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

Cindy Hugenschmidt

Kontinuierliche Tracer zur hydrologischen Prozessforschung in bewaldeten Einzugsgebieten



Diplomarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Chr. Leibundgut

Freiburg im Breisgau, Februar 2006

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

Cindy Hugenschmidt

Kontinuierliche Tracer zur hydrologischen Prozessforschung in bewaldeten Einzugsgebieten

Referent: Prof. Dr. Ch. Leibundgut

Koreferent: Dr. J. Lange

Diplomarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Ch. Leibundgut Freiburg im Breisgau, Februar 2006

Inhaltsverzeichnis	
Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
	••••
Abbildungsverzeichnis im Ann	ang vi
Tabellenverzeichnis im Anhang	g VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Zusammenfassung	IX
Extended english summary	XI
1 Einleitung	1
1.1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	
1.2 Stand der Forschung	
2 Die Untersuchungsgebiete	7
2.1 KLIMATISCHE VERHÄLTNISSE	7
2.2 TOPOGRAPHIE UND MORPHOLOGIE	
2.2.1 Glasbach 2.2.2 Solzarhächle	
2.2.2 Seizenbuche 2.2.3 Engebächle	
2.3 GEOLOGIE UND PEDOLOGIE	
2.3.1 Glasbach	
2.3.2 Selzenbächle	
2.3.3 Engebächle	
2.4 VEGETATION UND LANDNUTZUNG	
2.4.1 Glasbach	
2.4.2 Seizenbachie 2.4.3 Engebächle	
2.4.5 Engebuchte	12
3 Methodik	
3 1 ANGEWANDTE NATÜRLICHE TRACER	13
<i>3.1.1 Temperatur</i>	
3.1.2 Trübung	
3.1.3 Elektrische Leitfähigkeit	
3.2 Hydrometrische Ausstattung der Einzuc	BSGEBIETE15
3.2.1 Niederschlag	
3.2.2 Irubung 3.2.3 Wassewstand Leitfähigkeit und Termenus	
3.2.5 rrussersiunu, Leijunigkeii unu 1emperul 3.2.4 Erstellen der Wasserstands-Ahfluss-Rezi	ωι
3.2.5 Luftdruck, Lufttemperatur	20
3.3 EINZUGSGEBIET ENGEBÄCHLE	

3.3.1	Bodenfeuchtesonden	22
3.3.2	Quellfassung Steineck und Quellfassung Sägedobel	23
3.3.3	Grundwasserpegel	23
3.3.4	Temperatursonden	24
3.4 A	BFLUSSKOMPONENTENSEPARATION	25
3.4.1	Abflusskomponentenseparation unter Verwendung der Temperatur	26
3.4.2	Abflusskomponentenseparation unter Verwendung der Leitfähigkeit	27
4	Modellieruna	28
4 1 N		20
4.1 M	ODELLAUFBAU	28
4.1.1	Schnee-Routine	29
4.1.2	Boaenjeucnie-Routine	29
4.1.5	ADJIUSSKONZENIFALIONSFOULINE	50
4.1.4	W ellenablaufroutine	31
4.2 El	NGABEPARAMETER UND DATEN	32
4.2.1	Ermittung der veraunstung.	32 25
4.2.2	Niederschlag, Temperatur, Abjiuss und variable Parameter	33
4.2.3	Modellkalibrierung	30
4.3 FA	AZIT	37
5	Untersuchungsergebnisse	38
5.1 W	TTTERUNGSBEDINGUNGEN	
5.2 A	BFLUSSGANGLINIEN	40
5.2.1	Glasbach	40
5.2.2	Selzenbächle	42
5.2.3	Engebächle	44
5.2.4	Fazit	46
5.3 R	EZESSIONSANALYSE	48
5.3.1	Rezessionsanalvse im EZG Glasbach	49
5.3.2	Rezessionsanalyse im EZG Selzenbächle	50
5.3.3	Rezessionsanalyse im EZG Engebächle	51
5.3.4	Fazit	52
5.4 Ti	RÜBUNGSMESSWERTE	52
5.4.1	Selzenbächle	53
5.4.2	Engebächle	54
5.4.3	Fazit	54
5.5 G	RUNDWASSERPEGEL	57
5.5.1	Fazit	59
5.6 B	DDENFEUCHTESONDEN	60
5.6.1	Fazit	61
5.7 G	EWÄSSERTEMPERATUR	62
5.7.1	Glasbach	62
5.7.2	Selzenbächle	62
5.7.3	Engebächle	63
5.7.4	Fazit	65
5.8 Li	EITFÄHIGKEIT	65
5.8.1	Glasbach	65
5.8.2	Selzenbächle	66
5.8.3	Engebächle	66
5.8.4	Fazit	67

	6 Le	Auswertung eitfähigkeit	der	Temperaturdaten	und	der 68
6.1		Ganglinienseparation	n über Le	EITFÄHIGKEIT		68
6.	1.1	Definition der End	member			68
6.	1.2	Ergebnisse im EZC	Glasbac	h		68
0. 6	1.3 1 1	Ergebnisse für das	EZG Selz	enbachle	•••••	
0. 6	1.4 15	Ergeonisse jur aus Fazit	EZG Eng	educnie	•••••	
62	1.5	GANGLINIENSEPARATION	n über Te	EMPERATUR	•••••	
б.	2.1	Definition der End	member			
6.	2.2	Ergebnisse der GL	S unter V	erwendung der Temperatur		
6.	2.3	Fazit				
6.3		VERGLEICH DER ERGEBN	VISSE ÜBE	r Temperatur und Leitfähig	KEIT	79
6.	3.1	Fazit	•••••		••••••	80
	7	Ergebnisse de	er Moo	lellierung		81
7.1		Ergebnis der Simulat	ion auf E	BASIS DER ORIGINALDATEN		82
7.2		ERGEBNIS DER SIMULAT	ION AUF E	BASIS DER REDUZIERTEN DATEN		
7.3		Fazit				
	8	Schlussfolger	runger	n und Ausblick		87
	9	Literatur				90
	D	ank				96
	٨	nhana				07
	A	iiiiaiiy	•••••	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	•••••	3/

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Einzugsgebiete Engebächle (links) und Selzenbächle süd-östlich von Freiburg	9
Abbildung 3.1: Optische Zelle des GGUN FL 30 mit den vier Lichtquellen und den	
Detektoren (Schnegg und Flynn, 2001)	16
Abbildung 3.2: Eichgeraden für den beiden Fluorometer am Engebächle und Selzenbächle	e
	17
Abbildung 3.3: Längsprofil der Temperatur und der Leitfähigkeit am Engebächle	24
Abbildung 4.1: Bodenfeuchteroutine	30
Abbildung 4.2: Einzellinearspeicher	31
Abbildung 5.1: Niederschlag und Lufttemperatur für die EZG Engebächle und Selzenbäch	nle
	39
Abbildung 5.2: Pegeldaten Glasbach	41
Abbildung 5.3: Pegeldaten Selzenbächle	43
Abbildung 5.4: Pegeldaten Engebächle	45
Abbildung 5.5: Vergleich des Ereignisses vom 16. September an den einzelnen Bächen	47
Abbildung 5.6: Rezessionsanalyse des Ereignis GBE4 am Glasbach	50
Abbildung 5.7: Rezessionsanalyse für das Ereignis EBE7	51
Abbildung 5.8: Trübungsmesswerte Selzenbächle	55
Abbildung 5.9: Trübungsmesswerte Engebächle	56
Abbildung 5.10: Grundwasserpegel 1	58
Abbildung 5.11: Grundwasserpegel 2	59
Abbildung 5.12: Bodenfeuchtesonden	61
Abbildung 5.13: Verlauf der Gewässertemperatur bei Sonde S74, S58, S65, S67 und am	
Pegel im EZG Engebächle und die dort herrschende Lufttemperatur	64
Abbildung 6.1: Temperaturverlauf des Bachwassers während des Niederschlagsereignisse	S
am 29./30. Juni am Pegel und Vergleichsweise an Temperatursonden 62 und 58	73
Abbildung 6.2: GLS über die Temperatur mit der Zwei-Stufen-Methode	75
Abbildung 6.3: GLS über die Temperatur mit linearer Interpolation	76
Abbildung 6.4: Abflussanteile der einzelnen Temperatursonden	79
Abbildung 6.5: Vergleich der ermittelten event water- und pre-event water-Anteile durch	
eine GLS über die lineare Temperaturmethode (T) und der Leitfähigkeit (LF)	80
Abbildung 7.1: Darstellung der simulierten und observierten Kurve des HBV Modells der	•
unveränderten Daten	83
Abbildung 7.3: Darstellung der simulierten und observierten Kurve das HBV Modells der	•
um den Ereigniswasseranteil reduzierten Daten.	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.2: Zusammenstellung der Eingabe-Parameter im HBV-Modell 36 Tabelle 5.1: Monatsmittelwerte der Temperatur und des Niederschlags des Pluviographen 39 Tabelle 5.2: Werte der einzelnen Ereignisse im EZG Glasbach 42 Tabelle 5.3: Werte der einzelnen Ereignisse am Selzenbächle 44 Tabelle 5.4: Werte der einzelnen Ereignisse am Engebächle 46 Tabelle 5.5: Ermittelte Rezessionskoeffizienten der Ereignisse im Glasbach 50 Tabelle 5.7: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Selzenbächle 51 Tabelle 5.7: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Engebächle 52 Tabelle 6.1: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Glasbach 69 Tabelle 6.3: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Engebächle 70 Tabelle 6.4: Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden am Pegel Engebächle 75 Tabelle 6.6: Relative Anteile der Komponenten des Ereignis EBE 1 über unterschiedliche 79 Methoden ermittelt. 79 Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter 82 Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation. 82 Tabelle 7	Tabelle 4.1: Ein- und Ausgabeparameter der HBV Routinen	35
Tabelle 5.1: Monatsmittelwerte der Temperatur und des Niederschlags des Pluviographen 39 Tabelle 5.2: Werte der einzelnen Ereignisse im EZG Glasbach 42 Tabelle 5.3: Werte der einzelnen Ereignisse am Selzenbächle 44 Tabelle 5.4: Werte der einzelnen Ereignisse am Engebächle 46 Tabelle 5.5: Ermittelte Rezessionskoeffizienten der Ereignisse im Glasbach 50 Tabelle 5.6: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Selzenbächle 51 Tabelle 5.7: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Engebächle 52 Tabelle 6.1: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Glasbach 69 Tabelle 6.2: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Selzenbächle 70 Tabelle 6.4: Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden am Pegel Engebächle 71 Tabelle 6.5: Ergebnisse der GLS mit Hilfe der Temperatursonden 78 Tabelle 6.6: Relative Anteile der Komponenten des Ereignis EBE 1 über unterschiedliche 79 Methoden ermittelt. 79 Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter 82 Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation. 82 Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden 86	Tabelle 4.2: Zusammenstellung der Eingabe-Parameter im HBV-Modell	36
"Ringlighof"39Tabelle 5.2: Werte der einzelnen Ereignisse im EZG Glasbach42Tabelle 5.3: Werte der einzelnen Ereignisse am Selzenbächle44Tabelle 5.4: Werte der einzelnen Ereignisse am Engebächle46Tabelle 5.5: Ermittelte Rezessionskoeffizienten der Ereignisse im Glasbach50Tabelle 5.6: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Selzenbächle51Tabelle 5.7: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Engebächle52Tabelle 6.1: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Glasbach69Tabelle 6.2: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Selzenbächle70Tabelle 6.3: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Engebächle71Tabelle 6.4: Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden am Pegel Engebächle78Tabelle 6.5: Ergebnisse der GLS mit Hilfe der Temperatursonden78Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter82Tabelle 7.2: Ermittelte Parameter82Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden86	Tabelle 5.1: Monatsmittelwerte der Temperatur und des Niederschlags des Pluviograph	hen
Tabelle 5.2: Werte der einzelnen Ereignisse im EZG Glasbach 42 Tabelle 5.3: Werte der einzelnen Ereignisse am Selzenbächle 44 Tabelle 5.4: Werte der einzelnen Ereignisse am Engebächle 46 Tabelle 5.5: Ermittelte Rezessionskoeffizienten der Ereignisse im Glasbach 50 Tabelle 5.6: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Selzenbächle 51 Tabelle 5.7: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Engebächle 52 Tabelle 6.1: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Glasbach 69 Tabelle 6.2: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Selzenbächle 70 Tabelle 6.3: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Engebächle 71 Tabelle 6.4: Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden am Pegel Engebächle 75 Tabelle 6.5: Ergebnisse der GLS mit Hilfe der Temperatursonden 78 Tabelle 6.6: Relative Anteile der Komponenten des Ereignis EBE 1 über unterschiedliche 79 Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter 82 Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation 82 Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden 86	"Ringlighof"	39
Tabelle 5.3: Werte der einzelnen Ereignisse am Selzenbächle 44 Tabelle 5.4: Werte der einzelnen Ereignisse am Engebächle 46 Tabelle 5.5: Ermittelte Rezessionskoeffizienten der Ereignisse im Glasbach 50 Tabelle 5.6: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Selzenbächle 51 Tabelle 5.7: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Engebächle 52 Tabelle 6.1: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Glasbach 69 Tabelle 6.2: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Selzenbächle 70 Tabelle 6.3: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Engebächle 71 Tabelle 6.4: Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden am Pegel Engebächle 75 Tabelle 6.5: Ergebnisse der GLS mit Hilfe der Temperatursonden 78 Tabelle 6.6: Relative Anteile der Komponenten des Ereignis EBE 1 über unterschiedliche 79 Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter 82 Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation 82 Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden 86	Tabelle 5.2: Werte der einzelnen Ereignisse im EZG Glasbach	42
Tabelle 5.4: Werte der einzelnen Ereignisse am Engebächle 46 Tabelle 5.5: Ermittelte Rezessionskoeffizienten der Ereignisse im Glasbach 50 Tabelle 5.6: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Selzenbächle 51 Tabelle 5.7: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Engebächle 52 Tabelle 6.1: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Glasbach 69 Tabelle 6.2: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Selzenbächle 70 Tabelle 6.3: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Engebächle 71 Tabelle 6.4: Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden am Pegel Engebächle 75 Tabelle 6.5: Ergebnisse der GLS mit Hilfe der Temperatursonden 78 Tabelle 6.6: Relative Anteile der Komponenten des Ereignis EBE 1 über unterschiedliche 79 Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter 82 Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation 82 Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden 86	Tabelle 5.3: Werte der einzelnen Ereignisse am Selzenbächle	44
Tabelle 5.5: Ermittelte Rezessionskoeffizienten der Ereignisse im Glasbach 50 Tabelle 5.6: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Selzenbächle 51 Tabelle 5.7: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Engebächle 52 Tabelle 6.1: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Glasbach 69 Tabelle 6.2: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Selzenbächle 70 Tabelle 6.3: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Engebächle 71 Tabelle 6.4: Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden am Pegel Engebächle 75 Tabelle 6.5: Ergebnisse der GLS mit Hilfe der Temperatursonden 78 Tabelle 6.6: Relative Anteile der Komponenten des Ereignis EBE 1 über unterschiedliche 79 Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter 82 Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation 82 Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden 86	Tabelle 5.4: Werte der einzelnen Ereignisse am Engebächle	46
Tabelle 5.6: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Selzenbächle 51 Tabelle 5.7: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Engebächle 52 Tabelle 6.1: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Glasbach 69 Tabelle 6.2: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Selzenbächle 70 Tabelle 6.3: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Engebächle 71 Tabelle 6.4: Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden am Pegel Engebächle 75 Tabelle 6.5: Ergebnisse der GLS mit Hilfe der Temperatursonden 78 Tabelle 6.6: Relative Anteile der Komponenten des Ereignis EBE 1 über unterschiedliche 79 Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter 82 Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation 82 Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden 86	Tabelle 5.5: Ermittelte Rezessionskoeffizienten der Ereignisse im Glasbach	50
Tabelle 5.7: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Engebächle 52 Tabelle 6.1: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Glasbach 69 Tabelle 6.2: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Selzenbächle 70 Tabelle 6.3: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Engebächle 71 Tabelle 6.4: Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden am Pegel Engebächle 75 Tabelle 6.5: Ergebnisse der GLS mit Hilfe der Temperatursonden 78 Tabelle 6.6: Relative Anteile der Komponenten des Ereignis EBE 1 über unterschiedliche 79 Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter 82 Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation 82 Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden 86	Tabelle 5.6: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Selzenbächle	51
Tabelle 6.1: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Glasbach 69 Tabelle 6.2: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Selzenbächle 70 Tabelle 6.3: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Engebächle 71 Tabelle 6.4: Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden am Pegel Engebächle 75 Tabelle 6.5: Ergebnisse der GLS mit Hilfe der Temperatursonden 78 Tabelle 6.6: Relative Anteile der Komponenten des Ereignis EBE 1 über unterschiedliche 79 Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter 82 Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden 86	Tabelle 5.7: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Engebächle	52
Tabelle 6.2: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Selzenbächle 70 Tabelle 6.3: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Engebächle 71 Tabelle 6.4: Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden am Pegel Engebächle 75 Tabelle 6.5: Ergebnisse der GLS mit Hilfe der Temperatursonden 78 Tabelle 6.6: Relative Anteile der Komponenten des Ereignis EBE 1 über unterschiedliche 79 Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter 82 Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation 82 Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden 86	Tabelle 6.1: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Glasbach	69
 Tabelle 6.3: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Engebächle	Tabelle 6.2: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Selzenbächle	70
 Tabelle 6.4: Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden am Pegel Engebächle	Tabelle 6.3: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Engebächle	71
Tabelle 6.5: Ergebnisse der GLS mit Hilfe der Temperatursonden 78 Tabelle 6.6: Relative Anteile der Komponenten des Ereignis EBE 1 über unterschiedliche 79 Methoden ermittelt. 79 Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter 82 Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation. 82 Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden 86	Tabelle 6.4: Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden am Pegel Engebächle	75
 Tabelle 6.6: Relative Anteile der Komponenten des Ereignis EBE 1 über unterschiedliche Methoden ermittelt. 79 Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter. 82 Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation. 82 Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden Modellvarianten kontribuiert wurden. 	Tabelle 6.5: Ergebnisse der GLS mit Hilfe der Temperatursonden	78
Methoden ermittelt. 79 Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter. 82 Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation. 82 Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden Modellvarianten kontribuiert wurden. 86	Tabelle 6.6: Relative Anteile der Komponenten des Ereignis EBE 1 über unterschiedlich	che
Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter 82 Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation 82 Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden 82 Modellvarianten kontribuiert wurden 86	Methoden ermittelt.	79
Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation	Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter	82
Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden Modellvarianten kontribuiert wurden	Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation	82
Modellvarianten kontribuiert wurden	Tabelle 7.4: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden	
	Modellvarianten kontribuiert wurden	86

Abbildungsverzeichnis im Anhang

Abbildung A 1: GLS Leitfähigkeit für das Ereignis GBE2	. 99
Abbildung A 2: GLS Leitfähigkeit für das Ereignis SBE4	100
Abbildung A 3: GLS Leitfähigkeit für das Ereignis EBE7	101
Abbildung A 4: Position der Temperatursonden im Engebächle	102
Abbildung A 5: Vergleich der prozentualen Anteile am Gesamtvolumen ermittelte über I	LF
	103
Abbildung A 6: Ergebnisse der Ganglinienseparation für das Ereignis von 29. Juni der	
Temperatursonden 75, 73, 65	104
Abbildung A 7: Ergebnisse der Ganglinienseparation für das Ereignis von 29. Juni der	
Temperatursonden 69, 61, 58	105
Abbildung A 8: Ergebnisse der Ganglinienseparation für das Ereignis von 29. Juni der	
Temperatursonden 63, 55, 59	106
Abbildung A 9: Ergebnisse der Ganglinienseparation für das Ereignis von 29. Juni der	
Temperatursonden 67, 64, 53	107
Abbildung A 10: Ergebnisse der Ganglinienseparation für das Ereignis von 29. Juni der.	108
Abbildung A 11: Ergebnisse der Ganglinienseparation für das Ereignis von 29. Juni der	
Temperatursonden 74, 51, 56	109
Abbildung A 12: Temperatursonde S62 im Engebächle	110
Abbildung A 13: Fluorometer am Pegel Engebächle	111
Abbildung A 14: Pegel Engebächle während Niedrigwasserphasen (rechts) und während	des
Hochwasserereignisses vom 9. September	111
Abbildung A 15: Diversonde der Firma Eijelkamp/Van Essen	111
Abbildung A 16: Schematische Darstellung der Grundwasserpegel GW-Pegel 1-3 in der	
Riparian Zone	112
Abbildung A 17: Dreieckswehr am Pegel Engebächle	112

Tabellenverzeichnis im Anhang

Tabelle A 1: Lagebeschreibung der einzelnen Temperatursonden im Engebächle	97
Tabelle A 2: Technische Daten der CTD-Diver (Guwang, 2004)	98

Abkürzungsverzeichnis

A:	durchflossener Querschnitt (m ²)
Ah:	Humoser Oberbodenhorizont
BETA	Formfaktor
Bv:	Mineralbodenhorizont
CFMAX:	Grad-Tag Faktor (mm/°C*d)
CFR:	Refreezing Koeffizient
CMELT:	Grad-Tag Faktor (mm/°C*d)
Cn:	spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck (KJ·(kg·K) ⁻¹
CW:	Wasserkapazität
e:	aktueller Wasserdampfdruck (hPa)
EBE	Engebächle Ereignis No. X
EL	Sättigungsdampfdruck (hPa)
eL	aktueller Wasserdampfdruck der Luft (hPa)
ETP:	Verdunstungshöhe (mm)
e _s :	Sättigungsdampfdruck bei aktueller Lufttemperatur (hPa)
EZG	Einzugsgebiet (km ²)
F	relative Luftfeuchte
FC	Maximaler Bodenfeuchtespeicher mm
G:	Bodenwärmefluss (Pauschal 0,1 bis $0,2 \cdot R_N$ (Wh·m ⁻²)
GLS	Ganglinienseparation
GBE	Glasbach Ereignis No. x
GW-Pegel	Grundwasserpegel
h NN:	Höher über Meer (m)
I:	Wasserliniengefälle
k:	Speicherkoeffizient (1/d)
K ₂ :	Rezessionskoeffizient (unterer Speicher) (1/d)
K ₁ :	Rezessionskoeffizient (oberer Speicher) (1/d)
K ₀ :	Rezessionskoeffizient (oberer Speicher) (1/d)
k _{st} :	Stricklerbeiwert
LF _B :	Leitfähigkeit des Bachwassers (°C)
LF _{GW} :	Leitfähigkeit des Vorereigniswasser, Endmember pre-event water (°C)
LF _N :	Leitfähigkeit des Niederschlags, Endmember event water (°C)
LP:	Grenzwert für Reduktion der Evaporation
MAXBAS	Länge der Wichtungsfunktion (d)
MELT:	Schneeschmelze (mm/d)
mV:	Millivolt
NTU:	Nepelometrische Trübungseinheit
p:	Luftdruck (mbar)
PERC:	Max. Sickerrate vom oberen zum unteren Speicher (mm/d)
Q:	Abfluss (m³/s); (mm/6h)
Q _{0:}	Abfluss zum Zeitpunkt t=0
Q _B :	Gesamtabfluss (l/s)
Q_G :	Abfluss aus dem Grundwasserspeicher (mm/6h)
Q _{GW} :	pre-event water (l/s)
Q _N :	event water (l/s)
Qobs:	Gemessener Abfluss (mm/6h)
Q _{sim:}	Simulierter Abfluss (mm/6h)
Qt:	Abfluss nach t Tagen

r _a :	aerodynamischer Widerstand (s·m ⁻¹)
R _{eff:}	Effizienz (1 entspricht "perfect fit")
R _{G:}	Globalstrahlung (Wh·m ⁻²)
R _{hy} :	hydraulischer Radius (m)
R _{L:}	langwellige Strahlungsbilanz (Wh·m ⁻²)
$R_{N:}$	Nettostrahlung (Wh·m ⁻²)
r _s :	Oberflächenwiderstand (s·m ⁻¹)
r _{sc} :	minimaler Oberflächenwiederstand der Pflanze (s/m)
r _{ss} :	Oberflächenwiderstand für unbewachsenen Boden (s/m)
S:	Speicherkapazität (mm)
SBE:	Selzenbächle Ereignis No. x
SFCF:	Schneefall-Korrekturfaktor
t:	Zeit (d)
T:	Temperatur (°C)
TT	Grenzwert (°C)
T _B :	Temperaturverlauf des Bachwassers (°C)
T _{GW} :	Temperatur des Vorereigniswasser, Endmember pre-event water (°C)
t _i :	Anzahl Sekunden im Berechnungsintervall
T _N :	Temperatur des Niederschlags, Endmember event water. (°C)
T _v :	mittlere, virtuelle Temperatur der Luftsäule (°C)
u:	Windgeschwindigkeit (m/s)
UZL:	Grenzwert für K ₀ -Ausfluss (mm)
Z:	Höhe über Grund in der die Windgeschwindigkeit gemessen wird (m),
Z ₀ :	aerodynamische Rauhigkeitslänge (m)
α:	Rezessionskoeffizient
λ:	latente Verdunstungswärme (KJ·kg ⁻¹⁾
Δ :	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve (hPa·K ⁻¹)
Γ:	Psychrometerkonstante (hPa· K^{-1})
ρ:	Dichte der Luft (kg·m ⁻³⁾

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Studie ist es zum einen, über hydrometrische Messungen und kontinuierliche Erfassung natürlicher Tracer die Abflussgeneration des bewaldeten, 1,3 km² großen EZG Engebächle während sommerlicher Niederschlagsereignissen zu untersuchen. Zum anderen werden durch räumlich geringer aufgelöste Messungen des Abflusses und einiger Tracer in zwei weiteren Gebieten, einem ebenfalls bewaldeten und einem landwirtschaftlich genutzten, Vergleiche zwischen dem Abflussverhalten auf Flächen mit unterschiedlichen Landnutzungsarten gezogen. Neben der unterschiedlichen Landnutzung und Vegetation der einzelnen EZG sind jedoch grundliegende Bedingungen wie Geologie, Pedologie und die klimatischen Verhältnisse sehr ähnlich. Zudem erhalten die EZG Engebächle und Selzenbächle den selben Niederschlagsinput und grenzen räumlich aneinander an.

Abschließend gehen die gewonnenen Kenntnisse aus dem EZG mit den räumlich hoch aufgelösten Messdaten zur Überprüfung der Konzeptionalisierung in ein Niederschlags-Abfluss Modell ein.

Grundlage dieser Untersuchung stellt ein zahlreiches Datenmaterial dar, welches über einen Zeitraum von vier Monaten kontinuierlich aufgezeichnet wird. Für die Messung der Abflusswerte kommen Sonden zum Einsatz, die über einen Zeitraum von einer Woche kontinuierlich Messdaten in zweiminütiger Auflösung registrieren. Diese Diversonden der Firma *Eijelkamp/Van Essen* haben den Vorteil, dass sie nebenher in gleicher zeitlicher Auflösung, ebenfalls kontinuierliche Werte der Leitfähigkeit und Gewässertemperatur aufzeichnen. Dies erweist sich als äußerst praktisch, da die Messwerte dann direkt in Relation zu einander gesetzt werden können.

Neben diesen Sonden, die sich in jedem EZG am Pegel (Gebietsauslass) befinden, sind im EZG Engebächle, welchem in dieser Untersuchungsreihe die größte Aufmerksamkeit zukommt, weitere Messgeräte installiert. Diese tragen zum Prozessverständnis in diesem Gebiet maßgeblich bei. Neben den Grundwasserpegeln, welche die Auendynamik überwachen, steht ein Profil mit Bodenfeuchtesonden zur Registrierung der Wasserbewegung in der Bodenmatrix zur Verfügung, weiterhin wird mit Hilfe von 18 Temperatursonden ein kontinuierliches Längsprofil der Gewässertemperatur im Engebächle erstellt. Ein weiteres Messgerät, welches der Messung der Trübungsrate der Gewässer dient, ist jeweils im EZG Engebächle und EZG Selzenbächle vorhanden. Die daraus gewonnenen Daten sollten ursprünglich zur Identifizierung der Oberflächenkomponente im Ereignisfalls verwendet werden, können aber letzten Endes auf Grund mangelnder Qualität nicht eingesetzt werden.

Die Abflussanteile werden in den einzelnen Gebieten im Verlaufe von Ereignissen unter Anwendung einer Ganglinienseparation unter Verwendung der Leitfähigkeitsdaten quantifiziert und zusätzlich für das erste Ereignis im EZG Engebächle zusätzlich über einen neuen Ansatz über Temperaturdaten ermittelt. Dieses Ereignis schließt sich direkt an die dreiwöchige Trockenphase an und bewirkt einen signifikanten Temperatursturz im Gewässer. Da diese Methode noch relativ neu ist und in dieser Form kaum angewandt wurde, wird sie als neuer Ansatz betrachtet, dessen Ergebnisse auf jeden Fall mit den Ergebnissen etablierterer Methoden korreliert werden müssen (GLS über Leitfähigkeit). Um das Verhalten der Vorereigniswassertemperatur im Ereignisfall näherungsweise wiederzugeben, werden zwei unterschiedliche Methoden getestet, von welchen jedoch keine auf einem thermodynamischem Konzept aufbaut und als empirisch betrachtet werden muss. Die Ergebnisse der einzelnen GLS aller EZG belegen durchgehend eine Dominanz des Grundwassers in Ereignisfällen. Dieser Anteil beträgt über die gesamte Messphase und in allen EZG zwischen 52% im EZG Engebächle nach Ende der Trockenphase und 97% im ebenfalls bewaldeten EZG Glasbach. Die Dominanz der Grundwasserkomponente wird auch für das EZG Selzenbächle nachgewiesen, obwohl dieses Gebiet auf Grund der Landnutzung eher eine Tendenz zur Dominanz von Oberflächenkomponenten zu haben scheint.

Die Quantifizierung der Abflussanteile für das erste Ereignis im EZG Engebächle über ein GLS mit den Temperaturdaten zeigt sich mit den über die Leitfähigkeit ermittelten Werten verhältnismäßig deckungsgleich.

Auf Grund des zusätzlichen Datenmaterials im EZG Engebächle kann mit fortschreitender Dauer der Messperiode und wiedereinsetzenden Niederschlägen ein Wiederauffeuchten der zu Beginn leeren Bodenspeicher bis in tiefere Schichten belegt werden. Diese Daten unterstützen zudem die Aussage der Ergebnisse der GLS, dass während Niederschlagsereignissen der von tieferen Grundwasserstockwerken kontribuierte Anteil am Gesamtabfluss dominiert.

Die an Hand der Abflussdaten durchgeführte Rezessionsanalyse zeigt, dass in den meisten Ereignisfällen, zumindest in den bewaldeten EZG, eine schnelle Direktkomponente und eine ereignisbedingte, jedoch zeitverzögert einsetzende Komponente zum Abflussgeschehen beitragen. Diese Konstitution kann jedoch für das EZG Selzenbächle nicht bestätigt werden, da dort zu keinem Zeitpunkt eine zweite bzw. dritte Komponente während der Ereignisse auszumachen ist. Es scheint also, dass die Gebiete durch unterschiedliche Speichersysteme kontrolliert werden.

Den Abflussdaten lässt sich weiterhin entnehmen, dass über die gesamte Messperiode im EZG Selzenbächle das verhältnismäßig größte Abflussvolumen spendet. Die im EZG Engebächle registrierten Werte werden vom EZG Glasbach nochmals unterboten. Ein Vergleich des Glasbaches mit den anderen beiden EZG scheint jedoch fragwürdig, da sich der Niederschlagsinput unterscheidet.

Die an Hand der Messdaten im EZG Engebächle erstellte Konzeptionalisierung der Abflussprozesse wird mit Hilfe eines Niederschlags-Abfluss Modells überprüft. Hierzu wird das konzeptionelle Einzugsgebietsmodell HBV eingesetzt. Neben den Daten wie Abfluss, Niederschlag und Lufttemperatur gehen auch noch die Werte der potentiellen Verdunstung in das Modell ein. Diese werden über zwei Ansätze berechnet, *Penman-Monteith* und *Haude*, wobei letztendlich die über *Haude* ermittelten Werte in das Modell eingehen, da die anderen Werte deutlich zu hoch liegen.

Da das Hauptaugenmerk dieser Studie auf Abflussprozesse unter bewaldeten EZG während Niederschlagsereignissen liegt, wird die Simulation mit einer Auflösung von sechs Stunden durchgeführt.

Die durch die erste Simulation ermittelten Gebietsparameter gehen dann in eine zweite Simulation ein, bei welcher die gemessenen Abflüsse während der Ereignisse um den Anteil reduziert werden, welcher an Hand der GLS über die Leitfähigkeitswerte berechnet wird.

Das Ergebnis der Simulation lässt jedoch keine eindeutige Interpretation zu und ist nur unter Vorbehalt zu betrachten.

Trotz relativ kurzer Messphase kann ein umfassender Überblick über das grundliegende System des EZG Engebächle erreicht werden. Um die Unterschiede der abflussbildenden Prozesse in Bezug auf die Landnutzung genauer zu definieren, sind sicherlich noch weitere Messungen in beiden Gebieten, EZG Engebächle und EZG Selzenbächle, nötig.

Extended english summary

The current study intends to investigate runoff generation in a steep 1,3 km² sized forested watershed (Engebächle). This is carried out by using hydrometric records and additionally continuous measurements of natural tracers like electrical conductivity, turbidity and stream temperature during summer storm events. To compare the runoff generating processes under different land use conditions there are two more watersheds integrated in which the measurements are recorded in a less spatial resolution. One of these watersheds is dominated by agricultural landuse (Selzenbächle), while the other one is also completely forested (Glasbach).

Besides these different land use conditions there are quite a lot similarities between the watersheds. Fundamental characters like geology, pedology and climate influences are nearly the same. The watersheds Selzenbächle and Engebächle are situated very close next to each other and obtain the same amount of precipitation input.

To proof the conceptualisation of the investigated runoff generation the collected data are finally modelled with a rainfall-runoff model.

The results of this study are founded on a tremendous amount of collected data which were observed over four months. To record runoff data at the gauges the CTD-Diver from *Eijelkamp/Van Essen* is used. This Diver takes combinated measurements of water level, electrical conductivity and stream temperature every two minutes. This is advantageous as for the data can be set in relation to each other without greater expenditure.

Considering the fact that the Engebächle watershed is of higher interest it is set up with a couple more measurement devices. The goal of these devices is to get more information of underground processes like lateral and transversal matrix flow in soils, which is realized by setting up five soil moisture probes in different soil layers within a hillslope. Furthermore, there are two ground water gauges which observe riparian zone dynamics. To record a continuous cross section of stream temperature over the reach of the Engebächle 18 temperature logger are put along the stream bed.

To compare runoff generating processes in the forested and agricutural dominated watershed in each of them a Fluorometer is set up which determines turbidity rates in the streams. This measurements should be approached to identify the overland flow componenent in runoff generation during storm events. Because of incomplete data sets and useless values it is not possible to use these measurements.

To determine the single runoff generating processes during storm events the hydrographs are separated using measurements of electrical conductivity for all watersheds and most of the events. An additional hydrograph separation of the first storm event in the observed period is done by using stream temperature data. This method is a non established and a seldom used one so it is inalienable to correlate these results to those from hydrograph separation using electrical conductivity.

It is difficult to understand the behavior of the pre event water temperature during the storm event. It is impossible to predict the development of the stream temperature using a thermodynamic concept. This behavior is approximated with two different empirical approaches.

The results of the single hydrograph separations are heading for the same direction which is a continuous dominance of the pre event water componente during storm events.

The values are defined with 52% as the lowest part in the Engebächle watershed and show a maximum part of the pre event water component with 79% in the Glasbach watershed. The

dominating pre event water component is also detected in the Selzenbächle watershed which seems to be quite surprising considering the agricultural land use.

The quantified components for the first storm event in the Engebächle watershed resulting from hydrograph separation using stream temperature show the same evidences: a dominant behavior of the pre event water component.

Due to the additional data collection in the Engebächle watershed it is possible to determine a continuous wetting of the dry soil layers during the observations period. This is caused by enduring precipitation input. Furthermore, this data confirm the assumption, that a dominance of a deeper groundwater component exists during storm events, which is concluded out of the hydrograph separations,

The runoff data are used to determine the recession coefficient for most of the occuring events. According to this data, it is possible to identify Interflow quickly and an event depending delayed Interflow in the forested watersheds. This cannot be proofed for the Selzenbächle watershed as for none of the events a third (second) component is detectable. This fact seems to indicate different storage systems in the single watersheds.

