbach	0,13	0,45	0,05	0,12	1,00						
Quantitative Temperaturänderung [°C]	Katzensteigbach	0,09	0,28	0,01	0,03	1,00						
Quantitative Temperaturänderung [°C]	Selzenbächle	0,26	0,78	0,16	0,10	1,00						
Quantitative Temperaturänderung [°C]	Zipfeldobelbach	0,15	0,08	0,27	0,20	1,00						
Verdünnungseffekt	Engebächle	0,00	0,58	0,29	0,08	0,03	1,00					
Verdünnungseffekt	Glasbach	0,10	0,15	0,30	0,02	0,06	1,00					
Verdünnungseffekt	Katzensteigbach	0,00	0,16	0,55	0,11	0,09	1,00					
Verdünnungseffekt	Selzenbächle	0,00	0,55	0,32	0,09	0,17	1,00					
Verdünnungseffekt	Zipfeldobelbach	0,09	0,22	0,05	0,01	0,33	1,00					
Vorereignisabfluss [l/(skm ²)]	Engebächle	0,41	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00				
Vorereignisabfluss [l/(skm ²)]	Glasbach	0,21	0,15	0,11	0,10	0,19	0,12	1,00				
Vorereignisabfluss [l/(skm ²)]	Katzensteigbach	0,03	0,08	0,28	0,04	0,02	0,25	1,00				
Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	Selzenbächle	0,17	0,17	0,13	0,10	0,26	0,02	1,00				
Vorereignisabfluss [l/(skm ²)]	Zipfeldobelbach	0,30	0,38	0,27	0,29	0,10	0,17	1,00				

	Bäche	Ereignisda	Niederschl	Maximale Niederschl [mm/10mir	Maximale ,	Quantitativ Änderung	Verdünnur	Vorereigni	Ereignisab	Maximaler [l/(skm²)]	Maximaler [l/(skm²)]	Abflussvol [l/km²]
		uer [min]	lagsmenge [mm]	lagsintensität ¹]	Abkühlung	/e Temperatur [°C]	ngseffekt	sabfluss [l/(skm²)]	flussvolumen [m³]	Direktabfluss	Ereignisabfluss	umenspende
Ereignisabflussvolumen [m ³]	Engebächle	0,62	0,68	0,00	0,15	0,20	0,01	0,22	1,00			
Ereignisabflussvolumen [m ³]	Glasbach	0,43	0,64	0,36	0,21	0,64	0,15	0,01	1,00			
Ereignisabflussvolumen [m3]	Katzensteigbach	0,91	0,64	0,01	0,03	0,11	0,00	0,03	1,00			
Ereignisabflussvolumen [m3]	Selzenbächle	0,40	0,42	0,03	0,06	0,72	0,08	0,10	1,00			
Ereignisabflussvolumen [m3]	Zipfeldobelbach	0,73	0,50	0,01	0,00	0,03	0,20	0,21	1,00			
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	Engebächle	0,01	0,75	0,35	0,30	0,44	0,17	0,00	0,18	1,00		
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	Glasbach	0,26	0,62	0,50	0,25	0,58	0,17	0,02	0,78	1,00		
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	Katzensteigbach	0,09	0,31	0,53	0,01	0,21	0,41	0,14	0,13	1,00		
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	Selzenbächle	0,05	0,43	0,80	0,07	0,01	0,34	0,12	0,07	1,00		
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	Zipfeldobelbach	0,10	0,07	0,59	0,03	0,88	0,16	0,18	0,00	1,00		
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²]	Engebächle	0,12	0,81	0,27	0,23	0,37	0,14	0,16	0,04	0,84	1,00	
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²]	Glasbach	0,24	0,60	0,49	0,24	0,59	0,16	0,01	0,78	1,00	1,00	
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²]	Katzensteigbach	0,13	0,27	0,39	0,02	0,16	0,29	0,01	0,20	0,93	1,00	
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²]	Selzenbächle	0,11	0,36	0,74	0,04	0,00	0,34	0,02	0,05	0,95	1,00	
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²]	Zipfeldobelbach	0,19	0,03	0,52	0,01	0,90	0,12	0,07	0,01	0,97	1,00	
Abflussvolumenspende [l/km ²]	Engebächle	0,62	0,83	0,00	0,15	0,20	0,01	0,22	1,00	0,18	0,04	1,00
Abflussvolumenspende [l/km ²]	Glasbach	0,43	0,64	0,36	0,21	0,64	0,15	0,01	1,00	0,78	0,78	1,00
Abflussvolumenspende [l/km ²]	Katzensteigbach	0,91	0,64	0,01	0,03	0,11	0,00	0,03	1,00	0,13	0,20	1,00
Abflussvolumenspende [l/km ²]	Selzenbächle	0,40	0,42	0,03	0,06	0,72	0,08	0,10	1,00	0,07	0,05	1,00
Abflussvolumenspende [l/km ²]	Zipfeldobelbach	0.73	0.50	0.01	0.00	0.03	0.20	0.21	1.00	0.00	0.01	1.00

 Tabelle 6-15: Korrelationsmatrix der Niederschlagsereignisse Teil 3.

6.5 Fazit und Diskussion

Wie oben erwähnt, gibt es keine feste Grenze, wie groß ein Stichprobenumfang für eine Korrelationsmatrix sein muss. Da für die Matrix nur elf Ereignisse pro Einzugsgebiet vorliegen, ist die angewandte Statistik sicherlich nur begrenzt geeignet, um generelle Aussagen zu treffen. Eine längere Messperiode würde die Aussagekraft erhöhen.

Mit Hilfe dieser Korrelationsmatrix kann versucht werden die Gebietsdynamik prozessnnah zu beschreiben. So können die Zusammenhänge der ermittelten Parameter dargestellt und interpretiert werden.

Es lässt sich kein Einfluss der Landnutzung auf die ausgewerteten Parameter nachweisen. Der Parameter maximale Abkühlung führte nicht zu neuen Erkenntnissen hinsichtlich einem unterschiedlichen Verhalten der stärker bewaldeten Einzugsgebiete gegenüber denen mit hoher Weidelandnutzung. Die Verdünnung konnte nur halbquantitativ betrachtet werden, mit geeigneter Messtechnik verspricht dies ein interessanter Parameter zu sein, mit dem beispielsweise Fäkalabschwemmungen nach Starkniederschlagsereignissen quantifiziert werden können oder Ganglinienseparationen durchgeführt werden können.

