Institut für Hydrologie

der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br.

Fabian Nippgen

Temperatur und Leitfähigkeit als natürliche Tracer zur Abflussbildungsforschung im Kaiserstuhl



Diplomarbeit unter der Leitung von

Prof. Dr. Ch. Leibundgut Freiburg i.Br., Oktober 2007

Institut für Hydrologie

der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br.

Fabian Nippgen

Temperatur und Leitfähigkeit als natürliche Tracer zur Abflussbildungsforschung im Kaiserstuhl

Referent: Prof. Dr. Ch. Leibundgut Korreferent: Dr. J. Lange

Diplomarbeit unter der Leitung von

Prof. Dr. Ch. Leibundgut Freiburg i.Br., Oktober 2007

Bedanken möchte ich mich

bei Prof. Dr. Ch. Leibundgut für die Bereitstellung des Themas.

bei Dr. J. Lange für die Übernahme des Korreferats.

bei Tobias Schütz für die tatkräftige Unterstützung bei der Feldarbeit und die hilfreichen Diskussionen über die Arbeit

bei Emil Blattmann für die Hilfe bei den ganzen eingesetzten Gerätschaften.

bei allen anderen, die auf ihre Art zu dieser Arbeit beigetragen haben.

People have believed for hundreds of years that newts in a well mean that the water's fresh and drinkable, and in all that time never asked themselves whether the newts got out to go to the lavatory.

– Terry Pratchett –

Inhaltsverzeichnis

In	halts	verzeic	hnis	Ι								
Al	obildu	ungsve	rzeichnis	V								
Та	Tabellenverzeichnis II											
Zι	Isam	menfas	ssung	XI								
Er	nglish	Sumr	nary	XIII								
1	Einl	eitung	und Problemstellung	1								
2	Das	Löche	ernbach Einzugsgebiet	3								
	2.1	Gebie	tsbeschreibung	4								
		2.1.1	Geologische Gegebenheiten	4								
		2.1.2	Pedologische Gegebenheiten	6								
		2.1.3	Flurbereinigungen	8								
		2.1.4	Landnutzung	11								
		2.1.5	Klimatische Bedingungen	12								
	2.2	Frühe	re Studien	14								
3	Met	hodik		17								
	3.1	Der K	Convergenzansatz nach Leibundgut	17								
	3.2	Verwe	endete natürliche Tracer	17								
		3.2.1	Temperatur	18								
		3.2.2	Leitfähigkeit	19								
		3.2.3	Sediment	20								
	3.3	Misch	ungsrechnungen	20								
4	Mes	snetz		23								
	4.1	Hydro	ometrische Ausstattung	23								
		4.1.1	Niederschlag	23								
		4.1.2	Abfluss, Temperatur, Leitfähigkeit (Pegel)	23								

I

		4.1.3 Wasserstand, Temperatur, Leitfähigkeit (Diver-Sonden) 24	4
		4.1.4 Temperatur $\ldots \ldots 20$	6
		4.1.5 Sediment $\ldots \ldots 2'$	7
	4.2	Probleme	7
		4.2.1 Befestigung der Stowaways und Diver	7
		4.2.2 Wasserstandsschwankungen	8
		4.2.3 Reaktionszeiten der Logger	9
		4.2.4 Zeitsynchronisation	0
		4.2.5 Wasserstand am Pegel	1
		4.2.6 Mischungsrechnungen	1
	4.3	Messzeitraum	2
5	Aus	wertung der Pegeldaten 33	5
	5.1	Ergebnisse und Interpretation	5
	5.2	Sediment-Proben	1
6	Erei	gnisanalysen 4	5
	6.1	Ereignis vom 7. August $2007 \dots $	5
		6.1.1 Löchernbach	б
		6.1.2 Biebenbach	3
		6.1.3 Pegel	5
	6.2	Ereignis vom 23. Juli 2007	9
		6.2.1 Löchernbach	9
		6.2.2 Biebenbach	6
		6.2.3 Pegel	7
	6.3	Ereignis vom 19. Juli 2007 \ldots 69	9
		6.3.1 Löchernbach	9
		6.3.2 Biebenbach	4
		6.3.3 Pegel	5
	6.4	Ereignis vom 26. Juni 2007	6
	6.5	Hydraulische Abflussberechnungen	8
	6.6	Fließgeschwindigkeiten	0
	6.7	Fazit	1
7	Gru	ndwasser 8'	7
	7.1	Grundwasser-Drainagen	7
	7.2	Temperatur- und Leitfähigkeits-Längsprofile	0
		7.2.1 Löchernbach	1
		7.2.2 Biebenbach	2

	7.2.3 Fazit	93
8	Synthese aus den Ergebnissen und Ausblick	97
Α	Grafiken	101
В	Tabellen	105
С	Fotos	123
Lit	eraturverzeichnis	125
Eh	renwörtliche Erklärung	129