The results from the runoff observations show that the highest amount of water is recorded in the Selzenbächle watershed followed by the values of the Engebächle and Glasbach. Considering the different precipitation input at the Glasbach watershed it is questionable if this comparsion makes sense.

Using the HBV Model the conceptualised runoff generating processes on the basis of the collected date in the Engebächle catchment is proofed. While runoff, precipitation and air temperature built the model's database additional input of evaporation data is necessary. This is done by using two different equations, the equations after *Penman-Monteith* and *Haude*. The results from *Haude* seem to be more suitable to local potential Evaporation values.

The temporal resolution of simulation steps is set to six hours according to interest on summer storm events. The parameter estimation and calibration is done with the original (measured) data set, while a second simulation with the same parameter set but modified input data is run. This modification is done as follows: the runoff values of the original data set are reduced by the event water component determined by hydrograph separation using electrical conductivity.

It is not definitely clear whether the simulation determines the runoff generation conceptualisation or not. These results should be treated with respect.

Even though the considered period is quite short, it is possible to get a general idea of the underlying hydrological system in the Engebächle watershed. To get more information related to the paired catchment study Engebächle and Selzenbächle, it would be a great advantage to intensify measurements in both of the watersheds.

Keywords

Natural tracer, electric conductivity; turbidity; runoff generation; forested watershed; land use; groundwater dynamics in storm runoff; soil moisture; physically based modelling; stream temperature; paired watershed study; hydrograph separation.

1 Einleitung

Im Zuge der Industrialisierung und Urbanisierung der letzten Jahrzehnte ist es notwendig geworden, immer mehr Menschen mit hochwertigem Trinkwasser zu versorgen.

In unseren Breitengraden ist es weniger problematisch dieser Nachfrage in Bezug auf die Quantität gerecht zu werden, tatsächlich aber gestaltet sich die Erhaltung der Qualität des Wassers zunehmend kritisch. Die Verfügbarkeit von Trinkwasser verhält sich nicht wie manch anderes Wirtschaftsgut, dessen Angebot sich ständig an der Nachfrage orientiert. Das Gegenteil ist der Fall: verstärkte Nutzung bringt eine größere Gewässerbelastung mit sich. Seit geraumer Zeit ist man aus diesem Grunde damit beschäftigt, die Auswirkungen des Industrialisierungsbooms auf die Gewässer abzumindern oder die ursprünglichen Zustände dieser, soweit möglich, wiederherzustellen und sie zu erhalten.

Forschungsarbeiten und Erfahrungswerte haben gezeigt, dass intakte Ökosysteme qualitativ hochwertigeres Trinkwasser liefern wie vergleichsweise durch Altlasten o.ä. belastete Gebiete. Die Trinkwasserversorgung wird also, zumindest in unserem Lebensraum, nicht durch die Quantität des Wassers eingeschränkt sondern durch dessen Qualität. Um diese zu gewährleisten und intakte hydrologische Systeme schützen zu können, ist es notwendig, diese Systeme in ihrer Funktion zu verstehen. Auch hier gilt das allgemeine Credo, dass man etwas nur dann schützen und erhalten kann, wenn man die Funktionsweise des Systems nachvollziehen kann.

Ein aktueller Forschungsschwerpunkt in der Hydrologie ist es, detaillierte Kenntnisse über unterschiedliche Komponenten des Abflussbildungsprozesses zu gewinnen.

Im Zuge dieser Fragestellung wurden am Institut für Hydrologie der Universität Freiburg u.a. Arbeiten von Didszun (2004), Lindenlaub (1998) und Uhlenbrook (1999) verfasst.

Neben der Zusammensetzung des Abflusses stellt sich auch die Frage, inwiefern sich die Umwelt eines hydrologischen Systems, u.a. Vegetation und Landnutzung, und dessen Veränderung auf die Abflussbildung und die Wasserqualität auswirken. Da Wasser ein Transport- und Lösungsmittel für verschiedenste Substanzen darstellt, spielt es auch in biochemischen Kreisläufen eine wichtige Rolle (Huntington et al., 1994).

Neben diesen Kriterien stellt aber auch die Pufferwirkung von Wäldern in Bezug auf Extremereignisse eine nützliche Funktion dar. Diese Funktion setzt jedoch ein funktionierendes Bodensystem voraus, welches wiederum stark durch Vegetation und Landnutzung geprägt ist.

Schon sehr früh beschäftigten sich Wissenschaftler damit. wie sich Landnutzungsänderungen, hauptsächlich in Bezug auf Wälder, auf die Abflussbildung von Gewässern auswirkt. Man vermutete einen Zusammenhang zwischen den Änderungen an dem Bewaldungsgrad z.B. durch Aufforstung oder Rodung und dem Abfluss (Andréassian, 2004; Brown et al., 2005; Naef et al., 2002; Niehoff et al., 2002). Die Auswirkungen im Zuge von Landnutzungsänderungen wurden teilweise mit Hilfe von paired-catchmentstudies, also ähnlich Einzugsgebieten (EZG) bei unterschiedlicher Vegetation, untersucht (Brown et al., 2005).

Diese Arbeit widmet sich ebenfalls der Abflussbildung unter bewaldeten EZG während sommerlicher Starkregenereignisse. Es werden Vergleiche der mit unterschiedlichen Landnutzungsarten und Vegetation versehener Gebiete in Bezug auf deren Abflussbildungsprozesse erstellt. Mit hilfe neuerer, bisher selten angewandter Methoden, wird versucht weitere aufschlussreiche Einblicke in die Prozesse der Abflussbildung unter bewaldeten Gebieten zu erhalten.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Aufbauend und resultierend aus der Arbeit von Adolph (2005) wird die Zusammensetzung des Abflusses unter bewaldetem Einzugsgebiet mit Hilfe hochaufgelöster hydrometrischer und tracer-basierter Messungen im Engebächle in Bezug auf sommerliche Niederschlagsereignisse untersucht. Eine parallel verlaufende Arbeit von Hänsler (2005) untersucht die Abflussgeneration bezüglich der Trockenphasen.

Neben dem positiven Einfluss von bewaldeten Gebieten auf die Wasserqualität, beeinflussen Wälder auch die Abflussganglinien von Gewässern massiv (Gutknecht, 1996; Post und Jones, 2001). Dies gilt es vermehrt zu untersuchen um möglichst viel Detailwissen zu erlangen.

Das eigens für diese Arbeit installierte Messnetz zur Erfassung von Niederschlag, Abfluss und Temperatur beschränkt sich in den Einzugsgebieten (EZG) Glasbach und Selzenbächle auf die Diversonden am Pegel, das EZG Engebächle ist zusätzlich mit weiteren Messgeräten versehen.

Zu den eingesetzten Messgeräten zählen weitere Diversonden in Grundwasserpegeln und Quellfassung zur kontinuierlichen Erfassung der Wasserstände, Leitfähigkeiten und Temperaturen. Weiterhin kommen Bodenfeuchtesonden und 18 Temperatursonden entlang des Bachlaufs und zwei Fluorometer zur Messung der Trübung zum Einsatz.

Über die gewonnen Temperatur- und Leitfähigkeitsdaten werden die verschiedenen Komponenten des Abflusses während der Ereignisse mit Hilfe einer Ganglinienseparation (GLS) identifiziert.

Während die Leitfähigkeit als Tracer zur Ganglinienseparation etabliert ist, wird die Temperatur noch nicht allzu lange und in kaum einer Studie zu diesem Zwecke eingesetzt.

Weiterhin gehen die Messdaten der Trübung, welche möglicherweise die Oberflächenkomponente indirekt repräsentieren, in die Abflusskomponententrennung ein.

Die Messungen sollen zum einen auf den Aspekt der landwirtschaftlich unterschiedlich genutzten Flächen betrachtet werden, zum anderen wird der Verlauf der Abflussganglinien während der Niederschlagsereignisse an Hand von Rezessionsanalysen untersucht. Dies soll speziell für die Einzugsgebiete (EZG) Engebächle (bewaldet) und Selzenbächle (landwirtschaftliche Flächen) durchgeführt werden.

Aus diesem Vergleich lassen sich dann Erkenntnisse in Bezug auf die Abflussbildung in Abhängigkeit von der Vegetationsdecke gewinnen.

Abschließend erfolgt eine Simulation der bemessenen Niederschlags-Abfluss-Beziehung im EZG Engebächle mit Hilfe des HBV-Modells.

Mit dieser Anwendung wird die Konzeptionalisierung der Abflussbildung überprüft. Außerdem soll geprüft werden, ob sich das HBV-Modell zur Anwendung in diesem Gebiet eignet.

Die Trübungs-, Temperatur- und Leitfähigkeitsdaten gehen zu Validierungszwecken in das Modell ein. Die in das Modell eingehenden Abflusswerte werden um den durch die Ganglinienseparation (GLS) über Temperatur- und Leitfähigkeitswerte ermittelten Ereigniswasseranteile reduziert. Hiermit wird bezweckt, dass das Modell nur den Basisabfluss bzw. den Zwischenabfluss in der Simulation berücksichtigt.

Beruhend auf der Annahme, dass die Trübung im Gewässer größtenteils durch Oberflächenabfluss verursacht wird, dienen diese Messwerte zur Ermittlung einer Oberflächenkomponente.

1.2 Stand der Forschung

Da in dieser Arbeit die abflussbildenden Prozesse unter bewaldeten Gebieten betrachtet werden, soll zuerst ein Überblick über die allgemeinen Abflussprozesse gegeben werden.

Der Abfluss stellt den durch das EZG transformierten Niederschlag dar. Er setzt sich aus unterschiedlichen Komponenten zusammen, welche unter gegebenen Bedingungen in ihrer Quantität variieren können. Die Komponenten sind im Folgenden Abschnitt in einen kurzen Überblick zusammengefasst.

Beim Horton'schen Oberflächenabfluss übersteigt die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität und fließt auf Grund dessen flächenhaft an der Oberfläche ab (Wenninger, 2002).Der Oberflächenabfluss tritt jedoch in bewaldeten Gebieten durch die dort vorherrschenden Gegebenheiten (u.a. Pedologie, Makroporen) selten auf (Pearce et al., 1986).

Eine weitere an der Oberfläche verlaufende Abflusskomponente wird durch den Sättigungsflächenabfluss beschrieben. Hierbei handelt es sich um Oberflächenabfluss auf gesättigten bzw. aufgesättigten Böden (Uhlenbrook, 1999). Das ebenfalls zur Abflussbildung beitragende Groundwater Ridging (Grundwasserberge) stellt einen Prozess dar, bei welchem das in vorfluternahen Talaquiferen gespeicherte Grundwasser der Flurabstand stark verringert wird und ausgedrückt wird. Zwei weitere abflussbildende Prozesse werden von (Uhlenbrook, 1999) wie folgt beschrieben: der Piston Flow Effekt, bei welchem vorfluterfern infiltrierendes Wasser an vorfluternahen Standorten Wasser durch Druckübertragungsmechanismen ausdrückt, und der Makroporenfluss, welcher einen sehr schnellen Wassertransport im Boden ermöglicht.

Da sich die Vegetation definitiv auf die abflussbildenden Prozesse auswirkt, gilt es nun im Detail zu klären, inwiefern sich der Wald auf die Transformation der Niederschlags in den Gebietsabfluss auswirkt. Hinsichtlich dieser Fragestellung wurden in den letzten Jahrzehnten einige Untersuchungen durchgeführt (Brown et al., 2005; Hegg et al., 2004; Post und Jones, 2001).

Das Ziel früherer Messungen war es, die Auswirkung von Wäldern auf das Abflussvolumen und die Abflussspitzen herauszufinden. In einem historischen Rückblick von Andréassian (2004) finden sich schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts Belege dafür, dass Rodungen in EZG generell eine Zunahme der Abflussspitzen und des Abflussvolumen bewirken. Es wurde gezeigt, dass schon 40% gerodete Waldfläche einen erheblichen Anstieg des Abflusses bewirken.

Weitere Untersuchungen belegen die oben erwähnten Feststellungen: die Reduktion der Waldbedeckung eines EZG bewirkt erhöhte Abflusswerte, im Gegensatz dazu wird über Wiederaufforstungsmaßnahmen eine Reduktion des Abflusses bewirkt.

Was sämtliche Untersuchungen bestätigen ist, dass sich der "Faktor" Wald auf die abflussbildenden Prozesse auswirkt. Da viele der Untersuchungen in unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen durchgeführt wurden, können die daraus gewonnenen Aussagen weder verallgemeinert noch ohne weiteres auf andere Gebiete übertragen werden. Grundlegend soll davon ausgegangen werden, dass mehrere komplexe Prozesse zusammenwirken und die "Decodierung" dadurch erschwert wird.

Auf Grund dieser Tatsachen ist die Forschung in Bezug auf Abflussbildung unter bewaldeten EZG in den letzten Jahrzehnten beachtlich vorangeschritten.

In Bonell (1993) werden diese Fortschritte ausführlich diskutiert. Es wird verdeutlicht, dass die Infiltrationskapazität von bewaldeten Flächen selten überschritten wird und auf Grund

dessen der Oberflächenabfluss weitaus weniger zur Generation des Abflusses beiträgt als der Zwischenabfluss, welcher unter Wäldern begünstigt wird. Dieses durch Makroporen begünstigte Phänomen resultiert aus gut durchwurzelten Böden, sowie auch aus Wurmgängen u.ä. Das infiltrierende Wasser kann der gesättigten Bodenzone durch die Makroporen wesentlich schneller zugeführt werden, als über die Bodenmatrix.

Burch et al. (1987) vergleichen das Verhalten eines bewaldeten und unbewaldeten EZG und können in Bezug auf den Makroporenfluss belegen, dass dieser im unbewaldeten Gebiet nicht vorhanden ist. Das unbewaldet Gebiet generiert voluminösere Abflüsse und höhere Abflussspitzen. Weiterhin belegen Untersuchungen, dass der laterale Zwischenabfluss im Ereignisfall zu langsam ist um signifikante Anteile am Direktabfluss zu stellen (Kirkby, 1988).

Zum jährlichen Verlauf des Abflussbildung unter bewaldeten Gebieten lässt sich auch sagen, dass die Bäume während der Vegetationsphase erhebliche Mengen an Wasser aus dem Boden saugen. Dies bedeutet eine geringere Bodenfeuchte, wodurch sich auch der Basisabfluss im Verhältnis zu Weideflächen verringert (Brown et al., 2005).

Einige weiteren Arbeiten beschäftigen sich allgemein mit Änderung der Landnutzung in EZG und deren Auswirkungen auf abflussbildende Prozesse (Naef et al., 2002; Niehoff et al., 2002). Niehoff et al. (2002) haben einige Szenarien in Bezug auf Landnutzungsänderungen in einem Modell, dem LUCK (Land-use change modelling kit), unter Berücksichtigung unterschiedlicher Niederschlagsintensitäten berechnet und konnten mögliche Auswirkungen quantifizieren.

Beide Untersuchungen gehen davon aus, dass die dominierenden Abflussprozesse unter bewaldeten EZG durch die langsameren Komponenten gegeben sind.

Wie kann man nun also vorgehen, um die jeweiligen dominierenden abflussbildenden Prozesse zu quantifizieren?

Ein von McDonnell (1990) angewandter Ansatz kombiniert die hydrometrischen Methoden mit hydrochemischen Analysen. Dieser Ansatz wird als Herausforderung in der Forsthydrologie betrachtet.

Weiterhin soll der Einsatz von physikalisch basierten Modellen, gekoppelt mit fortschreitender Arbeit in der experimentellen Hydrologie, weitere Einblicke in die Systeme ermöglichen. Die physikalisch basierten Modelle haben sich in der Datenanalyse als nützliche Tools erwiesen, und können deshalb zur Überprüfung hydrologischer Thesen zu Rate gezogen werden (Grayson et al., 1992).

Neben der Frage, wie sich bewaldete EZG auf die Abflussvolumen und Abflussspitzen auswirken, gilt es auch herauszufinden, inwiefern sie die Abflussgeneration, also die unterschiedlichen Anteile der Komponenten beeinflussen. Wie oben bereits erwähnt, spielt der Oberflächenabfluss in Waldgebieten nachweislich kaum eine Rolle. Folglich muss der größte Anteil des Wassers in den Boden infiltrieren und als Zwischenabfluss oder als Basisabfluss dem Vorfluter zuströmen.

Die zur Abflussbildung beitragenden und dominierenden Prozesse können über eine Ganglinienseparation (EMMA, End Member Mixing Analysis; Abflusskomponententrennung) quantifiziert werden.

Während die Komponententrennung früher grafisch erfolgte, kommen heute, nach langjährigen experimentellen Untersuchungen, Tracer zum Einsatz. Diese Tracer sind u.a. stabile Isotope oder konservative geochemische Tracer und haben sich zum Einsatz in kleineren EZG als gewöhnliches Werkzeug etabliert (Weiler et al., 2003). Die

Komponenten werden unter Berücksichtigung des (chemischen und isotopischen) Massenerhaltungsgesetzes quantifiziert (Ogunkoya und Jenkins, 1993).

In dieser Arbeit werden Temperatur und Leitfähigkeit als Tools zur Komponententrennung eingesetzt. Aus diesem Grund wird im folgenden hauptsächlich auf Anwendungen eingegangen, bei welchen diese beiden natürlichen Tracer zum Einsatz kommen.

Voraussetzung für die Anwendung einer Ganglinienseparation (GLS) bzw. für die Verwendung spezifischer Tracer ist, dass die Konzentrationen des Vorereigniswasser und die des Ereigniswasser signifikant voneinander unterscheidbar sind (Sklash und Farvolden, 1979). Zudem sollen die Konzentrationen über den betrachteten Zeitraum konstant bleiben, es sei denn, die Schwankungen können messtechnisch erfasst werden.

Das Ereigniswasser wird meist als event water bezeichnet, womit das neue, in das System eingehende Wasser, also der Niederschlag, gemeint ist, wobei das Vorerigniswasser als preevent water, also als älteres, schon über längeren Zeitraum im System verweilendes Wasser (Bodenwasser, Grundwasser) steht.

Die elektrische Leitfähigkeit wird in mehreren Studien als Tracer zur GLS verwendet und hat sich als sehr brauchbar erwiesen (Laudon und Slaymaker, 1997; Ogunkoya und Jenkins, 1993; Sklash und Farvolden, 1979).

Aus den Untersuchungen von Laudon und Slaymaker (1997) geht hervor, dass bei der Berechnung der Vorereigniswasserkomponente unter Verwendung der Leitfähigkeit deren Anteil meist 10-20% geringer sind als die Anteile, welche über weitere Tracer (Deuterium, O-18) ermittelt werden.

Für eine Zwei-Kopmonenten-Trennung werden zwei Endmember benötigt welche zum einen den Niederschlagsanteil, zum andere den Grundwasseranteil repräsentieren.

Obwohl die Anteile, welche über die Leitfähigkeit ermittelt werden im Vergleich zu anderen konservativen Tracern häufig zu geringe Vorereigniswasseranteile liefern, wird sie dennoch oft angewandt, da sie kontinuierlich und ohne großen Aufwand gemessen und in Datenloggern gespeichert werden kann.

Für die Anwendung der Temperatur zur Abflusskomponententrennung über eine EMMA können trotz intensiver Literaturrecherche kaum Untersuchungsberichte aufgefunden werden. Die Temperatur wird in der aktuellen Forschung gerne als Grundwassertracer verwendet, etwa um dessen Zirkulationstiefe abzuschätzen. Dies gestaltet sich jedoch teilweise problematisch, da die Wärmetransportgleichung und die Massengleichung berücksichtigt werden müssen (Anderson, 2005; James et al., 2000).

Hannah et al. (2004) haben versucht diese Interaktionen in ihrer Studie zu verifizieren. Um die Energiebilanz eines Flusses zu beschreiben wurden hauptsächlich meteorologische und hydrologische Faktoren berücksichtigt, welche zu dem Ergebnis führten, dass das Bachbett die eine große Energiequelle darstellt und die fühlbare Wärme die Hauptgröße der atmosphärischen Energiequelle ist. Die quantitative Ermittlung dieser Größen gestaltet sich jedoch in der Praxis äußerst komplex.

Wie auch bei der Leitfähigkeit als Tracer zur Komponententrennung gelten für die Anwendung der Temperatur die selben Kriterien: Ereigniswasser- und Vorereigniswassertemperatur müssen signifikant voneinander unterscheidbar sein. Das Niederschlagsereignis muss die Gewässertemperatur also deutlich verändern.

Es lässt sich jedoch sicher sagen, dass Änderungen der Gewässertemperatur häufig auf einer Änderung des Ursprungs des Bachwassers beruhen (Shanley und Peters, 1988).

In der Arbeit von Shanley und Peters (1988) wird die Temperatur als Tracer verwendet.

Da es sich schwierig gestaltet, die Niederschlagstemperatur zu erfassen, wird für diese die Lufttemperatur als Näherung eingesetzt.

Sie können mit Hilfe von Grundwassertemperatur belegen, dass der Temperatursturz während eines Ereignisses durch einströmendes Vorereigniswasser verursacht wird. Diese These wurde durch Isotopen- und Chemiedaten bestätigt. Die Anwendung einer GLS alleine auf Temperaturmesswerten basierend scheint jedoch noch in den "Kinderschuhen" zu stecken.

Dies kann sicherlich auch damit begründet werden, dass es einen signifikanten Temperatursturz in der Gewässertemperatur benötigt und diese dazu auch noch registriert werden muss.

Die Anwendung der Temperaturdaten zur Abflusskomponententrennung im Zuge dieser Arbeit kann also als experimenteller Ansatz betrachtet werden.

2 Die Untersuchungsgebiete

Um der Fragestellung dieser Arbeit gerecht zu werden, müssen die Untersuchungsgebiete unterschiedliche Bedingungen erfüllen. Entscheidend bei der Auswahl der Einzugsgebiete sind auf Grund dessen vor allem die landwirtschaftlichen Verhältnisse. Es soll unter anderem ein Vergleich zwischen bewaldeten und landwirtschaftlich genutzten Gebieten in Bezug auf deren Abflussbildungsprozesse dargestellt werden. Neben der unterschiedlichen Flächennutzung muss jedoch beachtet werden, dass die Gebiete in ihrer Klimatologie, Morphologie und Geologie nicht allzu unterschiedlich sein dürfen. Unterscheiden sie sich signifikant voneinander, kann ein Vergleich der Systeme nur mäßig erfolgen.

Da die Messgeräte, welche es zu installieren gilt, wöchentlich ausgelesen und kontrolliert werden müssen, sollten die Gebiete in näherer Umgebung liegen.

Im Folgenden werden die ausgewählten Einzugsgebiete detailliert vorgestellt.

2.1 Klimatische Verhältnisse

Die in Abschnitt 2.1 enthaltenen Informationen und Werte sind, soweit keine anderen Angaben erfolgen, Parlow und Rosner (1997) entnommen.

Das Makroklima des Oberrheingrabens wird durch das System der atmosphärischen Zirkulation der Nordhalbkugel beeinflusst. Durch die Lage der Region und ihrer topographischen Einbindung wird das für uns entscheidende Mesoklima bestimmt.

In der durch die Topographie unbeeinflussten freien Atmosphäre und in den Hochlagen des Schwarzwaldes dominieren Winde aus dem westlichen Sektor, auch als allgemeine Westwindzone bezeichnet. Diese bringen über das gesamte Jahr ausreichend Niederschläge, wodurch es keine ausgeprägten Trocken- und Feuchtperioden gibt.

Der Oberrheingraben wird durch ein Wechselspiel von maritim-atlantischen und kontinentalen Luftmassen bestimmt. Diese Übergangszone wird auch sub-atlantisch genannt.

Durch die Erhebungen, Schwarzwald und Vogesen, kommt es zu ausgeprägten Luv- und Leeeffekten und somit zu asymmetrisch verteilten Niederschlägen. Diese nehmen von Westen (ca. 550 mm, Colmar) nach Osten (ca. 1000 mm, Freiburg) hin zu.

Die topographische Lage bewirkt eine stärkere Beeinflussung des Klimas durch subtropisch-mediterrane Luftmassen, welche u. a. über die Burgundische Pforte (Westen) aus dem Rhônetal überführt werden. Der Schwarzwald und das Jura erschweren die Beeinflussung des Klimas von Osten und Süden her.

Generell gilt auch im Oberrheingraben eine Temperaturabnahme mit der Höhe (hypsometrischer Temperaturgradient). Dieser Gradient liegt, je nach vorliegenden Luftmassen, zwischen $0,4 - 0,7^{\circ}$ C. Bei einem Höhenunterschied von etwa 1350 m zwischen der Rheinebene (Straßburg, 140 m NN) und dem höchsten Lagen am Feldberggipfel (1493 m NN) bedeutet dies eine durchschnittliche Temperaturabnahme von 7°C bis maximal 13°C. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt in der Rheinebene 10°C und nimmt mit der Höhe ab (700-900 m NN, 6-7°C; >900 m NN, 3-4°C).

Die Isohyeten zeichnen das Bild der Isohypsen grob nach.

Die allgemeine Niederschlagszunahme mit der Höhe (rund 100 mm pro 100 m) ist im Winter stärker ausgeprägt als im Sommer. Im Sommer dominieren konvektive Niederschläge in Form von Gewitterschauern die Niederungen. Die Kammlagen erreichen einen Jahresdurchschnittswert von etwa 1700 – 1900 mm. Das Niederschlagsmaximum liegt im Tiefland im Juni bis August und weist somit einen breitentypischen Jahresgang auf. Zwischen den Rheinniederungen und den Kammlagen kann es eine durchschnittliche Jahresdifferenz der Niederschlagssumme von über 1000 mm geben. Der größte Teil des Niederschlags fällt in den Hochlagen als Schnee.

2.2 Topographie und Morphologie

2.2.1 Glasbach

Das Einzugsgebiet des Glasbaches befindet sich im nordöstlichen Stadtteil Freiburgs (Herdern).

Das EZG wird stark von Siedlungsflächen geprägt, wobei im oberen Bereich, welcher in dieser Arbeit von Interesse ist, ein großer Waldanteil vorliegt.

Der Pegel liegt über der Einflussgrenze der Siedlungsflächen auf 320 m NN. Somit wird die gesamte, aus den Pegeldaten gewonnenen Information, dem bewaldeten Anteil des Gebietes zugeschrieben.

Das Einzugsgebiet hat eine Gesamtgröße von 1,4 km² mit einer maximalen Höhe von 773 m NN (Rosskopf) und dem tiefsten Punkt (Pegel) auf 320 m NN.

Die heutigen Oberflächenformen der Täler und Höhenlagen um Freiburg sind durch glaziale Formungsprozesse entstanden, welche sich in der Würmkaltzeit vollzogen haben (Metz, 1997).

2.2.2 Selzenbächle

Das EZG Selzenbächle liegt etwa 15 km südlich von Freiburg bei Au, Merzhausen im Hexental.

Die Umgebung Merzhausens ist im Westen durch die Oberrheinebene durch die sogenannte Vorbergzone im zentralen Teil und im Osten durch den Schwarzwald geprägt. Die Randverwerfung, welche in NNE –Richtung verläuft, zeigt den Grenzbereich zwischen dem Kristallinen des Schwarzwalds und den Sedimenten der Vorbergzone.

Im Osten der Vorbergzone erhebt sich mit deutlichem Anstieg das kristalline Grundgebirge des Schwarzwaldes.

Das EZG Selzenbächle ist mit einer Fläche von 1,9 km² das Größte in dieser Untersuchungsreihe. Das EZG weist im Vergleich zu den beiden anderen EZG eine länglichere Form auf und hat bei einer maximalen Erhebung von 885 m NN (Hörnle) und dem tiefsten Punkt, 410 m NN, dem Pegel ein mittleres Gefälle von 36%.

Die höheren Lagen der westlichen Wasserscheide grenzen direkt an die Einzugsgebietsgrenzen des Engebächle an. Die Lauflänge des Hauptarmes beträgt 1,8 km, die Nebenarme ergeben zusätzlich noch 1,3 km an Gerinnenetzen.

Das Gesamtgebiet um Freiburg ist glazial geformt, also auch sämtliche der drei betrachteten Untersuchungsgebiete.

Ein gutes Beispiel für die glaziale Prägung des Gebietes in näherer Umgebung ist das Tal von St. Wilhelm, welches als am Besten erhaltenes Trogtal im Schwarzwald gilt.

Nach (1997) waren unter anderem Feldberg, Belchen und Schauinsland Zentren einer etwa 1000 km² großen flächenhaften Maximalvergletscherung der Würmvereisung des Südschwarzwaldes.

2.2.3 Engebächle

Das EZG Engebächle befindet sich ebenfalls etwa 15 km südlich von Freiburg bei Wittnau/Biezighofen im Hexental. Dieses Gebiet war ebenfalls Objekt in vorangegangenen Untersuchungen (Adolph, 2005). Auf Grund anthropogener Störfaktoren wird der Pegel im Vergleich zu den Untersuchungen im vergangenen Jahr etwa einen Kilometer bachaufwärts verlegt, womit sich das EZG auf 1,3 km² verringert.

Mit einer maximalen Erhebung von 850 m NN und dem Pegel auf etwa 420 m NN überwindet das Engebächle die Strecke mit einem mittleren Bachlaufgefälle von 4% und einem mittleren Gefälle von 19%.

Die Quelle des Engebächles befindet sich am Schauinsland. In seinem Lauf wird es noch von einigen weiteren Zuflüssen gespeist, bevor es in Au mit dem Selzenbächle zusammenfließt, und dann über den Dorfbach in Merzhausen der Dreisam zugeführt wird. Der Hauptarm (Quelle – Gebietsauslaß) beträgt etwa 2,2 km, die zwei bestehenden Nebenarme haben eine gesamte Länge von 1,1 km.

Die glaziale Prägung des Gebietes um das Engebächle unterliegt den gleichen Gebenheiten wie jene des Selzenbächles und des Glasbaches.



Abbildung 2.1: Einzugsgebiete Engebächle (links) und Selzenbächle süd-östlich von Freiburg

2.3 Geologie und Pedologie

Die drei Untersuchungsgebiete liegen in ihrer großräumlichen Lage alle in einer geologisch interessanten und vielseitig geprägten Umgebung: der Übergangszone Oberrheingraben – Schwarzwald (Schwarzwaldrandverwerfung) und deren Vorbergzone (Ernst und

Widemann, 1986). Die Unterlage wird von kristallinem Grundgebirge gebildet, welches fast zu zwei Dritteln aus metamorphen Gesteinen (Gneisen) besteht. Diese entstehen durch mehrmalige Umwandlung aus Sedimenten und magmatischen Erstarrungsgesteinen. Ausgangsgesteine der heute im Schwarzwald verbreiteten Gneise bilden Sedimente, welche im Präkambrium überwiegend in Gestalt von Grauwacken, Arkosen und Schiefertonen in mächtigen Serien abgelagert wurden (Geyer und Gwinner, 1968).

Durch weitere Genese dieser Gesteinsserien entstanden unter anderem auch Anatexite.

Die Besonderheit der Gebiete östlich der Schwarzwaldrandverwerfung ist, dass die Bodenbildung nicht die anstehenden Gesteine erfasst, sondern die hangenden periglazialen und glazialen Schuttsedimente. Die Mächtigkeit dieser gesteinsüberziehenden Sedimente beträgt zwischen 1-2 m (Stahr, 1979).

Weiterhin weisen Hädrich und Stahr (1997) darauf hin, dass die Böden in der Umgebung von Freiburg nur unscharf abgegrenzt werden können, welches sie durch die Vielfalt der naturräumlichen Ausstattung begründen, die sonst in Mitteleuropa selten anzutreffen ist.

2.3.1 Glasbach

Das EZG Glasbach befindet sich auf kristallinem Grundgebirge welches überwiegend von Paragneis dominiert wird .

Die typische Schieferung (Paralleltextur) dieser Gesteine ist durch eine Regionalmetamorphose zustande gekommen.

Je nach Ausgangsgestein unterscheiden sich Para- und Orthogneise. Die Paragneise entstehen aus ehemaligen Sedimenten, die Orthogneise bilden sich aus magmatischpalingenen Erstarrungsgesteinen (Geyer und Gwinner, 1968).

Für die am Glasbach vorherrschende Gneisart, Paragneis, stellen also präkambrische Sedimentserien die Bildungsgrundlage dar. Sie bestehen hauptsächlich aus Quarz, Feldspäten (Plagioklas, Orthoklas) und Glimmer (Biotit) (Ernst und Widemann, 1986) und lassen sich auf Grund ihrer lagigen Ausbildung parallel zur Schieferungsebene spalten.

Vor allem in den höheren Lagen treten zusätzlich noch vereinzelt Amphiboliteinlagerungen auf. Die Amphibolite zählen zu den dunklen Metamorphiten.

Nach Geyer und Gwinner (1968) sind die örtlich auftretenden karbonatischen Sedimente in Amphibolite und Kalksilikatfelse umgewandelt worden. Amphibolite treten sehr selten auf und können auch aus Magmatiten hervorgehen, wobei jedoch die Genese aus Sedimenten überwiegt.

Die pedologischen Verhältnisse östlich der Schwarzwaldrandverwerfung sind, wie bereits erwähnt, dadurch geprägt, dass das anstehende Gestein nicht von der Bodenentwicklung erfasst wurde, dafür aber die hangenden periglazialen und glazigenen Lockersedimente (Stahr, 1979). Über dem festen und unverwitterten Gestein lagert zunächst eine an Ort und Stelle gebildete und verbliebene Zersatzzone aus Grus, Steinen und Blöcken. Darüber befindet sich die Basisfolge (erste echte periglaziäre Schuttschicht), welche von der Hauptfolge geschlossen wird. Sie entstand aus einem oberflächlich auftauenden Permafrostboden, in welchen später teilweise Löß eingeweht wurde. An besonders steilen Hängen entwickelte sich noch oft eine Deckfolge (Hädrich und Stahr, 1997).

Im gesamten Einzugsgebiet des Glasbach dominiert demnach die Braunerde.

2.3.2 Selzenbächle

Das dem Einzugsgebiet Selzenbächle Abbildung 2.1 zu Grunde liegende anstehende Gestein ist hauptsächlich durch Para- und Orthogneise, Anatexite und verschiedene Granite geprägt.

Die als Antexite bezeichneten Gesteine, zu denen unter anderem die Meta- und Diatexite gezählt werden, wurden nach der Vergneisung noch zusätzlich während der regionalen Anatexis (Aufschmelzung) weiter umgebildet (Ernst und Widemann, 1986).

Diese Gesteinsserien geraten durch Versenkung in große Tiefen in Bereiche mit gesteigertem Druck und erhöhter Temperatur, wobei sie in entsprechendem Maße der Aufschmelzung unterliegen. Weiterhin bilden sich heterogene Mischungen, die keine Zufuhr magmatischer Komponenten erhalten, bei denen sich jedoch durch teilweise Aufschmelzung (Metatexis) die hellen, bei niedrigerer Temperatur zu mobilisierenden Mineralkomponenten (Quarz, Feldspäte, Apatit) von den dunklen Gemengeteilen (Glimmer, Hornblende usw.) absondern (Geyer und Gwinner, 1968).

In dem Gebiet um das Selzenbächle herrscht ebenfalls die Braunerde vor (Wasser- und Bodenatlas, 2004).

Die Bildungsprozesse ähneln denen im Gebiet des Glasbaches. Über dem anstehenden Gestein lagert zunächst eine Zersatzzone aus Grus, Steinen und Blöcken, welche von einer periglazialen Schuttschicht, der Basisfolge, abgelöst wurde.

Sie entsteht durch gletscherartiges Hinabgleiten eines Eis-Boden-Gemisches mit Temperaturen nahe 0°C (Hädrich und Stahr, 1997). Die Hauptfolge entsteht aus oberflächlich auftauendem Permafrostboden. Im Bildungszeitraum kommt es zu Lößeinwehungen, welche nach Westen hin unter 500 m NN einen größeren Lößanteil in der Hauptfolge wie in der Basisfolge verursachen.

2.3.3 Engebächle

Geologisch betrachtet befindet sich das Gebiet ebenfalls auf kristallinem Grundgebirge, welches sich in drei Regionen unterteilen lässt. Im Quellgebiet trifft man hauptsächlich auf Diatexite, wobei der mittlere Teil von Metatexiten dominiert wird und der Bereich um den Pegel von Para- und Orthogneisen geprägt ist.