Anhand der Temperaturänderung lassen sich verschiedene Niederschlagsereignisse und deren Einfluss auf den Abfluss definieren. Aufgrund dessen wird er als ein aussagekräftiger Parameter erachtet. Jedoch konnten hier nicht für jedes Ereignis Daten verwendet werden (vergleiche hierzu die Tabellen der Niederschlagsereignisse im Anhang), weshalb die Bestimmtheitsmaße als nicht signifikant erachtet werden.

7 Schlussbemerkungen und Empfehlungen

Ziel dieser Arbeit war es Unterschiede der untersuchten Gebiete hinsichtlich ihres Temperatur-, Leitfähigkeits-, Ionen- und Abflussverhalten während kontinuierlicher Messung herauszuarbeiten, um anschließend die Ergebnisse auf ihren Zusammenhang mit der Landnutzung zu überprüfen.

7.1 Messmethodik

Die ausgewählten Sonden eignen sich nur bedingt für diese Art von experimenteller Arbeit. Es sollte versucht werden, Luftdruck und Wasserstand am gleichen Ort zu messen (vergleiche 2.1.4). Zusätzlich sollten die Sonden in stark beruhigte Zonen des Abflussquerschnittes eingebracht werden. Der Abflussquerschnitt sollte aus einheitlichem Material bzw. aus Materialien mit gleichem Rauhigkeitsbeiwert erstellt werden. Mit der Leitfähigkeitsmessung nachgebildet Tendenzen konnten die langfristigen werden. Die Ereignisauswertung erschwerte sich aufgrund der Messungenauigkeit. Es gilt speziell bei der Leitfähigkeit zu prüfen, beispielsweise über Vergleichsmessungen mit anderen Sonden, ob diese ursprünglich fürs Grundwasser entwickelten Sonden für Messungen in Oberflächengewässern geeignet sind. Die Wassertemperatur konnte sehr gut nachgebildet werden. Um die Prozesse, die den Tagesgang verursachen, erfassen zu können wäre eine räumlich und zeitlich hoch aufgelöste kontinuierliche Temperaturmessung entlang eines Gerinnes sinnvoll. So könnte die Frage geklärt werden, ob die am Pegel gemessene Temperatur im Wesentlichen von den Verhältnissen der direkten Umgebung geprägt wird, oder ob das gesamte Einzugsgebiet darauf einen großen Einfluss nimmt.

7.2 Stichtagsbeprobung

Die Ergebnisse aus der Analytik der Wasserproben spiegelt die anthropogene Nutzung der Einzugsgebiete wieder. Andere Untersuchungen (u. a. KAUPPI 1979) ermittelten meist lineare Zusammenhänge zwischen dem Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Einzugsgebiet und den Nund P-Konzentrationen. Das Selzenbächle mit dem größten Anteil an Weidelandnutzung wies die größten Nitrat- und Chloridkonzentrationen auf. Auf das Verhalten der gestesteten Ionen während Ereignissen kann nicht geschlossen werden, da diese nicht explizit beprobt wurden. Dies wäre sicherlich noch eine sinnvolle Ergänzung der Gebietsarbeit. Des Weiteren könnten dadurch fundierte Kenntnisse der Abflussbildung der einzelnen Gebiete dargelegt werden. Alle gemessenen Werte

zeugen von einer geringen Belastung der Bäche. Durch die Stichtagsbeprobungen konnten zwei Cluster herausgearbeitet werden. Die höher gelegenen Einzugsgebiete Katzensteig und Zipfeldobel weisen ein anderes Verhalten auf als die Gebiete Glasbach, Selzenbächle und Engebächle. Die Schwankungen der Calcium- und Sulfatkonzentration über die gesamte Messperiode beim Engebächle und beim Glasbach konnte der mit kontinuierlichen Leitfähigkeitsmessung nachgebildet werden. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Waldeinzugsgebiete eine andere Abflussdynamik aufweisen als das Selzenbächle mit nur ca. 25 % Waldanteil.

7.3 Temperatur- und Leitfähigkeitslängsprofile

Es konnte die Abhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit vom Abfluss nachgewiesen werden. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass die Leitfähigkeit im Längsverlauf nach unten zunimmt. Dies wird durch einen größeren Anteil an höher mineralisiertem Grundwasser im flacheren Teil der untersuchten Einzugsgebiete begründet. Durch das Temperaturprofil können Grundwasserzutritte lokalisiert werden. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass sich das Selzenbächle, dessen Gerinne weniger Beschattung aufweist, schneller erwärmt als das Engebächle. Dies stimmt mit den Untersuchungen von TETI (2004) überein. Die Methode der Längsprofile bei unterschiedlichen Abflüssen wird als geeignet erachtet, um Informationen über die Abflussbildung der Einzugsgebiete zu erhalten. Wie schon in der Untersuchung von MEYER (2001) konnten mit den Längsprofilen verschiedene Teilgebiete charakterisiert werden.

7.4 Unterschiede zwischen den Einzugsgebieten

Die Einzugsgebiete unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Landnutzung. Es wurde versucht eine Dynamik bzw. eine Systematik im Abflussverhalten in niederschlagsfreien Perioden und anhand von verschiedenen Ereignissen in Abhängigkeit des Waldanteils herauszuarbeiten. Wichtig ist, dass keine generellen Aussagen getroffen werden können, da die zugrunde liegende Datenreihe mit Werten aus fünf Monaten relativ kurz ist.