Abbildungsverzeichnis

1.0.1	3D-Ansicht des Löchernbaches. Oberflächlich angedeutet die Lage der Rohre und Drainagen. Auf Basis des von der LUBW zur Verfü-	
	gung gestellten DGM. 2-fach überhöht	2
2.0.1	Lage des Einzugsgebietes	3
2.1.1	Geologie (nach KRÄMER, 1999, verändert. Kartengrundlage: Geo-	
	logische Exkursionskarte des Kaiserstuhls 1:25.000 GLA, 1959)	5
2.1.2	Pedologie (nach KRÄMER, 1999, verändert. Kartengrundlage: Bo-	
	denkarte von Baden-Württemberg 1:25.000, Blatt 7812 Kenzingen	
	- GLA 1996 und 7912 Freiburg i. Br. NW - LGRB 1998) $\ \ .$	7
2.1.3	Rohr- und Drainagensystem (nach WAGNER, 2002, verändert und	
	$erweitert) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	9
2.1.4	Veränderung des Maulwurfdräns nach 10 Jahren (aus FEICHTIN-	
	GER, 1960; in KAMMERER, 2006)	10
2.1.5	Querschnitt durch das Löchernbach Einzugsgebiet. Der rote Punkt	
	in der oberen Grafik stellt den Kulminationspunkt in der unteren	
	Grafik dar. 4-fach überhöht. Blickrichtung von NW (Löchernbach)	
	bzw WSW (Biebenbach) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	11
2.1.6	Landnutzung (nach KRÄMER, 1999, verändert)	12
2.1.7	Niederschlagsregime für die Stationen Mahlkünzig und Adler/Brei-	
	tenweg für die Jahre 1977-1980 und 1990-1995 (KRÄMER, 1999; ver-	
	$\ddot{a}ndert$)	13
4.1.1	Standorte der Diver und des Pluvios	25
4.1.2	Standorte der Stowaways	26
4.2.1	Verlauf der Temperaturen beim Reaktionszeiten-Versuch $\ . \ . \ .$.	29
4.2.2	Nomogramm zur Fehlerabschätzung des Abflusses anhand des Was-	
	serstandes. Aus LUFT ET AL. (1981) \ldots	31
4.3.1	Niederschlag und Lufttemperatur während der Messperiode	32
5.1.1	Niederschlag und Abflussganglinie	35

V

5.1.2	Zusammenhang zwischen Niederschlags-Intensität und Dauer bis	
	zum Abflusspeak anhand der gebildeten Abflussklassen	37
5.1.3	Zusammenhang zwischen Niederschlagsmenge und Niederschlags-	
	dauer für alle 73 Ereignisse	38
5.2.1	Sediment-Durchgang 23. Juli 2007	41
5.2.2	Sediment-Durchgang 7. August 2007	42
6.1.1	Lufttemperatur und Niederschlag während des Ereignisses vom 7.	
	August 2007	45
6.1.2	Anordnung der Diver und Stowaways am 7. August 2007	46
6.1.3	Wassertemperaturverlauf der Logger Stow11 bis Stow09 (7. August	
	2007)	47
6.1.4	Wassertemperaturverlauf der Logger Stow14 bis Stow06 während	
	des Ereignisses vom 7. August 2007	49
6.1.5	Wassertemperaturverlauf der Logger Stow15 bis Stow10 während	
	des Ereignisses vom 7. August 2007	50
6.1.6	Wassertemperaturverlauf der Logger Stow12 bis Stow18 während	
	des Ereignisses vom 7. August 2007	52
6.1.7	Verlauf des Ereignisses vom 7. August 2007 dargestellt an Diver 01 $% (2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,$	53
6.1.8	Wassertemperaturverläufe bei den im Biebenbach gelegenen Daten-	
	loggern (7. August 2007) \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	54
6.1.9	Verlauf des Ereignisses vom 7. August 2007, dargestellt an Diver 02 .	55
6.1.10	Reaktion des Pegels auf das Ereignis vom 7. August 2007	56
6.1.11	Elektrische Leitfähigkeit während des Ereignisses vom 7. August 2007	57
6.1.12	Anteile der Rohre für das Ereignis vom 7. August	58
6.1.13	Ungefähre Einzugsgebiete der einzelnen Rohre	58
6.2.1	Lufttemperatur und Niederschlag während des Ereignisses vom 23.	
	Juli 2007	59
6.2.2	Anordnung der Diver und Stowaways am 23. Juli 2007	60
6.2.3	Wassertemperaturverlauf der Logger Stow11 bis Stow08 (23. Juli	
	2007)	61
6.2.4	Wassertemperaturverlauf der Logger Stow10 bis Stow09 (23. Juli	
	2007)	62
6.2.5	Wassertemperaturverlauf der Logger Stow14 bis Stow06 (23. Juli	
	2007)	63
6.2.6	Wassertemperaturverlauf der Logger Stow15 bis Stow01 (23. Juli	
	2007)	64
6.2.7	Verlauf des Ereignisses vom 23. Juli 2007, dargestellt an Diver01	66