Auf Grund der geringen räumlichen Entfernung des Engebächle vom Selzenbächle unterscheiden sich die geologischen Verhältnisse nur minimal. Das Einzugsgebiet des Engebächle weist einen größeren Anteil an Anatexiten auf. Anatexite entstehen, wie bereits erwähnt, aus Orthogneisen (Metatexite) und Paragneisen (Diatexite), wenn diese weiter, in unterschiedlichen Graden, aufgeschmolzen werden und anschließend wieder neu kristallisieren.

Im Großen und Ganzen ist auch im Einzugsgebiet des Engebächles die Braunerde mit einer typischen (Ah-Bv-C) Folge dominierend. Laut Hädrich und Stahr (1997) wird dieser an besonders steilen Hängen, wie sie am Engebächle anzutreffen sind, aus dem typischen Syrosem (Rohboden) entwickelt. Ansonsten unterscheiden sich die bodenbildenden Prozesse kaum von denen der Gebiete um den Glasbach und um das Selzenbächle.

2.4 Vegetation und Landnutzung

2.4.1 Glasbach

Durch die stadtnahe Lage des Gebietes wird dieses gerne als Ausflugsmöglichkeit genutzt.

Die Vegetation ist, laut dem Städtischen Forstamt Freiburg, dem Bergwald zuzuordnen und wird von diesem zu 100% dominiert. Er zieht sich von den letzten Häusern der Stadt bis hinauf zum Schauinsland. Die Hauptbaumarten sind neben Buche, Douglasie, Fichte und Tanne in geringerer Anzahl Eiche, Ahorn und einige weitere Laub- und Nadelhölzer. Der Wald ist wegen der großen Holzvorräte wirtschaftlich besonders interessant.

Landwirtschaftlich genutzte Flächen oder Brachflächen finden sich in diesem Gebiet nicht.

2.4.2 Selzenbächle

Das Selzenbächle nimmt in dieser Untersuchung bezüglich der Vegetation und der Landnutzung eine besondere Stellung ein. Bei einem Waldanteil von nur fünfundzwanzig Prozent unterliegt das Gebiet einem starken Einfluss von landwirtschaftlichen Nutzflächen. Diese sind zum einen auf extensive Weidebewirtschaftung und zum anderen auf Grünfuttergewinnung ausgelegt.

Der Waldanteil setzt sich im unteren Teil hauptsächlich aus diversen Nadelhölzern zusammen, um den Pegelbereich trifft man auf den vom EZG Glasbach gewohnten Mischwald, dominiert von Buchen und Fichten.

2.4.3 Engebächle

Im Einzugsgebiet des Engebächles herrscht in etwa die gleiche Situation wie im Gebiet des Glasbaches. Wie bereits erwähnt wurde der Pegel auf Grund anthropogener Störfaktoren um etwa 1000 m bachaufwärts verlegt. Der Bach durchfließt somit keine landwirtschaftlich genutzten Flächen mehr und weist ebenfalls ein zu hundert Prozent bewaldetes Einzugsgebiet auf.

Das Waldgebiet um das Engebächle wird als forstwirtschaftliche Fläche genutzt und dient gleichzeitig als Naherholungsgebiet für Anwohner. Der Baumbestand gleicht im Großen und Ganzen dem des Selzenbächle. Neben Buche, Fichte und Douglasie tritt unter anderem der Bergahorn auf.

Eine Besonderheit im Engebächle stellt der vorhandene Fischteich dar. Dieser Fischteich befindet sich etwa 50 m oberhalb des Pegels und wird vom Bachwasser gespeist, welches durch den Fischteich geleitet wird, und am Ende über einen Auslauf wieder dem Engebächle zugeführt wird.

2.5 Quellen Engebächle

Im Einzugsgebiet Engebächle wurde uns der Zutritt zu zwei Quellfassungen, Quellfassung Steineck und Quellfassung Sägedobel, der Gemeinde Wittnau gestattet.

Die Quellfassungen bestehen jeweils aus sechs einzelnen Quellen, die in einem Sammelbecken gefasst werden.

Sie dienen in dieser Untersuchung hauptsächlich dazu, die Grundwasserbeschaffenheit (Temperatur, Leitfähigkeit) und die Speicherkapazitäten des Bodens zu beschreiben. Die Quellen werden im Zuge einer anderen Diplomarbeit wöchentlich auf die chemische Zusammensetzung beprobt, gleichzeitig werden von jeder einzelnen Quelle Temperatur, Leitfähigkeit und Schüttung gemessen.

3 Methodik

Um die erforderlichen Daten zu erlangen, muss ein Messnetz installiert werden. Dies ist, abhängig vom betreffenden Gebiet, mehr oder weniger zeit- und arbeitsaufwändig. Vor allem im Engebächle gestaltet sich das Design dieses Messnetzes sehr arbeitsintensiv. Neben einem neuen Messwehr werden Grundwasserpegel gesetzt, Bodenprofile gegraben und mehrere Messsonden ausgebracht. Nebenbei werden Längsprofile der Temperatur und der Leitfähigkeit im Bachlauf erstellt.

Während der gesamten Messphase hindurch stellt die wöchentliche Pflege des Messnetzes und die Aufarbeitung der ausgelesenen Daten ein sehr aufwändiges Verfahren dar.

3.1 Angewandte natürliche Tracer

In der vorangegangenen Arbeit von Adolph (2005) werden die Temperatur und Leitfähigkeit bereits als natürliche Tracer eingesetzt. Neben diesen beiden, wiederholt angewandten natürlichen Tracern kommt eine neue Komponente hinzu, die Trübung. Diese soll dabei helfen, die Abflusskomponenten bezüglich Niederschlagsereignissen zu verifizieren. Diese Methode wurde noch nicht angewandt und soll im Rahmen dieser Diplomarbeit als neue Methode eingesetzt werden.

3.1.1 Temperatur

Die Temperatur von Fließgewässern ist stark von der Temperatur ihrer Zuflüsse abhängig. Zu solchen Zuflüssen zählen Grundwassereinströme (z.B. Quellen), welche von natur aus geringe jahreszeitliche Temperaturdifferenzen aufweisen, sowie auch Zwischen- und Oberflächenabflüsse, welche sich durch größere Temperaturschwankungen auszeichnen. Ferner wirken sich neben Boden- und Gesteinstemperatur des Bachbettes Lufttemperatur und Beschattungsgrad durch die Uferzone (Wohlrab et al., 1992) auf die Gewässertemperatur aus. Auf Grund der hohen Wärmekapazität von Wasser ist generell festzustellen, dass tägliche oder jahreszeitliche Temperaturschwankungen in Gewässern langsamer erfolgen als über Landflächen und die Intensität der Schwankungen zudem direkt vom Volumen abhängig sind (Hannah et al., 2004).

Dem Fließgewässer zugeführtes Wasser verändert dessen ursprüngliche Temperatur und lässt auf die Herkunft der Komponenten schließen (Shanley und Peters, 1988). Es kann somit also als sogenannter Summentracer verwendet werden.

Auf Grund der generell geringeren Temperaturen von Grundwasser ist es möglich mit Temperaturmessungen an der Gewässeroberfläche Aussagen über Wassereinbrüche aus der Tiefe zu machen (Käss, 1992).

Als Grundlage dient hier die Annahme, dass der Abfluss in Trockenzeiten vom Grundwasser gespeist wird (Basisabfluss) und die Gewässertemperatur somit einzig durch die Grundwasserkomponente geprägt wird.

3.1.2 Trübung

Jedes Fließgewässer führt mehr oder weniger große Mengen von Feststoffen mit sich. Je nach ihrem gewichts- und strömungsbedingten Verhalten im Wasser kann man zwischen

- Schwimmstoffen: Feststoffe meist organischer Art, die leichter als Wasser sind und daher auf ihm schwimmen.
- Schwebstoffen: Feststoffe meist mineralischer Art, die mit Wasser im Gleichgewicht stehen oder durch Turbulenz in Schwebe gehalten werden.
- Sinkstoffen: Schwebstoffe, die abgesunken sind (Abnahme des Strömungsauftriebes und der Turbulenz)
- Geschiebe: Feststoffe, meist Gesteinstrümmer, die durch Wasser an der Gewässersohle bewegt, d. h. gerollt und geschoben werden unterscheiden.

Aus dieser Definition nach Wohlrab et. al (1992) lässt sich erkennen, dass es zwischen den einzelnen Größen keine scharfen Grenzen gibt. Für die Anwendung in dieser Untersuchung spielen jedoch nur die Schwebstoffe eine Rolle, da diese sozusagen im Durchfluss enthalten sind

Der Grenzwert für die Größenordnung von Schwebestoffen ist, wie bereits erwähnt, nur vage definiert. Die Angaben reichen von 0-2,4 mm bis zu einem Durchmesser von > 0,2 mm (Burz, 1958).

Eine weitere Definition für Trübung wird vom United States Geological Survey gegeben, in welcher Trübung als Ausdruck der optischen Konsistenz einer Wasserprobe, welche Streuung von Lichtstrahlen verursacht, oder diese absorbiert (Erwärmung) anstatt diese durch die Probe hindurchtreten zu lassen betrachtet wird (Gray und Glysson, 2002). Die Trübung wird durch gelöstes Material wie Lehm und Schluff oder Mikroorganismen u.ä. verursacht. Dies bestätigt auch Nydegger (1967) in seiner Untersuchung.

Es ist problematisch, die Herkunft der Trübung genau zu definieren. Neben den oberflächlichen Quellen ist es ebenso möglich, dass das gelöste Material aus dem Bachbett selbst stammt. Folglich kann man zu einem Trugschluss gelangen, da die Annahme, die Konzentration der Trübung käme alleine durch oberflächliche Zuflüsse zustande und könne somit mit der Oberflächenkomponente im Gesamtabfluss in Relation gesetzt werden, nicht mehr gültig wäre.

Die Ermittlung von Trübungsraten (Sedimentfracht) dient im Allgemeinen hauptsächlich zur Berechnung von Erosionsraten (Pavanelli und Pagliarani, 2002; Sun et al., 2001) und zur Beobachtung von Wasserqualität in Bezug auf die Trinkwasserversorgung. Die Trübungswerte, welche im Zusammenhang mit dieser Messkampagne ermittelt werden, sollen Aussagen über die Oberflächenkomponente im Abfluss geben. Die Annahme, dass höhere Trübungswerte auf einen großen Anteil des Oberflächenabfluss in einem Gewässer hinweisen liegt dieser Anwendung zu Grunde.

3.1.3 Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit von reinem Wasser ist wegen des geringen Anteils an dissoziierten H^+ und OH^- -Ionen gering (Baumgartner und Liebscher, 1990).

Echte und potenzielle Elektrolyte dissoziieren in wässriger Lösung, die dabei entstehenden Ionen machen die Lösungen elektrisch leitfähig (Tipler, 2000).

Mit steigender Temperatur nimmt die Eigenbewegung der Moleküle, die Brown'sche Molekularbewegung, stark zu (Mortimer, 1996). Somit steigt auch der Dissoziationsgrad und gleichzeitig erhöht sich die Leitfähigkeit.

Neben der Temperatur ist die Leitfähigkeit vor allem vom Herkunftsraum des Wassers, also von der geochemischen Zusammensetzung des Substrats durch welches das Wasser diffundierte, abhängig. In diesem Zusammenhang lässt sich auch auf die Verweilzeiten von Wasser in einem System schließen. Vorausgesetzt es herrschen gleiche geologische und geochemische Bedingungen kann man annehmen, dass längere Verweilzeiten von Wasser in einem System zu einer höheren Leitfähigkeit führen, da mehr Ionen gelöst werden (Hölting und Coldewey, 2005).

Auf Grund dieser Tatsachen wird versucht Herkunftsräume und Verweilzeiten, hauptsächlich in Bezug auf Niederschlagsereignisse, des Wassers zu definieren.

Zum Vergleich mit den Leitfähigkeitswerten im Fließgewässer stehen Leitfähigkeitswerte aus drei Grundwasserpegeln und den Quellen zur Verfügung.

3.2 Hydrometrische Ausstattung der Einzugsgebiete

3.2.1 Niederschlag

Für die Erfassung des Niederschlags stehen zwei Messgeräte zur Verfügung. Für das Einzugsgebiet Glasbach kann auf die Niederschlagsdaten des Meteorologischen Instituts Freiburg zurückgegriffen werden.

Dieser wird auf eine Höhe von 325 m auf dem Dach eines Hochhauses über eine Niederschlagswippe mit einer Auffangfläche von 200 cm² erfasst. Die Auflösung beträgt 0,2 mm Niederschlag pro Impuls.

Der eigens für diese Untersuchung angebrachte Niederschlagsmesser wird mit freundlicher Genehmigung der Familie Rees auf dem Ringlihof im Einzugsgebiet Selzenbächle auf 480 m NN installiert. Somit befindet sich der Pluviograph am selben Ort, wie auch schon zu der Messreihe vom letzten Jahr (Adolph, 2005). Bei dem Messgerät handelt es sich um einen Niederschlagstotalisator der Firma Ott mit einer Auffangfläche von ebenfalls 200 cm². Die Messwerte werden zweiminütig gespeichert und über das Wägeprinzip mit einer Auflösung von 0,01 mm gemessen.

Um die chemische Zusammensetzung und den O^{18} Gehalt des Niederschlags zu bestimmen, wurde zusätzlich ein Isotopensammler installiert. Über einen Trichter wird Niederschlagswasser in eine im Boden vergrabene PVC-Flasche gesammelt, welche wöchentlich geleert und beprobt wird.

3.2.2 Trübung

Die Messung der Trübung erfolgt mit Hilfe des Fluorometers GGUN FL 30, welcher von der *Geomagnetism Group* der Universität Neuchatel entwickelt und getestet wurde. Jeweils eines dieser Messgeräte ist in den Pegelbereichen des Engebächle und des Selzenbächle installiert.

Bei dem GGUN FL 30 handelt es sich um ein sogenanntes flow-through Fluorometer (Schnegg und Flynn, 2001).

Es wird durch eine 6 V-Batterie betrieben und kann bei Bedarf direkt im Fließgewässer angebracht werden, aber auch extern, wie es im Falle dieser Arbeit gehandhabt wird.

Der Fluorometer wurde generell zur Messung von Tracern (Uranin, Tinopal, Rhodamin) in Gewässern entwickelt (Schnegg, 2002). Um Hintergrundstörungen durch häufig auftretende Trübungseffekte zu verringern oder eliminieren wurde eine zusätzliche Messkomponente entwickelt, welche die Trübung misst.

Das Messelement des Gerätes ist eine optische Zelle, eine einfache Glasröhre, welche entlang der geometrischen Achse des Metallzylinders liegt. Durch diese Glasröhre strömt das Wasser hindurch und wird bemessen. Das Messsystem dieser optischen Zelle (Abbildung 3.1) besteht aus einem Exzitationsbereich, welches zum einen aus einer quasi-monochromatischen Lichtquelle, einem Filter und einer Kondensatorlampe und zum anderen aus einem Detektorbereich, welcher im 90° Winkel zum Exzitationsstrahl steht, besteht. Der Detektorbereich ist zusätzlich mit einer Linse, einem Filter und einem Photodetektor versehen. Eines dieser Sets ist dazu bestimmt die Trübung zu messen, die restlichen Paare werden verwendet um die Tracerkonzentrationen zu bestimmen.



Abbildung 3.1: Optische Zelle des GGUN FL 30 mit den vier Lichtquellen und den Detektoren (Schnegg und Flynn, 2001)

Die Lichtquellen und die Filter sind so gewählt, dass sie das Absorptions-Emissions-Spektrum der Tracer abdecken (Schnegg, 2003). Für die Messung der Trübung wird eine rote Lichtquelle (Wellenlänge λ =660 nm) verwendet da diese die Registrierung der Tracer nicht stört (Schnegg, 2002).

Der Trübungsmessung liegt folgender physikalischer Hintergrund vor: gelöste Teilchen, welche in die optische Zelle gelangen, streuen das Exzitationslicht und verursachen ein Streusignal, welches die Anwesenheit von Tracern simuliert. Ein speziell eingebautes optisches System misst den Betrag von gestreutem Licht in einem 90°-Winkel zur Exzitationsquelle.

In klarem, sauberem Wasser ist dieser Betrag nahe bei Null, es tritt nur Raman-Streuung auf. Mit zunehmender Anzahl der gelösten Teilchen nimmt der Betrag jedoch zu.

Die Messwerte werden in Millivolt (mV) angegeben und müssen über eine Eichgerade in nephelometrische Trübungseinheiten (NTU) umgerechnet werden.

Die Erfassung der Messwerte ist nach oben hin auf 2500 mV begrenzt.

Bevor die Messungen gestartet werden können, müssen die Geräte kalibriert werden. Die Standardlösungen sind nicht handelsüblich und müssen im Labor hergestellt werden. Laut Hersteller soll das Gerät mit Lösungen von 1 NTU, 10 NTU und 100 NTU Konzentration geeicht werden. Diese Standarde werden aus einer Formazin-Stammlösung mit einer Konzentration von 4000 NTU gewonnen.



Abbildung 3.2: Eichgeraden für den beiden Fluorometer am Engebächle und Selzenbächle

Die Eichung wird für jedes der beiden Messgeräte durchgeführt, die Trübungskonzentration dann an Hand der gerätespezifischen Eichgerade ermittelt (Abbildung 3.2).

Die Installation der Messgeräte gestaltet sich in beiden EZG über die gesamte Messphase hindurch als äußerst labil.

Da keine Möglichkeit besteht, das Wasser durch das Gerät hindurch zu pumpen, und es auch nicht vorgesehen ist, diese direkt im Bach auszubringen, muss eine Position gefunden werden, die über ein natürliches Gefälle einen Unterdruck erzeugt und somit das Wasser durch die Messröhre zieht.

An den Pegeln werden geschlitzte PVC Rohre in das Bachbett eingebracht, welche an Holzpfählen fixiert sind. Innerhalb dieser PVC Rohre befinden sich Schläuche, die mit einem Trichter mit engmaschigem Siebchen über der Öffnung versehen sind.

Die Schlitze in den PVC Rohren sollen das Grobmaterial abhalten. Das Siebchen in den Rohren, direkt auf dem Ansaugschlauch aufsitzend, soll feinkörnigeres Material davon abhalten, die Zuläufe zu den Messgeräten zu verstopfen.

Das Wasser wird den etwas weiter entfernten Fluormetern dann über Schläuche zugeführt.

Dieses System scheint theoretisch einwandfrei, erweist sich in der experimentellen Phase jedoch als weniger praktisch.

Zu Beginn der Messphase kann zumindest am Selzenbächle kaum eine Woche registriert werden, in welcher das Wasser noch durch den Fluorometer fließt. Beim Engebächle gestaltet sich die Messung etwas einfacher.

In beiden Bächen ist zu beobachten, dass sich die Siebchen, welche zum Schutz vor Feinmaterial auf den Schlauchspitzen angebracht sind, als äußerst unpraktisch erweisen. Der durch das Gefälle erzeugte Unterdruck zieht das Feinmaterial geradezu an die Siebchen heran, welche dann durch diese Sedimentablagerungen verstopfen und den Wasserstrom somit unterbrechen. Auf Grund dessen werden die Siebchen entfernt und durch Nylonstrümpfe ersetzt, welche über die PVC Rohre gezogen werden. Diese Variante bringt jedoch auch nicht die erhoffte Besserung, es tritt wieder das gleiche Problem auf wie bei den Siebchen: nach kurzer Zeit sind die Maschen der Strümpfe mit Feinmaterial verstopft und es kann kaum noch Wasser durchdringen. Letzten Endes werden die Ansaugschläuche ohne jeglichen Schutz in den PVC Rohren belassen, welche durch ihre Schlitze ausreichend Grobmaterial abhalten, durch Feinmaterial nicht verstopfen und sich somit als geeignet erweisen.

Lediglich am Selzenbächle treten trotz dieser Verbesserungen des öfteren Ausfälle auf. Nach dem Hochwasserereignis vom 12. Juli wird der Pegel zerstört und die Kiste mit dem Fluorometer durch die Hochwasserwelle um einige Meter versetzt. Diese wird daraufhin weiter in den angrenzenden Wald und etwas weiter nach unten hin versetzt. Durch diese Veränderung wird ein besseres Gefälle erreicht. Durch die Verlagerung des Ansaugschlauches in einen strömungsberuhigten Bereich gelingt es. die Durchflussproblematik abermals ein wenig zu entschärfen.

Da ein zu geringes Gefälle, also mangelnder Unterdruck, und undichte Schläuche nun ausgeschlossen werden können, bleibt zuletzt die Möglichkeit, dass die Ventile, über welche der Schlauch am Fluorometer angeschlossen ist, undicht ist und somit Luft in das System einströmt und dieses unterbricht.

Dieses Problem kann erst in der letzen Phase der Messkampagne im Zuge eines Pumpversuchs behoben werden, indem das professionelle Ventil durch einen einfach Aufsatz aus einem Gartenschlauchstück ersetzt wird. Nach diesem Eingriff kann ein sehr geringer Wasserstrom (tropfend) auch über eine Woche hinweg aufrecht erhalten werden.

Die Fluorometer werden auf ein Messintervall von zwei Minuten gesetzt und wöchentlich ausgelesen und gereinigt. Die Messwerte überträgt man über einem Datenlogger auf eine Speicherkarte und schließlich über das Programm *GGUN-FL-30* auf den Rechner.

Beim Starten und Beenden der Messungen muss die Zeit festgehalten werden, da weder Datum noch Uhrzeit von den Geräten aufgezeichnet werden können. Mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms können den einzelnen Messwerten Daten zugeordnet werden.

3.2.3 Wasserstand, Leitfähigkeit und Temperatur

Die Messung von Wasserstand, Leitfähigkeit und Temperatur kann unter Einsatz einer kombinierten Messonde (CTD-Diver) der Firma Eijkelkamp/Van Essen Instruments durchgeführt werden (Abbildung A 15).

Diese Messsonden, welche schon in vorangegangenen Arbeiten zum Einsatz kamen (Adolph, 2005; Guwang, 2004), können in hoher zeitlicher Auflösung Druck (mbar), Temperatur (°C) und elektrische Leitfähigkeit (μ S/cm) messen.

Es wird ein Messintervall von zwei Minuten programmiert, wodurch den Diversonden eine Gesamtspeicherkapazität von 22,2 Tagen zur Verfügung steht.

Die Diver werden jedoch wöchentlich bis zweiwöchentlich ausgelesen, wobei sie über eine optische Schnittstelle mit dem Geländelaptop verbunden werden und über das Programm *LoggerDataManager* (LDM) ausgelesen und exportiert werden. Weiterhin findet bei jedem Auslesen eine Referenzmessung von Hand statt, die zur Kontrolle der Messungen dient.

Mit dem Leitfähigkeitsmessgerät LF 92 der Firma WTW wird die Leitfähigkeit und die Wassertemperatur bestimmt, der Wasserstand wird mit einem einfachen Zollstock ermittelt. Zu verschiedenen Wasserständen wird an allen Bächen der Abfluss bestimmt und PQ-Beziehungen erstellt (vgl. Kapitel 3.2.4).

Ursprünglich finden die Sonden ihre Verwendung im Grundwassermessbereich (Piezometerrohre, Grundwasserpegel) und eignen sich unter Beachtung einiger Randbedingungen auch geringfügig zum Einsatz in Fließgewässern. Aus Tabelle A 2 lassen sich Angaben über die technischen Daten der Messgeräte entnehmen. Es wird jeweils an jedem Pegel eine Diversonde angebracht, welche wöchentlich ausgelesen und gereinigt werden muss. Beim Platzieren der Diversonden an den Pegeln ist entscheidend, dass die Sonden in einem strömungsberuhigten Bereich platziert und fixiert sind, um den Einfluss von Störfaktoren, hauptsächlich Wellenschlag, zu minimieren. Dies kann erreicht werden, indem die Sonden in kurzen, perforierten Metallrohren am Bachbett fixiert werden und so vor größeren Steinen o. ä. und Eigenbewegungen geschützt sind.

Der Messbereich der Sonden wird durch engmaschige Metallgitter vor Kleinstlebewesen und anderen Störfaktoren geschützt, welche sich bevorzugt in den Messschlitzen der Sonden einnisten. Auch diese Fassung und deren Umgebung wird wöchentlich gereinigt, um die Messergebnisse so unbeeinflusst wie möglich zu halten.

Weitere Diversonden sind in der Quellfassung Sägedobel und in Grundwasserpegeln installiert. Ihnen liegt das gleiche Messprinzip zu Grunde welches im folgenden beschrieben wird.

Wie sich Tabelle A 2 entnehmen lässt, wird der Wasserstand von den Sonden als Druck gemessen, also über die Summe des Drucks der auflastenden Wassersäule und des darauf lastenden Luftdrucks. Um nun die tatsächlichen Werte, den Wasserstand in cm, zu erhalten, müssen die Messwerte kompensiert werden. Das heißt, der über der Wassersäule herrschende Luftdruck muss subtrahiert werden. Hierzu wäre es von Vorteil, neben jedem ausgebrachter Diversonde einen Barodiver, welcher Luftdruck und Temperatur misst, zu positionieren. Messtechnisch ist dies jedoch nicht möglich. Das Problem muss also auf einem anderen Wege gelöst werden.

Nach einigen erfolglosen Versuchen, die Druck-Messwerte der Diversonde über die passende Software (*LDM*) mit Barodaten zu kompensieren, wird dies fortlaufend manuell mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogrammes (*MS EXCEL*) durchgeführt.

Für die Wasserstandsmessung am Engebächle steht bis zum 19. Juli 2005 ein Barodiver zur Verfügung, welcher direkt am Pegel angebracht wird, sich also auf gleicher Höhe wie der *CTD*-Diver befindet. Augrund von Ungenauigkeiten der Messungen die durch starke Temperaturschwankungen hervorgerufen werden, erfolgt am 19. Juli eine Verlegung des Barodivers in die Untere der beiden Quellfassungen, Quellfassung Steineck.. Bis zum genannten Zeitpunkt werden die Daten am Engebächle und Selzenbächle jeweils mit temperatur- und höhenkorrigierten Luftdruckdaten der meteorologischen Stadtstation des Meteorologischen Instituts Freiburg (*MIF*) kompensiert.

Die Lufttemperatur wird von einem weiteren Barodiver außerhalb der Quellfassung gemessen. Die neue Position des Barodivers bewirkt einen Höhenunterschied von etwa 20 m zwischen den am Pegel gewonnenen Wasserstandsdaten und den Barodaten. Die Luftdruckdaten müssen also ebenfalls über die barometrische Höhenformel auf Pegelniveau korrigiert werden. Diese Formel wurde auf die Annahme vereinfacht, dass sich der Druck mit einem Meter Höhenänderung um 8 mbar verändert.

Mit dem selben Barodiver werden auch die Wasserstandsdaten der Diversonde am Pegel Selzenbächle korrigiert. Die Höhendifferenz zwischen dem Pegel Selzenbächle und des Barodivers beträgt 15 m.

Eine weitere Kontrolle der Messdaten erfolgt über wöchentliche Handmessungen, die im Zuge der Routinebeprobung durchgeführt werden. Unter Berücksichtigung der Eigenhöhe der Sonden (etwa 3-4 cm) welche verhindert, dass der Wasserstand von der Gewässersohle aus gemessen wird, stimmen diese Werte größtenteils überein.

Die Daten der Sonde vom Pegel Glasbach werden auf Grund ihrer räumlichen Distanz gesondert betrachtet und mit den Luftdruckdaten des Meteorologischen Instituts Freiburg kompensiert. Hierzu mussten diese Daten ebenfalls mit der barometrischen Höhenformel angepasst werden.

Die elektrische Leitfähigkeit von Wasser bestimmt man durch eine Widerstandsmessung zwischen Elektroden mit einer bestimmten Fläche und einem bestimmte Abstand. Üblicherweise beträgt die Fläche der Elektrode 1 cm² und der Abstand 1 cm. Somit ergibt sich als Einheit der elektrischen Leitfähigkeit S/cm bzw. μ S/cm (Hölting und Coldewey, 2005).

Die Messgenauigkeit der Sonden liegt bei $\pm 50 \ \mu$ S/cm. Die Anwendung der Sonden im offenen Gerinne zur Messung geringer Leitfähigkeiten (kristalliner Untergrund) ist laut Hersteller eher ungeeignet. Die Metallgitter über den Spitzen der Sonden dienen als Schutzvorrichtung, da Aktivitäten von Kleinstlebewesen die Messergebnisse verfälschen würden.

Da die Leitfähigkeit in starkem Maße Temperaturabhängig ist, werden die Werte auf die spezifische Leitfähigkeit umgerechnet, also auf eine Referenztemperatur von 25 °C bezogen.

Trotz wöchentlicher Wartungsarbeiten treten hin und wieder unerklärliche Ausreißer in den Messreihen auf. Diese werden manuell korrigiert.

Die Messung der Temperaturwerte über die Diversonden erfolgt problemlos, die Messwerte stimmen mit den manuell vorgenommenen Referenzmessungen überein.

3.2.4 Erstellen der Wasserstands-Abfluss-Beziehung

Für jeden Durchflussquerschnitt ist der Durchfluss eine Funktion des Wasserstands und umgekehrt. Es ist das wesentliche Ziel, jedem Pegelstand für den betrachteten Querschnitt eine Durchflussrate zuzuordnen (Dyck und Peschke, 1995).

Für die Pegel Glasbach und Selzenbächle können die Gerinnequerschnitte aus der vorangegangenen Arbeit (Adolph, 2005) übernommen werden. Für das Engebächle wird ein neues Konzept entwickelt, da der Pegel bachaufwärts verlegt werden muss.

An einer passenden Stelle wird ein Pegel aus Betonplatten und mit definiertem, rechteckigem Querschnitt errichtet. Bei fortschreitender Abnahme des Wasserstandes trat jedoch das Problem auf, dass die Messsonde nicht mehr vollständig mit Wasser bedeckt war und die Messwerte somit unbrauchbar sind. Um diese Problematik zu beheben, muss der Durchflussquerschnitt verringert werden. Dies wird am 09. Juni mit dem nachträglichen Einbau eines Thompsonüberfalls (Dreieckswehr) realisiert.

Für alle drei Pegel liegen also definierte Messquerschnitte vor.

Um den Abfluss mit den Pegelständen korrelieren zu können, werden zu unterschiedlichen Wasserständen mit Hilfe der Salzverdünnungsmethode experimentelle Abflussmessungen durchgeführt.

Diese werden mit dem Abflussmesskoffer der Firma Sommer vollzogen. Das Messset besteht aus zwei Leitfähigkeitsmesssonden und einem Datenlogger, welcher über das Programm PC-TRACE ausgelesen wird und mehrere Messungen hintereinander abspeichert. Das Abflussvolumen der Durchgangskurve wird über eine Eichgerade aus deren Salzkonzentration errechnet.

Die Einspeisung einer bestimmten Salzmenge erfolgt zu jeder Messung am selben Punkt etwa 100 m oberhalb der Messsonden.
Allen PQ-Beziehungen in dieser Arbeit liegt die Manning-Strickler-Formel (1), welche aus Potenzprodukten aufgebaut ist (Schröder, 1994), zugrunde.

$$Q = A \cdot k_{st} \cdot I^{1/2} \cdot R_{hy}^{2/3}$$
mit Q: Durchfluss [m³/s]
(3.1)

A: durchflossene Querschnittsfläche (m²)

 k_{st} : Stricklerbeiwert

I: Wasserspielgelliniengefälle

 R_{hy} : hydraulischer Radius .

Der Dreiecksüberfall am Engebächle hat einen Öffnungswinkel von weniger als 90° (Abbildung A 17), weshalb auch in Zeiten mit geringeren Abflüssen der Wasserstand über der Diversonde steht und diese somit dauerhaft wasserbedeckt ist. Auf Grund des Öffnungswinkels kann die empirische Gleichung nach (Dyck und Peschke, 1995) verwendet werden:

$$Q = 8/15 \cdot \mu * (2 \cdot g)^{1/2} \cdot \tan \cdot (\alpha/2) h^{5/2}$$
(3.2)

- Q: Durchfluss [m³/s]
- μ : Überfallbeiwert (0,6)
- g: Gravitationskonstante
- α : Öffnungswinkel (52,6°)
- *h*: Wasserstand in m.

Die mit dieser Formel ermittelten Durchflüsse stimmen größtenteils mit den manuellen Messungen überein. Es gestaltet sich jedoch problematisch Extremereignisse (Hochwasser) zu bemessen, da der Pegel ab einem Wasserstand von 38 cm überflutet wird und die PQ-Beziehung somit nicht mehr anzuwenden ist.

Da am Glasbach schon zwei Untersuchungsreihen durchgeführt wurden (Guwang, 2004) und (Adolph, 2005) kann die auf den Pegel abgestimmte PQ-Beziehung übernommen werden. Es handelt sich um ein Rechteckwehr mit unbefestigter, unebener Sohle. Laut (Adolph, 2005) kann im Niedrigwasserbereich davon ausgegangen werden, das der Stricklerbeiwert und das Energieliniengefälle konstant bleiben, während es bei Wasserständen ab 6,8cm zu Diskontinuitäten, vermutlich auf Grund von vermehrter Geschiebeführung und Sohlumlagerung, kommt. Ab diesem Wasserstand kann die Manning-Strickler-Formel mit konstantem G (Anpassungsparameter aus Energieliniengefälle und Stricklerbeiwert) nicht mehr zufriedenstellend angepasst werden. Die PQ-Beziehung wird ab einem Wasserstand von 6,8 cm durch eine Polynomfunktion zweiten Grades beschrieben, was mit zunehmender Rauhigkeit bei steigenden Wasserständen begründet werden kann.

Manning-Strickler-Formel für einen Rechteckquerschnitt:

$$Q = b \cdot h \cdot G \cdot \left\{ \frac{b \cdot h}{2 \cdot h + b} \right\}^{2/3}$$
(3.3)

b: Breite (m)

G: Anpassungsparameter aus Energieliniengefälle und Stricklerbeiwert ($m^{1/3}/s$).

Polynomfunktion für den Rechteckquerschnitt Glasbach mit h < 6,8cm:

$$Q = 3225 \cdot h^2 - 157,39 \cdot h \,. \tag{3.4}$$

Am Selzenbächle wird der Pegel, wie bereits erwähnt, ebenfalls übernommen. Gleichfalls kann auch die bestehende PQ-Beziehung übernommen werden, lediglich der G-Wert wird leicht verändert, da der Pegel nach vollständiger Zerstörung durch ein Hochwasser (12. Juli 2005) während der Messphase nicht wieder an der exakten Position aufgebaut werden kann. Die Grundfläche von 0,8 m wird jedoch beibehalten, zusätzlich erhält der Pegel eine neue ebene Grundfläche, welche sich im Vergleich zum vorigen Exemplar als Verbesserung erweist.

Auch am Pegel Selzenbächle tritt das Problem auf, dass die Abflussspitzen von Extremereignissen nicht exakt erfasst werden können, da der Pegel ab einem Wasserstand von etwa 40 cm überflutet wird und auch hier die PQ-Beziehung für Extremsituationen nicht mehr gültig ist. Für den Reckteckquerschnitt am Selzenbächle wird ebenfalls die Manning-Strickler-Formel verwendet (Gleichung 3).

3.2.5 Luftdruck, Lufttemperatur

Luftdruck und Lufttemperatur können ebenfalls mit Hilfe einer kombinierten Messonde der Firma Eijkelkamp/Van Essen Instruments erfasst werden.

Von diesen Messsonden, den Barodivern, stehen zwei zur Verfügung, welche beide im Einzugsgebiet Engebächle liegen. Aus oben geschilderten Gründen (Temperaturabhängigkeit der Luftdruckmessung) wird die Sonde, welche den Luftdruck misst, auf Empfehlung des Herstellers in eine Umgebung mit nahezu konstanter Temperatur verlegt. Die Quellfassung Steineck erweist sich für die Lagerung des Baro-Divers als geeignet. Nach der Verlegung kann die Kompensation der Daten vergleichsweise unproblematisch durchgeführt werden.

Die Lufttemperatur wird registriert, um sie am Ende in das HBV-Modell einzugeben.

Die Barodiver werden alle vierzehn Tage über das *LDM* Programm ausgelesen und exportiert. Der Umgang mit den Messdaten der Baro-Diver gestaltete sich unkompliziert..

3.3 Einzugsgebiet Engebächle

Dem Einzugsgebiet Engebächle kommt in dieser Arbeit eine besondere Bedeutung zu. Im Vergleich zu den anderen beiden Untersuchungsgebieten werden hier neben der Standardausstattung, den Diversonden an den Pegeln, einige weitere Messgeräte installiert, welche im Folgenden aufgeführt sind.