Wird das Cluster Glasbach, Engebächle und Selzenbächle betrachtet, zeigt sich über die Schwankungen der Leitfähigkeit und der Ionenkonzentrationen, dass sich die stärker bewaldeten Bäche durch ihre Abflussdynamik vom Selzenbächle unterscheiden. Alle Waldgebiete zeigten durch ihre größere Retention ein dämpfendes Verhalten auf den maximalen Direktabfluss. Zusätzlich bedarf es in den stärker bewaldeten Gebieten einer größeren Niederschlagsmenge um eine Abflussreaktion zu bewirken, als dies bei den Gebieten mit höherer Weidelandnutzung der Fall ist. Werden die untersuchten niederschlagsfreien Perioden bei den beiden verschiedenen Cluster betrachtet, so ist festzustellen, dass sich diese Perioden stärker in den unteren Lagen (Glasbach, Selzenbächle und Engebächle) auswirken. Der MQ war in den bewaldeten Gebieten durchweg geringer, ebenso der NQ. Durch die Verhältnisse von HQ zu HQ, MQ zu MQ und NQ zu NQ beim Selzenbächle und Engebächle zeigt sich, dass der Unterschied vom HQ- über das MQ- zum NQ-Verhältnis größer wird. Gleiches Bild zeigt sich beim Vergleich des Selzenbächles mit dem Glasbach. Daraus ergibt sich, dass der Wald Niedrigwasser verschärfend wirkt.

Durch diese Arbeit konnte ein wesentlicher Beitrag zum besseren Verständnis von längerfristigeren Prozessen in der Abflussdynamik geleistet werden.

Literaturverzeichnis

- AL BAHARANI, S. 1977: Untersuchungen zum Wasserhaushalt und Abflussverhalten der Schwarzwaldflüsse zwischen Wiese und Kinzig; Dissertation; Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- BARUS, T.A. 1996: Ökophysikalische und chemische Faktoren des Wilhelmshäuser Bachsystems und ihre Veränderung durch Nutzungseingriffe; Ökologie und Umweltsicherung; Dissertation der Universität Gh Kassel.
- BRAUKMANN, U. 1998: Hydrochemische und biologische Merkmale regionaler Bachtypen in Baden-Württemberg; Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg; Habil. der Universität Karlsruhe.
- BREHM, J. & MEIJERLING, M.P.D. 1990: Fließgewässerkunde; 2. Auflage; Quelle & Meyer Verlag, Heidelberg-Wiesbaden.
- DIDSZUN, J. 2004: Experimentelle Untersuchungen zur Skalenabhängigkeit der Abflussbildung; Dissertation am Institut für Hydrologie; Freiburg i.Br..
- DOSTINE, P. 2001: Assessment of the Ecological Condition of Freshwater Streams in the Darwin Region; Evidence from survey of macroinvertebrate communities and water quality in the early dry season 2001; Ministry of agriculture and forestry; New Zealand
- DVWK Merkblätter 228/1996: Aussagekraft von Gewässergüteparametern in Fließgewässern; Teil II Summenparameter für Kohlenstoffverbindungen und sauerstoffverbrauchende Substanzen, Mineralstoffe, Organische Schadstoffe, Hygienische Kennwerte; Teil III Hinweise zur Probenahme für physikalisch- chemische Untersuchungen.
- DVWK Merkblätter 227/1993: Aussagekraft von Gewässergüteparametern in Fließgewässern; Teil I Allgemeine Kenngrößen, Nährstoffe, Spurenstoffe und anorganische Schadstoffe, Biologische Kenngrößen.
- DYCK & PESCHKE 1995: Grundlagen der Hydrologie; Verlag für Bauwesen GmbH Berlin.

- EGGER, U., 2003: Erstellung eines Entwicklungskonzepts für ein städtisches Fließgewässer am Beispiel des Glasbaches in Freiburg-Herdern; Diplomarbeit; Institut für Hydrologie; Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- ENGLER, A. 1919: Untersuchungen über den Einfluß des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mitteilungen der Schweizerischen Zentralanstalt für das Forstliche Versuchswesen Band XII. Zürich.
- 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.
- FEGER, K.H., LORENZ, K., RASPE, S., ARMBRUSTER, M. 2000: Mittel- bis langfristige Auswirkungen von Kompensations- bzw. Bodenschutzkalkungen auf die Pedo- und Hydrosphäre; Projektträgerschaft Programm Lebensgrundlagen Umwelt und ihre Sicherung; Forschungsbericht FZKA-BWPLUS; Schlussbericht; Baden-Württemberg.
- FÖRSTER, E., RÖNZ, B. 1979: Methoden der Korrelations- und Regressionsanalyse ;Verlag die Wissenschaft; Berlin.
- FRANKENBERGER, J. 2000: Land Use & Water Quality; Purdue University Cooperative Extension Service; West Lafayette IN 47907.
- GÄBLER, G. 1995: Entwicklung eines Messsets zur Abflussganglinienseparation, Diplomarbeit; Institut für Hydrologie Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- GEOLOGISCHE KARTE von Freiburg i. Br. und Umgebung 1:50.000, 1981: Geologisches Landesamt Baden-Württemberg. Verbesserter Nachdruck, Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart.
- GEOLOGISCHE KARTE von Freiburg i. Br. und Umgebung 1:50.000, 1996: Geologisches Landesamt Baden-Württemberg. Verbesserter Nachdruck, Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart.
- GEYER, O.F. & GWINNER, M.P. 1991: Geologie von Baden-Württemberg.4.Auflage, Schweitzerbart´sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

- GUWANG, B., 2004: Hydrologische Prozesse im Stadtgebiet von Freiburg und deren adäquaten Modellierung; Diplomarbeit; Institut für Hydrologie; Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- HÄDRICH, F., MOLL, M. & STAHR, K. 1980: Bodenentwicklung und Bodentypen. In: Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald, Land vom Rhein über den Schwarzwald zur Baar: 42-53, Karl Schillinger; Freiburg.
- HÜTTER, L.A. 1990: Wasser und Wasseruntersuchung; 4. Auflage; Salle und Sauerländer, Frankfurt a.M..
- JOHNSON, E.A., MEGINNIS, H.G., 1960: Effect of altering forest vegetation on low flows of small streams, in: Publication no. 51 of the I.A.S.H. Commission of Surface Waters, pp. 257-266.
- Käss 1992: Lehrbuch der Hydrogeologie Band 9; Geohydrologische Markierungstechnik; Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- KARL, J.; TOLDRIAN, H. 1973: Eine transportable Beregnungsanlage für die Messung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag. Wasser & Boden 3
- KAUPPI, L. 1979: Effects of land use on the diffuse load of phosphorus and nitrogen. Nordic Hydrology, 79-88.
- KEHINDE, M.O. ET AL. 1992: Natural tracers as investigatory tools in groundwater development: A case study from the Cretaceous Bida Basin, Central Nigeria; Kehinde, M.O., Löhnert, E.P.; In: Tracer Hydrology; Edited by Hötzl, A. & Werner, A., Balkeman, A.A.; Rotterdam.
- KENNEL, M. 2004: Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wald und Forstwirtschaft in Bayern; Herausgeber: Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft; Freising.
- KRAUS, H. 2000: Die Atmosphäre der Erde; Eine Einführung in die Meteorologie;Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft GmbH;Braunschweig/Wiesbaden.
- LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1987: Topographische Karte 1:25000;Blatt 7912: Freiburg im Breisgau Nordwest.