6.2.8	Verlauf des Ereignisses vom 23. Juli 2007 dargestellt an Diver 02 $$. $$.	67
6.2.9	Reaktion des Pegels auf das Ereignis vom 23. Juli 2007	68
6.2.10	Anteile der Rohre vom 23. Juli	69
6.3.1	Niederschlag und Lufttemperatur während des Ereignisses vom 19.	
	Juli 2007	70
6.3.2	Wassertemperaturen der Logger Stow 11 bis Stow 08 (19. Juli 2007) $\ .$	71
6.3.3	Wassertemperaturen der Logger Stow 10 bis Stow 09 (19. Juli 2007) $\ .$	72
6.3.4	Wassertemperaturen der Logger Stow 14 bis Stow 06 (19. Juli 2007) $\ .$	73
6.3.5	Wassertemperaturen der Logger Diver03 und Stow01 (19. Juli 2007)	74
6.3.6	Reaktion von Diver01 auf das Ereignis vom 19. Juli 2007	75
6.3.7	Gebietsreaktion auf das Ereignis vom 19. Juli 2007	76
6.4.1	Niederschlag und Temperatur während des Ereignisses vom 26. Juni	
	2007	77
6.4.2	Reaktion des Pegels beim Ereignis vom 26. Juni 2007	78
6.6.1	Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Fließgeschwindigkeit und	
	Entfernung zum Pegel bei unterschiedlichen Scheitelabflüssen	80
6.6.2	Höhenlängsprofil des Löchernbaches. Erstellt anhand des 1x1 m Lasersc	an-
	DGMs der LUBW (2007)	81
6.7.1	Scheitelabfluss geplottet gegen die Zeitdifferenz der Doppelpeaks für	
	fünf Ereignissen	85
711	La ma dan Crum drug gan Taran anatunla man	07
7.1.0	Lage der Grundwasser-Temperaturlogger	01
(.1.2 7.1.2	Conditioner Charles and the Lafter start (condition)	88
7.1.3	Ganginnen von Stowo3 und der Luttemperatur (gegiattet)	89 01
7.2.1	Langsprome vom 1. und 11. August	91
(.2.2	Langsprofil Biebenbach 6. August 2007	93
(.2.3	Ronre und Drainagen, bei denen ein Leitianigkeits- und Tempera-	0.4
	tursprung nachgewiesen werden konnte	94
A.0.1	Reaktion von Diver02 auf das Ereignis vom 19. Juli 2007	101
A.0.2	Wassertemperaturverläufe der im Biebenbach angebrachten Logger .	102
A.0.3	Temperaturverlauf der im Biebenbach angebrachten Datenlogger	102
A.0.4	Verlauf der Leitfähigkeiten der beiden Diver 01 und 02 beim Ereignis	
	vom 26. Juni 2007	103
A.0.5	Niederschlag und Pegelreaktion beim Ereignis vom 29. Juli 2007	103
A.0.6	Niederschlag und Pegelreaktion beim Ereignis vom 11. Juli 2007	104
A.0.7	Niederschlag und Pegelreaktion beim Ereignis vom 21. Juni 2007	104
C c 1		100
C.0.1	Straßenabfluss	123

C.0.2	Wasser sammelt sich in Gerinnenähe			•		 •		•		•	123
C.0.3	Basis babfluss / freigeräumter Pegel $% \left({{\left({{{{\bf{n}}_{{\rm{s}}}}} \right)}_{{\rm{s}}}}} \right)$.			•	•					•	124
C.0.4	Abflusse reignis vom 11. Juli 2007 $$			•		 •				•	124

Tabellenverzeichnis

2.1.1	Anteile der Landnutzung an der Gesamtfläche 13
2.2.1	Wasserhaushalt für die Jahre 1977 bis 1980 in $[mm]$. V=Verdunstung,
	A=Abflusshöhe, N=Niederschlag $\dots \dots \dots$
4.2.1	Reaktionszeiten-Versuch der Stowaway-Temperaturlogger 30
5.1.1	Ereignis-Klassierungen
5.1.2	Niederschlagsklassen mit Durchschnitts-Kennwerten \ldots \ldots \ldots 36
5.1.3	Abflussbeiwerte vom 18.5. bis 22.8
5.2.1	Sediment-Kennwerte für drei Ereignisse
6.5.1	Berechnete Rohr-Abflüsse mit Rohr-Gefälle aus dem Laserscan-DGM 78
6.5.2	Berechnete Rohr-Abflüsse mit stark reduziertem Rohr-Gefälle $(0,5~\%)~79$
6.6.1	Gefälle der einzelnen Gerinne-Teilstücke
6.7.1	Zeitdifferenzen zwischen den Abflusspeaks bei fünf Ereignisse 84
7.2.1	Mischungsrechnungen Basisabfluss 11. August 2007 95
7.2.2	Grundlagen für die Basisabfluss-Mischungsrechnungen 95
7.2.3	Abflüsse aus Drainagen und Rohren berechnet mit Leitf. und Temp. 96
B.0.1	Reaktion der Stowaways auf das Ereignis vom 7. August
B.0.4	Reaktion der Diver auf das Ereignis vom 7. August 2007 $\ . \ . \ . \ . \ . \ 106$
B.0.5	Reaktion der Diver auf das Ereignis vom 23. Juli 2007 108
B.0.6	Reaktion der Diver auf das Ereignis vom 19. Juli 2007 111
B.0.2	Reaktion der Stowaways auf das Ereignis vom 23. Juli 2007 113
B.0.3	Reaktion der Stowaways auf das Ereignis vom 19. Juli 2007 114
B.0.7	Übersicht über alle am Pegel registrierten Ereignisse 115
B.0.8	Übersicht über alle vom Pluvio registrierten Ereignisse $\ .\ .\ .\ .\ .$ 119

Zusammenfassung

Das Löchernbach Einzugsgebiet am Ostkaiserstuhl wurde durch Flurbereinigungsmaßnahmen stark verändert. Diese Veränderungen betreffen auch vor allem die Abflussbildung. Um den Abfluss abzuleiten, der auf den asphaltierten Straßen gebildet wird, wurden Rohre zur Straßenentwässerung verlegt.

Diese Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit der oberflächlich gebildeten Abflusskomponente. Anhand der natürlichen Tracer Temperatur und elektrische Leitfähigkeit wurde versucht, die Abflussganglinie am Pegel nach Herkunftsräumen aufzuschlüsseln.