3.3.1 Bodenfeuchtesonden

Um die Hangwasserdynamik in den oberflächennahen Bodenzonen zu untersuch, wird an einem nordwestlich exponierten Hang ein Bodenprofil gegraben, welches mit fünf Bodenfeuchtesonden ECH_2O der Firma *Decagon* ausgestattet ist. Diese Sonden sind

innerhalb des Profils verteilt, um die Infiltration des Wassers in den tieferen Bodenbereich zu registrieren. Die Mächtigkeit des Bodenprofils beträgt eine Höhe von 1,25 m und setzt sich aus drei Horizonten zusammen.

Um möglichst exakte Messdaten zu erhalten wird das Profil sorgfältig wieder verschlossen.

Die Sonden sind auf ein Messintervall von 10 Minuten programmiert und müssen so alle 14 Tage ausgelesen werden.

Das Messprinzip der Bodenfeuchtsonden beruht auf der Ermittlung der unterschiedlichen Dielektrizitätskonstante (DE) von Wasser (DE 80), Boden (DE \sim 4) und Luft (DE 1). Die Messgenauigkeit liegt, laut Hersteller, bei ±3% für beliebige Böden.

3.3.2 Quellfassung Steineck und Quellfassung Sägedobel

Die Beobachtung und Auswertung der Quelldaten stellt das Hauptaugenmerk der Arbeit von Andreas Hänsler (2005) dar, auf die für genauere Informationen hier verwiesen werden soll. Dieses kurze Kapitel dient nur der Übersicht und wird der Vollständigkeit halber erwähnt.

Um einen Einblick in die Speichersysteme und Grundwasserdynamik des Einzugsgebietes zu bekommen, werden die Quellen am Engebächle beprobt.

Neben qualitativen Messungen werden auch quantitative Messungen durchgeführt.

Mit dem Leitfähigkeitsmessgerät LF 92 der Firma WTW werden Leitfähigkeit und Temperatur gemessen, die Schüttung wird über die Volumenmethode ermittelt.

Neben diesen Messungen werden die Quellen, ebenso wöchentlich, auf Hauptionen und das Isotop O-18 untersucht. Diese qualitativen Messungen finde im Labor des Instituts für Hydrologie Freiburg statt.

Zur kontinuierlichen Registrierung von Wasserstand, Leitfähigkeit und Temperatur in den Speicherbecken, ist es uns gestattet, in beiden Quellfassungen eine Diversonde (Quellfassung Sägedobel) und eine Messkiste (Quellfassung Steineck) zu platzieren.

Die Messkiste registriert die selben Größen, Wasserstand über den Druck, Leitfähigkeit und Temperatur.

Beide Messgeräte werden zweiwöchentlich ausgelesen, wobei die einzelnen Quellen jeweils wöchentlich beprobt werden.

3.3.3 Grundwasserpegel

In einigen Bereichen der Uferzone finden sich Feuchtflächen, sogenannte *Riparian Zones*. Um deren Beitrag zur Abflussbildung festzustellen, und die Dynamik dieser Bereich in Bezug auf Ereignisse zu registrieren, werden an einer dieser repräsentativen Flächen drei Pegelrohre installiert.

Diese Pegelrohre werden zur Registrierung des Wasserstands, der Leitfähigkeit und der Temperatur mit Diversonden versehen, welche dem gleichen Messprinzip unterliegen wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben und ebenfalls in zweiminütiger Auflösung messen.

Es werden, je nach Konsistenz des Untergrundes, drei Pegelrohre mit einer Länge von 1,20 m in unterschiedliche Tiefen versenkt. Je weiter entfernt vom Bachbett, umso weniger gut lassen sich die Pegelrohre in den Boden einbringen, da dieser zunehmend steiniger und undurchlässiger wird. Das direkt am Bachbett auszubringende Rohr, GW-Pegel 1 (1 m Entfernung), lässt sich nahezu vollständig versenken. GW-Pegel 2, welcher etwa 4,5 m davon entfernt ist, kann nur bis etwa 80 cm Tiefe eingeschlagen werden. Der GW-Pegel 3, etwa 9 m vom Bachbett entfernt, kann trotz mehreren Versuchen nicht mehr als bis zur Hälfte seiner Länge (ca. 50 cm) installiert werden. Neben den üblichen Diversonden in GW-Pegel 1 und 2 kommt im GW-Pegel 3 eine etwas veränderte Version zum Einsatz. Die

Diversonde, registriert kontinuierliche Messwerte der Temperatur und des Druckes, ist jedoch nicht in der Lage, Leitfähigkeit zu messen. Für GW-Pegel 3 liegen also nur Messwerte für Wasserstand und Temperatur vor.

Alle drei Grundwasserpegel werden wöchentlich auf die Hydrochemie beprobt, die Diversonden jedoch nur zweiwöchentlich ausgelesen.

Bevor die Wasserproben gezogen werden, müssen die Pegelrohre mit einer Kofferpumpe leergepumpt werden, um sicherzugehen, dass die Proben aus "Frischwasser" gezogen werden. Zwischen den einzelnen Pegelrohren wird die Pumpe mit destilliertem Wasser durchgespült, um Verunreinigungen der Proben zu vermeiden.

3.3.4 Temperatursonden

Im Falle eines natürlich belassenen Gewässerbettes ist dieses, lokal betrachtet, meist permeabel und es finden Interaktionen zwischen dem Bachwasser und dem Grundwasser statt. Diese Zone wird als hyporheische Zone bezeichnet (Dingman, 2002).

Um einen Einblick in die Dynamik dieser Zone zu erhalten, werden über ein Strecke von etwa einem Kilometer 18 Temperatursonden der Marke *OPTIC STOWAWAY* ausgelegt.

Die Sonden sind teilweise zufällig alle 100 m mit Heringen direkt im Bachbett verankert, teilweise unter Berücksichtigung von Zuflüssen, austretendem Hangwasser, oder Feuchtflächen an interessant erscheinenden Stellen fixiert.

Mit dieser Vorgehensweise wird versucht, die Sonden an möglichst aussagekräftigen Stellen auszubringen.



Abbildung 3.3: Längsprofil der Temperatur und der Leitfähigkeit am Engebächle

Um weniger offensichtliche aber interessante Stellen zu finden wird mit Hilfe einiger Studenten während einer Exkursion ein Längsprofil der Temperatur und Leitfähigkeit erstellt. Dieses Längsprofil ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

Die genaue Position der Sonden kann der Messgerätekarte im Anhang (Abbildung A 4) entnommen werden sowie auch die Lagebeschreibung in Tabelle A 1.

Die Sonden sind auf Messintervalle von 5 Minuten programmiert und können in dieser Auflösung bis zu drei Wochen durchgehend Messwerte registrieren.

Um das Auffinden der Sonden zum auslesen zu erleichtern, wird die Positionen der Sonden an gut einzusehenden Ästen mit Absperrband markiert und jeweils mit den Gerätenummern versehen.

Das Auslesen der Sonden gestaltet sich, im Vergleich zum Aufsuchen derer, relativ einfach. Mit Hilfe eines handlichen Zwischenspeichers, dem *OPTIC SHUTTLE*, können acht Sonden am Stück ausgelesen werden und müssen erst dann mit Hilfe eines Laptops und dem Programm *BOXCAR* auf die Festplatte gezogen werden. Dies ist daher sehr angenehm, da nicht nach jeder Sonde der Laptop bereitstehen muss und somit viel Zeit eingespart wird. Generell gestaltet sich das Auslesen der Sonden als problemlos.

Wie auch die Trübungswerte sollen die Messwerte der Temperatursonden später zur Validierung der Modell-Simulation dienen und Grundlage einer Abflusskomponententrennung bilden.

Ausgehend von der Annahme, dass in Trockenphasen der Abfluss nur vom Grundwasser gespeist wird (Basisabfluss) und demnach die Bachwassertemperatur kurzfristig auch die des Grundwassers wiedergibt, wird der Anteil des Basisabflusses am Gebietsabfluss abgeschätzt.

3.4 Abflusskomponentenseparation

Um die Anteile der unterschiedlichen Komponenten des Abflusses zu quantifizieren, ist es möglich, diesen an Hand geeigneter Tracer zu separieren.

Mit einer Zwei-Komponenten-Trennung können zwei Abflusskomponenten Q_a und Q_b über die Verwendung von zwei Tracerkonzentrationen (hier Temperaturwerte) T_a und T_b und den Gesamtabfluss identifiziert werden.

Neben der Drei-Komponenten-Trennung kann auch eine Zwei-Komponenten-Trennung zum Einsatz kommen, welche hier verwendet wird.

Die Anwendung einer Abflussganglinienseparation (Ganglinienseparation, End-Member-Mixing-Analysis, EMMA) basiert auf der Annahme, dass der Abfluss während eines Ereignis in Ereigniswasser- (event water) und Vorereigniswasseranteile (pre-event water) separiert werden kann. Unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung und der Massenerhaltung lassen sich für die Zwei-Komponenten Trennung zwei Gleichungen aufstellen (Weiler et al., 2003):

$$Q = Q_p + Q_e \tag{3.5}$$

$$CQ = C_p Q_p + C_e Q_e \tag{3.6}$$

Wobei Q den Abfluss darstellt, Q_p ist der durch das pre-event water gegebene Anteil und Q_e der durch das event water. Die Gesamtkonzentration C einer Lösung, elektrischer Leitfähigkeit, Umwelttracer o.ä. wird durch C_p , die Konztration des Tracers im pre-event water Anteil und durch die Konzentration C_e im event water Anteil gegeben (Ogunkoya und Jenkins, 1993).

Die Zwei-Komponenten-Trennung kann nur sinnvoll angewendet werden, wenn folgende Randbedingungen gegeben sind (Sklash und Farvolden, 1976):

- Die Tracerkonzentrationen der beiden Komponenten sind signifikant voneinander unterscheidbar
- Die Tracerkonzentrationen zeigen keine räumliche und zeitliche Varianz, es sei denn diese kann messtechnisch erfasst und somit berücksichtigt werden.
- Boden- und Grundwasser als Teile der Vorereignis-Komponente sind bezüglich ihrer Tracerkonzentration identisch oder der Anteil des Bodenwassers ist von untergeordneter Bedeutung.
- Der Beitrag des Oberflächenspeichers ist während des Hochwassers vernachlässigbar.

Die entscheidende der Bedingungen ist, dass sich die Konzentrationen der Tracer signifikant unterscheiden. Die weiteren Bedingungen beeinflussen die Genauigkeit der Ergebnisse jedoch ebenfalls entscheidend (Hooper und Shoemaker, 1986).

Die hier zum Einsatz kommenden Tracer sind Temperatur und Leitfähigkeit. Sind alle drei Konzentrationen der Tracer *C*, C_p und C_e bekannt, können die einzelnen Komponenten Q_p und Q_e über folgend Gleichung bestimmt werden:

$$Q_e = Q \cdot \frac{C_p - C}{C_p - C_e} \tag{3.7}$$

$$Q_p = Q \cdot \frac{C_e - C}{C_e - C_p} \tag{3.8}$$

Bei der Verwendung der Zwei-Komponenten-Trennung ist zu beachten, dass unter Umständen, auch wenn die mathematische Lösung unproblematisch ist, falsche Wirklichkeiten wiedergegeben werden.

3.4.1 Abflusskomponentenseparation unter Verwendung der Temperatur

Eine Auftrennung der Abflusskomponenten über die Temperatur erfolgt über die Vorereignistemperatur, die Temperatur des Gewässers nach dem Ereignis und der des Niederschlags als Input-Größe. Da die Niederschlagstemperatur nicht gemessen werden kann, wird auf die Näherung über die Lufttemperatur zurückgegriffen (Shanley und Peters, 1988). Auch hier müssen die oben erwähnten Bedingungen zur Anwendung der Komponententrennung erfüllt werden. Dies gestaltet sich in sofern problematisch, dass nicht jedes Niederschlagsereignis die Gewässertemperatur signifikant beeinflusst und somit zuerst ein adäquates Ereignis vorliegen muss, um eine Komponententrennung über die Temperatur zu vollziehen.

Die Variabilität der Wassertemperatur über die Zeit wird von den Diver-Sonden am Pegel und zusätzlich von den 18 im Engebächle ausgebrachten Temperatursonden in zweiminütiger bzw. fünfminütiger Auflösung registriert.

Die oben beschriebenen Gleichungen 3.7 und 3.8 kommen dann folgendermaßen zur Anwendung:

$$Q_{N} = Q_{B} \cdot \frac{T_{GW} - T_{B}}{T_{GW} - T_{N}}$$
(3.9)

$$Q_{GW} = Q_B \cdot \frac{T_N - T_B}{T_N - T_{GW}}$$
(3.10)

mit Q_N : event water (Niederschlagswasser) Q_{GW} : pre-event water (Vorereigniswasser)

 Q_B : Gesamtabfluss

 T_{GW} : Temperatur des Vorereigniswasser, Endmember pre-event water

T_B: Temperaturverlauf des Bachwassers

 T_N : Temperatur des Niederschlags, Endmember event water.

Über die Anwendung hinweg werden die beiden Parameter T_{GW} und T_N konstant gehalten.

3.4.2 Abflusskomponentenseparation unter Verwendung der Leitfähigkeit

Für die Abflusskomponententrennung über die Leitfähigkeit stehen die gemessenen Werte im Gewässer vor und nach dem Ereignis zur Verfügung, wie auch die Leitfähigkeitswerte des Niederschlags. Diese werden bei Niederschlagsereignissen aus den wöchentlichen Proben im Labor mit dem Leitfähigkeitsmessgerät *WTW LF 325* ermittelt.

Die Leitfähigkeitswerte im Gewässer werden von den Diversonden kontinuierlich gemessen und wöchentlich mit manuellen Referenzmessungen abgeglichen.

Die Abflussanteile werden unter Berücksichtigung kleiner Veränderungen der Parameter über die gleiche Methode ermittelt wie bereits oben erwähnt:

$$Q_N = Q_B \cdot \frac{LF_{GW} - LF_B}{LF_{GW} - LF_N}$$
(3.11)

$$Q_{GW} = Q_B \cdot \frac{LF_N - LF_B}{LF_N - LF_{GW}}$$
(3.12)

mit

 Q_N : event water (Niederschlagswasser)

 Q_{GW} : pre-event water (Vorereigniswasser)

 Q_B : Gesamtabfluss

LF_{GW}: Leitfähigkeit des Vorereigniswasser, Endmember pre-event water

LF_B: Leitfähigkeit des Bachwassers

 LF_N : Leitfähigkeit des Niederschlags, Endmember event water.

Auch hier gilt, dass die beiden Parameter LF_N und LF_{GW} konstant gehalten werden.

4 Modellierung

Neben planungstechnischen Anwendungen wie Hochwasservorhersage und wasserwirtschaftlichen Aspekten, kommen hydrologische Modelle auch als Hilfsmittel in der Prozessforschung zum Einsatz. Dies wird damit begründet, dass es nicht möglich ist, alle Parameter welche hydrologische Prozesse beschreiben, messtechnisch zu erfassen (Beven, 2003).

Die aus der Messphase gewonnen Daten sollen zur Simulation der Niederschlags-Abfluss-Beziehung in das HBV-Modell eingespeist werden.

Unter den hydrologischen Modellen finden sich neben den Black-Box-Modellen, welche die Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen Systemeingabe und Systemausgabe beschreiben, noch die physikalisch basierten White-Box-Modelle, welche die Prozesse mit Hilfe physikalischer Gleichungen beschreiben und letztlich die mit vereinfachten Näherungen der physikalischen Gesetzen rechnenden Grey-Box-Modelle.

Diese drei Modelltypen werden unter dem Begriff deterministische Modelle zusammengefasst (Dyck und Peschke, 1995) und bieten die Möglichkeit, das zu modellierende Gebiet flächenkonzentriert (lumped) oder flächendetailliert (distributed) zu betrachten.

Das HBV Modell wird zu den konzeptionellen semi-distribuierten Modellen gezählt, welches aus unterschiedlichen Modulen aufgebaut ist. Es wurde hauptsächlich unter dem Aspekt der hydrologischen Vorhersagen, vom Schwedischen Institut für Meteorologie und Hydrologie (SMHI) konzipiert (Bergström, 1992). Die erfolgreiche Anwendung unter verschiedenen physiografischen und klimatologischen Verhältnissen hat gezeigt, dass die Struktur des Modells, in Betracht auf seine Einfachheit, robust und überraschend generell ist (Lindström et al., 1997).

4.1 Modellaufbau

Das HBV Modell arbeitet flächendetailliert (semi-distributed) und ist aus einzelnen Modulen zusammengesetzt:

- Schneeroutine
- Bodenfeuchteroutine
- Abflusskonzentrationsroutine
- Wellenablaufroutine.

Das Modell bietet die Möglichkeit, das zu modellierende Gebiet in einzelne Untereinheiten als primäre hydrologische Einheiten zu gliedern und innerhalb dieser unterschiedliche Höhen- und Vegetationszonen zu definieren (Bergström, 1991). Diese Differenzierung in Untereinheiten wird nur in den Modulen Schneeroutine und Bodenfeuchteroutine berücksichtigt. Die Abflusskonzentrationsroutine und die Wellenablaufroutine beschreiben die hydrologischen Prozesse bezogen auf das gesamte Einzugsgebiet.

Der Modellansatz wird von Holocher (1997) vereinfacht wie folgt beschrieben: Der auf die unterschiedlichen Höhenstufen und Vegetationsarten fallende Niederschlag wird je nach herrschenden Temperaturverhältnissen als Regen oder Schnee simuliert. Das Niederschlags- bzw. Schmelzwasser gelangt in die Bodenspeicher der verschiedenen Höhen- und Vegetationszonen. Dort wird er in einen abflusswirksamen Anteil und in einen im Boden gespeicherten, zur Evapotranspiration zur Verfügung stehenden Anteil aufgeteilt.

Der abflusswirksame Anteil gelangt aus der Bodenzone in den einheitlichen Grundwasserspeicher welcher aus zwei Einzellinearspeichern aufgebaut ist.

Deren Ausfluss wird über eine Wichtungsfunktion in den simulierten Abfluss transformiert. Die Simulation des Abflusses erfolgt gewöhnlich auf Tageswertbasis, wird aber zu dieser Anwendung, in Bezug auf die Simulation einzelner Ereignisse, auf 6h-Werte gesetzt.

4.1.1 Schnee-Routine

Die Schnee-Routine im Modell kontrolliert die Schneeschmelze und die Schneeakkumulation für jede Höhen- und Vegetationszone in Abhängigkeit eines Temperatur-Schwellenwertes *TT*, welcher Niederschlag entweder als Regen oder Schnee definiert. Abhängig von diesem Temperatur-Schwellenwert wird die Schmelzrate über das Grad-Tag-Verfahren ermittelt:

 $MELT = C_{MELT} * (T - TT)$ (4.1)

MELT:	Schneeschmelze (mm/d)
C_{MELT} :	Grad-Tag Faktor (mm/°C*d)
TT:	Temperatur-Schwellenwert (°C).

Während der gesamten Messphase von Mai bis September 2005 wurde kein Schneefall registriert, weshalb die Schnee-Routine in dieser Simulation nicht zum Einsatz kommt und zu deren näheren Beschreibung auf Bergström (1992) und Seibert (2003) verwiesen werden soll.

4.1.2 Bodenfeuchte-Routine

Die Bodenfeuchte-Routine beschreibt den Feuchtegehalt des Bodens im gesamten betrachteten Gebiet und somit die Abflussbildung. Der Niederschlag wird hier in einen abflusswirksamen und einen im Boden gespeicherten Anteil aufgeteilt.

Zunächst wird der Interzeptions- und der Bodenspeicher aufgefüllt. Das maximale Speichervolumen dieser beiden Speicher wird durch den Parameter FC beschrieben ist jedoch nicht mit der Feldkapazität zu vergleichen.

Je nach Füllungsstand des Speichers gelangt ein gewisser Teil des Wassers zum Abfluss.

Der abflusswirksame Anteil, in der Formel als *recharge* bezeichnet, infiltriert in die Grundwasserspeicher, welche die Abflusskonzentration beschreiben.

Über den Faktor *BETA* werden die Anteile festgelegt, die entweder als Bodenfeuchte im Gebiet verbleiben, oder abflusswirksam werden.

Der Faktor S_{sm} (Soil moisture) wird vom Modell für die Berechnungen innerhalb der Bodenfeuchteroutine benötigt:

$$\frac{\operatorname{rech}\operatorname{arg} e}{P(t)} = \left(\frac{S_{sm}(t)}{FC}\right)^{BETA}.$$
(4.2)

Der nicht abflusswirksame, also im Boden gespeicherte Anteil, unterliegt dem reduzierenden Einfluß der Evapotranspiration. Zur Beschreibung des Einflusses der Evapotranspiration bzw. zur Definition eines Schwellenwertes steht der Parameter LP zur Verfügung. LP beschreibt den Anteil des maximalen Bodenspeichervermögens FC bis zu welchem die aktuelle Evapotranspiration ETA gleich der potentiellen Evapotranspiration ETP ist. Wird der durch LP definierte Wert der Bodenfeuchte unterschritten, wird ETP linear auf ETA reduziert (Abbildung 4.1):

$$ETA = ETP$$
 falls $S_{sm} \ge LP$ (4.3)

$$ETA = \frac{S_{sm}}{FC} \cdot ETP$$
 falls $S_{sm} < LP$. (4.4)



Abbildung 4.1: Bodenfeuchteroutine

4.1.3 Abflusskonzentrationsroutine

Die Grundlage dieser Routine ist durch einen einfachen Einzellinearspeicher gegeben. Dieser beschreibt einen proportionalen Zusammenhang zwischen dem Abfluss Q zu einer gegebenen Zeit t und der Speicherkapazität S(t):

$$Q(t) = k * S(t) \tag{4.5}$$

- *Q*: Abfluss (mm/d)
- t: Zeit (d)
- *k*: Speicherkoeffizient (1/d)
- S: Speicherkapazität (mm).



Abbildung 4.2: Einzellinearspeicher

Der abflusswirksame Anteil des Niederschlags wird aus der Bodenfeuchteroutine in den Grundwasserspeicher überführt.

Der Grundwasserspeicher ist aus zwei Einzellinearspeichern zusammengesetzt (Abbildung 4.2). Der obere Speicher *SUZ* ist zweigeteilt. Überschreitet die Speicherfüllung einen durch den Grenzwert *UZL* vorgegebenen Wert, springt der oberer Auslauf an. Ist die Speicherfüllung geringer als der durch *UZL* vorgegebene Wert, wird der Speicher nur über den unteren Auslauf entleert.

Über den Parameter PERC wird der Anteil festgelegt, welcher dem unteren Speicher SLZ aus dem oberen Speicher SUZ zugeführt wird. Der oberer Speicher SUZ kann jedoch nur gefüllt werden, wenn der abflusswirksame Anteil (recharge), der dem Grundwasserbereich pro Zeiteinheit zusickert, größer ist als die Flussrate PERC zwischen dem oberen Speicher SUZ und unterem SLZ Speicher. Das gesamte Abflussvolumen aus dem sich Grundwasserspeicher setzt also aus der Summe der Teilausflüsse der Einzellinearspeicher zusammen:

$$Q_{GW}(t) = K_2 \cdot SLZ + K_1 \cdot SUZ + K_0 \cdot \max(SUZ - UZL)$$
(4.6)

wobei

 Q_{Gw} : Abfluss aus dem Grundwasserspeicher

*K*₂: Rezessionskoeffizient (unterer Speicher)

 K_l : Rezessionskoeffizient (oberer Speicher)

 K_0 : Rezessionskoeffizient (oberer Speicher).

ist.

4.1.4 Wellenablaufroutine

In der Wellenablaufroutine wird der Abfluss aus der Speicherzone des Grundwassers im Gerinne in die Abflussganglinie am Gebietsauslaß transformiert. Dies wird über eine Wichtungsfunktion erreicht, welche den Abflussverlauf glättet. Die Länge dieser Funktion wird in Tagen definiert und durch den Modellparameter *MAXBAS* (Gleichung 4.7) beschrieben.

Durch diese Filterung (Flood routing) kommt die vom Modell berechnete Abflussganglinie Q_{sim} in (mm/d) für das betrachtete Einzugsgebiet zustande, die dann mit der gemessenen Kurve verglichen wird.

$$Q_{sim}(t) = \sum_{i=1}^{MAXBAS} c(i)Q_{GW}(t-i+1)$$
(4.7)

wobei

$$c(i) = \int_{i-1}^{i} \frac{2}{MAXBAS} - \left| u - \frac{MAXBAS}{2} \right| \frac{4}{MAXBAS} du .$$
(4.8)

4.2 Eingabeparameter und Daten

4.2.1 Ermittlung der Verdunstung

Neben dem Gebietsabfluss stellt die Verdunstung die größte Verlustrate des Wasserhaushaltes dar. Aus diesem Grund darf sie, gerade in bewaldeten Gebieten, bei der Modellierung nicht vernachlässigt werden (Beven, 2003). Das HBV Modell verwendet die potentielle Evapotranspiration, welche die maximale Wassermenge beschreibt, die bei gegebenen meteorologischen und pflanzenphysiologischen Bedingungen pro Zeiteinheit aus dem Boden direkt oder über die Pflanzen in die Atmosphäre abgegeben werden kann. Dabei wird eine uneingeschränkte Wasserversorgung der verdunstenden Flächen angenommen.

Zur Ermittlung der potentiellen Verdunstungswerte wird die Formel von *Penman-Monteith* verwendet. Diese berücksichtigt neben zahlreichen meteorologischen Parametern auch pflanzenphysiologische Eigenschaften (Ott, 2002):

$$ET_{p} = \frac{1}{\lambda} \frac{3.6 \cdot \frac{\Delta}{\gamma} \cdot (R_{N} - G) + \frac{\rho \cdot c_{p}}{\gamma \cdot r_{a}} (e_{s} - e) \cdot t_{i}}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1 + \frac{r_{s}}{r_{a}}}$$
(4.9)

mit ETP: Verdunstungshöhe (mm)

λ: latente Verdunstungswärme $λ = (2500, 8 - 2, 372 \cdot T) \text{ KJ·kg}^{-1}$ T: Temperatur (°C)

- Δ : Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve (hPa·K⁻¹)
- Γ : Psychrometerkonstante (hPa·K⁻¹)
- R_N : Nettostrahlung, Umrechung von Wh·m⁻² in KJ·m⁻² durch Faktor 3,6 (Wh·m⁻²)
- G: Bodenwärmefluss (Pauschal 0,1 bis $0,2 \cdot R_N$ (Wh·m⁻²)
- ρ: Dichte der Luft, ρ = p/(R*T), mit Gaskonstante R* = 287 Ws·(kg·K)⁻¹, Luftdruck (Pa) und Temperatur (K) bei 0°C und 1013 hPa: ρ = 1,29 (kg·m⁻³⁾
- c_p : spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck, $c_p = 1,005$ (KJ·(kg·K)⁻¹
- *e*_s: Sättigungsdampfdruck bei aktueller Lufttemperatur (hPa)
- *e*: aktueller Wasserdampfdruck (hPa)
- *t_i*: Anzahl Sekunden im Berechnungsintervall
- r_a : aerodynamischer Widerstand (s·m⁻¹)
- r_s : Oberflächenwiderstand (s·m⁻¹).

Die Ermittlung der Bestandteile in Gleichung (4.9) erfolgt über weitere Gleichungen, welche im Folgenden erläutert werden.

Über die sogenannte Magnus-Formel wird mit Hilfe der Lufttemperatur T in °C der Sättigungsdampfdruck e_s (hPa) berechnet:

$$e_s = 6,1078 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T}{237,3 \cdot T}}$$
 (hPa) (4.10)

Der aktuelle Wasserdampfdruck e (hPa) wird über eine Beziehung zwischen Sättigungsdampfdruck e_s und der relativen Feuchte U in % ermittelt:

$$e = e_s \cdot \frac{U}{100} \tag{(hPa)}$$

Leitet man die Magnus-Formel ab, geht daraus die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve Δ hervor:

$$\Delta = \frac{\partial e_s}{\partial T} = \frac{25092}{(237, 3+T)^2} \cdot e^{\frac{17, 27.T}{237, 3\cdot T}} \qquad (hPa \cdot K^{-1})$$
(4.12)

mit T: Temperatur (°C).

Die Psychrometerkonstante lässt sich als Funktion des Luftdrucks und der Temperatur bestimmen:

$$\gamma = f(p,T) = \frac{c_p \cdot p}{0.622 \cdot \lambda} \qquad (h \operatorname{Pa} \cdot \mathrm{K}^{-1})$$
(4.13)

mit

p: Luftdruck aus der barometrischen Höhenformel
0,622: als Verhältnis der Molekulargewichte von Wasserdampf und trockener Luft.

Dabei lautet die barometrische Höhenformel folgendermaßen:

$$p \approx 1013 \cdot e^{-\frac{h_M}{7991+29.33 \cdot T_v}}$$
 (hPa) (4.14)

mit

p: Luftdruck (mbar)

 h_{M} : Höhe über Meer (m)

 T_{v} : mittlere, virtuelle Temperatur der Luftsäule (°C).

Die Nettostrahlung R_N setzt sich aus kurzwelliger und langwelliger Strahlungsbilanz zusammen:

$$R_N = (1 - \alpha) \cdot R_G - R_L \qquad (Wh \cdot m^{-2})$$

$$(4.15)$$

- mit R_N : Nettostrahlung (Wh·m⁻²)
 - R_G : Globalstrahlung (Wh·m⁻²)
 - A: Albedo (-)
 - R_L : langwellige Strahlungsbilanz (Wh·m⁻²).

Um den Einfluss der Pflanzen auf die Verdunstungsmenge zu berücksichtigen, werden Widerstände definiert. Der aerodynamische Widerstand r_a (s/m) beschreibt den turbulenten Austausch der Luftmassen:

$$r_{a} = \frac{4.72 \cdot \left(\ln \frac{z}{z_{0}}\right)^{2}}{1 + 0.54 \cdot u}$$
(4.16)

mit z: Höhe über Grund in der die Windgeschwindigkeit gemessen wird (m), z₀: aerodynamische Rauhigkeitslänge (m)

u: Windgeschwindigkeit (m/s).

Bei Waldbeständen vereinfacht sich diese Gleichung zu:

$$r_a = \frac{64}{\left(1 + 0.54 \cdot u\right)}.\tag{4.17}$$

Der zweite pflanzenphysiologische Widerstand ist durch den Oberflächenwiederstand r_s (s/m) gegeben:

$$\frac{1}{r_s} = \frac{(1-A)}{r_{sc}} + \frac{A}{r_{ss}}$$
(4.18)

mit r_{sc} : minimaler Oberflächenwiederstand der Pflanze bei voller Wasserversorgung und dichtem Bewuchs (s/m)

 r_{ss} : Oberflächenwiderstand für unbewachsenen Boden (ca. 150 s/m) (s/m)

I-A: verdunstungswirksame Vegetationsbedeckung $A = f^{LAI}$, Blattflächenindex, f = 0, 6...0, 7.

Während sämtliche in die Gleichungen eingehenden Daten gemessen werden, wird zur Bestimmung von LAI, z_0 und r_{sc} auf Tabellen von Ott (2002) zurückgegriffen.

Eine weitere Methode zur Ermittlung der potentiellen Verdunstung stellt die Gleichung nach *Haude* dar (Baumgartner und Liebscher, 1990).

Ausgehend vom Sättigungsdefizit der Luft um 14 Uhr multipliziert mit einem jahreszeitlich variablen Koeffizienten und einem Term, welcher die relative Luftfeuchtigkeit berücksichtigt, wird die Verdunstung (mm/d) wie folgt berechnet:

$$ETP = k \cdot \left(E_L - e_L\right) = k \cdot E_L \cdot \left(1 - \frac{F}{100}\right) \tag{4.19}$$

mit k: jahreszeitlich variabler Koeffizient, abhängig von der Vegetation (mm/hPa) E_L : Sättigungsdampfdruck (hPa)

 e_L : aktueller Wasserdampfdruck der Luft (hPa)

F: relative Luftfeuchte.

Wie sich aus den Formelbestandteilen erkennen lässt, werden pflanzenphysiologische Faktoren wie der aerodynamische und der Oberflächenwiderstand nicht berücksichtigt. Sie

gehen stark vereinfacht über den variablen Koeffizienten k in die Gleichung ein, welcher für jeden Monat und für einige Vegetationsarten definiert ist.

Die Globalstrahlung wird ebenfalls Näherungsweise über die Temperatur berücksichtigt

Die über oben beschriebene Formeln ermittelten Verdunstungswerte werden dann in die Simulation mit einbezogen.

Die Modellierung erfolgt mit beiden Datensätzen, je nach Qualität und Effektivität wird dann eine der beiden Methoden bevorzugt verwendet werden.

4.2.2 Niederschlag, Temperatur, Abfluss und variable Parameter

Die Niederschlags-, Temperatur- und Abflussdaten werden aus den Messdaten übernommen. Da die Simulation in 6h-Zeitschritten erfolgen soll, müssen die Werte entsprechend angepasst werden.

Die Niederschlagsdaten stammen von den Messungen des Pluviographen im EZG Selzenbächle und werden als Summe (mm/6h) eingegeben. Die Daten der Lufttemperatur (°C), welche vom Baro-Diver im EZG Engebächle registriert werden, werden über den gegebenen Zeitraum gemittelt und in die Datei eingelesen.

Die Abflussdaten müssen aus Messwerten in zweiminütiger Auflösung auf 6h-Werte hochgerechnet werden. Die gemessenen Werte stehen in (l/s) zur Verfügung, werden jedoch in $(l/m^2 \cdot d)$ bzw. in $(l/m^2 \cdot 6h)$ umgerechnet.

Die 2-Minuten-Werte der Abflussdaten werden über einen Zeitraum von 6 Stunden gemittelt und auf Basis des gebildeten Mittelwertes auf 6 Stunden hochgerechnet. Indem dieser Wert durch die Gebietsgröße von 1,3 km² dividiert wird, kann die modellspezifische Einheit (l/m²•6h) errechnet werden.

Routine	Input	Output
Schnee Routine	Niederschlag,	Schneedecke,
	Temperatur	Schneeschmelze
Bodenroutine	Potentielle Evapotranpiration,	Aktuelle Evapo-
	Niederschlag,	transpiration,
	Schneeschmelze	Bodenfeuchte,
		Grundwasser-
		neubildung
Abflusskonzentrationsroutine	Grundwasserneubildung	Abfluss
		Grundwasser-
		spiegel
Wellenablaufroutine	Abfluss	Simulierter
		Abfluss

Tabelle 4.1:	Ein- und	Ausgaber	parameter	der	HBV	Routinen
I ubene mit	Lin unu	1 Lusgube	Jui unitetti	uu		noutifith

Neben dieser Datengrundlage kommen noch einige freie Parameter vor, welche zu Beginn der Simulation festgelegt werden müssen und, soweit möglich, über die gesamte Kalibrierungsphase konstant gehalten werden sollten. Diese Parameter beschreiben die Charakteristik des Einzugsgebietes und sind für sämtliche Teileinzugsgebiete repräsentativ. Darunter fallen unter anderem die Einteilung der Höhen- und Vegetationszonen.

Die Definition der Vegetationszonen gestaltet sich als unproblematisch, da in dem betrachteten Einzugsgebiet zu 100% Waldflächen vorliegen.

Die Höhenzonen werden mit Hilfe eines geographischen Informationssystems (GIS) berechnet.

Parameter	Bedeutung	Einheit
Schneeroutine		
TT	Grenzwert	°C
CFMAX	Grad-Tag Faktor	mm/°C*d
SFCF	Schneefall-Korrekturfaktor	-
CWII	Wasserkapazität	-
CFR	-	-
Bodenfeuchteroutine		
FC	Maximaler Bodenfeuchtespeicher	mm
LP	Grenzwert für Reduktion der Evapo	pration -
BETA	Formfaktor	-
Abflusskonzentrationsroutin	0	
	Rezessionskoeffizient (oberer Speic	cher) 1/d
K)	Rezessionskoeffizient (oberer Speic	cher) $1/d$
K ₁ K ₂	Rezessionskoeffizient (unterer Speie	icher) 1/d
	Grenzwert für Ko-Ausfluss	mm
DEDC	Max Siekerrate vom oberen zum	111111
I LINC	untaran Spaighar	mm/d
MAVDAS	Länge der Wichtungsfunktion	11111/Q
ΜΑΛΔΑδ	Lange der wichtungstunktion	u

Tabelle 4.2: Zusammenstellung de	r Eingabe-Parameter im HBV-Modell
----------------------------------	-----------------------------------

Weitere konstante Parameter sind *PCALT*, Änderung des Niederschlags mit der Höhe, und *TCALT*, die Änderung der Temperatur in Abhängigkeit der Höhe.