LECHER ET AL 2001: Taschenbuch der Wasserwirtschaft; Parey Buchverlag Berlin.

- LEIBUNDGUT, CH. 1984: Zur Erfassung hydrologischer Messwerte und deren Übertragung auf Einzugsgebiete verschiedener Dimensionen; Geographisches Institut der Universität Bern, S. 141-170.
- MANIAK, U. 1997: Hydrologie und Wasserwirtschaft; Eine Einführung für Ingenieure; Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- MENDEL, H. G. 2000: Elemente des Wasserkreislaufs eine kommentierte Bibliographie zur Abflussbildung. Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg), Berlin, 244 S.
- MEYER, I. 2001: Experimentelle Untersuchungen zur Abflussbildung im Rotherdbachgebiet; Diplomarbeit am Institut für Hydrologie; Freiburg i. Br..
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG; LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.) 2001: WaBoA digital. Stuttgart
- MÖßMER, R. (2003): Vorbeugender Hochwasserschutz im Wald -Herausforderung für die Forstwirtschaft.AFZ/Der Wald 17,S. 875 – 877.

MORTIMER, C.E. 1976: Chemie. – 2. Auflage, Thieme-Verlag, Stuttgart.

- NIEHOFF, D. 2001: Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala; Dissertation an der Mathematisch Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Potsdam.
- PETERS, N.E., RATCLIFFE, E.B., TRANTER, M. 1998: Tracing solute mobility at the Panola Mountain Research Watershed, Georgia, USA: variations in Na+, Cl- and H4SiO4 concentrations; IAHS-Pub.; zitiert in der Dissertation von Stefan Uhlenbrook 1999; Freiburger Schriften; Institut der Hydrologie Freiburg i.Br..
- REHFUESS, K. 1990: Waldböden, Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung, 2. völlig bearbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Paul Parey, Hamburg.

- RINGROSE, C., MEYER, S., BREN, L.J., NEILSEN, W.A. 2001: Hydrology of small catchments in the Warra LTER Site: objectives and preliminary analysis; School of Forestry, Creswick 3363.
- ROEDEL, W. 1992: Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre; Springer Verlag Berlin Heidelberg
- SCHACHTSCHABEL, H ET AL. 1992: Lehrbuch der Bodenkunde, 13. durchgesehene Auflage; Enke Verlag Stuttgart.
- SCHLITTGEN, R. 2000: Einführung in die Statistik. 9. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München.
- SCHRÖDER 1994: Technische Hydraulik; Kompendium für den Wasserbau; SpringerVerlag Berlin Heidelberg.
- SCHWEGLER M., 1995: Klassifizierung von Quellen nach Hydrochemie und Herkunftsräumen im Einzugsgebiet der Brugga (Südschwarzwald); Diplomarbeit; Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- SCHWOERBEL, J. 1987: Einführung in die Limnologie; 6. Auflage; Gustav Fischer Verlag; Jena-Stuttgart.
- SCHWOERBEL, J. 1993: Einführung in die Limnologie; 7. Auflage; Gustav Fischer Verlag; Jena-Stuttgart.
- STAHR, K. 1979: Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für die Bodenbildung und Standorteigenschaften im Südschwarzwald. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen 9, Freiburg.
- TETI, P. 2004: Shade and Stream Temperature; B.C. Ministry of Water, Land and Air Protection; Journal of Forest Research.
- TRENKLE, H., VON RUDOLF, H. 1989: Das Klima im Schwarzwald, In: Der Schwarzwald, Beiträge zur Landeskunde Hrsg.: Liehl E. und Sick, W.D.; Konkordia Verlag GmbH, Bühl/Baden.
- UHLENBROOK, S. 1999: Untersuchungen und Modellierung der Abflussbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet, Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 10; Institut für Hydrologie der Universität Freiburg; Freiburg i.Br..

- WABOA 2004: Wasser und Boden Atlas von Baden Württemberg; Landesamt für Umweltschutz Karlruhe; Institut für Hydrologie Freiburg i.Br..
- WENNINGER, J. 2002: Experimentelle Untersuchung zur Dynamik von Hanggrundwasser und dessen Übertritt in die Talaue und den Vorfluter im Bruggaeinzugsgebiet; Diplomarbeit am Institut für Hydrologie, Freiburg.
- WETZEL, K.-F. 2003: Runoff production processes in small alpine catchments within the unconsolidated Pleistocene sediments of the Lainbach area (Upper Bavaria); In: Hydrological Processes 17; S. 2463 – 2483.
- WOLOCK, D.M. & HORNBERGER, G.M. 1998: Relationship of catchment topographic and soil hydraulic characteristics with surface water acidification; IAHS-Pub.; zitiert in der Dissertation von Stefan Uhlenbrook 1999; Freiburger Schriften; Institut der Hydrologie Freiburg i.Br..

Sonstige Quellen:

http://www.klimadiagramme.de/Bawue/freiburg.html: Klimadiagramme (Stand 19.01.2004).

http://www.verwaltungsgemeinschaft-hexental.de.

- http://www.bwg.admin.ch/themen/wasser/d/nwstat.htm: Bundesamt für Wasser und Geologie BWG.
- http://www.mineral.tu-freiberg.de: TU Freiberg; Untersuchungen zum Rothschönberger Stolln.

WASSERMEISTER OBERRIED 2004: Persönliche Kommunikation.

FORSTAMT FREIBURG 2004: Persönliche Kommunikation.