Der Pegel erhält seinen Abfluss sowohl zu Basisabflusszeiten als auch während Ereignissen fast ausschließlich vom Löchernbach-Arm; der Biebenbach spielt vom Abflussvolumen her nur eine untergeordnete Rolle. Ferner kann der Löchernbach während Ereignissen zweigeteilt werden. Viele Ereignisse weisen zumindest ansatzweise einen Doppelpeak auf: der erste, meist geringere Peak, wird von dem Gebietsteil in Pegelnähe gebildet, während der zweite, größere Peak auf die restlichen beiden Rohre und die selbst als Rohr gefasste Quelle zurückzuführen ist. Sedimentproben bestätigen diese Abflusszweiteilung, da auch dort ein zweiter Peak beobachtet werden kann.

Zudem konnten für die untersuchten Ereignisse für die Abflüsse der einzelnen Rohre durchschnittliche Fließgeschwindigkeiten ermittelt werden. Diese liegen im Bereich von 12 bis 28 m/min.

Für zwei der Rohre konnten bei zwei Ereignissen Abflüsse berechnet werden. Der Spitzenabfluss aus einem Rohr beträgt ca. 450 l/s. Dieser Wert bestätigt die Abflussauftrennung anhand der Temperatur, womit für dasselbe Rohr ein Abfluss von 447 l/s berechnet wurde.

Des Weiteren wurde aufgrund aller am Pegel gemessenen Ereignisse (73 insgesamt) eine Abflussklassierung anhand der Scheitelabflüsse vorgenommen und unter anderem mit den Niederschlagswerten verglichen. Je höher die Niederschlagsintensität während eines Ereignisses ist, desto schneller wird am Pegel der Peakabfluss erreicht. Vom Niederschlagsschwerpunkt bis zum Peakabfluss vergehen bei den kleinen Ereignissen duchschnittlich 67 min, bei den größten Ereignissen wird der Peak bereits 24 min nach der höchsten Niederschlagsintensität erreicht.

Über einen bestimmten Zeitraum gemessene Grundwassertemperaturen legen die Vermutung über zwei Grundwassersysteme im Löchernbach nahe. Die Grundwässer im Gebiet weisen je nach Herkunftsraum unterschiedliche Temperaturen auf. So kann möglicherweise auf eine jüngere –wärmere– Komponente aus dem Talbereich und eine ältere –kältere– Komponente geschlossen werden. Die jüngere Komponente scheint der Lufttemperatur vom Verlauf her im zwei- bis dreiwöchentlichen Abstand zu folgen. Der Großteil des Abflusses wird auch zu Basisabflusszeiten vom Pegel gestellt.

English Summary

The Löchernbach catchment, located in the south-east of the Kaiserstuhl, is highly anthropogenic altered due to intensive terracing. These changes especially affect the runoff generation: the runoff, which is generated on the streets, is collected in drains and discharged by pipes into the stream.

This thesis mainly deals with surface runoff. By means of the natural tracers temperature and electrical conductivity the hydrograph at the gage is divided into its single runoff origins.

The runoff at the gage is dominated by the Löchernbach tributary, both at baseflow and during runoff events. The contribution of the Biebenbach tributary can be neglected. Furthermore it is possible to divide the Löchernbach tributary into two parts during runoff events. Many events show a runoff double peak: the first peak is generated by the lower part of the catchment, while the second peak can be traced back to the two remaining pipes and the stream's spring itself. Sediment samples seem to prove the division into two parts.

Additionally it was possible to calculate flow velocities for the discharge of each pipe in the analyzed events. The average flow velocities range from 12 to 28 m/s.

It was possible to calculate the runoff during two events for two of the pipes. The peak discharge of one of the pipes is about 450 l/s. This value proves the runoff divsion at the gage on the basis of the temperature, which gives a discharge of 447 l/s for the same pipe at the same time.

Additionally all the 73 runoff events were classified by the peak discharges and among other things compared with the precipitation. The higher the rainfall intensity is, the faster the runoff peaks at the gage. The time lag between the centre of the rainfall and the peak discharge is approximately 67 min for the small events and 24 min for the largest events.

Groundwater temperatures, measured in the drainages, indicate the existence of two different groundwater systems in the Löchernbach catchment. The groundwater from the valley is warmer than the groundwater from the terraces. Possibly the groundwater from the valley is younger than the groundwater from the terraces. Besides that the temperature of the warmer seems to follow the air temperature with a time lag of two or three weeks.

1. Einleitung und Problemstellung

Die europäische Wasserrahmenrichtlinie aus dem Jahr 2000 sieht einen ganzheitlichen Schutz aller Gewässer vor. Der Fokus liegt dabei auch vor allem auf der Wasserqualität und der Trinkwassersicherung. Damit verbunden ist auch insbesondere der Schutz von Oberflächengewässern gegen Schadstoffeinträge. Gerade in landwirtschaftlichen Gegenden birgt der Eintrag von Dünge- und besonders Spritzmitteln zum Schutz der Agrarkulturen eine große Gefahr für die Flora und Fauna der Gewässer und auch für den Menschen. Diese Arbeit ist Teil des europäischen ArtWET-Projektes (Mitigation of pesticides pollution and phytoremediation in **Ar**tificial **WET**land ecosystems). Bei dem Projekt geht es darum festzustellen, inwieweit künstlich angelegte Feuchtflächen in der Lage sind, Pestizide rückzuhalten und auch durch bestimmten Pflanzenbewuchs abzubauen.

Das Institut für Hydrologie (IHF) an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg ist mit dem Hydrologischen Forschungseinzugsgebiet in Eichstetten vertreten, mit dem Ziel, den Pestizidtransport und auch den möglichen Abbau in einer solchen Feuchtfläche zu modellieren.