Für *PCALT* wird der für das Dreisameinzugsgebiet von Holocher (1997) auf 7%/100 m bestimmte Wert verwendet.

Als Korrekturwert für die Änderung der Temperatur mit der Höhe wird der allgemeine Wert der adiabatischen Abkühlung von 0,6 °C/100 m (Baumgartner und Liebscher, 1990) eingesetzt.

4.2.3 Modellkalibrierung

Während der Kalibrierungsphase müssen die in Tabelle 4.2 aufgeführten Parameter angepasst werden.

Durch die Veränderung dieser Parameter wird eine Anpassung der simulierten Abflussganglinie an die gemessene, tatsächlich Abflussganglinie durchgeführt.

Diese Parameter-Anpassung kann manuell (trial and error) oder aber mit einem integrierten Modell- der Monte-Carlo-Simulation erfolgen.

Über diese Modul können in einem abgegrenzten Wertebereich (es wird jeweils eine Oberund Untergrenze definiert) die variierenden Parameter untereinander kombiniert werden.

Dieses Modul erleichtert das anpassen der Parameter deutlich.

Über Gleichung (4.20) wird für jeden "Run" (Durchlauf) die Effizienz R_{eff} der jeweiligen Simulation bestimmt:

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum (Q_{Sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum (Q_{Obs}(t) - \overline{Q_{Obs}})^2}$$

$$(4.20)$$

$$R_{eff} = \sum (1 \text{ enterricht perfect fit})^2$$

Effizienz (1 entspricht "perfect fit") K_{eff} :

Simulierter Abfluss Q_{sim} :

Gemessener Abfluss. Q_{obs} :

4.3 Fazit

Das HBV-Modell stellt ein Standard-Werkzeug in der Niederschlags-Abfluss Modellierung dar. Es hat sich bei vielen Anwendungen als Modul zur Hochwasservorhersage bewährt, wurde in Schweden zur Qualitätskontrolle von Messdaten eingesetzt und kam u.a. auch schon innerhalb Wasserbilanzstudien zum Einsatz (Bergström, 1992).

Über oben dargestellte Module wird der Systeminput unter Berücksichtigung der Verluste durch Verdunstung über zwei vorhandene Speichersysteme in den Gebietsabfluss transformiert. Dies erfolgt jedoch ohne die Berücksichtigung einer Direktkomponenten.

In Bezug auf die Modellgüte muss berücksichtigt werden, dass unter Verwendung unterschiedlicher Parametersätze die gleiche Modelleffizient berechnet werden kann. Dies weist den Nutzer letzen Endes wieder darauf hin, dass es sich bei hydrologischen Modellen, auch wenn diese physikalisch basiert sind, immer eine Vereinfachung eines komplexen natürlichen Systems handelt, welche die Wirklichkeit nie exakt wiedergegeben werden können (Beven, 2003).

Nach eigenen Erfahrungen der Autorin verhält sich das HBV-Modell nicht anders: unter völlig unterschiedlichen Bedingungen können gleiche Werte für die Modelleffizienz errechnet werden. Aus diesem Grund wird in dieser Simulation die Effizienz nicht das Hauptgütemaß darstellen. Auch hier gilt, die Ergebnisse der Simulation kritisch zu betrachten.

5 Untersuchungsergebnisse

Im den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse und Interpretationen der Messkampagne dargestellt.

Zu Beginn wird ein Überblick über die Witterungsbedingungen während der Messphase gegeben.

Der Zeitpunkt der Datenerfassung variiert zwischen den EZG leicht, da die Installation des Messnetzes unterschiedlich viel Zeit beanspruchte und somit die Messgeräte zu unterschiedlichen Zeiten in Betrieb genommen werden konnten.

So können die Diversonden im Selzenbächle ab dem 24. Mai nahezu kontinuierlich bis einschließlich 27. September Daten registrieren, wobei der Start der Aufzeichnungen im Glasbach zum 31. Mai, jene im Engebächle zum 09. Juni erfolgte.

Das Hauptaugenmerk dieser Untersuchung liegt auf dem EZG Engebächle. Für dieses werden die Ergebnisse der Einzelereignisse detailliert dargestellt. Auch im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der GLS sich hauptsächlich auf das EZG Engebächle beziehen.

Zur Einteilung der Ereignisse in den EZG sei hier kurz erwähnt, dass nicht der Niederschlag das Auswahlkriterium für die zeitliche Erstreckung der Einzelereignisse darstellt sondern das Verhalten der Abflussganglinie, also ihr steigender und fallender Ast.

5.1 Witterungsbedingungen

Für die Registrierung des Niederschlags stehen, wie bereits in Kapitel 3.2.1 beschrieben, die Daten der Messstation des Meteorologischen Instituts Freiburg zur Verfügung, sowie auch der Niederschlagsschreiber, welcher im Zuge der hydrometrischen Ausstattung der EZG auf dem Gelände des "Ringlihof" installiert werden kann.

Die Daten der Station des MIF werden zur Auswertung der Pegeldaten des Glasbaches herangezogen, da sie räumlich geringer entfernt sind wie die des "Ringlihof".

Die Werte der Lufttemperatur für das EZG können ebenfalls aus den Messungen des MIF verwendet werden.

Für die EZG Engebächle und Selzenbächle können die Lufttemperaturwerte über den am Engebächle installierten Barodiver registriert werden.

Der Beginn der Messphase ist durch eine nahezu dreiwöchige Trockenphase geprägt, welche am 29. Juni durch ein Starkregenereignis beendet wird. Dieses Ereignis kann hervorragend zur Anwendung einer Ganglinienseparation mit Hilfe der Gewässertemperatur herangezogen werden.

In Tabelle 5.1 lassen sich die Monatsmittelwerte der Lufttemperatur und die monatlichen Niederschlagssummen mit den langjährigen Mitteln vergleichen. Wie sich daraus erkennen lässt, ist der in der Messphase gefallene Niederschlag gegenüber dem langjährigen Mittel deutlich höher. Der zu Beginn der Messperiode anhaltenden Trockenphase steht ein verhältnismäßig niederschlagsreicher Spätsommer gegenüber. Die genaue Darstellung der Niederschlagsverteilung und der Verlauf der Lufttemperatur findet sich in Abbildung 5.1 für die EZG Engebächle und Selzenbächle. Die Niederschlagsverteilung über die Messphase für das EZG Glasbach ist Abbildung 5.2 zu entnehmen.

	Stadtstation	Ringlihof	langjährig	ges Mittel
	T (°C)	N (mm)	T (°C)	Ν
Mai	16.07	137.83	15	103
Juni	20.92	42.22	17,9	109
Juli	20.97	196.14	20,3	99
August	18.53	120.62	20	84
September	18.14	92.16	16,1	76
gesamt	18.93	588.97	17.50	471.00

 Tabelle 5.1: Monatsmittelwerte der Temperatur und des Niederschlags des

 Pluviographen "Ringlighof"

Eine weitere Trockenphase stellt sich Anfang September für etwa zwei Wochen ein, welche zur Auswertung der Messdaten gut verwendet werden kann.

Die Monatsmittelwerte der Lufttemperatur weichen ebenfalls größtenteils von den langjährigen Mittel ab. Auffällig ist die deutlich nach oben abweichende Durchschnittstemperatur im Juni und die nach unten abweichende Temperatur im August. Beide Differenzen betragen mehr als 1°C.



Abbildung 5.1: Niederschlag und Lufttemperatur für die EZG Engebächle und Selzenbächle

5.2 Abflussganglinien

Die am Gebietsauslass registrierte Abflussganglinie repräsentiert dem Konvergenzansatz nach (Leibundgut, 1984) die aus dem zugeordneten EZG entspringenden Informationen. Eine Abflussganglinie stellt also eine Transformation des Niederschlags in den Abfluss durch das EZG dar (Dyck und Peschke, 1995). Bei der Bildung einer Abflussganglinie stehen sich die schnelleren Komponenten und die langsamer abfließenden, über längere Zeit im System verweilende Komponenten, gegenüber. In Kapitel 1.1 sind die einzelnen abflussbildenden Prozesse genauer erläutert.

Da sich diese Arbeit der Generation des Abflusses während sommerlichen Starkniederschlägen widmet, werden im Folgenden für die einzelnen EZG zweckentsprechende Abflussereignisse ausgewählt und im Detail betrachtet.

Der Verlauf der Abflussganglinien kann für ein spezifisches EZG sozusagen als "Code" betrachtet werden, welche jedoch unter Erhaltung einiger Rahmenbedingungen (Geologie, Morphologie) zu jedem Niederschlagsereignis neu erstellt werden.

Die Reaktionen eines EZG auf Ereignisse sind häufig ähnlich, jedoch niemals exakt gleich, da zu viele Prozesse über zu viele Variationsmöglichkeiten auf die Abflussbildung einwirken.

Meist werden die Abflussganglinien auf gebräuchliche Kenngrößen wie Scheitelwerte und Volumen hin untersucht, seltener jedoch in Bezug auf ihre Formen.

Vergleiche von Abflussganglinien unterschiedlicher EZG bei annähernd ähnlichem Niederschlag zeigen mitunter beachtliche Unterschiede im Hinblick auf den zeitlichen Verlauf also auf das Anstiegs- und Auslaufverhalten (Gutknecht, 1996). Das Auslaufverhalten bzw. der fallende Ast des Abflussereignisses enthält wesentliche Informationen über das Speichersystem eines EZG.

Auf Grund dessen wird das Auslaufverhalten der einzelnen Systeme nach den einzelnen Ereignissen neben den grafischen Analysen auch über Rezessionsanalysen (vgl. Kapitel 5.3) verglichen.

Die Darstellung der Abflussganglinien sind im Folgenden aus vergleichstechnischen Gründen für jedes EZG einheitlich vom 8. Juni bis zum 27. September, mit Dienstagen als Stichtag, dargestellt.

5.2.1 Glasbach

Am Pegel Glasbach werden von der Diversonde vom 31. Mai bis zum 27. September die Messwerte von Wasserstand, Leitfähigkeit und Temperatur in zweiminütiger Auflösung aufgezeichnet (Abbildung 5.2). Die Einteilung der Ereignisse während der gesamten Messphase ist ebenfalls in Abbildung 5.2 dargestellt, die Werte der einzelnen Ereignisse finden sich in Tabelle 5.2.

Bei nachfolgenden Betrachtungen muss nochmals kurz darauf hingewiesen werden, dass es sich beim EZG Glasbach um ein vollständig bewaldetes Areal handelt.



Abbildung 5.2: Pegeldaten Glasbach

Glasbach	Datum	N-Summe (mm)	N-Intensität (mm/h)	Qmax (l/s)	Q-Summe	Dauer (h)
GBE1	29.06.05	11,4	1,628571429	7,58	162,05219	7,16
GBE2	06.07.05	52,8	0,357723577	29,87	7089,70191	147,3
GBE3	29.07.05	37,63	1,963846154	32,89	650,341373	8
GBE4	02.08.05	8,01	0,534	16,95	914,272743	15,16
GBE5	15.08.05	24,53	1,280271399	27,98	1426,52023	19,16
GBE6	21.08.05	32,22	0,943208431	32,22	2574,53292	34,16
GBE7	09.09.05	17,02	2,085784314	29,75	532,175576	8,16
GBE8	11.09.05	54,7	3,38490099	69,4	2404,54247	16,2
GBE9	16.09.05	21,93	1,21160221	20,4	1224,81181	18,1

 Tabelle 5.2: Werte der einzelnen Ereignisse im EZG Glasbach

Das Abflussverhalten im Glasbach zu Beginn der Messphase wird durch die länger anhaltende Trockenphase geprägt. Dies zeigt sich darin, dass die Diversonde eine geringe Abnahme der Wasserstände registriert.

Mit wiedereinsetzenden Niederschlägen steigen die Wasserstände erwartungsgemäß an und können über einen längeren Zeitraum auf einem höheren Niveau gehalten werden. Während die Auslaufkurven des ersten und zweiten Ereignisses, GBE1 und GBE2, relativ schnell wieder auf ein konstantes Niveau fallen, kann in den darauffolgenden Ereignissen ein langsameres und länger anhaltendes Abfallen der Wasserstände beobachtet werden.

Auf Grund der geringen Einzugsgebietsgröße reagiert das Gewässer relativ rasch auf einsetzende Niederschläge.

Mit einem Abflussmaximum von 76,4 l/s zum Ereignis GBE8 am 11. September liegt die Abflussspitze des EZG Glasbach deutlich unter den der beiden anderen EZG. Der geringste Abfluss wird in der Anfangsphase während der niederschlagsfreien Zeit mit 2,4 l/s gemessen.

5.2.2 Selzenbächle

Der Verlauf des Abflusses über die gesamte Messphase vom 8. Juni bis zum 28. September ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

Die geringsten Abflusswerte im Selzenbächle liegen ebenfalls in der anhaltenden Trockenphase zu Beginn der Messungen. Das Minimum des Abflusses beträgt etwa 8 l/s. Demgegenüber steht die Abflussspitze von 222,62 l/s während des Ereignisses SBE2 am 29. Juli, wobei hier angemerkt sei, dass das Volumen deutlich unterschätzt wurde, da der Pegel überflutet wurde und die spezifische PQ-Beziehung unter diesen Voraussetzungen keine Gültigkeit mehr hat.

Das die Trockenphase abschließende Ereignis vom 29. Juni kann für den Pegel Selzenbächle nicht ausgewertete werden, da es zu einem Datenausfall kam.

Das Gewässer reagiert nahe zusofort auf eintretende Niederschläge, was sicherlich auch durch die kleine räumliche Ausdehnung des EZG begründet ist.

Die ersten drei Ereignisse lassen ein rasches Abfallen der Wasserstände nach den Niederschlägen erkennen. Es zeigt sich jedoch, dass der durchschnittliche Abfluss schon nach dem Ereignis SBE1 deutlich über dem Niveau der Vorereignisphase liegt. Dieses



Abbildung 5.3: Pegeldaten Selzenbächle

Verhalten lässt sich bei nachfolgenden Ereignissen in immer größer werdendem Ausmaß erkennen. Für das Ereignis SBE4 zeigt sich nach einem anfänglichen Abflusspeak ein langsames, von Niederschlägen geringer Intensität begleitetes Auslaufen der Kurven.

Eine Übersicht der einzelnen Ereignisse ist in Tabelle 5.3 gegeben. Das SBE2 kann zum Vergleich mit dem zeitgleich ablaufenden Ereignis EBE4 im EZG Engebächle herangezogen werden.

Selzenbächle	Datum	N-Summe (mm)	N-Intensität (mm/h)	Qmax (l/s)	Q-Summe	Dauer (h)
SBE1	25.07.05	25,81	0,573555556	52,91	4461,96583	15,5
SBE2	29.07.05	38,17	2,900455927	222,62	6001,74719	13,16
SBE3	15.08.05	25,37	0,826384365	73,79	6914,5029	30
SBE4	21.08.05	34	0,603907638	78,22	14483,9801	56,5
SBE5	11.09.05	54,7	3,217647059	85,45	5741,9918	17,16
SBE6	16.09.05	21,93	1,21160221	64,76	4967,31183	18,1

Tabelle 5.3: Werte der einzelnen Ereignisse am Selzenbächle

5.2.3 Engebächle

Der Pegel am Engebächle muss auf Grund einer Verlagerung komplett neu aufgebaut werden und wird zusätzlich mit einem Dreieckswehr ausgestattet. Die Aufzeichnungen beginnen auf Grund dessen etwas zeitverzögert am 9. Juni.

Die Trockenphase wirkt sich auch auf die Abflussführung am Engebächle aus: das Abflussminimum mit etwa 0,6 l/s wird zu dieser Zeit, unmittelbar vor dem Ereignis EBE1, registriert. Der maximale Abflusswert kann während des Verlaufs des Ereignis EBE4 mit 150,47 l/s bemessen werden. Hier tritt jedoch die gleiche Problematik auf, die auch am Pegel Selzenbächle vorliegt: die Abflusspitze wird gering bemessen, da der Pegel überflutet ist und die PQ-Beziehung nicht mehr zur Anwendung kommen kann.

Das Engebächle reagiert sofort auf das Niederschlagsereignis EBE1, fällt anschließend jedoch wieder auf eine Wasserführung zurück, wie sie vor dem Ereignis zu beobachten war. Die Durchgangskurve verläuft relativ steil und weist kaum einen abfallenden Ast auf.

Im Zuge weiterer Ereignisse wird jedoch eine deutliche Veränderung in diesem Verhalten ersichtlich. Mit kürzeren niederschlagsfreien Phasen zwischen den einzelnen Ereignissen, werden immer länger anhaltende abfallende Äste registriert. Während sich die Durchgangskurve bis zum Ereignis EBE4 noch im Zeitrahmen von einigen Tagen bewegt, können während der Folgeereignisse trotz geringerer Niederschläge wesentlich länger anhaltende Auslaufkurven aufgezeichnet werden.

Dieses Verhalten kann durch ein Wiederaufsättigen bzw. Wiederauffüllen der Bodenspeicher im Zuge der vorangegangenen anhaltenden Niederschlägen erklärt werden. Die Messungen der Bodenfeuchtsonden können diese Annahme für die Ereignisse im Engebächle festigen (Kapitel 5.6).

Während einer weiteren Trockenphase Anfang September, fallen die Abflusswerte nicht mehr so stark zurück wie zu Beginn der Messphase. Auch dies weist darauf hin, dass sich die Speicher des Systems wieder gefüllt haben.

Bei genauerer Betrachtung der Trockenwetterauslauflinie der letzteren Ereignisse kann der Einfluss einer später einsetzenden, verzögerten Komponente erkannt werden.

Diese Thematik wird jedoch in Abschnitt 5.3 genauer betrachtet.



Abbildung 5.4: Pegeldaten Engebächle

Engebächle	Datum	N-Summe (mm)	N-Intensität (mm/h)	Qmax (l/s)	Q-Summe	Dauer (h)
EBE1	29.06.05	26,01	1,250480769	54,22	1131,80459	20,8
EBE2	10.07.05	34,47	1,418518519	150,47	5255,12499	24,3
EBE3	25.07.05	25,5	0,692934783	67,11	3900,53999	36,8
EBE4	29.07.05	38,17	2,900455927	147,07	4673,04041	13,16
EBE5	01.08.05	8,19	0,166463415	71,37	9243,55723	49,2
EBE6	15.08.05	25,37	0,874827586	88,12	6508,32565	29,16
EBE7	21.08.05	31,46	0,803370787	101,44	11488,7637	39,16
EBE8	11.09.05	54,7	1,57183908	110,46	8775,47903	34,8
EBE9	16.09.05	21,93	1,21160221	74,98	4672,06877	18,1

 Tabelle 5.4: Werte der einzelnen Ereignisse am Engebächle

5.2.4 Fazit

Der Niederschlagsinput für die EZG Selzenbächle und Engebächle ist identisch. Auf Grund der räumlichen Entfernung des EZG Glasbach weist dieser meist ein unterschiedliches Niederschlagsinput auf, zeigt aber in Bezug auf die Gangliniendynamik ebenfalls ein sehr ähnliches Verhalten wie das des Engebächle und des Selzenbächle auf.

Für das Ereignis am 16. September kann auf Grund des gleichen Niederschlagsinputs in allen drei Gebieten ein Vergleich vollzogen werden (Abbildung 5.5).

Beim Vergleich der oben ausführlich dargestellten Abflussganglinien fällt auf, dass die beiden EZG Engebächle und Glasbach, obwohl unterschiedliche Niederschlagsintensitäten vorliegen, eine nahezu identische Dynamik im Abflussverhalten aufweisen. Die Ganglinien unterscheiden sich zwar in Laufzeit und Volumen, setzen jedoch zeitgleich ein und weisen beide mit fortschreitender Messperiode eine länger anhaltende Auslaufphase auf.

Die Abflussvolumina und die Auslaufdauer liegen im Glasbach jedoch immer unter denen des Engebächle.

Die höchsten Werte der drei EZG werden im Selzenbächle (größtenteils landwirtschaftlich genutzte Flächen und größte EZG Fläche) registriert, welches zum Einen höhere Basisabflüsse und zum Anderen wesentlich höhere Abflussspitzen aufweist. Die Trockenwetterfalllinien scheinen auf den ersten Blick, verglichen mit denen der EZG Engebächle und Glasbach, wesentlich flacher und zumindest während der letzten Ereignisse über längere Zeiträume zu verlaufen. Die Trockenwetterauslauflinien der einzelnen EZG werden in Kapitel 5.3 genauer beschrieben.

Den Spitzenabflusswerten des EZG Selzenbächle (Gesamtvolumen über die Messphase: 356680,466 l) folgen jene aus dem EZG Engebächle (171861,14 l). Im EZG Glasbach werden die geringsten Abflusswerte gemessen, hier fließt ebenfalls das geringste Gesamtvolumen (67402,2 l) durch den Pegel.

Den einzelnen Ganglinien ist auch eine einheitliche Reaktion auf die anhaltende Trockenphase zu Beginn der Messperiode im Juni zu entnehmen. An sämtlichen Pegeln werden abnehmende Abflüsse registriert, wobei auch hier die Werte am Pegel Selzenbächle am höchsten liegen. Die zeitliche Verzögerung der Auslauflinien nach Ereignissen wird ebenfalls in allen EZG aufgezeichnet. Dies wird durch kürzerer niederschlagsfreie Phasen zwischen den Ereignissen begünstigt, welche eine Aufsättigung des Bodens ermöglichen. Diese Beobachtungen können auch von Hänsler (2005) in einer parallel verlaufenden Studie bestätigt werden.



Abbildung 5.5: Vergleich des Ereignisses vom 16. September an den einzelnen Bächen

Ungeachtet der unterschiedlichen Spitzenabflüsse reagieren alle EZG nahezu zeitgleich auf einsetzende Niederschläge, was durch die geringe räumliche Ausdehnung und durch das Gefälle begünstigt wird, und weisen auch eine ähnliche Dynamik auf.

Die EZG Selzenbächle und Engebächle erhalten den gleichen Niederschlagsinput und reagieren relativ homogen. So lässt sich für das Ereignis EBE9/SBE6 am 16. September eine Abflussganglinie aufzeichnen, in welcher die Spitzen nur um etwa 10 l/s unterscheiden. Erstaunlicherweise lassen sich – trotz größerer Entfernung und unterschiedlichem Niederschlagsinput – am Pegel Glasbach auch Parallelen erkennen.

Das erste Ereignis am 29. Juli findet hier nicht statt, da es sich um ein Niederschlagsereignis mit geringer räumlicher Ausdehnung handelt.

Das letzte am Glasbach aufgezeichnete Ereignis, GBE9 am 16. September, wird durch den gleichen Niederschlagsinput hervorgerufen, wie die Ereignisse im Engebächle und Selzenbächle. Dieser Vergleich ist in Abbildung 5.5 dargestellt und verdeutlicht, dass die Abflussspitzen, ebenso die vorausgehenden Peaks, nahezu zeitgleich erreicht werden. Die Auslaufkurven weisen ebenfalls einen ähnlichen Verlauf auf.

Betrachtet man den fallenden Ast des Ereignisses etwas genauer lassen sich schon an Hand der Abbildung 5.5 verzögert einsetzende Abflusskomponenten erkennen. Das Einsetzen dieser Komponenten ist in Abbildung 5.5 durch schwarze Pfeilen markiert. Ob während des Abflussereignisses eine dritte Komponente mit im Spiel war wird in Kapitel 5.3 erörtert.

Für dieses Ereignis, wird in den jeweiligen Gebieten die Abflussspende ermittelt, welche somit einen Vergleich erleichtert:

Engebächle: 3,37 l/s*km² Selzenbächle: 2,49 l/s*km² Glasbach: 0,92 l/s*km².

Für die gesamte Messphase können die in Kapitel 1.1 beschriebenen Untersuchungsergebnisse bestätigt werden. In Bezug auf diese Abflusswerte muss natürlich berücksichtigt werden, dass das EZG Selzenbächle eine um 0,5 km² größeren Fläche aufweist wie die EZG des Glasbaches und des Engebächles.

5.3 Rezessionsanalyse

Der Gesamtabfluss eines Vorfluters setzt sich aus verschiedenen Anteilen zusammen. In niederschlagsfreien Phasen kann man annehmen, dass das Gewässer durch das Grundwasser gespeist wird. Diese Situation ändert sich jedoch beim Eintreten eines Niederschlagsereignisses. Nach längerer Niederschlagsphase und fortschreitender Sättigung des Bodens und Annäherung an die Infiltrationskapazität setzen schnelle und direkte der Infiltrationskapazität Zwischenabflüsse ein. Nach überschreiten kann ein Oberflächenabfluss auftreten. Diese beiden Komponenten werden häufig unter der Bezeichnung Direktabfluss zusammengefasst.

Das während der Trockenphase stattfindendn Leerlaufen der Aquifere folgt einer nichtlinearen, eher exponentiell verlaufenden Kurve, welche durch die Maillet-Formel (Baumgartner und Liebscher, 1990) beschrieben ist:

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

(5.1)

mit $Q_{0:}$ Abfluss zum Zeitpunkt t=0

 \tilde{Q}_t Abfluss nach t Tagen

 α : Leerlaufkoeffizient.

Wird der Abfluss linear gegen die Zeit aufgetragen, ergibt sich eine exponentiell abfallende Kurve, welche sich bei semilogarithmischer Darstellung als eine Gerade darstellt, und deren Steigung den Leerlaufkoeffizienten α repräsentiert.

Der Leerlaufkoeffizient nimmt für ein rasches Leerlaufen große Werte an, für ein langsameres Leerlaufen geringere Werte.

Die Maillet-Formel kann bei annähernd homogenen Aquiferen eingesetzt werden. Für mehrschichtige Aquifere, welche bei semilogarithmischer Darstellung keine Rezessionsgerade sondern eine gekrümmte Kurve mit unterschiedlich geraden Streckenabschnitten ergeben, müssen mehrere Leerlaufkoeffizienten ermittelt werden.

Der Verlauf solcher Kurven kann mehrere Ursachen haben und ist seltenst eindeutig zu interpretieren.

Um das Leerlaufverhalten der verschiedenen Gebiete untereinander vergleichen zu können, werden für die einzelnen Ereignisse die Leerlaufkoeffizienten α bestimmt.

Dies erfolgt mit semi-logarithmischer Darstellung der Abflusswerte, aus welcher sich dann an Hand der Knickpunkte im Kurvenverlauf mögliche Abflusskomponenten erkennen lassen. Die Kurve wird dann unter Berücksichtigung der Knickpunkte in beliebig viele Teilkurven eingeteilt, welchen jeweils eine Gerade mit

$$y = m \cdot x + b \tag{5.2}$$

angepasst wird. Die Steigung der Geraden *m* repräsentiert dann den Leerlaufkoeffizienten. Bei der Anpassung der Geraden muss berücksichtigt werden, dass zum Zeitpunkt des Abflussscheitelpunktes t_0 der Gesamtabfluss Q aus den Abflusskomponenten Q_n zusammengesetzt ist:

$$Q(t_0) = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \,. \tag{5.3}$$

Daraus lässt sich schließen, das vor der Anpassung der Geraden an die einzelnen Kurventeile die entsprechenden Abflusskomponenten reduziert werden müssen (Baumgartner und Liebscher, 1990):

$$Q_n = Q(t_0) - Q_1 - \dots - Q_{n-1}.$$
(5.4)

Über die Geradengleichung werden dann die einzelnen Abflusskomponenten berechnet und in einer Grafik dargestellt. In Abbildung 5.7 ist dieser Methode am Beispiel des Ereignis EBE7 im EZG Engebächle dargestellt. Die Werte der Rezessionskoeffizienten repräsentieren jeweils die "Geschwindigkeit" des Auslaufens eines Systems. Somit stellt α_1 die schnellste Komponente dar. Eine verzögerte Komponente wird durch α_2 wiedergegeben und über α_3 wird eine langsame Komponente beschrieben.

Die Ergebnisse der einzelnen Ereignisse werden in den folgenden Abschnitten für alle EZG diskutiert.

5.3.1 Rezessionsanalyse im EZG Glasbach

Die Ermittlung der einzelnen Leerlaufkoeffizienten wird, soweit möglich, für jedes Ereignis in den einzelnen EZG durchgeführt.

Für die Einzelereignisse im EZG Glasbach kann bis auf zwei Ereignisse, GBE1 und GBE7, an allen weiteren eine Analyse des Auslaufverhaltens durchgeführt werden. Hierbei können maximal drei unterschiedliche Geraden an den auslaufenden Ast angepasst werden.

In Tabelle 5.5 sind die aus den Anpassungen ermittelten Rezessionskoeffizienten dargestellt.

Für das Ereignis GBE2 kann nur ein Rezessionskoeffizient ermittelt werden, da die Hochwasserwelle relativ schnell abfließt und es in den aufgezeichneten Daten keinerlei Hinweise auf verzögert einsetzende Komponenten gibt.

In Abbildung 5.6 ist das Auslaufverhalten des Systems EZG Glasbach in Folge auf ein Niederschlagsereignis vom 2. August dargestellt. Für dieses Ereignis können drei unterschiedliche Rezessionskoeffizienten ermittelt werden. Für die Ereignisse im Glasbach können nur für zwei der neun Ereignisse drei unterschiedliche Rezessionskoeffizienten ermittelt werden.

Die Abtrennung einer Ereigniskomponente von einer verzögert einsetzenden Komponenten kann jedoch für jedes Ereignis erfolgen. Wie bereits erwähnt kann für eines der ersten Ereignisse während der Messphase GBE2 nur ein Rezessionskoeffizient ermittelt werden.

1 4	bene oloi	Limiter	te itezebb	lonskoen	lizienten	uer Ereig	511550 111
	GBE2	GBE3	GBE4	GBE5	GBE6	GBE8	GBE9
a3	-	-	-0,00003	-	-	-	-0,0003
a2	-	-0,0006	-0,0003	-0,0002	0,0005	-0,0007	-0,0002
a1	-0,0003	-0,0034	-0,0004	-0,0009	0,0004	-0,0022	-0,001

Tabelle 5.5: Ermittelte Rezessionskoeffizienten der Ereignisse im Glasbach

Eine Begründung für dieses Verhalten liegt möglicherweise in der Topographie des EZG, da der Bach in einem steilen Kerbtal eingebettet ist, welches kaum eine Übergangszone zwischen Bachbett und Hang aufweist.



Abbildung 5.6: Rezessionsanalyse des Ereignis GBE4 am Glasbach

5.3.2 Rezessionsanalyse im EZG Selzenbächle

Für das EZG Selzenbächle können von den sechs registrierten Ereignissen nur vier zur Rezessionsanalyse verwendet werden. Für die übrigen zwei Ereignisse (SBE3 und SBE7) kann keine zufriedenstellende Geradenangleichung ermittelt werden.

Für keines der betrachteten Ereignisse kann eine eindeutige dritte Komponenten ermittelt werden.

Der Rezessionskoeffizient α_3 stellt, wie in Abbildung 5.7 zu erkennen ist die Komponente dar, welche in den anderen EZG die am zeitverzögertsten reagiert, aber auch am längsten anhält.

Dies kann auf Grund der geringen Datenlage im Selzenbächle jedoch nicht eindeutig interpretiert werden und somit keiner definitiven Ursache zugeordnet werden.

Da dieses Gebiet kaum Waldfläche aufweist und starker landwirtschaftlicher Nutzung unterliegt, ist es gut möglich, dass eine Bildung des schnellen Zwischenabflusses auf Grund von geringer Infiltrationskapazitäten seltener zustande kommt. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die relativ steilen Hänge des EZG lediglich mit Gras und ähnlicher Vegetation bewachsen sind. Andererseits begünstigen diese Fakten wiederum die Bildung von Oberflächenabfluss. Somit kann möglicherweise ein "return flow" an den Hangfüßen entstehen, oder aber auch ein Überlagerungseffekt von piston flow und Oberflächenabfluss im Ereignisfall.

	SBE1	SBE2	SBE4	SBE6
a3	-	-	-	-
a2	-0.00005	-0.0002	-0.00001	-7E-05
a1	-0.0001	-0.0007	-0.00002	-0.0003

Tabelle 5.6: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Selzenbächle

Wie bereits erwähnt gibt es jedoch für oben genannte Vermutungen keinerlei Belege, diese müssen deshalb als reine Spekulation betrachtet werden.

Die Rezessionskoeffizienten des Selzenbächle liegen, bis auf eine Ausnahme, unter den Werten des EZG Engebächle und des EZG Glasbach.

5.3.3 Rezessionsanalyse im EZG Engebächle

Die registrierten Ereignisse im Engebächle können alle zur Rezessionsanalyse herangezogen werden. Die "Knickpunkte" der einzelnen Auslaufkurven können meist eindeutig ausgemacht werden und somit problemlos zur Ermittlung der Rezessionskoeffizienten dienen.



Abbildung 5.7: Rezessionsanalyse für das Ereignis EBE7

Für die Ereignisse EBE1, EBE6 und EBE9 werden nur zwei unterschiedliche Rezessionskoeffizienten ermittelt, während für die restlichen Ereignisse drei unterschiedliche Steigungen angepasst werden.

Der in Abbildung 5.7 semilogarithmisch dargestellt fallende Ast des EBE7 kann relativ gut durch eine Gerade angenähert werden.

Die Pfeile in der Grafik markieren jeweils die "Knickpunkt", also der vermutliche Einsatz einer weiteren Komponente, welche ab diesem Zeitpunkt dann das Abflussgeschehen mitbestimmt. Für das EBE7 zeigt sich, dass der letzte Ast mit $\alpha_3 = 0,0000002$ kaum noch eine Steigung bzw. ein Gefälle aufweist.

Daraus kann man schließen, dass der Abfluss über diesen Zeitraum aus einem relativ konstanten Speichersystem gespeist wird und scheinbar keine zusätzlichen Einflüsse in diesen Prozess mit einspielen.

Sämtliche Rezessionskoeffizienten, welche für die Ereignisse am Engebächle ermittelt werden, sind in Tabelle 5.7 dargestellt.

I ab											
	EBE1	EBE2	EBE3	EBE4	EBE5	EBE6	EBE7	EBE8	EBE9		
a3	-	-0,0003	-0,0001	-0,0006	-0,0002	-	-2E-07	-0,00005	-		
a2	-0,000009	-0,0008	-0,0003	-0,0007	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0005	-0,0002		
a1	-0,0003	-0,0018	-0,001	-0,0017	-0,0007	-0,0005	-0,0004	-0,0009	-0,0007		

Tabelle 5.7: Ermittelte Rezessionskoeffizienten im Engebächle

5.3.4 Fazit

Zur Interpretation der ermittelten Werte muss nochmals kurz darauf hingewiesen werden, dass es sich bei den angenäherten Geraden, deren Steigung den Rezessionskoeffizienten repräsentieren, um eine Beschreibung handelt, welche ein Verhältnis zwischen auslaufendem Volumen und der Zeit darstellt.

Berücksichtigt man diese Funktion repräsentiert ein großer Rezessionskoeffizient ein Auslaufen eines größeren Volumens über kürzeste Zeit.

Generell verhalten sich alle beschriebenen Auslaufkurven so, dass sie von einer steileren Geraden, also verhältnismäßig großem Leerlaufkoeffizienten, in eine flacher verlaufende Gerade, also einen kleineren Leerlaufkoeffizienten, übergehen. Dies bedeutet, dass der Oberflächenabfluss, der Zwischenabfluss und der Basisabfluss nach einem Ereignis zeitlich nacheinander ausklingen (Baumgartner und Liebscher, 1990).

Dies ist jedoch eine der wenigen Aussagen welche als gesichert angesehen werden kann.

Die folgende Diskussion basiert, soweit nicht anders erwähnt, auf den Aussagen von Baumgartner und Liebscher (1990).

Für das EZG Selzenbächle werden die geringsten Rezessionskoeffizienten bestimmt (Tabelle 5.6). Vergleicht man die ermittelten Werte der Ereignisse SBE6, GBE9 und EBE9 kann man erkennen, dass die schnellste Komponente im Selzenbächle deutlich langsamer reagiert wie die der EZG Glasbach und Engebächle.

Dies kann auf einen weniger rasch reagierenden, verzögerten Zwischenabfluss zurückzuführen sein, oder aber auch durch vergleichbar weniger gut entwässernde Böden. Da in den bewaldeten Gebieten stets höhere Rezessionskoeffizienten vorzufinden sind, liegt die Vermutung nahe, dass der Makroporenfluss bei der Entwässerung eine wichtige Rolle spielt. Diese ist laut Burch et al. (1987) unter landwirtschaftlich genutzten Flächen nicht vorhanden.