Anhang



Abbildung A 1: Portabler Abflussmesskoffer.



Abbildung A 2: Tracereinspeisung am Zipfeldobelbach.



Abbildung A 3: Niederschlagsmessgerät beim Ringlihof.



Abbildung A 4: Abflussereignis am Selzenbächle.





Abbildung A 5: Auslauflinie Engebächle.

AL Katzensteigbach



Abbildung A 6: Auslauflinie Katzensteigbach.

AL Zipfeldobelbach



Abbildung A 7: Auslauflinie Zipfeldobelbach.



AL Selzenbächle

Abbildung A 8: Auslauflinie Selzenbächle.

AL Glasbach



Abbildung A 9: Auslauflinie Glasbach.





Abbildung A 10: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der niederschlagsfreien Periode 2 am Glasbach

Lf-Q Glasbach niederschlagsfreie Periode 3







Abbildung A 12: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der niederschlagsfreien Periode 2 am Selzenbächle.

Lf-Q Selzenbächle niederschlagsfreie Periode 3



Abbildung A 13: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der niederschlagsfreien Periode 3 am Selzenbächle.



Abbildung A 14: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der niederschlagsfreien Periode 2 am Zipfeldobelbach.

Lf-Q Zipfeldobelbach niederschlagsfreie Periode 3



Abbildung A 15: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der niederschlagsfreien Periode 3 am Zipfeldobelbach.



Abbildung A 16: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der niederschlagsfreien Periode 2 am Katzensteigbach.

•



Abbildung A 17: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der niederschlagsfreien Periode 2 am Engebächle.



Lf-Q Engebächle niederschlagsfreie Periode 3

Abbildung A 18: Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Abfluss in der niederschlagsfreien Periode 3 am Engebächle.

 Tabelle A 1: Korrelationsmatrix der niederschlagsfreien Perioden Teil 1.

	Bäche	Trockenperiodendauer [min]	Exponent der Trendlinie des Abflusses	Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	Vorereignisabfluss	Ereignisendabfluss	Differenz Anfangs- Endabfluss	Prozent Endabfluss von Anfangsabfluss	Mittlere Amplitudenverschiebung [min]	Maximale Amplitude der Wassertemperatur	Maximale Wassertemperatur	Maximale Lufttemperatur
Trockenperiodendauer [min]	Engebächle	1,00										
Trockenperiodendauer [min]	Glasbach	1,00										
Trockenperiodendauer [min]	Katzensteigbach	1,00										
Trockenperiodendauer [min]	Selzenbächle	1,00										
Trockenperiodendauer [min]	Zipfeldobelbach	1,00										
Exponent der Trendlinie des Abflusses	Engebächle	0,19	1,00									
Exponent der Trendlinie des Abflusses	Glasbach	0,50	1,00									
Exponent der Trendlinie des Abflusses	Katzensteigbach	0,68	1,00									
Exponent der Trendlinie des Abflusses	Selzenbächle	0,77	1,00									
Exponent der Trendlinie des Abflusses	Zipfeldobelbach	0,69	1,00									
Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	Engebächle	0,23	1,00	1,00								
Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	Glasbach	0,05	0,73	1,00								
Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	Katzensteigbach	0,00	0,35	1,00								
Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	Selzenbächle	0,01	0,15	1,00								
Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	Zipfeldobelbach	0,1	0,07	1,00								

Tabelle A 2: Korrelationsmatrix der niederschlagsfreien Perioden Teil 2.

	Bäche	Trockenperiodendauer [min]	Exponent der Trendlinie des Abflusses	Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	Vorereignisabfluss	Ereignisendabfluss	Differenz Anfangs- Endabfluss	Prozent Endabfluss von Anfangsabfluss	Mittlere Amplitudenverschiebung [min]	Maximale Amplitude der Wassertemperatur	Maximale Wassertemperatur	Maximale Lufttemperatur
Vorereignisabfluss	Engebächle	0,22	1,00	1,00	1,00							
Vorereignisabfluss	Glasbach	0,06	0,74	1,00	1,00							
Vorereignisabfluss	Katzensteigbach	0,65	1,00	0,38	1,00							
Vorereignisabfluss	Selzenbächle	0,21	0,00	0,88	1,00							
Vorereignisabfluss	Zipfeldobelbach	0,34	0,00	0,91	1,00							
Ereignisendabfluss	Engebächle	0,87	0,53	0,58	0,58	1,00						
Ereignisendabfluss	Glasbach	0,86	0,16	0,02	0,02	1,00						
Ereignisendabfluss	Katzensteigbach	0,24	0,80	0,79	0,83	1,00						
Ereignisendabfluss	Selzenbächle	0,38	0,02	0,73	0,96	1,00						
Ereignisendabfluss	Zipfeldobelbach	0,54	0,06	0,76	0,96	1,00						
Differenz Anfangs- Endabfluss	Engebächle	0,95	0,05	0,07	0,07	0,69	1,00					
Differenz Anfangs- Endabfluss	Glasbach	0,11	0,19	0,71	0,69	0,43	1,00					
Differenz Anfangs- Endabfluss	Katzensteigbach	0,99	0,78	0,02	0,75	0,34	1,00					
Differenz Anfangs- Endabfluss	Selzenbächle	0,92	0,95	0,03	0,04	0,14	1,00					
Differenz Anfangs- Endabfluss	Zipfeldobelbach	0,80	0,98	0,02	0,02	0,13	1,00					
Prozent End- von Anfangsabfluss	Engebächle	1,00	0,21	0,25	0,25	0,89	0,94	1,00				
Prozent End- von Anfangsabfluss	Glasbach	0,16	0,14	0,64	0,62	0,50	1,00	1,00				
Prozent End- von Anfangsabfluss	Katzensteigbach	0,79	0,23	0,18	0,20	0,00	0,70	1,00				
Prozent End- von Anfangsabfluss	Selzenbächle	0,99	0,67	0,05	0,30	0,49	0,85	1,00				
Prozent End- von Anfangsabfluss	Zipfeldobelbach	0,66	1,00	0,09	0,00	0,04	0,98	1,00				

Tabelle A 3: Korrelationsmatrix der niederschlagsfreien Perioden Teil 3.