Gegen Ende des Jahres 2006 wurde in Eichstetten das alte Hochwasserrückhaltebecken, das unterhalb des Pegels des Löchernbaches stationiert ist, grundlegend saniert. Das alte Becken war dicht mit Bäumen bewachsen, die im Zuge der Sanierung weichen mussten. Es bot sich an, in diesem neu geschaffenen Raum eine Feuchtfläche anzulegen, die die Basis der Arbeit des IHF darstellen soll.

Der Kaiserstuhl ist ein ideales Gebiet, um Untersuchungen über Pestizide im Wasser durchzuführen. Praktisch rund um den gesamten Kaiserstuhl wird an den Hängen und Terrassen Wein angebaut, der in der Wachstumszeit bis in den August hinein auch gegen Schädlinge mit Pestiziden behandelt wird. Fallender Niederschlag wäscht die Schadstoffe von den Oberflächen der Pflanzen, und die Pestizide werden zum Teil mit dem oberflächlich gebildeteten Abfluss ins Bachbett gespült. Für weitergehende Untersuchungen ist es notwendig, die Abflussbildung im Löchernbach –insbesondere, was die oberflächlich gebildeten Abflusskomponenten betrifft– noch genauer zu verstehen. Aufgrund des hohen Versiegelungsgrades im Gebiet stellten schon verschiedene Autoren fest, dass dem Oberflächenabfluss eine besondere Bedeutung zukommt. Bislang wurde jedoch noch keine Studie durchgeführt, die sich darauf konzentriert, die räumliche und zeitliche Zusammensetzung des Abflusses während eines Ereignisses zu entschlüsseln. An diesem Punkt setzt die vorliegende Arbeit an. Mit Hilfe natürlicher Tracer wird versucht, den Ablauf der Abflussbildung nach Niederschlägen zu verstehen und Aussagen machen zu können z.B. über die Herkunft bestimmter Teile der Abflussganglinie. Diese Angaben sollen dann später dazu dienen, eine Niederschlags-Abfluss-Modellierung im Löchernbach anzupassen.

Von der LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg) wurde ein digitales Geländemodell aus einer Laserscanüberfliegung zur Verfügung gestellt. Bei der Arbeit wurden allerdings weiterhin die Grenzen des unterirdischen Einzugsgebiets verwendet, um eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen Studien zu gewährleisten. Abbildung 1.0.1 zeigt eine mit dem DGM erstellte 3D-Ansicht des Löchernbaches. Bei der Erstellung von kleinen Teileinzugsgebieten ergaben sich jedoch Probleme, da bedingt durch die unnatürliche Struktur des Löchernbaches keine korrekten Grenzen ausgewiesen werden konnten.



Abbildung 1.0.1.: 3D-Ansicht des Löchernbaches. Oberflächlich angedeutet die Lage der Rohre und Drainagen. Auf Basis des von der LUBW zur Verfügung gestellten DGM. 2-fach überhöht

2. Das Löchernbach Einzugsgebiet



Abbildung 2.0.1.: Lage des Einzugsgebietes

Das Einzugsgebiet Löchernbach befindet sich am Ostrand des Kaiserstuhls (siehe Abbildung 2.0.1 auf Seite 3) und bildet zusammen mit dem kleineren Vergleichseinzugsgebiet Rippach das ehemalige Hydrologische Versuchsgebiet Ostkaiserstuhl. Das Löchernbach Einzugsgebiet hat eine unterirdische Größe von 180 ha. Für das oberirdische Einzugsgebiet gibt DEMUTH (1992) eine Fläche von 160 ha an. In der Literatur wurde bislang zumeist eine Größe von 170 ha angegeben, dem Mittelwert aus dem unterirdischen und dem oberirdischen Einzugsgebiet. Die Größenangaben in dieser Arbeit beziehen sich auf die 180 ha für das oberirdische Einzugsgebiet.

Im Kaiserstuhl wird seit Jahrhunderten traditionell Wein angebaut, was dazu führte, dass die Landschaft zur besseren Bearbeitung kleinterrassiert wurde. Während das Rippach Einzugsgebiet auch heute noch kleinterrassiert ist, unterlag das Einzugsgebiet des Löchernbaches gravierenden anthropogenen Eingriffen. Mitte der siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts hat das Gebiet eine grundlegende Flurbereinigung erfahren, was zur Folge hatte, dass das System mit vielen kleinen Terrassen aufgegeben wurde und stattdessen Großterrassen errichtet worden sind.

Die Auswirkungen dieser Eingriffe auf den Wasserhalt, die Abflussbildung und den Sedimenttransport standen bei der überwiegenden Zahl der Forschungsarbeiten im Vordergrund, wobei das ursprüngliche, kleinterrassierte Rippach Einzugsgebiet als Referenz diente (LUFT, 1980b; LUFT ET AL., 1981; RIEG ET AL., 1991; BUCHER und DEMUTH, 1985; MORGENSCHWEIS und LUFT, 1985; DEMUTH und MAUSER, 1983; LUFT ET AL., 1983; UHLENBROOK, 1995; CUI, 1997).

2.1. Gebietsbeschreibung

2.1.1. Geologische Gegebenheiten

Die Beschreibung der geologisch-morphologischen Entwicklung des Kaiserstuhls beruht hauptsächlich auf den Beschreibungen von GEILENKEUSER (1970) und deren Zusammenfassung in LUFT (1980a). Weite Teile wurden daraus übernommen.