Gerade im EZG Engebächle kann der Rezessionskoeffizient α_3 der beiden letzteren Ereignisse (EBE7 und EBE8) darauf hinweisen, dass über den Messraum hinweg Speichersysteme aufgefüllt werden, welche wesentlich langsamer auslaufen und dann einen konstanteren Basisabfluss in niederschlagsfreien Phasen gewährleisten.

5.4 Trübungsmesswerte

Die Trübungsmesswerte können für beide EZG nur bedingt bzw. nicht zur Auswertung herangezogen werden. Die Messungen im Engebächle sind von Sprunghaftigkeit und Diskontinuität geprägt, beim Selzenbächle stellt sich das Problem, dass die Datenaufzeichnung sehr lückenhaft vollzogen werden.

Beide Fluorometer befinden sich vom 23. bis 25. August zur Nachkalibrierung im Labor.

Wie bereits in Kapitel 3.2.2 ausführlich dargestellt, erweist sich die Messung der Trübung in beiden EZG als aufwendig.

Während der Auswertung der ersten Daten stellt sich die Frage, ob die Messungen vom Durchflussvolumen abhängig sind.

Auf Grund dessen wird bei beiden Geräten ein Test durchgeführt, bei welchem das Wasser jeweils mehrere Stunden mit einer Kofferpumpen durch die Fluorometer gepumpt wird.

Diese Pumpversuche werden während eines Ereignisses an beiden Bächen wiederholt, zum Einen um ein Durchlaufen des Wassers zu gewährleisten, zum Anderen um festzustellen, in wie weit sich die Messwerte von Pumpphase und Standart-Phase verhalten.

Das Ergebnis der Pumpphase während des niederschlagsfreien Tests weisen weder eine Verbesserung der Messungen auf, noch verschlechtern sie diese.

Auch die Pumpphase während des Ereignisses vom 11. September ergibt keine eindeutige Verbesserung der Messung.

Abschließend kann gesagt werden, dass die Messungen keine eindeutigen Ergebnisse liefern.

5.4.1 Selzenbächle

Auf Grund der in Abschnitt 3.2.2 geschilderten Problematik können die Trübungsmesswerte im EZG Selzenbächle erst ab 19. Juli einigermaßen zufriedenstellend aufgezeichnet werden (Abbildung 5.8.).

Die Messungen wurden zu einem früheren Zeitpunkt schon gestartet, konnten aber nie über eine gesamte Woche registriert werden, da der Durchfluss durch den Fluorometer kontinuierlich unterbrochen war. Nachdem der Pegel auf Grund der Zerstörung durch das Ereignis vom 12. Juli neu aufgebaut wurde, kommt auch der Fluorometer an einen anderen Ort, welcher ein höheres Gefälle aufweist. Der Durchfluss des Bachwassers durch das Gerät gestaltet sich ab diesem Zeitpunkt gering besser.

Bei genauerer Betrachtung lässt sich eine mögliche Kopplung der Dynamik der Trübungskonzentration an die der Leitfähigkeit erkennen. Die abnehmenden Werte der Trübung gegen Ende der Messeinheiten (jeweils eine Woche) sind jedoch eher darauf zurückzuführen, dass der Wasserstrom durch das Messgerät nicht mehr aufrecht erhalten werden konnte und somit kontinuierlich das selbe Wasser bemessen wurde. Da sich das gelöste Material am Boden der Glasröhre absetzt, werden über die Messung immer geringer werdende Konzentrationen registriert. Dies zeigt sich bei den wöchentlichen Reinigungen der Glasröhre, welche ständig mit einer feinen Sedimentschicht am Grunde versehen war.

Der erhoffte Zusammenhang zwischen den Abflusswerten und der Trübungskonzentration kann zu keiner Zeit während der Messphase über die kontinuierlichen Daten belegt werden.

Während des Ereignisses zu Beginn der Messphase am 29. Juni wurden Wasserproben gezogen und im Labor auf Trübung beprobt. Die dort ermittelten Werte im Ereignisfall liegen bei 70 NTU. Nach Abklingen der Hochwasserphase werden erneut Wasserproben

gezogen und im Labor beprobt. Für ereignisfreie Phasen werden im Selzenbächle Trübungswerte bei etwa 14-18 NTU ermittelt.

Dies entspricht einer geringen Sedimentladung (Pavanelli und Pagliarani, 2002).

Hierzu muss nochmals erwähnt werden, dass der Flurometer GGUN 30 eine obere Messgrenze von etwa 3,6 NTU (2500 mV) hat und somit eher gering für den Einsatz zur Erfassung der Trübungskonzentration an sich ist.

5.4.2 Engebächle

Die Messung der Trübung im Engebächle unterliegt der gleichen Problematik wie die des Selzenbächles. Ein besseres Durchlaufverhalten des Wassers durch den Fluorometer scheint jedoch vorzuliegen. Die Erfassung der Daten gestaltet sich hier stetiger, unterliegt aber verhältnismäßig starken Schwankungen.

Die Plateaus in Abbildung 5.9 lassen sich durch das Erreichen der Messgrenze des Fluorometers erklären. Der Wert von 2500 mV muss daher über diesen Zeitraum betrachtet überschritten werden.

Die Reaktion der Trübung auf das Ereignis EBE7 am 21. August zeigt über die ganze Messphase betrachtet die einzige Möglichkeit, einen Anstieg der Trübung auf Grund eines Ereignisses mit Hilfe der Messdaten zu belegen.

Da dieser Anstieg bei einer Abflussspitze von mehr als 80l/s nur etwa 1 NTU beträgt, kann auch diese Datenaufzeichnung nicht als absolute Messung betrachtet werden sondern sollte im Sinne der Dynamik interpretiert werden.

Die registrierten Trübungswerte sind auch im Engebächle zu gering. Sie können an Hand der im Labor untersuchten Wasserproben vom 29. Juni und der darauffolgenden niederschlagsfreien Phase auf 50-60 NTU während des Ereignisses und auf etwa 10 NTU nach Ablauf der Hochwasserwelle bestimmt werden.

Neben diesen Messwerten kann die Zunahme der Trübung während Ereignissen auch vom Engebächle visuell bestätigt werden.

5.4.3 Fazit

Wie sich aus der oben aufgeführten Darstellung erkennen lässt, bereitete die Datenerfassung unter Verwendung des GGUN 30 Fluorometer größte Schwierigkeiten.

Der Fluorometer scheint für diese Art der Anwendungen und diese Installation nicht geeignet zu sein.

Die Aufzeichnung mangelhafter bzw. fehlerhafter Messdaten und kontinuierlicher Durchflussprobleme scheinen diese Annahme zu belegen. Auch der eigentliche Anwendungszweck des Messgerätes, die Trübungswerte während Tracerversuchen zu registrieren um Hintergrundstörungen zu vermeiden, festigen diese Annahme (Schnegg, 2003).



Abbildung 5.8: Trübungsmesswerte Selzenbächle

In beiden EZG lässt sich während der Ereignisse eine Abnahme der Trübungswerte erkennen, während jedoch eine Zunahme, speziell für das Ereignis am 11. September, visuell Belegt werden kann.

Dass die Trübungswerte im Ereignisfall eindeutig zu gering registriert werden, belegen auch sämtliche zu Rate gezogenen Studien (Pavanelli und Pagliarani, 2002; Sun et al., 2001) so wie auch die im Labor durchgeführte Bemessung der Wasserproben.



Abbildung 5.9: Trübungsmesswerte Engebächle

Die Abnahme der Werte kann durch ein Versagen des Durchflusses auf Grund von Verstopfung der Ansaugrohre erklärt werden, da sich dann, wie obern geschildert, das Sediment in der Glasröhre am Grunde absetzt und das darin verbleibende Wasser immer weniger Sedimentfracht enthält.

Im Fluorometer des Engebächle kann der Durchfluss weitaus öfters über ein Woche hinweg aufrecht erhalten werden, während im Selzenbächle nur hin und wieder ein anhaltender Durchfluss festgestellt wird.

Da die Vermutung aufkam, die Messungen seinen vom Durchflussvolumen abhängig, wird für beide Bäche über einige Stunden ein Pumpversuch gestartet. Während eines niederschlagsfreien Zeitraums kann eine geglättetere Aufzeichnung der Daten registriert werden, während im Ereignisfall das Gegenteil der Fall ist und starke Schwankungen nachzuweisen sind. Dieser Versuch liefert also kein eindeutiges Ergebnis. Auf Grund messtechnischer Einschränkungen ist es auch nicht möglich, den Wasserstrom durch die Fluorometer dauerhaft mit Pumpen aufrecht zu erhalten.
Die Messung der Trübung stellt in der gesamten Messperiode die am arbeits- und zeitintensivste Methode dar. Trotz ständiger Wartung und Verbesserungsversuche kann keine aussagekräftige und zufriedenstellende Messreihe erhalten werden.

5.5 Grundwasserpegel

Die in den Grundwasserpegeln ausgebrachten Diversonden registrieren ab dem 09. Juni kontinuierlich Messdaten.

Mit diesen drei installierten Pegelrohren soll die Auendynamik in Bezug auf den Ereignisfall beobachtet und festgestellt werden, ob und in wie fern sich der Bereich auf die Abflussbildung auswirkt.

Während GW-Pegel 1 und GW-Pegel 2 Leitfähigkeit, Temperatur und Wasserstand aufzeichnen registriert der GW-Pegel 3 nur Wasserstand und Temperatur. Auf Grund der geringen Einbringtiefe können nur wenige Male während der Messphase Wasserstände gemessen werden. Da jedoch die Temperaturdaten vorhanden und unbeeinflusst von Wasser sind, werden die anderen beiden Diversonden mit den Daten des GW-Pegel 3 Luftdruckkompensiert.

Die Leitfähigkeitswerte des GW-Pegel 2 erweisen sich auf Grund messtechnischer Probleme als unbrauchbar.

Wie in Abbildung 5.10 und Abbildung 5.11 zu erkennen ist, unterscheidet sich das Verhalten der GW-Pegel in Bezug auf die Niederschlagsereignisse erheblich. Während der GW-Pegel 1 im Ereignisfall kaum oder nur geringe Schwankungen aufweist, werden im GW-Pegel 2 Schwankungen von mehr als 40 cm registriert.

Dies kann dadurch erklärt werden, dass der GW-Pegel 1, welcher sich nur einen Meter vom Bachbett entfernt befindet, durch das Bachbett einen Ausgleich erfährt. Die Wasserführung des Baches wird direkt auf den GW-Pegel übertragen und "puffert" so dessen Wasserstandschwankungen im Ereignisfall so wie auch in niederschlagsfreiem Zeitraum.

Der hydraulische Einfluss des Bachbettes reicht auf Grund der Entfernung von 4,5 m (Abbildung A 16) jedoch nicht bis an den GW-Pegel 2 heran. In den Aufzeichnungen des GW-Pegels 2 lassen sich demnach die Reaktionen auf die einzelnen Ereignisse deutlich erkennen (Abbildung 5.11). Am Beispiel des EBE 7 lässt sich der Anstieg des Wasserstandes im Pegel auf das Niederschlagsereignis hin sehr gut erkennen. Nach diesem Ereignis setzt die zweite Trockenphase während der Messungen ein, über einen Zeitraum von nahezu drei Wochen wird kein bedeutendes Niederschlagsereignis registriert. Über den niederschlagsfreien Zeitraum kann der Rückgang des Wasserstandes unter anderem durch den Wasserverbrauch der Vegetation erklärt werden.



Abbildung 5.10: Grundwasserpegel 1

Ob das Ansteigen des Wasserstandes im GW-Pegel 2 auch auf angestautes Hangwasser vom Bachbett und vom GW-Pegel 1 her zurückzuführen ist, lässt sich auf Grund der geringen Aussagekraft der Messdaten nicht belegen.

Gleichzeitig kann jedoch angenommen werden, dass die Dynamik des GW-Pegel 1 im Rahmen des Schwankungsbereichs des Bachwassers liegen und somit eine Aussage bezüglich der Auendynamik nicht zu treffen ist.



Abbildung 5.11: Grundwasserpegel 2

5.5.1 Fazit

Aus den oben dargestellten Grafiken und Erläuterungen kann man erkennen, dass der GW-Pegel 2 ein weitaus dynamischeres Verhalten aufweist wie GW-Pegel 1. Ausgehend von den Positionen der beiden Pegel wäre zu erwarten gewesen, dass sich diese gerade umgekehrt verhalten würden.

GW-Pegel 1 scheint jedoch auch zu Niedrigwasserphasen in ausreichend hydraulischem Kontakt mit dem Bachbett zu stehen. Dies würde die geringen Schwankungen erklären.

Bezieht man jedoch die Leitfähigkeitswerte in diese Betrachtungen mit ein, scheint ein direkter Kontakt her ausgeschlossen, da die im GW-Pegel 1 registrierten Werte gerade in Ereignisfällen höher liegen, wie die des Baches. Diese erhöhten Werte können durch längere Verweilzeiten zustande kommen.

Somit schein ein über Druck bestehender Kontakt zum Bachbett wahrscheinlicher als direktes Übertreten von Bachwasser (effluente Verhältnisse) in die Zone um den GW-Pegel 1 herum.

Für GW-Pegel 2 können die Reaktionen des Wasserstandes im Ereignisfall möglicherweise durch Aufstauungseffekte von Wasser zwischen dem angrenzenden Hang und dem Bachbett erklärt werden (McGlynn und McDonnell, 2003), müssen jedoch mit Vorsicht betrachtet werden, da der hydraulische Kontakt zwischen Hang und *Riparian Zone* durch Waldwege unterbrochen sein kann.

In beiden GW-Pegeln lassen sich gegen Ende der Messphase langsamere Rückgänge der Wasserstände nach Ereignissen belegen, was die in Kapitel 5.2.4 bereits angesprochene These bestätigen kann: der Boden wird zusehends aufgesättigt.

Der Anteil der *Riparian Zone* am gesamten EZG ist relativ gering. Die Beobachtungen von McGlynn (2005) lassen sich in Anbetracht dessen, das außerdem ungenügend Datenmaterial zur Verfügung steht, weder be- noch widerlegen.

5.6 Bodenfeuchtesonden

Die Bodenfeuchtdaten werden von den in einem Hangprofil eingegrabenen Sonden registriert. Sie dienen zur Erfassung der relativen Schwankungen des Wassergehaltes im Boden um eventuelle Zusammenhänge in der Abflussbildung belegen zu können. Die fünf Sonden werden jeweils in 10 cm (Sonde 1) unterhalb der Geländeoberfläche (GOF), 40 cm (Sonde 2), 65 cm (Sonde 3), 90 cm (Sonde 4) und 115 cm (Sonde 5) in die Bodenschichten eingegraben.

In Abbildung 5.12 lässt sich erkennen, dass die beiden untersten Sonden, Sonde 4 und 5, weniger dynamisch auf Ereignisse und Trockenphasen reagieren wie vergleichsweise die weiter oben positionierten Sonden. Während der anhaltenden Trockenphase zu Beginn der Messungen nimmt der Wassergehalt des Oberbodens zusehends ab. Dieser Verlauf lässt sich, in Abhängigkeit der Einbringtiefe mehr oder weniger stark, für jede Sonde erkennen.

Die Austrocknung der oberen Bodenschichten wird durch verstärkte Evapotranspiration begünstigt. Diese Vermutung wird dadurch bestärkt, dass die beiden tiefstgelegenen Sonden nur gering von diesen Effekten tangiert werden, und der Wurzelraum nicht so tief reicht.

Im Zuge der wieder einsetzenden Niederschläge lässt sich eine Wiederauffeuchtung der Bodenzonen erkennen. Es zeigt sich wiederum das Phänomen, dass die oberen Sonden zuerst einen erhöhten Wassergehalt registrieren, während die beiden unteren (Sonde 4 und 5) nahezu konstante Werte aufweisen. Je kürzer die Trockenphasen zwischen den Niederschlägen, umso schneller lässt sich jedoch eine Reaktion dieser beiden untersten Sonden belegen. Durch anhaltende Niederschläge bzw. kurze Trockenphasen kann das Wasser durch die gesamte Bodenmatrix in die tieferen Zonen perkolieren und diese letzen Endes wieder auffeuchten.



Abbildung 5.12: Bodenfeuchtesonden

Ab Mitte August können dann auch mit Sonde 4 und Sonde 5 eindeutige Reaktionen auf Niederschlagsereignisse belegt werden. Es kann also von einer Aufsättigung des Bodens gesprochen werden, welche eine vertikale Sickerung des Wassers in die tieferen Bodenzonen ermöglicht.

5.6.1 Fazit

Wie auch sämtlichen anderen Messdaten beschreiben die Bodenfeuchtesonden die bereits bekannte Situation: über den niederschlagfreien Zeitraum zu Beginn der Messphase wird ein Austrocknen der Bodenschichten aufgezeichnet, welches sich zuerst an den oberen Sonden bemerkbar macht und dann, im Laufe der Zeit, in den unteren beiden Sonden in geringerem Ausmaße erkennbar wird.

Ebenso belegen die von den Sonden aufgezeichneten Messdaten eine Aufsättigung der Bodenmatrix mit wieder einsetzenden Niederschlägen und kürzer bleibenden Trockenphasen.

Die rasche Reaktion der untersten Sonden auf die ersten Niederschläge kann durch einen Makroporenfluss erklärt werden, wie er in McDonnell (1990) beschrieben ist. Auch Gutknecht (1996) weist in seiner Arbeit darauf hin, dass für die rasche Entstehung von Sättigungsbereichen (an Hängen) eine rasche Nachlieferung von Niederschlagswasser in die tieferen Bodenschichten wesentlich ist.

Die Bodenfeuchtesonden liefern ebenfalls Belege dafür, dass sich das Auslaufverhalten der Abflussganglinien im Engebächle im letzten Drittel der Messphase über längere Zeiträume erstreckt.

5.7 Gewässertemperatur

Die Gewässertemperatur in den einzelnen Bachläufen verhält sich relativ homogen: die Schwankungen spielen sich sowohl in den gleichen Zeiträumen als auch in ähnlichen Wertebereichen ab.

Die Temperatur wird jeweils an den Pegeln von den Diversonden aufgezeichnet, im EZG Engebächle sind weiterhin 18 Temperatursonden zur Datenerfassung im Einsatz. Sämtliche Sonden zeichnen die Messdaten über die gesamte Dauer der Messung völlig problemlos auf. Der Verlauf der Gewässertemperatur in den einzelnen EZG ist im Folgenden dargestellt.

5.7.1 Glasbach

Der Glasbach fließt kontinuierlich unter Wald weshalb er größtenteils vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt ist.

Zu Beginn der Messphase, über den längeren niederschlagsfreien Zeitraum lässt sich ein Temperaturanstieg von etwa 9°C erkennen (Abbildung 5.2). Dieser Anstieg wird dann durch ein einsetzendes Ereignis am 29. Juni unterbrochen und stellt den längsten Zeitraum, in der die Temperatur zunimmt, dar.

Neben dem erwartungsgemäßen Tagesgang der Temperatur zeigt sich auch eine Reaktion auf die Schwankungen der Lufttemperatur, welche durch unterschiedliche Wetterlagen hervorgerufen wird. In Abbildung 5.2 unten ist der Trend der einzelnen Temperatursonden im Engebächle, welcher durch die Witterung bedingt ist, abgebildet. Diese können ohne weiteres auch auf die zeitlich ausgedehnteren Schwankungen der Gewässertemperatur übertragen werden.

Während die Temperaturänderung über den Tag betrachtet lediglich 1-2°C betragen, kann sie über längere Zeitbereiche auch schon mal um 4°C oder mehr schwanken.

Das Temperaturmaximum der Messphase wird am Spätnachmittag des 28. Juli mit 19,4°C gemessen, das Minimum liegt morgens am 8. Juni bei 9,6°C. Daraus lässt sich schließen, dass die Temperaturen des Gewässers im Zeitraum von Anfang Juni bis Ende September um etwa 10°C schwanken.

Ein bemerkenswerter Temperatursturz wird durch das letzte in der Messphase registrierte Ereignis, GBE9, am 16. September ausgelöst und bewirkt eine Temperaturabnahme um 5°C innerhalb von zwei Tagen.

5.7.2 Selzenbächle

Die Gewässertemperatur wird für das EZG Selzenbächle ebenfalls über eine Diversonde am Pegel gemessen.

Der Verlauf der Temperatur des Selzenbächle (Abbildung 5.3) weist zu Beginn der Messphase eine drei Wochen anhaltende, stetige Temperaturzunahme um etwa 9°C (8-17°C).

Diese Phase wird ebenfalls von dem am 29. Juni eintretenden Niederschlagsereignis beendet, wobei der anschließende Temperaturverlauf auf Grund von Datenausfall nicht aufgezeichnet werden konnte. Das Temperaturmaximum über den betrachteten Zeitraum wird mit 17,6 °C ebenfalls (wie auch im Glasbach) am Spätnachmittag des 28. Juli registriert. Das vermeintliche Temperaturmaximum von 19.9°C am 12. Juli kann nicht in die Betrachtungen mit einbezogen werden, da der Pegel zu diesem Zeitpunkt von einem Niederschlagsereignis zerstört war und die Diversonde Lufttemperaturwerte aufzeichnete.

Das Minimum liegt bei 8,25°C und findet sich zu Beginn der Messphase. Die Dynamik der Temperatur im Selzenbächle spielt sich im Zeitraum von Juni bis September also in einem Bereich von 9°C ab.

Auch hier lässt sich ein Tagesgang erkennen, bei welchem die Werte um 1-2°C schwanken, wobei witterungsbedingte und längerfristige Schwankungen durchaus in Bereichen von 4-9°C liegen können.

Der Reaktion der Gewässertemperatur auf das Ereignis vom 29. Juni kann auf Grund des bereits erwähnten Datenausfalls nicht betrachtet werden, es wird jedoch ein ebenfalls weiterer Temperaturabfall durch die Ereignisse Mitte September verursacht. Dieser spielt sich jedoch im Zeitraum von zwei Tagen ab und beträgt etwa 3°C.

5.7.3 Engebächle

Zur Bemessung der Gewässertemperatur im Engebächle konnten neben der Diversonde am Pegel (Abbildung 5.4) noch 18 weitere Temperatursonden verwendet werden.

Mit Hilfe dieser Sonden kann ein kontinuierliches Temperaturlängsprofil über ein Bachlauflänge von 1000 m erstellt werden. Da sich die Messwerte der einzelnen Sonden nur minimalst unterscheiden werden der Übersicht wegen in Abbildung 5.13 nur vier Sonden dargestellt, welche jeweils einen Bereich des Bachlaufes repräsentieren. Die genaue Position der Sonden ist der Messgerätekarte im Anhang (Abbildung A 4) zu entnehmen.

Sämtliche Temperatursonden weißen die selbe Dynamik auf und reagieren auch in gleichem Maße auf Witterungseinflüsse. Die vom Tagesgang bedingten Schwankungen liegen zwischen 1-2°C, die durch die Witterung verursachten Schwankungen spielen sich ebenfalls in einem Rahmen von 4°C ab.

Der Temperaturanstieg während der anfänglichen Trockenphase weicht auch kaum von der Größe ab, die an den einzelnen Pegeln registriert wurden und beträgt 8°C.

Der Einfachheit halber werden markante Werte (Temperaturminimum und –maximum usw.) nur für die am Pegel registrierten Daten erwähnt.

Die Temperaturzunahme über die drei Wochen anhaltende Trockenphase beträgt im Engebächle 18,74°C und wird kurz vor dem Ereignis EBE1 am 28. Juni um die Mittagszeit gemessen. Der minimale Temperaturwert, der über die gesamte Messphase aufgezeichnet werden kann (9,4°C), findet sich zu Beginn am 10. Juni gegen 08:00 Uhr. Die Werte schwanken also auch im Engebächle um 9°C.

Weitere Parallelen zu den beiden anderen EZG finden sich in den Schwankungen über den Tag, die sich ebenfalls im Bereich von 1-2°C abspielen, und die Reaktionen auf die Einflüsse der Lufttemperatur (Abbildung 5.13).

Tagesgänge und witterungsbedingte Änderungen der Gewässertemperatur werden auch von sämtlichen Temperatursonden belegt.

Eine Besonderheit des Temperaturverlaufs im Engebächle stellt der abrupte Temperatursturz am 29. Juni von 2,5°C innerhalb 20 Minuten dar. Dieser signifikante Temperatursturz wird durch das Niederschlagsereignis verursacht und findet sich in den Aufzeichnungen aller Sonden in der selben Intensität wieder.





Abbildung 5.13: Verlauf der Gewässertemperatur bei Sonde S74, S58, S65, S67 und am Pegel im EZG Engebächle und die dort herrschende Lufttemperatur

Bei den Temperatursonden gilt zu beachten, dass sie alle unter ähnlichen jedoch nicht identischen Bedingungen Messdaten aufzeichnen. Genauere Beschreibung der Situationen der einzelnen Temperatursonden finden sich im Anhang in Tabelle A 1.

Erhebliche Unterscheidungen in den Messwerten finden sich bei Sonde 53, welche sich dynamisch gleich Verhält wie alle anderen Sonden, jedoch immer Temperaturwerte registriert, die deutlich unter dem Durchschnitt liegen. Dieses Phänomen lässt sich leicht erklären: die Sonde 53 ist in einem Seitenarm (Zufluss) positioniert, und liegt direkt unterhalb des Auslasses der oberen Quellfassung (Abbildung A 4).

Die Reaktion der Sonde 62 kann demgegenüber nicht eindeutig geklärt werden. Vor und nach dem Starkregenereignis vom 29. Juli zeichnet diese Sonde erhöhte Temperaturwerte

auf. Eine möglich Begründung für dieses Verhalten kann durch die geringe Wasserführung vor dem Ereignis und eine, durch das Abflussereignis bewirkte, Veränderung der Position der Sonde erklärt werden. Durch die Positionsänderung wird die Sonde nur noch teilweise mit Wasser bedeckt und registriert Lufttemperaturwerte. Hier sei angemerkt, dass diese Sonde auf Grund ihrer Lage dem Einfluss der Sonnenstrahlung unterliegt.

5.7.4 Fazit

Alle Diversonden an den Pegeln und sämtliche Temperatursonden im Engebächle weisen eine ähnliche Dynamik in der Temperaturaufzeichnung auf.

Vor allem die Trockenphase zu Beginn der Messperiode kann mit Hilfe aller Messsonden detailliert gemessen werden. Der Temperaturanstieg vollzieht sich in den gleichen Maßen, in jedem Bachlauf kann eine Erhöhung um etwa 8°C registriert werden.

Aus dem oben beschriebenen Verhalten der einzelnen EZG lässt sich auch ein homogenes Verhalten der Bäche in Bezug auf den Tagesgang feststellen.

Auf Grund der räumlichen Distanz des EZG Glasbach zu den anderen beiden EZG ist es weniger erstaunlich, dass das Ereignis vom 29. Juni in der Datenreihe des Glasbach kaum auszumachen ist. Es handelt sich bei diesem Niederschlagsereignis um ein konvektives Ereignis, welche meist geringe räumliche Ausdehnung annehmen. Die Aufzeichnungen vom Selzenbächle fehlen für diesen Zeitraum und können ebenfalls nicht zur Auswertung herangezogen werden.

Die Niederschlagsphase beginnend am 16. September bewirkt jedoch in allen Bächen einen gleichermaßen starken Temperatursturz.

Da zur Anwendung einer Ganglinienseparation über die Temperatur eine signifikante Änderung der Werte innerhalb kürzester Zeiträume Voraussetzung ist, können die Daten des Ereignisses vom 29. Juli im EZG Engebächle hierzu zum Einsatz kommen.

5.8 Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeitswerte der einzelnen Bäche wird ebenfalls über die Diversonden an den jeweiligen Pegeln registriert.

Im Vergleich zur Aufzeichnung der Temperatur- und Wasserstandswerte kommt es bei der Messung der Leitfähigkeit immer wieder zu fehlerhaften Werten. Dies liegt daran, dass die Sonden trotz enormer Schutzvorrichtungen häufig, gerade nach Abflussereignissen mehr oder weniger stark mit Sediment verschmutzt sind. Dies wird jedoch in den folgenden Abschnitten detailliert betrachtet.

5.8.1 Glasbach

Die Leitfähigkeit wird unter anderem von Verweilzeiten im System geprägt und vom Substrat, durch welches das Wasser diffundiert.

Die Aufzeichnungen im Glasbach weisen die höchsten registrierte Werte innerhalb der drei EZG dar.

Die Werte liegen meist über 200 μ S/cm und werden nur durch Verdünnungseffekte während Ereignissen auf ein geringeres Niveau gebracht. Im Vergleich mit den anderen beiden EZG liegen die Werte zwar höher, jedoch immer noch im Bereich des im kristallinen Grundgebirges zu erwartenden.

Während der anfänglichen Trockenphase kann man erkennen, dass die Leitfähigkeit ähnliches Verhalten wie die Temperaturwerte aufzeigen. Sie steigen stetig an, bis sie dann durch einsetzende Niederschläge wieder verringert werden.

Wie bereits erwähnt, reagiert die Leitfähigkeit in den meisten Fällen mit deutlich geringer werdenden Werten auf Niederschlagsereignisse. Dies ist nicht ungewöhnlich, da es durch den in das Gewässer einfallenden Niederschlag, zu Verdünnungseffekten kommt. Für die jeweilig definierten Ereignisse können die Leitfähigkeitsmesswerte für eine Ganglinienseparation verwendet werden.

Für das Ereignis GBE2 (Abbildung 5.2) kann innerhalb eines sehr kurzen Zeitraumes eine deutliche Reduktion der Leitfähigkeit bei einsetzendem Niederschlag nachgezeichnet werden. Nach dem Niederschlagsereignis steigen diese Werte erwartungsgemäß wieder an.

Diese Verhalten lässt sich in der klassischen Form ebenfalls während der Ereignisse GBE1 und GBE5 erkennen.

5.8.2 Selzenbächle

Die Werte der Leitfähigkeit im Selzenbächle liegen meist in den Bereichen zwischen 160-180 μ S/cm und werden durch das geringere konzentrierte Niederschlagswasser im Ereignisfall oft auf Werte unter 120-100 μ S/cm verdünnt.

Auch diese Werte liegen im Bereich, welcher in Anbetracht des kristallinen Grundgebirges erwartet wird.

Die starken Schwankungen um den 20. Juni herum können durch keine logischen Erklärungen bereinigt.

Das Ereignis vom 12. Juli, welches eine Abnahme der Leitfähigkeit auf nahezu 2 μ S/cm bewirkt, kann im folgenden nicht berücksichtigt werden, da zu diesem Zeitpunkt der Pegel zerstört war und die Messspitze der Diversonde Werte der Luft registrierte.

Für die weiteren Ereignisse können die Auswirkungen auf die Leitfähigkeit auch am Pegel Selzenbächle sehr schön beobachtet werden. So zeigt beispielsweise das Gewässer eine deutliche Reaktion auf das Ereignis SBE1. Die Werte der Leitfähigkeit fallen abrupt und steigen ebenso unproblematisch wieder an.

Bewirkt durch ein Ereignis, welchem mehrere geringe Niederschlagseinheiten folgen, fällt die Leitfähigkeit für einen Zeitraum von nahezu einer Woche auf Werte um ca. 80 μ S/cm. Dies lässt sich in

Abbildung **5.3** (SBE2) sehr gut erkennen.

Ähnliches Verhalten kann auch für weitere Ereignisse in diesem EZG belegt werden.

5.8.3 Engebächle

Die am Pegel registrierten Leitfähigkeitswerte des Engebächle sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Wie bereits aus den Betrachtungen der Daten des EZG Selzenbächle und Glasbach bekannt, lässt sich auch hier eine Reaktion der Leitfähigkeit auf Niederschlagsbzw. Abflussereignisse erkennen.

Die Leitfähigkeitswerte zeigen auch hier zu Beginn der Messphase, über die dreiwöchige Trockenphase hinweg, eine Aufwärtstendenz.

Sie steigen während dieser Zeit von etwa 150 μ S/cm auf 180 μ S/cm an. Der Schwankungsbereich der gesamten Daten über die Messphase betrachtet liegt jedoch wesentlich höher.

Da im Engebächle während der Messphase an zwei Stichtagen Längsprofile der Leitfähigkeit und der Temperatur aufgenommen wurden (Abbildung 3.3) kann belegt werden, dass sich die Leitfähigkeitswerte über den Bachlauf hinweg kaum ändern. Sie schwanken im unteren Bereich des Bachlaufes (bis etwa 500 m oberhalb des Pegels) um maximal 10 μ S/cm.

Das Engebächle verhält sich auch im Ereignisfalle den Erwartungen entsprechend: zu stärkeren Niederschlagsereignissen fallen die Werte der Leitfähigkeit abrupt ab und steigen dann über unterschiedlich lange Zeiträume wieder an.

Bei dem Ereignis EBE1 am 29. Juni fällt die Leitfähigkeit um nahezu 100 μ S/cm innerhalb kurzer Zeit. Dieser Rückgang in der Leitfähigkeit wird durch das einsetzende Starkregenereignis ausgelöst.

Betrachtet man die folgenden Ereignisse, kann für diese eine ähnliche Reaktion belegt werden.

5.8.4 Fazit

Die registrierten Leitfähigkeitswerte liegen in allen drei EZG im Wertebereich für kristallines Grundgebirge (Hölting und Coldewey, 2005). Sie zeigen jeweils deutliche Reaktionen auf die Verdünnungseffekte durch Niederschlagswasser, welches in der Literatur mit einer Leitfähigkeit von 5-30 μ S/cm angegeben ist (Hölting und Coldewey, 2005). Auch ein Wiederanstieg der Werte bei Unterbrechung bzw. Beendigung der Ereignisse lässt sich erkennen.

Wie bereits in Kapitel 5.8.1 zu lesen ist, werden im EZG Glasbach die höchsten Leitfähigkeitswerte registriert, während sich die Werte der EZG Selzenbächle und Engebächle im gleichen Rahmen wiederfinden.

Es scheint, dass die Diversonden im Glasbach und im Selzenbächle hauptsächlich während der Ereignisse starke Schwankungen registrieren. Die Messungen im Engebächle gestalten sich in Bezug auf die Schwankungen jedoch eher geglättet. Eine Erklärung hierfür kann wohl durch die unterschiedlichen Pegel gegeben werden. Die Diversonde im Engebächle lag auf befestigtem Untergrund und hinter dem Überfall des Messwehres.

Obwohl die Messwerte in allen drei EZG hin und wieder von Sedimentablagerungen um die Sonden herum beeinflusst wurden, können die gewonnen Messdaten hervorragend zur Abflusskomponententrennung eingesetzt werden.

6 Auswertung der Temperaturdaten und der Leitfähigkeit

Die in Kapitel 5.7 und 5.8 erläuterten Messdaten der Temperatur und Leitfähigkeiten werden im Folgenden zur Abflusskomponententrennung herangezogen.

Während die Temperatur nur im EZG Engebächle verwendet werden kann, bietet sich die Leitfähigkeit in allen EZG zum Einsatz an.

Die Grundlagen für folgende Auswertung ist in Kapitel 3.4.2 ausführlich dargestellt.

Für das Ereignis EBE1 kann ein Vergleich der beiden Methoden vollzogen werden. Da die Verwendung der Temperatur zur Abflusskomponententrennung noch nicht standardisiert ist, ist dieser Vergleich von großem Interesse.

Die Niederschlagsintensitäten der einzelnen Ereignisse werden für den Zeitrahmen, über welchen sich die Ganglinienseparation unter Verwendung der Leitfähigkeit erstreckt, neu berechnet und können deshalb von den in Kapitel 5.2 ermittelten Intensitäten abweichen. Dies dient dem besseren Vergleich der Ergebnisse untereinander, es handelt sich dennoch um die selben Ereignisse.

Im Folgenden finden sich die Ergebnisse der einzelnen Ereignisse und den einzelnen EZG.

6.1 Ganglinienseparation über Leitfähigkeit

Nach einer kurzen Erläuterung über das Vorgehen bei der Definition der Endmember werden die Ergebnisse der einzelnen GLS beschrieben.

Auf Grund des gegebenen Rahmens können weder alle Grafiken abgebildet werden, noch kann jedes Einzelereignis im Detail besprochen werden.

Für jedes EZG wird ein repräsentatives Ereignis ausgewählt, an Hand dessen dann eine genauere Erläuterung erfolgen wird.