	Bäche	Trockenperiodendauer [min]	Exponent der Trendlinie des Abflusses	Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	Vorereignisabfluss	Ereignisendabfluss	Differenz Anfangs- Endabfluss	Prozent Endabfluss von Anfangsabfluss	Mittlere Amplitudenverschiebung [min]	Maximale Amplitude der Wassertemperatur	Maximale Wassertemperatur	Maximale Lufttemperatur
Mittlere Amplitudenverschiebung	Engebächle	0,90	0,02	0,03	0,03	0,59	0,99	0,88	1,00			
Mittlere Amplitudenverschiebung	Glasbach	0,81	0,89	0,40	0,42	0,45	0,01	0,00	1,00			
Mittlere Amplitudenverschiebung	Katzensteigbach	0,93	0,43	0,05	0,40	0,06	0,87	0,96	1,00			
Mittlere Amplitudenverschiebung	Selzenbächle	0,87	0,40	0,22	0,56	0,74	0,63	0,93	1,00			
Mittlere Amplitudenverschiebung	Zipfeldobelbach	1,00	0,75	0,06	0,28	0,48	0,85	0,72	1,00			
Max Amplitude der Wassertemperatur	Engebächle	0,85	0,57	0,61	0,61	1,00	0,66	0,87	0,56	1,00		
Max Amplitude der Wassertemperatur	Glasbach	0,21	0,91	0,94	0,95	0,01	0,47	0,40	0,64	1,00		
Max Amplitude der Wassertemperatur	Katzensteigbach	0,64	1,00	0,40	1,00	0,84	0,74	0,19	0,38	1,00		
Max Amplitude der Wassertemperatur	Selzenbächle	0,22	0,00	0,87	1,00	0,97	0,04	0,32	0,58	1,00		
Max Amplitude der Wassertemperatur	Zipfeldobelbach	0,66	0,12	0,66	0,90	0,99	0,21	0,10	0,59	1,00		
Maximale Wassertemperatur	Engebächle	0,36	0,21	0,17	0,18	0,07	0,58	0,33	0,68	0,06	1,00	
Maximale Wassertemperatur	Glasbach	0,29	0,95	0,89	0,90	0,04	0,38	0,31	0,73	0,99	1,00	
Maximale Wassertemperatur	Katzensteigbach	0,01	0,22	0,98	0,24	0,66	0,00	0,31	0,13	0,26	1,00	
Maximale Wassertemperatur	Selzenbächle	0,19	0,00	0,89	1,00	0,95	0,03	0,28	0,54	1,00	1,00	
Maximale Wassertemperatur	Zipfeldobelbach	0,52	0,04	0,78	0,97	1,00	0,11	0,03	0,45	0,98	1,00	
Maximale Lufttemperatur	Engebächle	0,44	0,15	0,12	0,12	0,12	0,66	0,41	0,75	0,10	0,99	1,00
Maximale Lufttemperatur	Glasbach	0,44	1,00	0,78	0,80	0,11	0,24	0,18	0,85	0,94	0,98	1,00
Maximale Lufttemperatur	Katzensteigbach	0,29	0,00	0,67	0,00	0,22	0,20	0,75	0,55	0,01	0,80	1,00
Maximale Lufttemperatur	Selzenbächle	0,44	0,05	0,68	0,94	1,00	0,18	0,55	0,79	0,95	0,93	1,00
Maximale Lufttemperatur	Zipfeldobelbach	0,29	0,00	0,93	1,00	0,94	0,01	0,00	0,24	0,87	0,95	1,00

Tabelle A 4: Korrelationsmatrix für die Trockenperiode 2003 am Glasbach.

	Bäche	Trockenperiodendauer [min]	Exponent der Trendlinie des Abflusses	Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	Vorereignisabfluss	Ereignisendabfluss	Differenz Anfangs- Endabfluss	Prozent Endabfluss von Anfangsabfluss	Mittlere Amplitudenverschiebung [min]	Maximale Amplitude der Wassertemperatur	Maximale Wassertemperatur	Maximale Lufttemperatur
Trockenperiodendauer [min]	Glasbach 2003	1,00										
Exponent der Trendlinie des Abflusses	Glasbach 2003	0,02	1,00									
Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	Glasbach 2003	0,98	0,07	1,00								
Vorereignisabfluss	Glasbach 2003	0,05	0,99	0,12	1,00							
Ereignisendabfluss	Glasbach 2003	0,65	0,22	0,53	0,15	1,00						
Differenz Anfangs- Endabfluss	Glasbach 2003	0,01	0,94	0,00	0,89	0,46	1,00					
Prozent End- von Anfangsabfluss	Glasbach 2003	0,05	0,87	0,01	0,81	0,57	0,99	1,00				
Mittlere Amplitudenverschiebung	Glasbach 2003	0,86	0,25	0,94	0,33	0,28	0,07	0,03	1,00			
Max Amplitude der Wassertemperatur	Glasbach 2003	0,12	0,96	0,21	0,99	0,08	0,80	0,71	0,45	1,00		
Maximale Wassertemperatur	Glasbach 2003	0,01	1,00	0,04	0,98	0,28	0,97	0,91	0,19	0,93	1,00	
Maximale Lufttemperatur	Glasbach 2003	0,18	0,69	0,10	0,61	0,77	0,89	0,95	0,00	0,49	0,76	1,00

Tabelle A 5: Korrelationsmatrix für die niederschlagsfreien Perioden von 1995 bis 1997 am Katzensteigbach.