Vom Eozän bis zum Oligozän senkte sich der südliche Oberrheingraben und wurde von mächtigen marinen Sedimenten ausgefüllt. Das Gebiet des Kaiserstuhls lag im Grenzbereich zwischen Rand- und Beckenfazies. Am Ende des Oligozäns kam es zu einer Heraushebung und Schrägstellung von mesozoischen und tertiären Sedimenten, wobei die Heraushebung mit Verwerfungen und Flexuren verbunden war. Durch eine Gebirgsbildungsphase wurden oligozäne Schichten an die Oberfläche gebracht, der Verwitterung ausgesetzt und teilweise bis auf die Pechelbronner Schichten (ei-





Abbildung 2.1.1.: Geologie (nach KRÄMER, 1999, verändert. Kartengrundlage: Geologische Exkursionskarte des Kaiserstuhls 1:25.000 GLA, 1959)

Die Entstehung des Kaiserstuhls war durch den Schnittpunkt zweier Störungssysteme gegeben: das N-S verlaufende rheinische System und der O-W gerichtete Bonndorfer Graben. Während sich im Westen die Grabenmitte senkte, hoben sich im Ostkaiserstuhl die tertiären Schichten. Diese Störungszone hatte einen polyzentrischen Vulkanismus zur Folge, in dessen Verlauf Tuffe, Brekzien und Lavaergüsse gefördert wurden. Der Vulkanismus dauerte vom Unter- bis zum Mittelmiozän an und führte dazu, dass der vulkanische Westkaiserstuhl und der sedimentäre Ostkaiserstuhl zusammengeschweißt wurden (GEILENKEUSER, 1970). Seit dem Obermiozän begann dann eine Verwitterung und Abtragung der vulkanischen Massen, die ebenfalls wieder bis auf die Pechelbronner Schichten reichte. Bis zum Altpleistozän wurden so mehrere hundert Meter vom Kaiserstuhl abgetragen und der Rohbau des Kaiserstuhls in seiner heutigen, flachwelligen Form geschaffen.

Der Fuß des Kaiserstuhls wurde nach einer pleistozänen Senkung des Oberrheingrabens mit Kiesen und Sanden bis zu 200 m zugeschottert. Zeitgleich mit der Aufschotterung des Rheins wurde die Abtragung des Kaiserstuhls unterbrochen. Während der pleistozänen Kaltzeiten wurde in mehreren Phasen äolisch Löss abgelagert. In dieser Phase kam es zur Ausbildung der teilweise mehrere Dekameter mächtigen Lössschichten, die heute das Bild des Kaiserstuhls prägen.

Abbildung 2.1.1 auf Seite 5 zeigt einen Überblick über die geologischen Verhältnisse im Löchernbach Einzugsgebiet. Der graue Bereich ("künstlich verändertes Gelände") im Westen des Einzugsgebietes bezieht sich auf eine im Wald gelegene Freizeitanlage, mit großer Hütte, Spielplatz und Parkplatz für Autos.

2.1.2. Pedologische Gegebenheiten

Aufgrund des starken räumlichen Wechsels von Gestein und Relief, der Zeitdauer der Bodenbildung, der Landnutzung und der damit einhergehenden anthropogenen Veränderung großer Landstriche sind die Bodenbildungsbedingungen im Kaiserstuhl sehr vielfältig. Insgesamt lassen sich nach HÄDRICH und STAHR (2001) vier Teilbereiche mit für sie typischen Bodengesellschaften abgrenzen, von denen jedoch nur drei im Löcherntal vorkommen. Die Beschreibung der Böden beruht vor allem auf HÄDRICH und STAHR, 2001.

Die Kammregion

Die Höhenlagen des Kaiserstuhls sind meist lössarme bis lössfreie bewaldete Kuppen, Rücken und Steilhänge aus verschiedenen basischen Vulkaniten. Die Wald-Weinbau-Grenze im Kaiserstuhl ist eine recht eindeutige Linie, die zwischen 300 und 400 m ü. NN liegt und hauptsächlich mit der geologischen Beschaffenheit und der daraus abgeleiteten Bodenbildung zusammenhängt. Der hier vorherrschende Bodentyp ist ein in Europa seltener Euranker, der mit weniger als 30 cm flachgründig und als Körnung sandiger Lehm bis lehmiger Ton ist.

Ranker kommen im Löchernbach Einzugsgebiet jedoch nicht vor. Hier sind Braunerde-Pelosole zu finden, die durch periglaziale Frostverwitterungsprozesse aus dem Gestein entstanden sind und mit 100-200 mm eine höhere Wasserspeicherfähigkeit als die Ranker aufweisen.



Abbildung 2.1.2.: Pedologie (nach KRÄMER, 1999, verändert. Kartengrundlage: Bodenkarte von Baden-Württemberg 1:25.000, Blatt 7812 Kenzingen - GLA 1996 und 7912 Freiburg i. Br. NW - LGRB 1998)

DerLössgürtel

Der Lössgürtel, der die mittleren Höhenlagen des Kaiserstuhls umfasst, wird hauptsächlich für intensiven Weinbau genutzt. Der Löss ist stark carbonathaltig und schluffreich. LUFT (1980a) gibt für Löss, der im Rippach Einzugsgebiet zu finden ist, einen Wert von mehr als 80 % Schluff an. Der Gesamtcarbonatgehalt liegt laut HÄDRICH und STAHR (2001) bei ca. 35 % und der Grobschluffgehalt bei ca. 55 %. Der Silizium-Anteil im Löss liegt bei ca. 50 %.