6.1.1 Definition der Endmember

Zur Ermittlung der einzelnen Abflussanteile müssen die Endmember für jedes Ereignis definiert werden.

Für die Ermittlung der Leitfähigkeiten der Niederschläge konnten die wöchentlich gewonnenen Wasserproben im Labor bemessen werden. So kann für jedes einzelne Ereignis ein spezifisches Endmember definiert werden. Diese Werte repräsentieren dann die Endmember des event water und bleibt über den gesamten Verlauf der GLS konstant.

Für die Ermittlung der Endmember der Grundwasser- bzw. Bachwasserkomponente wird ein Mittelwert der letzten drei 10-Minuten-Messwerte direkt vor dem Ereignis gebildet.

Diese Werte gehen dann, über den gesamten Anwendungszeitraum als LF_N und LF_{GW} in die Gleichungen (3.11) und (3.12) ein.

6.1.2 Ergebnisse im EZG Glasbach

Die Aufzeichnungen der Leitfähigkeit im Glasbach können für fast alle Ereignisse eingesetzt werden. Bis auf GBE5 und GBE6 sind die Ergebnisse aller GLS in Tabelle 6.1 dargestellt. Aus ihr lassen sich neben dem Gesamtvolumen die jeweiligen absoluten Anteile des event und pre-event water entnehmen, so wie auch die jeweiligen Endmember und über den betrachteten Zeitraum gemessene Niederschlagssummen.

Es lässt sich für keines der Ereignisse eine Dominanz der event water Komponente ausmachen, sämtliche Abflüsse weisen einen höheren Anteil an pre-event water auf.

Für die ersten vier Ereignisse, GBE1-GBE4, lassen sich relativ große Schwankungen der pre-event water Anteile erkennen (Abbildung A 5). Diese Schwankungen betragen für die einzelnen Komponenten der Ereignisse über 20%. Unglücklicherweise kann für die beiden folgenden Ereignisse, GBE5 und GBE6 keine GLS durchgeführt werden, da die Datenaufzeichnung mangelhaft ist.

Die letzten drei Ereignisse, GBE7, GBE8 und GBE9, weisen in den relativen Anteilen kaum noch Schwankungen auf, obwohl die Niederschlagsintensitäten der Ereignisse GBE8 und GBE9 deutlich voneinander abweichen.

	Gesamt-	pre-event	event	N-Summe	N-Intensität	EM event	EM pre-event	
	volumen	water	water	(mm)	(mm/10min)	water (µS/cm)	water (µS/cm)	
GBE1	120.76	103.79	16.97	11.4	0.32	15.3	261	
GBE2	1522.49	1078.18	444.31	6.8	0.17	10.4	245	
GBE3	478.48	448.82	29.65	36.22	0.95	15.3	230	
GBE4	464.74	451.64	13.10	7.34	0.17	11.3	168	
GBE7	500.64	401.40	98.50	17.02	0.44	6.3	271	
GBE8	1096.16	873.14	166.25	52.75	1.03	10.4	291	
GBE9	741.12	622.68	118.45	21.18	0.39	11.3	236	

Tabelle 6.1: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Glasbach

Der höchste pre-event water Anteil (97%) der gesamten Ereignisse (bzw. der geringste event water Anteil, 3%) wird für das Ereignis GBE4 ermittelt, während für das Ereignis GBE2 der geringste Einfluss des pre-event water (70%), also der größte berechnete Anteil des event water (30%) vorliegt. Die genaue Darstellung der prozentualen Anteile für die einzelnen Ereignisse ist in Abbildung A 5 zur Übersicht dargestellt.

Am Beispiel des Ereignisses GBE2 wird der Verlauf der einzelnen errechneten Komponenten über das Ereignis im Detail beschrieben. Die Grafik hierzu ist im Anhang unter Abbildung A 1 zu finden. Die geringe Unterschätzung der pre-event water Komponente vor Eintreten des Ereignisses kann durch einen Niederschlag geringer Intensität am Vortag erklärt werden. Das Verhalten des event water Anteils zeigt einen deutlichen Anstieg zu Beginn des Ereignisses, welcher dann etwas zeitverzögert, die Niederschlagscharakteristik wiedergibt. Die pre-event water Komponente setzt zeitgleich mit dem Niederschlag über einen bemerkenswerten Peak ein, geht dann kurzfristig zurück, um in der zweiten Niederschlagsphase nochmals deutlich anzusteigen. Beide Komponenten zeigen anschließend ein höheres Niveau als vor dem Ereignis.

Für sämtliche Ereignisse lässt sich sagen, dass die pre-event water Komponente schneller einsetzt als die event water Komponente. Nur bei Ereignis GBE7 setzen beide Komponenten nahezu zeitgleich ein.

Das sich die Größen der einzelnen Anteile über die letzten Ereignisse hin betrachtet nicht mehr signifikant ändern, kann durch eine Aufsättigung der Böden durch anhaltenden Niederschlag erklärt werden. Dies zöge ein Auffüllen der Systemspeicher nach sich, welches die Konstanz der pre-event water Komponente über die letzten Ereignisse begünstigen würde. Da jedoch im Glasbach keine weiteren Messdaten zur Verfügung stehen, welche diese Vermutungen bestätigen, kann diese Schlussfolgerung nur aus den Interpretationen der vorhandenen Messdaten des Systems Engebächle auf das System Glasbach übertragen werden.

6.1.3 Ergebnisse für das EZG Selzenbächle

Die Messdaten der sechs ausgewählten Einzelereignisse am Engebächle können allesamt, bis auf jene des Ereignisses SBE5, zur GLS herangezogen werden.

Im Selzenbächle lässt sich kein eindeutiger Trend im Verlauf der Messphase erkennen. Da für das Ereignis SBE5 und für das Ereignis vom 29. Juni (erstes Ereignis nach dreiwöchiger Trockenphase) keine Daten zur GLS zur Verfügung stehen, gestaltet sich die Reihe lückenhaft.

Der errechnete Anteil der pre-event water Komponente zum Ereignis SBE6, welcher bei 61% liegt, stellt den geringsten, über die Messperiode ermittelten, dar. Eine zweiwöchige Trockenphase zuvor, welche vom Ereignis SBE5 beendet wird, kann eine Erklärung liefern: die Speichersysteme des EZG sind stark beansprucht worden und konnten über das vorangehende Ereignis nicht genügend aufgefüllt werden Dies zeigt sich dann an der geringen Beteiligung des Grundwassers am Abflussgeschehen des Ereignisses EBE6.

Die größte Beeinflussung des Abflussgeschehens durch die pre-event water Komponente wird für Ereignis SBE4 errechnet. Sie liegt bei 84%, wobei die Niederschlagskomponente demnach 16% des Abflusses stellt.

	Gesamt-	pre-event	event	N	N-Intensität	EM event	EM pre-event
	Volumen (I)	water (I)	water (I)	(mm)	(mm/10min)	water (µS/cm)	water (µS/cm)
SBE1	1069.71	789.30	280.41	24.3	1.01	10.6	107
SBE2	1879.71	1197.23	682.48	36.22	1.44	15.3	178
SBE3	2064.65	1516.12	548.53	21.23	0.46	13.4	138
SBE4	4486.46	3782.08	704.38	26.36	0.20	15.9	170
SBE6	2427.01	1485.00	942.01	21.18	0.39	15.3	157

Tabelle 6.2: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Selzenbächle

Sämtliche errechneten Werte sind als Absolutwerte in Abbildung A 5 zusammengefasst. Ebenfalls sind die verwendeten Endmember aufgeführt, welche nach dem oben (Kapitel 6.1.1) beschriebenem Vorgehen definiert wurden.

Die Ergebnisse der GLS für das Ereignis SBE4 sind in Abbildung A 2 grafisch dargestellt. Das grundliegende Niederschlagsereignis hält etwa über eine Tageslänge an. Auf Grund des zu Beginn relativ geringen Niederschlags setzen beide Komponenten verzögert ein. Während die pre-event water Komponente im Folgenden stark ansteigt und zur Niederschlagspause wieder absinkt, verhält sich die event water Komponente selbst während der Unterbrechung des Niederschlags nahezu konstant und steigt dann mit Einsetzen der zweiten Niederschlagsphase sehr schnell an. Dieser event-water Peak ist dem pre-event water Peak deutlich voraus. In der dritten Niederschlagsphase dominiert der event water Anteil kurzfristig das Geschehen, wird jedoch noch unter anhaltendem Niederschlag von der pre-event water Komponente wieder abgelöst.

6.1.4 Ergebnisse für das EZG Engebächle

Im Engebächle gelingt es, für alle Ereignisse eine GLS durchzuführen. Die Resultate sind in Tabelle 6.3 dargestellt und werden im Folgenden erläutert.

Die Abflussganglinie des Ereignisses EBE1 setzt sich zu 52% aus pre-event water und zu 48% aus event water zusammen. EBE1 liefert hiermit den geringsten ermittelten Anteil von pre-event water am Abflussgeschehen. Dem gegenüber steht das letzte Ereignis, welches mit einen Anteil von 85% pre-event water den höchsten Wert liefert.

Die Begründung der geringen pre-event water Anteile während des Ereignisses EBE1 liegt sicherlich darin, dass zuvor eine dreiwöchige Trockenphase das Abflussgeschehen kontrollierte. Daraus kann man schließen, dass die Speicher des Systems nahezu geleert waren. Der Zustand der Speichersysteme liefert auch für den hohen Anteil des pre-event water des letzten in der Messphase registrierten Ereignisses EBE9. Zu diesem Zeitpunkt sind die Speicher über drei niederschlagsreiche Monate hinweg aufgefüllt worden und können dementsprechend größere Wassermengen zum Abflussgeschehen beitragen.

	Gesamt-	pre-event	event	N-Summe	N-Intensität	EM event	EM pre-event
	volumen (I)	water (I)	water (I)	(mm)	(mm/10min)	water (µS/cm)	water (µS/cm)
EBE1	740.97	379.97	361.00	25.95	0.9	11.5	184
EBE2	3674.66	2247.75	1426.91	46.88	0.93	10.4	229
EBE3	1649.03	1278.91	339.76	25.22	0.37	10.6	171
EBE4	4536.34	3333.45	1168.11	38.17	0.51	15.3	192
EBE5	2993.89	2359.82	634.07	17.49	0.34	15.3	160
EBE6	3584.75	2637.50	947.25	24.5	0.32	13.4	167
EBE7	4671.98	3207.21	1464.77	31.65	0.21	15.7	159
EBE8	605.53	426.88	178.65	27.26	1.36	6.3	183
EBE9	2810.44	2378.72	431.72	23.76	0.39	13.2	148

Tabelle 6.3: Ergebnisse der GLS über Leitfähigkeit im EZG Engebächle

Für das EBE1 zeigt sich, trotz der stark beanspruchten Speichersysteme, dennoch ein deutlich vorauseilender pre-event water Peak, welchem ein ebenso deutlicher event water Peak folgt. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich im Folgeereignis, EBE2, bei welchem der pre-event water Anteil nur gering über dem des ersten Ereignisses liegt (61%).

Ereignis EBE7 wird ebenfalls durch einen deutlichen Anstieg des pre-event water geprägt, während dieses jedoch rasch wieder abnimmt, steigt der event water Anteil zur Hälfte der zweiten Niederschlagsphase stark an (Abbildung A 3).

Über die Messphase betrachtet lässt sich eine deutliche Erhöhung des pre-event water Anteils über die ersten drei Ereignisse hinweg erkennen. Nach diesem Zeitpunkt halten sich die Schwankungen der Werte relativ gering, selbst während des Starkregenereignisses EBE8.

6.1.5 Fazit

Der Anteil des direkt auf das Gewässer auftreffende Niederschlagswassers ist auf Grund der kleinen Oberfläche der Gewässer relativ gering. Außerdem wird ein Großteil des Niederschlagswasser, von der Vegetation abgefangen (Interzeption) (Harding et al., 1992). Dies kann eine Erklärung für den akut geringen Anteil der event water Komponente der einzelnen Ereignisse liefern. Das Niederschlagswasser wird etwas verzögert in das Gerinne aufgenommen bzw. eingeführt.

Die deutliche und rasche Reaktion der pre-event water Komponente, die von fast allen Ereignissen einheitlich wiedergegeben wird, kann durch eine Interaktion zwischen dem im Boden gespeicherten Wasser und dem infiltrierenden Niederschlagswasser begründet werden (Wenninger, 2002). Diese verdrängt bereits vorhandenes Bodenwasser und bewirkt somit ein Ausdrücken dessen.

Eine Parallele zwischen den bewaldeten EZG kann nicht eindeutig belegt werden. Es scheint jedoch, dass beide bewaldeten EZG im Vergleich zu dem verstärkt landwirtschaftlich genutzten EZG (EZG Selzenbächle) über längere Zeiträume hinweg in ihren pre-event water Anteilen ein kontinuierlicheres Verhalten aufweisen. In ihrer mittleren Zusammensetzung kann jedoch kein eindeutiger Unterschied ausgemacht werden, welcher auf die unterschiedliche Vegetation der EZG zurückzuführen wäre. Für die EZG Selzenbächle und Engebächle lassen sich während des Ereignisses vom 21. August (EBE7 und SBE4) sogar deutliche Ähnlichkeiten in der Reaktion der pre-event water Komponente ausmachen (Abbildung A 2 und Abbildung A 3).

Die Dominanz der Grundwasserkomponente (pre-event water) wird durch zahlreiche Studien belegt (Sklash und Farvolden, 1979). Weiterhin hat sich die GLS unter Verwendung der Leitfähigkeit als hydrologisch wertvolles Tool etabliert.

Dies kann auch für diese Untersuchung bestätigt werden, welche im Mittel für sämtliche Ereignisse in allen EZG einen relativen Anteil des pre-event water von etwa 70-81% aufweist.

Die "Extremwerte" wurden erstaunlicherweise in beiden zu 100% bewaldeten Gebieten registriert. So weist das EZG Engbächle für das Ereignis EBE1 einen pre-event water Anteil von nur 52% auf, während für das Ereignis GBE4 im Glasbach der höchste Anteil mit 97% berechnet wurde.

Problematisch bei der Anwendung einer Zwei-Komponenten Separation ist, dass der Anteil des pre-event water meist unterschätzt wird, da das Bodenwasser in den Berechnungen nicht berücksichtigt wird (Bazemore et al., 1994). Dies stellt jedoch, wie eine Studie von Bazemore et al. (1994) belegt, einen beachtlichen Anteil an den Abflussganglinien dar. Dies mag unter anderem ein Grund dafür sein, dass die Anteile, welche über die Leitfähigkeit ermittelt werden geringere Größen liefern, wie vergleichsweise gleiche Ereignisse, welche über Isotopenkonzentrationen separiert wurden (Laudon und Slaymaker, 1997).

6.2 Ganglinienseparation über Temperatur

Grundlage dieser Anwendung stellt die Annahme, dass sich während niederschlagsfreien Phasen nur noch Wasser aus dem Grundwasser im Gerinne befindet. Da dieses jedoch durch geringe Fließgeschwindigkeiten usw. eine starke Erwärmung erfährt, weist dieses Wasser eine wesentlich höhere Temperatur wie das eigentlich Grundwasser auf. Folglich befindet sich erwärmtes Grundwasser im Bachbett.

Eine günstige Situation für eine Anwendung der Temperatur zur GLS tritt im Engebächle mit dem Ereignis EBE1 am 29. Juni ein. Nach nahezu dreiwöchiger (bzw. fünfwöchiger) Trockenphase wird das Gerinne nur noch von Grundwasser gespeist. Das eintreffende Ereignis bewirkt einen Temperatursturz von nahezu 2,5°C über kürzesten Zeitraum (Abbildung 6.1).

Diese Reaktion wird von allen Sonden im Engebächle registriert und kann deshalb hervorragend eingesetzt werden.

Auf Grund des Temperaturverlaufs lässt sich der Zeitpunkt des Einsatzes der Niederschlagskomponente gut erkennen. Davon ausgehend, dass vor dem Niederschlagsereignis das gesamte im Gerinne fließende Wasser dem Grundwasser entspringt und dieses durch das Bachbett und meteorologische Faktoren erwärmt wird, wird der Temperatursturz also vom einfallenden Niederschlag bewirkt, welches eine Änderung des Ursprungs des abfließenden Wassers bedeutet (Kobayashi et al., 1999).



Abbildung 6.1: Temperaturverlauf des Bachwassers während des Niederschlagsereignisses am 29./30. Juni am Pegel und Vergleichsweise an Temperatursonden 62 und 58

Ein großes Problem bei der Anwendung der Temperatur des Bachwassers zur Komponentenseparation stellt die oben beschriebene Erwärmung des Wassers dar. Es lässt sich an Hand der Messdaten nicht genau definieren, wie sich die Temperatur der Grundwasserkomponente (*pre-event water*) im Verlauf des Ereignisses entwickelt, was eine Definition der Endmember erschwert.

Die Temperatur findet zwar in einigen Studien Anwendung als Tracer in Bezug auf preferentielle Fließwege (Arai, 1993), jedoch nicht im Sinne von quantitativen Anwendungen. Dies mag daran liegen, dass die Erwärmung des Wasser im Bachbett von vielen Faktoren beeinflusst wird und einen äußert komplexen Prozess darstellt (siehe Kapitel 1.1.). Auf Grund dessen gibt es für diese Problematik noch keinen angemessenen Lösungsansatz und wird hier über zwei mögliche Methoden, die den Verlauf der Temperatur der Grundwasserkomponenten im Verlauf des Ereignisses beschreiben sollen:

Zum einen wird der Temperaturverlauf im Gewässer über einen linearen Ansatz zwischen den zwei definierten Endmember interpoliert. Ausgehend von der Vorereignistemperatur werden die Temperaturwerte an die Temperatur nach dem Ereignis, zum Zeitpunkt vollständiger Vermischung beider Wässer, linear herangeführt.

Zum anderen kommt eine Zwei-Stufen-Methode zum Einsatz, wie sie in Abbildung 6.2 dargestellt ist. Da der erste Teil des Niederschlagsinput die Temperatur wesentlich stärker zu beeinflussen scheint wie der folgende Teil, wird nach Abklingen dessen keine weitere Beeinflussung der Grundwasser- (Bachwasser-) Temperatur angenommen. Sie wird dann über den Rest des Ereignisses mit dem Temperaturwert des Mischwassers nach dem Ereignis als konstant angesehen.

Die zweite Methodik wird jedoch nur für die Datenaufzeichnung am Pegel Engebächle eingesetzt, während der lineare Temperaturverlauf für die gesamten Temperatursonden zum Einsatz kommt.

6.2.1 Definition der Endmember

Zur Berechnung der unterschiedlichen Abflussanteile über eine Zwei-Komponenten-Trennung müssen zwei Endmember definiert werden, welche jeweils den Anteil des event water bzw. den Anteil des pre-event water repräsentieren.

Eigentlich sollten beide Endmember über den Verlauf der Separation konstant bleiben, was sich jedoch auf Grund oben geschilderter Problematik für die Endmember des pre-event water nicht durchführen lässt.

Die das event water repräsentierende Endmember kann andererseits problemlos ermittelt und auch über den gesamten Verlauf als konstant angenommen werden.

Da die Temperatur des Niederschlags nicht gemessen werden kann, wird für den Wert der Endmember event water die Lufttemperatur als Näherung verwendet (Shanley und Peters, 1988). Dieser Wert beträgt für sämtlich Separationen die nun folgen 13,32°C.

Für die Gewässertemperatur wird ein Mittelwert über drei 10-Minuten-Messwerte direkt vor dem Ereignis gebildet und ergibt dann 18°C als Endmember für die Ganglinienseparation am Pegel. Diese wird zum einen durchgehend linear auf 15,3°C interpoliert, zum anderen (Zwei-Stufen-Methode) wird sie nach Ende der ersten und ergiebigeren Niederschlagsphase mit 15,3°C als konstant angenommen und nur bis zu diesem Zeitpunkt interpoliert (Abbildung 6.2).

Für die Komponententrennung an den einzelnen Temperatursonden wird die lineare Methodik angewandt, wobei für jede Sonde die spezifischen Werte vor und nach dem Ereignis ermittelt werden. In Tabelle 6.5 sind die jeweiligen Werte der Endmember dargestellt, zwischen welchen interpoliert wurde.

Die Endmember des Niederschlags geht dauerhaft über den selben Wert in die Gleichung ein, also mit 13,32°C.

6.2.2 Ergebnisse der GLS unter Verwendung der Temperatur

Zu Beginn werden die beiden Methoden, die am Pegel zu Einsatz kamen, verglichen, anschließend werden die einzelnen Temperatursonden besprochen.

Wie sich aus Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3) erkennen lässt wird über die unterschiedlichen Methoden jeweils eine andere Menge des pre-event water ermittelt, gestaltet sich aber in der Dynamik relativ gleich. So unterschätzt die Methodik der linearen Interpolation im Vergleich zur stufigen Methode den Anteil des pre-event water um etwa 70 l beziehungsweise überschätzt die stufige Methode diesen Anteil im Vergleich zur linearen Methode.

Betrachtet man das event water setzt dies, über die Stufen-Methode ermittelt, etwas später ein, wie jenes, über den linearen Ansatz berechnete, und beeinflusst das Abflussgeschehen dementsprechend länger.

Welche von beiden Methoden nun wahrscheinlicher ist, lässt sich an Hand der vorliegenden Daten nicht sagen.



Abbildung 6.2: GLS über die Temperatur mit der Zwei-Stufen-Methode

Dies soll im Folgenden Abschnitt an Hand der GLS über die Leitfähigkeit überprüft werden und in Kapitel 6.3 abschließend diskutiert werden.

Zu diesem Zeitpunkt kann jedoch bestätigt werden, dass beide Methoden unterschiedliche Ergebnisse liefern, die sich in Anbetracht des Gesamtvolumens quantitativ um einiges unterscheiden.

Tabelle 6.4: Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden am Pegel Engebach

	linear	zweistufig
Qgesamt (I)	505,460031	505,460031
Qevent (I)	224,470724	153,681157
Qpre-event (I)	280,989307	351,778875

Die Ergebnisse der einzelnen Temperatursonden werden der Übersicht wegen nur tabellarisch dargestellt und finden sich unter Abbildung A 6 bis Abbildung A 11 im Anhang wieder. Die Reihenfolge der Sonden in den Grafiken entspricht der Anordnung, wie die Sonden im Bachlauf vom Pegel aufwärts positioniert sind.

Da es sich um 18 Temperatursonden handelt, soll die Beschreibung der Ergebnisse hier nur kurz wiedergegeben werden und nur auf bemerkenswerte Sonden im Detail eingegangen werden.

Soweit möglich werden die Sonden unter Berücksichtigung ihrer Positionen zusammengefasst beschrieben. Die genaue Position der Sonden ist auch im Anhang (Abbildung A 4) zu finden.



Abbildung 6.3: GLS über die Temperatur mit linearer Interpolation

Die Sonden S58 und S63 liegen beide in der Nähe der Riparian Zone, an welcher die GW-Pegel installiert sind. Beide zeigen ein sehr ähnliches Verhalten, wobei S63 zu Beginn des Ereignisses ein flüssigeres Auftreten der pre-event water Komponente zeigt (Abbildung A 8), S58 diesen Prozess jedoch eher etwas abrupt wiedergibt (Abbildung A 7). Möglicherweise kann dies als Einfluss der Riparian Zone betrachtet werden.

Sonden S64 und S59 liefern nahezu einen identischen Wert des event water Anteils und unterscheiden sich auch im Betrag des pre-event water um nur 61. Beide Sonden liegen nur etwa 60 m auseinander.

Sonde S53 zeigt einen relativ hohen event water Anteil, obwohl dieser Zufluss von dem Auslass der Quellfassung Sägedobel beeinflusst wird.

In Abbildung A 6 ist zu sehen, dass sich die beiden Sonden S67 und S69 (Abbildung A 7) trotz großer Entfernung in ihrem Verhalten sehr ähnlich sind. Dies bestätigen auch die Werte, welche in Tabelle 6.5 aufgeführt sind und nur um geringe Beträge voneinander abweichen.

Sonde S62 weist den höchsten ermittelten Anteil am event water auf und reagiert mit der pre-event water Komponente im Vergleich zu den anderen Sonden zeitverzögert und sprunghafter (Abbildung A 10). Die Sonde befindet sich relativ nahe an einem Waldweg, welcher über vorgeformte Fließpfade zur Sonde hin entwässert. Scheinbar registriert S62 eine Oberflächenkomponente, was ein Erklärung für den hohen event water Anteil liefern würde. Der verzögerte Einsatz von pre-event water ist möglicherweise durch eine nahe am Bachlauf gelegene Feuchtfläche bedingt, welche durch Druckübertragung im Laufe des Ereignisses Wasser an den Vorfluter abgibt. Der geringe Anteil lässt sich durch die nahezu leeren Speichersysteme erklären.

Ein ähnliches Verhalten, das zeitverzögerte reagieren der pre-event water Komponente,

findet sich bei S77 (Abbildung A 10) sowie auch bei S56 (Abbildung A 11).

Die unterhalb von S62 liegende S66 liegt mit dem Wert für den event water Anteil nur gering unter dem von S62 bestimmten Wert. Auch ein zeitverzögertes Eintreten des preevent water Anteils findet sich dort wieder.

Für S56, welche sich in einem kleinen Zufluss im oberen Bachlauf befindet, kann dies eventuell über das austretende Hangwasser erklärt werden. Das Wasser, welches von dieser Sonde bemessen wird, tritt einige Meter zuvor aus einem steinigen Hang aus und formt sich dann zu einem kleinen Gerinne. Für die ebenfalls im oberen Bachlauf positionierten Sonden S51 und S74 lassen sich weniger Ähnlichkeiten ausmachen. S51 fällt mit dem Anteil des pre-event water nicht wieder nach Beendigung des Ereignisses ab, stellt jedoch die einzige Sonde dar, welche dieses Verhalten an den Tag legt.

Dass S74 einen langsameren Anstieg der pre-event water Komponente zeigt wie S51, kann durch die Beeinflussung des zugeströmten Wassers aus dem Seitenzufluss (S56) hervorgerufen werden.

Dem Doppelpeak, welcher in der pre-event water Komponente der Sonde S75 und daher auch die reduzierte event water Komponente aufgezeigt wird, soll hier keine weitere Bedeutung zugetan werden, da diese Sonde im Einflussbereich des Fischteiches liegt.

Die darüber liegende Sonde S73 ähnelt ihrer Dynamik der im Bachlauf folgenden Sonde S65. Bei beiden wird der Anteil des pre-event water bei unterschiedlichem Ausgangsniveau zum gleichen Zeitpunkt erhöht (Abbildung A 6).

Sonde S61 zeigt kaum Gemeinsamkeiten mit der darunter liegenden S69, da diese von dem Auslass der Quellfassung Steineck beeinflusst wird.

Das Absinken und Wiederansteigen, welches von Sonde S55 wiedergegeben wird, beruht wohl auf der Position der Sonde, welche sich am Fuße einer Gabelung des Baches befindet und auf Grund dessen ebenfalls durch zwei Zustrombereiche kontrolliert wird.

	Endmember (°C)	Gesamt-	event water	pre-event water
	linear interpoliert	volumen (l)	(I)	(I)
S51	17.91-14.89	500,592677	324,042565	176,5501119
S53	12.4-14.88	500,592677	391,028204	109,5644732
S55	16.94-14.88	500,592677	389,628222	88,58693293
S56	17.1-14.8	500,592677	388,442468	112,1502086
S58	16.94-14.72	500,592677	368,099261	106,5203858
S59	16.65-14.75	500,592677	369,493416	131,567344
S61	17.1-14.72	500,592677	393,473091	107,1195862
S62	18.04-14.7	500,592677	408,629765	91,96291176
S63	16.92-14.69	500,592677	362,80017	137,7925074
S64	16.94-14.72	500,592677	363,80017	136,7925074
S65	17.41-14.71	500,592677	394,234237	106,3584402
S66	17.54-14.71	500,592677	401,729916	98,86276103
S67	17.91-14.73	500,592677	400,916834	99,67584277
S69	17.28-17.12	500,592677	365,442056	112,7730989
S73	17.73-14.87	500,592677	355,417479	122,7976761
S74	16.69-14.42	500,592677	389,31302	111,279657
S75	16.31-14.73	500,592677	311,660463	188,9322142
S77	17.17-14.56	500,592677	390,239053	110,3536239

Tabelle 6.5: Ergebnisse der GLS mit Hilfe der Temperatursonden

6.2.3 Fazit

Da die beiden unterschiedlichen Methoden, der lineare Ansatz und der Stufen-Ansatz, oben bereits ausführlich beschrieben wurden, kommen diese hier nicht mehr zur Diskussion.

In Abbildung 6.4 sind die über die Temperaturwerte der einzelnen Sonden ermittelten Anteile der Komponenten dargestellt. Die Sortierung der Sonden in der Grafik hält sich ebenfalls an die Reihenfolge, in welcher sie pegelaufwärts im Bachbett ausgebracht waren.

Sonde S62 und S55 liefern die geringsten Anteile an pre-event water und die höchsten Anteile an event water. Während für S62 eine mögliche Erklärung dargestellt wird (Kapitel 6.2.2) kann jedoch für Sonde S55 keine befriedigende Interpretation gefunden werden.

Es kann auch bei keiner Sonde eine eindeutige Reaktion im Verlaufe des Ereignisses, wie etwa ein Ausdrücken von Bodenwasser innerhalb der Riparian Zone (S58) oder ähnliches, belegt werden.

In Bezug auf die Interpretation der Komponentenanteile, welche über die einzelnen Temperatursonden ermittelt werden, muss jedoch in jedem Falle berücksichtigt werden, dass dieser Methode nur ein geringer physikalischer Hintergrund unterliegt. Es werden weder die komplexen Prozesse der Wärmeübertragung vom Bachbett auf das Wasser berücksichtigt, noch wird die Interaktion zwischen Gewässer und Atmosphäre miteinbezogen.

Auf Grund dieser Fakten sind die Ergebnisse nur äußerst kritisch und unter Vorbehalt zu betrachten. Die Interpretation gestaltet sich problematisch, da keinerlei Anhaltspunkte in der Literatur zu finden sind.

Möglicherweise lassen sich die Werte relativ zueinander vergleichen, sollten aber wegen oben aufgezählten Gründen nicht absolut betrachtet werden.



Abbildung 6.4: Abflussanteile der einzelnen Temperatursonden

6.3 Vergleich der Ergebnisse über Temperatur und Leitfähigkeit

Im Folgenden werden die über die unterschiedlichen Varianten der GLS ermittelten Anteile der Komponenten für das Ereignis EBE1 dargestellt.

In Tabelle 6.6sind die relativen Anteile der einzelnen Komponenten dargestellt. Es zeigt sich, dass sämtliche Methoden einen größeren Anteil an pre-event water ermitteln. Als Anhaltspunkt dieses Vergleichs sollen die über die GLS mit Hilfe der Leitfähigkeitswerte berechneten Anteile dienen. Diese Methode ist, wie bereits oben erwähnt, ausreichend getestet und vertauenswürdig.

Tabelle 6.6: Relative Anteile der Komponenten des Ereignis EBE 1 über unterschiedliche Methoden ermittelt.

	T (linear)	T (stufig)	LF
Qevent (%)	44,00	30,00	48,00
Qpre-event (%)	56,00	70,00	52,00

In Anbetracht dessen scheinen die Werte, welche über die lineare Temperaturmethode ermittelt werden, besser mit den Werten die über die Leitfähigkeit berechnet werden, zusammen zu passen.

In Tabelle 6.6 sind die absoluten Anteile der Komponenten dargestellt, welche über den Ansatz des linearen Temperaturverlaufs und über die Leitfähigkeit ermittelt wurden.

Hier zeigt sich das Problem, dass der Anteil des pre-event water nach dem Ereignis deutlich zu hoch ist und bei der weiteren Durchführung der GLS den Gesamtabfluss überschreitet. Ungeachtet des uneinheitlichen Verlaufes stimmen die Anteile der beiden Methoden doch nahezu überein, während sich die Anteile die über den stufigen Temperaturverlauf berechnet wurden deutlich voneinander entfernen.



Abbildung 6.5: Vergleich der ermittelten event water- und pre-event water-Anteile durch eine GLS über die lineare Temperaturmethode (T) und der Leitfähigkeit (LF)

6.3.1 Fazit

Welche der beiden Methoden nun eher die Realität repräsentiert, kann hier nicht definitiv geklärt werden. Bei der Anwendung der Temperatur als Tracer zur GLS handelt es sich um eine noch nicht ausreichend ergründete Methodik.

Da jedoch die Leitfähigkeit ihre Eignung zur GLS in vielen Studien schon unter Beweis stellen konnte, sollten den über sie ermittelten Ergebnissen mehr Beachtung entgegengebracht werden. Obwohl oft genug darauf hingewiesen wird, dass bei einer Zwei-Komponenten-Trennung über die Leitfähigkeit Anteile des Bodenwasser unterschätzt werden (Bazemore et al., 1994), sollten die über die Temperatur höher ermittelten Werten eher gering gewichtet werden.

7 Ergebnisse der Modellierung

Die Modellierung in dieser Studie dient der Kontrolle der Konzeptionalisierung der Abflussbildung. Auf Grund der Datenlage wird sie nur für das EZG Engebächle durchgeführt.

Modellkonzept, Parameter und eingehende Datensätze wurden in Kapitel 4 ausführlich behandelt.

Aus den im Engebächle gewonnenen Messdaten und Erkenntnissen lässt sich schließen, dass die Abflussbildung des Gebietes hauptsächlich durch unterirdische Komponenten, dem Zwischen- und Basisabfluss, geprägt ist.

Um nun zu kontrollieren, ob diese Annahmen vertretbar sind, werden die in Kapitel 6.1.4 über die GLS ermittelten Direktabflussanteile (event water) vom gemessenen Abfluss subtrahiert und in dieser "reduzierten" Form erneut in das Modell eingegeben.

Nebenbei wird jedoch auch eine Simulation mit der tatsächlichen Datenreihe durchgeführt.

Zur Berechnung der Verdunstung stehen die in Kapitel 4.2.1 dargestellten Methoden nach *Penman-Monteith* und *Haude* zur Verfügung. Auf Grund der deutlich zu hoch gelegenen Werte, welche mit der Gleichung nach *Penman-Monteith* (4.9) berechnet werden ($E_{pot} = 1070 \text{ mm}$), kommen letzten Endes doch die nach *Haude* ermittelten Werte zum Einsatz. Sie lassen sich mit einem Betrag von 300 mm über die Messperiode besser mit der mittleren jährlichen potentiellen Verdunstung von etwa 500-600 mm (Wasser und Bodenatlas 2004) vereinbaren. Da die über Gleichung 4.19 berechneten Werte die potentielle Verdunstung eines Tages wiedergeben, werden die 6h-Werte abhängig von der Tageszeit über einen halbempirischen Ansatz folgendermaßen ermittelt:

0-6 Uhr:	x mm/d* 0
6-12 Uhr:	x mm/d* 1/6
12-18 Uhr:	x mm/d* 3/6
18-24 Uhr:	x mm/d* 2/6,

wobei x für den jeweilig bestimmten Tageswert steht.

Die einzelnen Parameter (Tabelle 4.2) werden für die unveränderte Datenreihe durch ein manuelles trial-and-error Verfahren ermittelt und gehen dann – unverändert – in die Simulation mit den reduzierten Abflusswerten ein. Diese müssen beibehalten werden, da sie gebietsspezifische Charakteristika repräsentieren und somit die Rahmenbedingungen stellen (Seibert, 2002).

In den weiter unten folgenden Abbildungen sind die Polts der Simulationsergebnisse zu sehen. Darin gilt:

- Oben: akkumulierte Differenz zwischen simuliertem und gemessenem Abfluss (schwarz, linke Achse) und die gemessene Temperatur (rot, rechte Achse)
- Mitte: gemessener Niederschlag (blau)
- Unten: gemessener (blau) und simulierter (rot) Abfluss.

7.1 Ergebnis der Simulation auf Basis der Originaldaten

Die für eine Modellgüte von $R_{eff} = 0.682$ und einer mittleren Differenz zwischen gemessener und simulierter Kurve von $Mean_{DIFF} = -6$ mm/a ermittelten Werte sind in Tabelle 7.1 aufgeführt.