	Bäche	Trockenperiodendauer [min]	Exponent der Trendlinie des Abflusses	Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	Vorereignisabfluss	Ereignisendabfluss	Differenz Anfangs- Endabfluss	Prozent Endabfluss von Anfangsabfluss	wittiere Amplitudenverschiebung [min]	Maximale Amplitude der Wassertemperatur	Maximale Wassertemperatur	Maximale Lufttemperatur
Trockenperiodendauer [min]	Katzensteigbach 1995-1997	1,00										
Exponent der Trendlinie des Abflusses	Katzensteigbach 1995-1997	0,90	1,00									
Steigung der Trendgeraden der Wassertemperatur	Katzensteigbach 1995-1997	0,83	0,99	1,00								
Vorereignisabfluss	Katzensteigbach 1995-1997	0,34	0,08	0,04	1,00							
Ereignisendabfluss	Katzensteigbach 1995-1997	0,68	0,93	0,97	0,00	1,00						
Differenz Anfangs- Endabfluss	Katzensteigbach 1995-1997	0,76	0,44	0,34	0,83	0,19	1,00					
Prozent End- von Anfangsabfluss	Katzensteigbach 1995-1997	0,90	0,63	0,53	0,66	0,36	0,96	1,00				
Mittlere Amplitudenverschiebung	Katzensteigbach 1995-1997	0,42	0,14	0,08	0,99	0,01	0,88	0,74	1,00			
Max Amplitude der Wassertemperatur	Katzensteigbach 1995-1997	0,81	0,98	1,00	0,03	0,98	0,32	0,50	0,06	1,00		
Maximale Wassertemperatur	Katzensteigbach 1995-1997	0,88	0,60	0,51	0,68	0,34	0,97	1,00	0,76	0,48	1,00	
Maximale Lufttemperatur	Katzensteigbach 1995-1997	0,89	0,62	0,52	0,67	0,35	0,97	1,00	0,75	0,49	1,00	1,00

Tabelle A 6: Parameter Niederschlagsereignis 1.

	Katzensteigbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle	Glasbach
Niederschlagsdauer [min]	130	130	150	150	110
Gesamtereignisdauer [min]	1630	580	1350	430	670
Niederschlagsmenge [mm]	1,90	1,90	1,81	1,81	1,60
Max Niederschlagsintensität [mm/10min]	0,40	0,40	0,53	0,53	0,40
Maximale Abkühlung [°C]	9,20	4,21	6,53	2,54	3,88
Quantitative Temperaturänderung [°C]					
Verdünnungseffekt	0	-1	1	1	1
Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	35,65	26,26	7,05	17,99	5,12
Ereignisabflussvolumen [m³]	41 907	2 262	13 203	720	64
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	4,29	4,16	1,50	2,15	1,02
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²)]	39,94	30,41	8,56	20,14	6,14
Abflussvolumenspende [l/km ²]	30,59	1,93	7,68	0,36	0,05

	Katzensteigbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle	Glasbach
Niederschlagsdauer [min]	1030	1030	660	660	560
Gesamtereignisdauer [min]	1570	1690	1910	1400	1860
Niederschlagsmenge [mm]	16,60	16,60	21,63	21,63	15,00
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	2,40	2,40	1,49	1,49	1,80
Maximale Abkühlung [°C]	6,35	7,00	8,76	8,84	8,90
Quantitative Temperaturänderung [°C]			0,95		
Verdünnungseffekt	1	3	3	3	3
Vorereignisabfluss [l/(skm ²)]	21,07	21,46	3,40	12,08	2,48
Ereignisabflussvolumen [m³]	105 801	67 993	80 024	83 535	46 464
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	18,14	15,53	7,42	12,87	7,93
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²)]	39.20	36.98	10.82	24.94	10.41
Abflussvolumenspende [l/km ²]	77,23	58,11	46,53	41,98	33,19

Tabelle A 7: Parameter Niederschlagsereignis 2.

Tabelle A 8: Parameter Niederschlagsereignis 3.

	Katzensteigbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle	Glasbach
Niederschlagsdauer [min]	2000	2000	1230	1230	900
Gesamtereignisdauer [min]	3410	2210	2410	2170	3590
Niederschlagsmenge [mm]	20,90	20,90	26,33	26,33	24,20
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	2,30	2,30	9,86	9,86	6,40
Maximale Abkühlung [°C]	7,68	6,62	9,01	5,62	10,40
Quantitative Temperaturänderung [°C]	-0,11		-8,52	-2,98	-9,74
Verdünnungseffekt	-1	1	3	3	3
Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	21,58	21,63	3,20	9,96	2,26
Ereignisabflussvolumen [m³]	645 374	132 459	166 717	290 648	407 710
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	19,26	10,94	13,10	26,36	65,51
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²)]	40,84	32,57	16,30	36,32	67,77
Abflussvolumenspende [l/km ²]	471,08	113,21	96,93	146,05	291,22

	Katzensteigbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle	Glasbach
Niederschlagsdauer [min]	1580	1580	1310	1560	1540
Gesamtereignisdauer [min]	2290	1770	1430	2410	3230
Niederschlagsmenge [mm]	17,30	17,30	25,02	25,58	23,60
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	2,10	2,10	4,51	4,51	4,80
Maximale Abkühlung [°C]	6,94	6,56	4,44	4,69	5,57
Quantitative Temperaturänderung [°C]	-0,11	0,20	0,31		
Verdünnungseffekt	-1	3	2	3	3
Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	26,41	21,50	5,20	12,15	2,64
Ereignisabflussvolumen [m³]	419 374	84 010	26 250	291 774	395 008
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	49,10	14,31	3,13	14,38	37,94
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²)]	75,50	35,80	8,33	26,52	40,58
Abflussvolumenspende [l/km²]	306,11	71,80	15,26	146,62	282,15

Tabelle A 9: Parameter Niederschlagsereignis 4

Tabelle A 10: Parameter Niederschlagsereignis 5.

	Katzensteigbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle	Glasbach
Niederschlagsdauer [min]	340	340	190	190	80
Gesamtereignisdauer [min]	820	960	2050	1810	3620
Niederschlagsmenge [mm]	9,90	9,90	20,56	20,56	19,60
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	3,80	3,80	10,27	10,27	9,40
Maximale Abkühlung [°C]	9,73	11,43	12,94	11,50	11,42
Quantitative Temperaturänderung [°C]	0,10	0,42	2,59	0,56	0,57
Verdünnungseffekt	1	1	3	3	3
Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	19,02	19,21	3,63	12,01	1,67
Ereignisabflussvolumen [m³]	29 466	15 712	87 421	159 450	224 507
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	21,12	24,51	7,48	36,46	31,72
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²)]	40,14	43,72	11,12	48,47	33,39
Abflussvolumenspende [l/km ²]	21,51	13,43	50,83	80,13	160,36

	Katzensteigbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle	Glasbach
Niederschlagsdauer [min]	430	430	380	380	390
Gesamtereignisdauer [min]	3070	1690	1230	860	2660
Niederschlagsmenge [mm]	23,40	23,40	15,73	15,73	10,60
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	6,50	6,50	6,93	6,93	6,20
Maximale Abkühlung [°C]	10,65	7,02	7,05	4,68	5,93
Quantitative Temperaturänderung [°C]	0,73	1,28	2,59	0,52	
Verdünnungseffekt	2	3	3	2	3
Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	18,21	17,62	3,69	10,08	1,98
Ereignisabflussvolumen [m³]	497 183	111 893	36 564	23 187	34 755
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	61,53	55,51	8,26	14,73	3,98
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²)]	109,23	85,57	20,55	49,36	8,34
Abflussvolumenspende [l/km ²]	362,91	95,63	21,26	11,65	24,82

Tabelle A 11: Parameter Niederschlagsereignis 6.