Die Böden in diesem Bereich sind Pararendzinen. Die Bodenentwicklung im Kaiserstuhl und insbesondere im Löcherntal ist insgesamt jedoch massiv durch die anthropogenen Eingriffe gestört.

Die Tallagen

Die Talbereiche sind durch fluviatile Ablagerungen aus zum Teil mächtigen Schwemmlössen aufgebaut. Die Böden sind Gleye und Gley-Kolluvien; sie sind durchweg carbonathaltig und aufgrund von Bearbeitung in der Regel verdichtet, was sie dann physiologisch einschränkt, sofern nicht anthropogen -wie im Löcherntal gescheheneingegriffen wird (siehe Abschnitt Flurbereinigungsmaßnahmen). Abbildung 2.1.2 auf Seite 7 zeigt die im Löchernbach vorkommenden Böden.

2.1.3. Flurbereinigungen

Die Beschreibung der Flurbereinigungsmaßnahmen wurde großenteils von MORGEN-SCHWEIS und LUFT (1985) übernommen.

Im Kaiserstuhl wird seit alters her traditionell auf kleinterrassiertem und kleinstparzelliertem Gebiet Wein angebaut: bereits im 10. und 11. Jahrhundert wurden die Lösshänge um Ihringen kultiviert (ENDLICHER, 1980). Um den Weinbau in den südbadischen Gebieten jedoch auf europäischer Ebene konkurrenzfähig zu machen, wurden seit Mitte der sechziger Jahre großflächige, reliefumgestaltende Rebflurbereinigungen durchgeführt. Am Kaiserstuhl -und auch in den Lössgebieten der Schwarzwald-Vorbergzone und des Tunibergs- errichtete man deshalb ausgedehnte, großterrassierte Flächen.

Das leicht verschiebbare Lockersediment Löss eignete sich sehr gut für solch eine großangelegte Umgestaltung. Von den bis 1982 insgesamt 20 großen Flurbereinigungsmaßnahmen im Kaiserstuhl betrafen auch zwei das Löchernbach Einzugsgebiet. Die erste fand von 1969 bis 1971 statt, die zweite von 1974 bis 1976 (LUFT ET AL., 1983).

Als Vorteile einer Großterrassierung wird vor allem eine wirtschaftlichere Bearbeitung der 40-80 m langen Rebzeilen angeführt, sowie die bessere Erschließbarkeit der Terrassen, da die Gebiete mit einem dichten Netz an geteerten Straßen durchzogen sind.

Um die Terrassen gut mit Maschinen befahren zu können und um der Erosionsanfälligkeit von Lössböden Rechnung zu tragen, wurde versucht, die Terrassen möglichst groß anzulegen. Den Terrassen wurde eine Innenneigung gegen die nächst höher gelegene Terrasse mit durchschnittlich 2-4 ° gegeben, um die Terrassenkanten vor Erosion zu schützen. Ebenso wurden die Riedel -Geländerücken zwischen zwei Tälern- teilweise mit einem umgekehrten Dachprofil versehen, um auch hier die Erosionswirkung zu mindern. Diese Innenneigung hatte jedoch zur Folge, dass sich an der Innenkante der Terrassen Kaltluftseen bildeten, die negative Auswirkungen auf



Abbildung 2.1.3.: Rohr- und Drainagensystem (nach WAGNER, 2002, verändert und erweitert)

den Weinbau gehabt hätten (Frostgefährdung etc.). Die Terrassen nachträglich noch zusätzlich eine Längsneigung, um die kalte Luft abfließen zu lassen.

Die Böschungen weisen Sprunghöhen von durchschnittlich 3-6 m auf, lokal kommen Sprunghöhen von über 20 m vor. Zur Sicherung der Terrassen mussten die Böschungen dementsprechend stabil sein und sind deshalb mit Böschungswinkeln von 1:1 angelegt. Das bedeutete einen Rebflächenverlust von 20 %. MOHR und STADELBAUER (1982) geben sogar einen Flächenverlust von 30 % an.

Zur besseren Bearbeitung bzw. Erschließung mit landwirtschaftlichen Maschinen wurde ein dichtes Wegenetz mit asphaltierten Straßen angelegt. Die Straßen nehmen insgesamt eine Fläche von 4,6 % des Einzugsgebietes ein, bezogen auf die Größe des unterirdischen Einzugsgebietes von 1,8km. Auf den Straßen gebildeter Oberflächenabfluss wird über Einlaufschächte und ein Kanalsystem direkt in den Vorfluter geleitet.

Die Bearbeitung des Geländes mit schwerem Gerät während der Flurbereinigung führte dazu, dass sich der Boden stark verdichtete. Nachträglich wurde verucht, einer verringerten Infiltrationsleistung durch Maulwurfdränung auf 20 % der Fläche

und dem Einbringen von Styromull entgegenzuwirken.

Auch im Talbereich hatten die Verdichtungen dazu geführt, dass sich Stauwasserhorizonte bildeten; um ein Aufnässen des Bodens zu verhindern, sind in 1,2 m Tiefe Drainagen eingebracht, die das Grundwasser bzw. Sickerwasser sammeln und ins Gerinne leiten. Abbildung 2.1.3 auf Seite 9 zeigt das Rohr- und Drainagenetzwerk im Löchernbach.