Parameter		
FC	(mm)	184
LP	(mm)	0.002
BETA	(-)	2.53
PERC	(mm/d)	3.6
UZL	(-)	44.1
K0	(1/d)	0.002/0
K1	(1/d)	0.21
K2	(1/d)	0.045
MAXBAS	(d)	1.85
PCALT	(%/100 m)	10
TCALT	(°C/100 m)	0.6

Tabelle 7.1: Ermittelte Parameter

In Tabelle 7.2 sind die bestmöglichen Ergebnisse der Simulation dargestellt. Auf Grund der kurzen Messphase können insgesamt nur 428 Datensätze eingegeben werden, weshalb sich die Plots überschneiden und jeweils nur der entscheidende Teil dargestellt ist.

Abbildung 7.1 stellt die Messphase vom 24. Juni bis 26. September dar. Im Laufe der Modellierung zeigt sich, dass die ansonsten vorgeschaltete "Warmlaufphase" – das warming up – hier nicht von Vorteil ist, da die Systemspeicher nicht gefüllt zu werden brauchen; sie sind zu Beginn der Messperiode nahezu leer.

Das HBV-Modell arbeitet mit zwei Einzellinearspeichern, welche in ihrem Auslaufverhalten durch die Parameter K_0 , K_1 und K_2 beschrieben werden. Während K_0 eine mehr oder weniger ereignisabhängige Komponente darstellt, werden K_1 und K_2 nur indirekt davon beeinflusst. In Abbildung 4.2 ist dieses System dargestellt. Es zeigt, dass Q_0 nur anspringt, wenn der obere Speicher über einen Grenzwert, *UZL*, gefüllt ist. Andererseits wird der Abfluss nur durch den Anteil des Q_1 und Q_2 generiert.

Generell sollte der tiefe Grundwasserspeicher, SLZ, also dauerhaft zum Abfluss beitragen.

		original	reduziert
R _{eff}	(-)	0.68	0.0242
MEAN _{Diff}	(-)	-6	21
Summe Qsim	(mm/100d)	75	45
Summe Qobs	(mm/100d)	69	66
Summe N	(mm/100d)	384	384
Summe ETA	(mm/100d)	279	303
Summe ETP	(mm/100d)	413	437
Contribution Q2	(-)	0.915	0.859
Contribution Q1	(-)	0.085	0.141

Tabelle 7.2: Ermittelte Werte der Simulation

Aus der Ergebnisdatei kann entnommen werden, dass über die gesamte Simulation der oberste Speicher über die gesamte Messphase hinweg kein Wasser kontribuiert. Der zweite

Speicher springt zu den meisten Ereignisfällen an, jedoch nicht zum ersten Ereignis, EBE1, und auch nicht zum Ereignis EBE7 vom 09. September. Wie nicht anders zu erwarten war, ist der tiefste Speicher, *SLZ*, kontinuierlich aktiv.

Die einzelnen Ereignisse werden dynamisch sehr gut erfasst, liegen aber mit den Peaks nur für das Ereignis EBE8 auf gleicher Höhe wie die gemessene Kurve (Abbildung 7.1). Das Folgeereignis wird dann wieder etwas überschätzt.

Das Ereignis vom 29. Juni wird nicht einmal andeutungsweise simuliert, was bedeutet, dass das Modell zu diesem Zeitpunkt alleine auf den tiefen Grundwasserspeicher, K2 zurückgreift. Nach den ersten Ereignissen wird der Basisabfluss vom Modell zu hoch angesetzt, dies lässt sich erst gegen Ende der Simulationsphase ändern. Wie sich aus Abbildung 7.1 entnehmen lässt, nähern sich die simulierte Kurve ab dem viertletzten Ereignis (EBE6) deutlich besser an die gemessenen Werte an. Wobei währenddessen die Spitzen enorm unterschätzt werden.



Abbildung 7.1: Darstellung der simulierten und observierten Kurve des HBV Modells der unveränderten Daten

7.2 Ergebnis der Simulation auf Basis der reduzierten Daten

Bis auf den Parameter K_0 werden sämtliche Parameter für beide Simulationen übernommen. K_0 repräsentiert den obersten Auslauf des oberen Grundwasserspeichers (Abbildung 4.2) und wird für die reduzierte Version auf $K_0 = 0$ gesetzt, da dieser Auslauf keinen Einfluss auf das Abflussgeschehen während der Ereignisse haben darf.

Für die Simulation mit der reduzierten Form lässt sich aus der Ergebnisdatei herauslesen, dass der Abflussanteil, welcher durch K_0 begrenzt wird, zu keiner Zeit zum Abflussgeschehen beiträgt.

Während der durch K_2 kontrollierte tiefere Speicher dauerhaft aktiviert ist, kommt der über den Parameter K_1 kontribuierte Anteil aus der oberen Grundwasserbox nur zu einigen Ereignissen zum Einsatz (Tabelle 7.3). Dieser setzt zu EBE4 und EBE7-EBE9 ein.

In Abbildung 7.2 ist das Ergebnis der Simulation grafisch dargestellt. Die Datengrundlage dieser Modellierung stellt die, während der Ereignisse, um den event-water Anteil reduzierte Form dar. Dies zeigt sich im Vergleich zur unveränderten Form in deutlich reduzierten Abflussspitzen während der Ereignisse.

Die ersten Ereignisse bis einschließlich EBE6 werden von der simulierten Kurve kaum wiedergegeben. Zum Ereignis EBE7 lässt sich eine sichtbare Reaktion des Modells auf den Niederschlagsinput erkennen. Die letzten beiden simulierten Ereignisse, EBE8 und EBE9 können dann eher mit der gemessenen Kurve in Einklang gebracht werden. Auch der fallende Ast des Ereignisses EBE9 reicht nahezu genau an die gemessene Kurve heran.



Abbildung 7.2: Darstellung der simulierten und observierten Kurve das HBV Modells der um den Ereigniswasseranteil reduzierten Daten.

Zuvor wird der Basisabfluss über die gesamte Messphase betrachtet als deutlich zu gering wiedergegeben.

7.3 Fazit

Obwohl beide Simulationen mit demselben Parametersatz gerechnet werden (bis auf K_0), zeigen sich deutlich Unterschiede in den Ergebnissen. Dies spiegelt sich weniger in den ermittelten Werten wieder, als in den abgebildeten Kurven. Sie zeigen über den größten Zeitraum der Simulationsperiode hinweg kaum Übereinstimmungen, wobei die letzten beiden Ereignisse jedoch einige Gemeinsamkeiten aufweisen.

Es wird versucht, die Kurven der zweiten Simulation (reduziert) durch Variationen des K_0 -Parameter besser aneinander anzugleichen. Dieser scheint jedoch keinerlei Einfluss auf die Modellsimulation zu haben, da sich selbst bei drastischen Änderungen (0.002-0.9) keine Auswirkung auf die Modellgüte erkennen lässt. Der reduzierte Datensatz liefert im Vergleich zur unveränderten Datenreihe dauerhaft geringere Werte der unteren Grundwasserbox und zeigt deutlich geringere Reaktionen der oberen Grundwasserbox. Diese kommt erst gegen Ende der Simulationsperiode zum Einsatz.

Dieses Verhalten zu interpretieren und mit den Erkenntnissen zu koppeln, welche aus den Messdaten gewonnen wurden, scheint äußerst problematisch zu sein.

Seltsamerweise liefert die Ergebniszusammenfassung des Modells unterschiedliche Werte der potentiellen Verdunstung für beide Durchläufe (Tabelle 7.2). Auf Grund der gleichen Datengrundlage scheint es hierfür keine logische Erklärung zugeben. Folglich ermittelt das Modell für beide Simulationen auch unterschiedliche aktuelle Verdunstungswerte.

Ein möglicher Lösungsansatz für diese Problematik, welcher aus Zeitgründen im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht mehr getestet werden kann, stellt eine Veränderung der Niederschlagsdaten.

Bei gleichem Niederschlagsinput und verringertem Abflussverlusten muss Wasserüberschuss durch höhere Verdunstungsraten kompensiert werden. Ob jedoch eine Reduktion der Niederschlagswerte um den Anteil, welcher die Direktkomponente verursacht, sinnvoll ist, kann in dieser Arbeit aus Zeitgründen nicht mehr ausreichend untersucht werden. Im Widerspruch zu dieser These stehen die zu Beginn der Simulation unterschätzten Abflussereignisse.

Der Anwendung dieses Modells innerhalb dieser Arbeit liegt die Überprüfung der Konzeptionalisierung der Abflussprozesse zu Grunde.

Dem Modell mit der reduzierten Datenversion zufolge, scheint der größte Teil des Niederschlags zu Beginn der Simulationsphase in den tiefer gelegenen Grundwasserspeicher zu sickern, um dann gegen Ende, basierend auf dieser Wasserspeicherung und kumulativ mit dem Niederschlagsinput gekoppelt, Ereignisreaktionen nachzustellen.

Die unbearbeitete Version der Daten scheint die Wirklichkeit etwas realistischer wiederzugeben.

Es ist jedoch problematisch, diese beiden Ergebnisse zur Überprüfung von Messdaten heranzuziehen, da für ein Modell immer noch die Prämisse gilt, darin eine starke Vereinfachung eines komplexen natürlichen Systems zu sehen.

Die Messdaten belegen eine Dominanz des tieferen Grundwasser über den gesamten Zeitraum der Messphase. Dies wird auch durch die Ergebnisse der Modellierung bestätigt (Tabelle 7.3), in welchem in Ereignisfällen der Beitrag des durch K1 kontrollierten Anteils hin und wieder überwiegt. Für die reduzierte Form ist dies für das Ereignis EBE8 der Fall, ebenso tritt dies für Ereignis EBE8 der unveränderten Datenform auf. Dies weist, dem Modell nach, auf einen verzögerten, ereignisbedingten Zwischenabfluss hin.

Es zeigen sich Übereinstimmungen darin, dass das Modell auch von einer Dominanz des tiefen Grundwassers (*SLZ*, K_2) über den gesamten Messzeitraum ausgeht, während zum Ereignis EBE8 der Beitrag der oberen Grundwasserbox (*SUZ*, K_1), also eines höher gelegenen Speichersystems, das Abflussgeschehen kurzfristig dominiert.

	K1 reduziert	K1 unverändert	K2 reduziert	K2 unverändert
EBE1	-	-	-	-
EBE2	-	0.857		0.992
EBE3	-	0.008		0.99
EBE4	0.002	1.517	0.238	2.467
EBE5	-	0.001		1.063
EBE6	-	0.179		1.049
EBE7	0.113	0.337	0.546	1.15
EBE8	4.064	2.19	2.274	1.179
EBE9	1.159	1.274	1.907	1.804

Tabelle 7.3: Anteile die zu den Einzelereignissen von K1 und K2 in den beiden Modellvarianten kontribuiert wurden

Dennoch sind diese Interpretationen mit äußerster Vorsicht zu betrachten. Obwohl das HBV-Modell weniger überparametrisiert zu sein scheint, sind es doch sechs empirische Parameter, welche über den Verlauf der Abflusskonzentration bestimmen (Lindström et al., 1997). Diese Parameter stellen jedoch die einzige Möglichkeit dar, neben der gegebenen Datengrundlage, Prozesskenntnisse des zu modellierenden Gebietes in die Simulation mit einzubeziehen. Dies bietet jedoch gleichermaßen eine Möglichkeit, Unsicherheiten in die Simulation mit einzubringen (Beven, 2003).

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass diese Simulation in Zeitschritten von sechs Stunden durchgeführt wird, und nicht ausreichend bekannt ist, ob eine Eignung für solch kurzfristige Anwendung vorliegt.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

In dieser Arbeit wird gezeigt, dass eine gekoppelte Anwendung hydrometrischer Messungen und parallel verlaufender Tracermessungen einen detaillierten Einblick in die Funktion eines hydrologischen Systems liefern können.

Diese gekoppelte Methode erweist sich vor allem in dem messtechnisch besonders gut ausgestatteten EZG Engebächle als sehr hilfreich. Auf Grund der geringen Flächen der einzelnen EZG gestaltet sich die Untersuchung übersichtlich und es bietet sich die Möglichkeit viele hydrologisch relevanten Faktoren zu berücksichtigen. Außerdem kann das Gebiet innerhalb kürzester Zeit auf markante Merkmale hin untersucht werden und anthropogene Einflüsse lassen sich ebenfalls leichter ausmachen (Fischteich im EZG Engebächle).

Als äußerst gelungen zeigt sich die Wahl der beiden EZG Engebächle und Selzenbächle, welche mit ihren Einzugsgebietsgrenzen aneinander stoßen. Beide EZG weisen ähnliche Charakteristika auf, unterscheiden sich jedoch in der Landnutzung deutlich. Diese grundlegenden Faktoren stellen eine gute Basis für Studien in Bezug auf Abflussbildungsprozesse in Gebieten mit unterschiedlichen Landnutzungsarten dar.

Die Diversonden der Firma *Eijkelkamp/Van Essen* ermöglichen eine kontinuierliche und zeitgleiche Aufzeichnung der Abfluss-, Leitfähigkeits- und Temperaturmesswerte. Diese bringen den Vorteil, dass die einzelnen Messwerte einfach untereinander verglichen werden können und teilweise in Relation zueinander gesetzt werden können.

Die Anwendung der Temperatur als Tracer zur Ganglinienseparation gestaltet sich problematisch, da viele Faktoren, die sich auf die Gewässertemperatur auswirken, berücksichtigt werden müssen (Hannah et al., 2004) und dies im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war. Dennoch kann an Hand eines besonders gut geeigneten Ereignis nach längerer Trockenphase eine GLS mit den Temperaturdaten durchgeführt werden, da der einfallende Niederschlag einen deutlichen Temperatursturz im Gewässer verursacht. Dieses Ereignis bringt einen deutlichen Temperatursturz innerhalb kürzester Zeit mit sich. Die Ergebnisse dieser Anwendung weisen wie auch die GLS mit den Leitfähigkeitswerten für das EZG Engebächle eine Dominanz des Grundwassers (pre-event water) während des Ereignisses auf.

Um diesen Ansatz weiterhin zu verfolgen, wäre es zum einen von Vorteil ein Temperaturprofil über die Tiefe des Gewässers aufzunehmen, zum anderen wäre es ebenfalls hilfreich, die Interaktionen in Bezug auf die Wärmeübertragung zwischen Bachbett und Gewässer und Atmosphäre und Gewässer qualitativ und quantitativ zu ermitteln. Dies sollte auf jeden Fall über einen thermodynamischen Ansatz erfolgen. Grundlegende Ansätze hierzu sind ebenfalls in Hannah et al. (2004) zu finden.

In Bezug auf die Abflussbildung in Abhängigkeit der unterschiedlichen Landnutzungsarten kann mit Hilfe der Abflussdaten belegt werden, dass über den selben Zeitraum bei gleichem Niederschlagsinput aus dem EZG Selzenbächle verhältnismäßig wesentlich mehr Abfluss registriert wird wie im EZG Engebächle. Dies kann darauf hinweisen, dass das Rückhaltevermögen von Wasser in bewaldeten EZG hoch ist (Schürch et al., 2003). Das EZG Glasbach kann zu diesem Vergleich auf Grund unterschiedlichem Niederschlagsinput weniger gut herangezogen werden.

Trotzdem bestätigen die gemessenen Abflussdaten aus den EZG Engebächle und Selzenbächle etliche Studien (unter anderem (Bonell, 1993). Alle EZG weisen zu Beginn der Messperiode jedoch sehr geringe Basisabflüsse auf.

Die Trübungswerte können nicht zur Auswertung herangezogen werden, da sie fehlerhaft und diskontinuierlich aufgezeichnet werden. Dennoch bietet dieser Ansatz Potential, wenn in weiteren Arbeiten Sedimentproben aus dem Gebiet analysiert werden, um sie mit den Sedimenten im Gerinne vergleichen zu können und wenn andere Messgeräte zum Einsatz kommen.

Über die GLS in den einzelnen EZG werden für alle Ereignisse Verhältnisse vorgefunden, in welchen das Grundwasser den größten Anteil zum Gesamtabfluss liefert. Diese Hypothese kann im Engebächle durch die Anzahl der Messdaten durchaus als belegt betrachtet werden, sollte jedoch in den anderen beiden EZG durch weitere Messungen über längeren Zeitraum beobachtet werden. Gerade für das EZG Selzenbächle wäre es in Bezug auf die unterschiedlichen Landnutzungsarten interessant, diese Annahme weiterhin zu verfolgen. Basierend auf den Ergebnissen der Rezessionsanalysen scheint es im EZG Selzenbächle keine vergleichbare Zwischenabflusskomponente wie im Engebächle und Glasbach zu geben.

Für die Abflussbildung im Engebächle scheint eine tiefere Grundwasserkomponente maßgeblich verantwortlich zu sein. Um dies jedoch definitiv beweisen zu können, wäre es günstig, neben den installierten GW-Pegeln an weiteren Feuchtflächen Piezometer (bspw. TRUTRACK) zu installieren, da diese auf Grund ihrer Beschaffenheit sicherlich leichter in den Untergrund einzubringen sind und somit eine bessere Überwachung der Auendynamik gegeben wäre.

Da die Bodenfeuchtedaten ebenfalls wertvolle Informationen über die Wasserbewegungen im Boden liefern, wäre es auch hier von Vorteil, an näher am Bachlauf gelegenen Stellen weitere Profile zu graben und die Messsonden dort zu installieren.

Um die präferenziellen Fließwege des Niederschlagswassers durch die Bodenmatrix auszumachen und somit die am ehesten zum Abfluss beitragenden Schichten auszumachen käme auch ein "Sickerversuch" in Frage, wobei Farbtracer in den Oberboden eingespeist werden und visuell (in gegrabenen Bodenprofilen) oder messtechnisch nachgewiesen werden.

Ein solcher Versuch wäre auch von Vorteil, um den schnellen Zwischenabfluss registrieren zu können.

Die Modellanwendung in dieser Arbeit bleibt unter Vorbehalt zu betrachten. Obwohl während der meisten Ereignisfälle eine Dominanz des tiefen Grundwasserspeichers gegeben ist und die Konzeptionalisierung der Abflussbildung im EZG Engebächle eigentlich bestätigt (Dominanz des Grundwassers auch im Ereignisfall), gelingt es nicht, mit der um den Ereignisanteil reduzierten Datenreihe eine annähernd zufriedenstellende Simulation durchzuführen. Objektiv betrachtet wird der Konzeptionalisierung auf Basis der Messdaten eher Glaubwürdigkeit entgegengebracht, als derjenigen durch das Modell.

Ungeachtet dessen wäre es von Vorteil, längere Messreihen als Datengrundlage zu haben. Die Frage, ob das HBV-Modell zu Simulationen kleiner Einzugsgebiete und kurzer Zeiträume überhaupt geeignet ist, konnte grundlegend nicht geklärt werden.

Auf Grund der Modellgüte von $R_{eff} = 0.67$ scheint dies jedoch im sinnvoll zu sein.

Der Einsatz eines weiteren Modells zu Vergleichszwecken wäre sicherlich interessant, auch in Anbetracht dessen, dass über die Messphase ein beachtlicher Datensatz gesammelt werden konnte, der zur Verfügung steht. Außerdem kann die geringe räumliche Erstreckung des EZG Engebächle hier wiederum als Vorteil betrachtet werden, da es sicherlich möglich ist, einige Prozesse messtechnisch zu erfassen und in Zusammenhang zu stellen.

Eine Simulation der Niederschlags-Abfluss Beziehung im EZG Selzenbächle wäre im Zuge dieser Studie wünschenswert und von großem Interesse gewesen, konnte aber auf Grund des gegeben Zeitrahmens nicht durchgeführt werden.

Es zeigt sich also, dass trotz der relativ kurzen Messphase von rund vier Monaten, interessante Erkenntnisse gewonnen werden können und das grundliegende System der Abflussbildungsprozesse im EZG Engebächle Ansatzweise erfasst werden kann. Diese Ansätze bieten eine Ausgangslage für weitere Studien in den Untersuchungsgebieten.

9 Literatur

- Adolph, G., 2005. Abflussdynamik und natürliche Tracer zur Beschriebung der Gebietsreatkion. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Brsg.
- Anderson, M., 2005. Heat as Groundwater Tracer. Ground Water, 43(No. 6): 951-968.
- Andréassian, V., 2004. Waters ans forests: from historical controversy to a scienitific debate a review. Journal of Hydrology, 291: 1-27.
- Arai, T., 1993. Estimation of groundwater flow from temperature distribution. IAHS, 215(Tracers in Hydrology): 101-107.
- Baumgartner, A. and Liebscher, H.-J., 1990. Allgemeine Hydrologie Quantitative Hydrologie. Lehrbuch der Hydrologie, 1, Berlin, Stuttgart.
- Bazemore, D., Eshleman, K. and Hollenbeck, K., 1994. The role of soil water in stormflow generation in a forested headwater catchment: synthesis of natural tracer and hydrometric evidence. Journal of Hydrology, 162: 47-75.
- Bergström, S., 1991. The HBV Model. In: Singh (Editor), Advances in hydrological modelling.
- Bergström, S., 1992. The HBV Model its structure and applications. SMHI reports, No. 4.
- Beven, J.K., 2003. Rainfall Runoff modelling; The Primer. John Wiley and Sons, LTD, New York.
- Bonell, M., 1993. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. Journal of Hydrology, 150: 217-275.
- Brown, A., Zhang, L., McMahon, T., Western, A. and Vertessy, R., 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting in alterations in vegetation. Journal of Hydrology, 310: 28-61.
- Burch, G., Bath, K., Moore, I. and O'Loughlin, E., 1987. Comparative hydrologic behaviour of forested and cleared catchments in south-eastern Australia. Journal of Hydrology, 90: 19-42.

- Burz, J., 1958. Abgrenzung der Schwebestoff- und Sohlenfracht. Die Wasserwirtschaft, Heft 14.
- Didszun, J., 2004. Experimentelle Untersuchung zur Skalenabhängigkeit der Abflussbildung. Freiburger Schriften zur Hydrologie, 19: 221.

Dingman, s.L., 2002. Physical Hydrology. Prentice Hall, New Jersey.

Dyck, S. and Peschke, G., 1995. Grundlagen der Hydrologie, Berlin.

- Ernst, M. and Widemann, N., 1986. Geologie der Umgebung von Merzhausen bei Freiburg i. Br.
- Geyer, O.F. and Gwinner, M.P., 1968. Einführung in die Geologie von Baden-Württemberg.
- Gray, J.R. and Glysson, D.G., 2002. Proceedings of the Federal Interagency Workshop on Turbidity and other Sediment Surrogates, April 30-May 2, 2002, Reno, Nevada. In: U.S.G.S.C. 1250 (Editor).
- Grayson, R., Moore, I. and McMahon, T., 1992. Physically based modeling, 2. Is the concept realistic? Water Ressources Research, 26: 2659-2666.
- Gutknecht, D., 1996. Abflussentstehung an Hängen Beobachtungen und Konzeptionen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Jahrgang 48(Heft 5/6): 134 - 145.
- Guwang, B., 2004. Hydrologische Prozesse im Stadtgebiet von Freiburg und deren adäquate Modellierung. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Albert-Ludwigs Universität, Freiburg.
- Hädrich, F. and Stahr, K., 1997. Die Böden in der Umgebung von Freiburg i. Br., pp. 63-87.
- Hannah, D., Malcolm, I., Soulsby, C. and Youngson, A., 2004. Heat exchange and temperatures within a salmon spawning stream in the Cairngorms, Scotland: seasonal and subseasonal dynamics. River Research and Applications, 20: 635-652.
- Hänsler, A., 2005. Hydrometrie und natürliche Tracer zur hydrologischen Prozessforschung bei Niedrigwassersituationen in einem bewaldeten Einzugsgebiet. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.
- Harding, J., Neal, C. and Whitehead, P., 1992. Hydrological effects of plantation forestry in north-western Europe. In: A. Teller, P. Mathy and J. Jeffers (Editors), Response of forest ecosystems to environmental changes. Elsevier, New York, pp. 445-455.

- Hegg, C., Badoux, A., Lüscher, P. and Witzig, J., 2004. Zur Schutzwirkung des Waldes gegen Hochwasser. Forum für Wissen: 15-20.
- Holocher, J., 1997. Anwendung des Niederschlag-Abfluß-Modells HBV an der Dreisam und verschieden skalierten Teileinzugsgebieten. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.
- Hölting, B. and Coldewey, W.G., 2005. Hydrogeologie Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 2005.
- Hooper, R.P. and Shoemaker, C.A., 1986. A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. Water Ressources Research, 22,10(1444-1454).
- Huntington, G., Hooper, R. and Aulenbach, B., 1994. Hydrologic processes controlling sulfate mobility in a small forested watershed. Water Ressources Research, 30: 283-295.
- James, E., Manga, M., Rose, T. and Hudson, G., 2000. The use of temperature and the isotopes of O, H, C, and noble gases to determine the pattern and spatial extent of groundwater flow. Journal of Hydrology, 237: 100-112.
- Käss, 1992. Lehrbuch der Hydrogeologie Band 9, Geohydrologische Markierungstechnik. Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- Kirkby, M., 1988. Hillslpoe runoff processes and models. Journal of Hydrology, 100(315-339).
- Kobayashi, D., Ishii, Y. and Kodama, Y., 1999. Stream temperatur, specific conductance and runoff process in mountain watersheds. Hydrological Processes, 13: 865-876.
- Laudon, H. and Slaymaker, O., 1997. Hydrograph separation using stable isotopes, silica and electrical conductivity: an alpine example. Journal of Hydrology, 201: 82-101.
- Leibundgut, C., 1984. Zur Erfassung hydrologischer Messwerte und deren Übertragung aus Einzugsgebiete verschiedener Dimensionen. Geomethodica, 9(141-170).
- Lindenlaub, M., 1998. Abflußkomponenten und Herkunftsräume im Einzugsgebiet der Brugga: Aspekte zeitlicher und räumlicher Skalierung. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universtität, Freiburg.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. and Bergström, S., 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. Journal of Hydrology, 201: 272-288.
- McDonnell, J., 1990. A rationale for old water discharge through macropores in a steep. Water Ressources Research, 26: 2821-2832.
- McGlynn, B.L., 2005. The role of riparian zones in steep mountain watersheds. In: M. Beniston (Editor), Global Change and Mountain Regions - Advances in Global Research. Springer Verlag, Berlin New York, pp. 650.
- McGlynn, B.L. and McDonnell, J., 2003. Quantifying the relative contributions of riparian and hillslope zones to catchment runoff. Water Ressources Research, 39(11): 1310-1329.
- Metz, B., 1997. Glaziale Formen und Formungsprozesse im Schwarzwald. In: I.f.P.G.d.A.-L.-U. Freiburg (Editor), Schwarzwald und Oberrheintiefland - Eine Einführung in das Exkursionsgebiet um Freiburg im Breisgau. M\u00e4ckel, R\u00fcdiger Metz, Bernhard.
- Mortimer, C., 1996. Chemie.
- Naef, F., Scherrer, S. and Weiler, M., 2002. A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. Journal of Hydrology, 267: 74-79.
- Niehoff, D., Fritsch, U. and Bronster, A., 2002. Land-use impacts on strom-runoff generation: scenarios of land-usechange and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. Journal of Hydrology, 267: 80-93.
- Nydegger, P., 1967. Untersuchung über Feinstofftransport in Flüssen und Seen, über Entstehung von Trübungshorizonten und zuflußbedingten Strömungen im Brienzersee und einigen Vergleichsseen, Bern.
- Ogunkoya, O. and Jenkins, A., 1993. Analysis of storm hydrograph and flow pathways using a three-component hydrograph separation model. Journal of Hydrology, 142: 71-88.
- Ott, B., 2002. Weiterentwicklung des Einzugsgebietsmodell TACD und Anwendung im Dreisameinzugsgebiet. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.

- Parlow, E. and Rosner, H.-J., 1997. Das Klima des Oberrheingrabens, Schwarzwald und Oberrheintiefland - Eine Einführung in das Exkursionsgebiet um Freiburg im Breisgau. Institut für Physische Geographie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Freiburg.
- Pavanelli, D. and Pagliarani, A., 2002. Monitoring Water Flow, Turbidity and Suspended Sediment Load, from an apennine Catchment Basin, Italy. Biosystems Engineering, 126: 1-6.
- Pearce, A., Stewart, M. and Sklash, M., 1986. Storm runoff generation in humid headwater catchments 1. Where does the water come from? Water Ressources Research, 22: 1263-1273.
- Post, D. and Jones, J., 2001. Hydrologic regimes of forested, mountainous, headwater basins in New Hampshire, North Carolina, Oregon, and Puerto Rico. Advances in Water Resources 24, 24: 1195-1210.
- Schnegg, P.-A., 2002. An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurements, Groundwater and Human Development, pp. 1484-1487.
- Schnegg, P.-A., 2003. A new field fluorometer for multi-tracer tests and turbidity measurements applied to hydrogeological problems, Eight International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil.
- Schnegg, P.-A. and Flynn, R., 2001. Online field fluorometer for hydrogeological tracer test.

Schröder, 1994. Technische Hydraulik, Kompendium für den Wasserbau. Springer, Berlin Heidelberg.

Schürch, M., Herold, T. and Kozel, R., 2003. Grundwasser - die Funktion des Waldes. Bündner Wald, Nr. 4: 71-76.

Seibert, J., 2002. The HBV Model.

Seibert, J., 2003. HBV light version 2, User's Manual.

Shanley, B.J. and Peters, N.E., 1988. Preliminary observations of streamflow genereation during storms in forested piedmont watershed using temperature as a tracer. Journal of Contaminant Hydrology, 3: 349-365.

- Sklash, M. and Farvolden, R., 1976. A conceptual model of watershed response to rainfall, developed through the use of oxygen-18 as natural tracer. Can. J. Earth Sci., 13: 271-283.
- Sklash, M. and Farvolden, R., 1979. The role of Groundwater in Storm runoff. Journal of Hydrology, 43: 45-65.
- Stahr, K., 1979. Die Bedeutung periglazialer Deckschichten f
 ür Bodenbildung und Standortseigenschaften im S
 üdschwarzwald. Freiburger Bodenkundliche Abhandlung, 9: 273.
- Sun, H., Cornish, P.S. and Daniell, T.M., 2001. Turbidity-based erosion estimation in a catchment in South Australia. Journal of Hydrology, 253(1-4): 227-238.
- Tipler, P.A., 2000. Physik. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford.
- Uhlenbrook, S., 1999. Untersuchung und Modellierung der Abflussbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet, Freiburger Schriften zur Hydrologie, Freiburg.
- Weiler, M., McGlynn, B.L., McGuire, K.J. and McDonnell, J., 2003. How does rainfall become runoff? A combined tracer and runoff transfer function approach. Water Ressources Research, 39: 1315-1327.
- Wenninger, J., 2002. Experimentelle Untersuchung zur Dynamik von Hanggrundwasser und dessen Übertritt in die Talaue und den Vorfluter im Bruggaeinzugsgebiet. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.
- Wohlrab, B., Ernstberger, H., Meuser, A. and Sokollek, V., 1992. Landschaftswasserhaushalt. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

Dank

Zum Abschluss dieser Diplomarbeit haben einige helfende Hände beigetragen.

Für die Vergabe des Themas sei Prof. Dr. Ch. Leibundgut gedankt, sowie auch Dr. Jens Lange für die engagierte Betreuung dieser Arbeit und dem immer präsenten Interesse daran.

Ohne die tatkräftige Unterstützung von Emil Blattmann wären einige Messgeräte nicht zum Einsatz gekommen. Die Gemeinde Wittnau und die Besitzer des "Ringlihofs" gesatteten die Installation von Messgeräten auf ihren Grundstücken, sowie auch der Wassermeister von Wittnau, Herr Binder, den Zutritt zu den Quellfassungen genehmigte. Ihnen sei hiermit ebenfalls gedankt.

Für die gelungene Teamarbeit Im Gelände und im Labor danke ich Andreas Hänsler, so wie auch den weiteren KommilitonInnen für die gemeinsame Zeit im Computerraum Dank gebührt.

Für das Korrekturlesen dieser Arbeit danke ich ganz besonders Robert Alink, Susanne Müller und Iris Pelz, so wie auch Anne Klein für die Hilfe beim Formatieren.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Familie Danke sagen. Neben der finanziellen Unterstützung bedanke ich mich auch für die moralische Unterstützung in allen erdenklichen Situationen.

Anhang

Sonden ID	Entfernung vom Pegel	Beschreibung der	Besonderheiten
	(m), (Abstand zur	Lage	
	Sonde unterhalb)		
75	50	Beschattete Zone	Oberhalb der Sonde wird
		in einem Pool	Wasser aus dem Bach in
			den Fischteich ausgeleitet
73	150 (100)	Mäßig beschattet,	
		zentral im	
		Strömungsbereich	
65	232 (82)		
69	330 (98)		Unterhalb Quellfassung
61	400 (70)		
58	437 (37)	Mäßig beschattet,	Pool ist verhältnismäßig
		in einem Pool auf	tief
		Höhe der GW-	
		Pegel	
63	455 (18)	Mäßig beschattet,	
		zentral im	
		Strömungsbereich	
55	473 (18)		
59	499 (26)		
64	556 (57)		
53	524 (Abzweig)	Beschattet, in	Stark von der
		gering	Wassereinleitung aus der
		wasserführendem	oberen Quellfassung
		Zufluss	beeinflußt
67	591 (35)	Beschattet, in	
		einem Pool	
66	691 (100)	Beschattet, in	
		einem Pool	
62	796 (105)	Beschattet, Zentral	
		im	
77	896 (100)		
74	941 (45)		
56	1010 (Abzweig)	Mäßig beschattet,	War teilweise stark
		in einem GW-	zusedimentiert
		gespeisten Zufluss	
51	1001 (60)	Beschattet, gut	
		durchströmter	
		Bereich,	

Tabelle A 1: Lagebeschreibung der einzelnen Temperatursonden im Engebächle

Spezifikation		CTD-Diver	Baro Diver
Маве		Länge 260 mm, \emptyset 22 mm	Länge 125 mm,
		_	\varnothing 22 mm
Betriebstemperatur		-20 °C bis +80°C	-20 °C bis +80°C
Speicherkapazität		3*16.000 Messwerte	2*24.000 Messwerte
	Messprinzip	Dehnmessstreifen-Brücke	Dehnmessstreifen-
Druck			Brücke
	Messbereich	950-1950 cm WS	950-1100 cm WS
	Genauigkeit	0,1 % typ., 0,2 %	0,1 % typ., 0,2 %
		max. (1-2 cm)	max.
	Messprinzip	Halbleiter	Halbleiter
Temperatur	Komp. Bereich	-20°C bis +80°C	-20°C bis +80°C
	Genauigkeit	0,1 °C	ca. 0,1 °C
	Messprinzip	4 Elektroden	-
Leitfähigkeit	Bereich	0-5 mS/cm	-
	Genauigkeit	1% vom Bereich (50	-20°C bis +80°C
		μS/cm)	

Tabelle A 2: Technische Daten der CTD-Diver (Guwang, 2004)



Abbildung A 1: GLS Leitfähigkeit für das Ereignis GBE2



Abbildung A 2: GLS Leitfähigkeit für das Ereignis SBE4



Abbildung A 3: GLS Leitfähigkeit für das Ereignis EBE7



Abbildung A 4: Position der Temperatursonden im Engebächle



Abbildung A 5: Vergleich der prozentualen Anteile am Gesamtvolumen ermittelte über LF



Abbildung A 6: Ergebnisse der Ganglinienseparation für das Ereignis von 29. Juni der Temperatursonden 75, 73, 65



Abbildung A 7: Ergebnisse der Ganglinienseparation für das Ereignis von 29. Juni der Temperatursonden 69, 61, 58



Abbildung A 8: Ergebnisse der Ganglinienseparation für das Ereignis von 29. Juni der Temperatursonden 63, 55, 59



Abbildung A 9: Ergebnisse der Ganglinienseparation für das Ereignis von 29. Juni der Temperatursonden 67, 64, 53



Abbildung A 10: Ergebnisse der Ganglinienseparation für das Ereignis von 29. Juni der



Abbildung A 11: Ergebnisse der Ganglinienseparation für das Ereignis von 29. Juni der Temperatursonden 74, 51, 56



Abbildung A 12: Temperatursonde S62 im Engebächle



Abbildung A 13: Fluorometer am Pegel Engebächle



Abbildung A 14: Pegel Engebächle während Niedrigwasserphasen (rechts) und während des Hochwasserereignisses vom 9. September



Abbildung A 15: Diversonde der Firma Eijelkamp/Van Essen



Abbildung A 16: Schematische Darstellung der Grundwasserpegel GW-Pegel 1-3 in der Riparian Zone



Abbildung A 17: Dreieckswehr am Pegel Engebächle

Ehrenwörtliche Erklärung

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

Freiburg, den 06. Februar 2006

Cindy Hugenschmidt