Tabelle A 12: Parameter Niederschlagsereignis 7.

	Katzensteigbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle	Glasbach
Niederschlagsdauer [min]	1030	1030	1110	1110	1020
Gesamtereignisdauer [min]	2420	2180	2820	2740	1840
Niederschlagsmenge [mm]	15,80	15,80	10.27	10,27	10,40
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	1,00	1,00	1,16	1,16	1,20
Maximale Abkühlung [°C]	7,38	7,45	6,87	6,85	6,36
Quantitative Temperaturänderung [°C]			1,21		-0,76
Verdünnungseffekt	1	1	3	1	0
Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	17,71	18,30	3,08	9,27	1,94
Ereignisabflussvolumen [m ³]	203 811	73 644	75 438	155 283	16 221
Maximaler Direktabfluss [l/(skm ²)]	20,59	14,27	3,44	8,48	3,27
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²)]	38,30	32,57	6,52	17,75	5,21
Abflussvolumenspende [l/km ²]	148,77	62,94	43,86	78,03	11,59
	Katzensteigbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle	Glasbach
--	-----------------	-----------------	------------	--------------	----------
Niederschlagsdauer [min]	240	240	190	190	210
Gesamtereignisdauer [min]	2630	1200	1050	1000	1490
Niederschlagsmenge [mm]	18,60	18,60	15,05	15,05	17,20
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	5,00	5,00	8,47	8,47	6,40
Maximale Abkühlung [°C]	6,79	8,11	5,72	5,18	6,27
Quantitative Temperaturänderung [°C]		0,15		1,75	-1,10
Verdünnungseffekt	3	2	3	1	3
Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	19,31	18,09	2,70	10,07	2,32
Ereignisabflussvolumen [m³]	494 411	42 729	9 374	34 310	61 597
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	74,03	30,01	2,81	21,95	36,35
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²)]	93,34	48,09	5,51	32,03	38,67
Abflussvolumenspende [l/km ²]	360,88	36,52	5,45	17,24	44,00

Tabelle A 13: Parameter Niederschlagsereignis 8.

Tabelle A 14: Parameter Niederschlagsereignis 9.

	Katzensteigbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle	Glasbach
Niederschlagsdauer [min]	2600	2420	2020	2020	1640
Gesamtereignisdauer [min]	4250	2720	2690	2370	2610
Niederschlagsmenge [mm]	28,70	27,30	18,56	18,56	10,00
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	1,40	1,40	7,12	7,12	3,20
Maximale Abkühlung [°C]	9,92	5,58	4,46	4,85	5,29
Quantitative Temperaturänderung [°C]	0,75		-0,21	1,05	-0,70
Verdünnungseffekt	1	2	3	3	3
Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	30,07	18,97	2,33	12,08	2,29
Ereignisabflussvolumen [m³]	1 003 025	95 368	51 530	88 349	21 281
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	36,66	6,74	2,53	11,52	2,09
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²)]	66,73	25,71	4,85	23,61	4,37
Abflussvolumenspende [l/km ²]	732,14	81,51	29,96	44,40	15,20

	Katzensteigbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle	Glasbach
Niederschlagsdauer [min]	2280	2280	2200	2200	2190
Gesamtereignisdauer [min]	3190	2890	3130	3340	3040
Niederschlagsmenge [mm]	20,10	20,10	14,76	14,76	14,40
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	4,80	4,80	2,15	2,15	1,00
Maximale Abkühlung [°C]	11,58	10,96	9,63	10,51	8,43
Quantitative Temperaturänderung [°C]	-0,45	-0,22	0,80		-0,16
Verdünnungseffekt	2	1	3	2	2
Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	27,34	18,33	1,87	11,17	2,13
Ereignisabflussvolumen [m ³]	582 813	110 246	97 143	185 988	23 511
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	34,07	4,85	2,74	4,93	1,70
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²)]	61,41	23,19	4,61	16,11	3,83
Abflussvolumenspende [l/km ²]	425,41	94,23	56,48	93,46	16,79

Tabelle A 15: Parameter Niederschlagsereignis 10.

Tabelle A 16: Parameter Niederschlagsereignis 11.

	Katzensteigbach	Zipfeldobelbach	Engebächle	Selzenbächle	Glasbach
Niederschlagsdauer [min]	1880	1880	1830	1830	1830
Gesamtereignisdauer [min]	3170	2830	3690	2820	2670
Niederschlagsmenge [mm]	13,90	13,90	15,72	15,72	16,20
Maximale Niederschlagsintensität [mm/10min]	0,90	0,90	1,71	1,71	1,20
Maximale Abkühlung [°C]	6,61	6,74	6,61	7,49	7,53
Quantitative Temperaturänderung [°C]			1,93		-1,05
Verdünnungseffekt	-1	3	2	1	2
Vorereignisabfluss [l/(skm²)]	27,20	18,06	1,88	11,81	1,99
Ereignisabflussvolumen [m³]	630 108	126 768	198 126	220 995	40 617
Maximaler Direktabfluss [l/(skm²)]	15,35	7,87	3,08	6,66	2,35
Maximaler Ereignisabfluss [l/(skm²)]	42,55	25,93	4,95	18,48	4,34
Abflussvolumenspende [l/km ²]	459,93	108,35	115,19	111,05	29,01

Ehrenwörtliche Erklärung

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