Die Wirksamkeit bzw. Funktionsfähigkeit der Maulwufdränung ist jedoch fraglich. Bei der Maulwurfdränung werden mit einem sogenannten Maulwurfdränpflug kreisrunde Hohlgänge im Boden gezogen (KAMMERER, 2006). EGGELSMANN (1981, in KAMMERER, 2006) gibt als Wirkungsdauer für maulwurgedränte Flächen 5 bis 10 Jahre an. MERTIN (1965) beobachtete sogar, dass sich die Hohlgänge bereits nach einigen Monaten mit Boden verfüllt hatten, wobei allerdings das Bestehenbleiben des Maulwurfdräns als Hohlgang auf lange Dauer keine Notwendigkeit sei, wenn nach wie vor genügend große Zwischenräume bestehen bleiben. Abbildung 2.1.4 stellt die Veränderung einer Maulwurfdränung im Laufe von 10 Jahren dar.



Abbildung 2.1.4.: Veränderung des Maulwurfdräns nach 10 Jahren (aus FEICHTINGER, 1960; in KAMMERER, 2006)

In den darauf folgenden Jahren kam es während Starkniederschlägen zu schwerwiegenden Erdrutschen an den Terrassenkanten und Böschungen, was zusätzliche Sicherungsmaßnahmen erforderte.

Die Abbildung 2.1.5 auf Seite 11 zeigt einen Querschnitt durch das Löchernbach Einzugsgebiet. Während im Biebental die Innenneigung der Terrassen sehr gut zu erkennen ist, fällt an den Nordhängen des Löcherntals auf, dass die Terrassen zum Tal geneigt sind. In einem Gespräch mit einem ortsansässigen Landwirt stellte sich heraus, dass die Bauern einige Jahre nach den Flurbereinigungen in Teilen des Löchernbach Einzugsgebietes -hauptsächlich auf der Seite des Löchernbach-Arms- die Innenneigung der Terrassen in Eigenregie korrigiert haben. Ebenso ist auf dem Riedel, der das Löcherntal vom Biebental trennt, kein umgekehrtes Dachprofil vorhanden.



Abbildung 2.1.5.: Querschnitt durch das Löchernbach Einzugsgebiet. Der rote Punkt in der oberen Grafik stellt den Kulminationspunkt in der unteren Grafik dar. 4-fach überhöht. Blickrichtung von NW (Löchernbach) bzw WSW (Biebenbach)

2.1.4. Landnutzung

Die Landnutzung im Löchernbach Einzugsgebiet beschränkt sich fast ausschließlich auf Weinbau im Lössgürtel. Der Löss allein ist indes nicht verantwortlich für die Eignung als landwirtschaftliche Nutzfläche, sondern ist durch seinen hohen Silikatanteil eher nährstoffarm; die wichtigen Nährstoffe können jedoch leicht durch zusätzliche Düngung eingebracht werden. "Die Fruchtbarkeit bezieht sich vielmehr auf die Klimagunst des Lössgürtels (warm und nur mäßig feucht), auf die leichte Terrassierbarkeit, Bearbeitbarkeit, Lockerheit, Durchwurzelbarkeit, gute Durchlüftung und hohe Wasserspeicherung des Löss und seiner Böden, die auch Trockenzeiten leicht zu überbrücken hilft" (HÄDRICH und STAHR, 2001).

Die Höhenlagen sind bewaldet, in den Talbereichen gibt es keine festgelegte Landnutzung: Maisfelder, große Blumenbeete, einige Gewächshäuser, Getreidefelder und Obstbäume prägen das Bild.

Ebenso nehmen die Böschungen der Großterrassen aufgrund des Böschungswinkels von 1:1 eine große Fläche ein. Tabelle 2.1.1 auf Seite 13 fasst die Flächenanteile der verschiedenen Landnutzungen zusammen.



Abbildung 2.1.6.: Landnutzung (nach KRÄMER, 1999, verändert)

Abbildung 2.1.6 zeigt die Landnutzung im Löchernbach Einzugsgebiet. Der Talbereich ist aufgrund der kleinräumig immer wieder wechselnden Landnutzung nicht weiter differenziert.

2.1.5. Klimatische Bedingungen

Die klimatische Sonderstellung des Kaiserstuhls beruht auf seiner Lage zwischen Schwarzwald und Vogesen in der Oberrheinebene, aus der er sich heraushebt (LUFT,

	gesamt	Weinbau	Mischkultur	Böschungen	asphaltierte Wege	Wald							
ha	180,1	110,2	33,2	22,1	8,3	6,3							
%	100	61,2	$18,\!5$	$12,\!3$	4,6	3,5							

Tabelle 2.1.1.: Anteile der Landnutzung an der Gesamtfläche

1980a). Nach ENDLICHER (1978) beträgt die mittlere jährliche Sonnenscheindauer mehr als 1700 Stunden, der Kaiserstuhl gehört somit zu den sonnenreichsten Gegenden Deutschlands. Schrepper (1933, in LUFT, 1980a) hebt besonders die hohe Sommerwärme mit auffallend hohen Nachmittags- und Abendtemperaturen hervor. Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei ungefähr 9 °C.

Für die Jahre 1977-1980 und 1990 bis-1995 besteht von zwei benachbarten DWD-Stationen (Mahlkünzig und Adler/Breitenweg) eine Niederschlagszeitreihe (Abbildung 2.1.7).



Abbildung 2.1.7.: Niederschlagsregime für die Stationen Mahlkünzig und Adler/Breitenweg für die Jahre 1977-1980 und 1990-1995 (KRÄMER, 1999; verändert)

Deutlich ist ein Niederschlags-Maximum in den Monaten Mai bis Juli zu erkennen, das Minimum liegt in den Wintermonaten Januar und Februar. Die hohen Niederschläge in den Sommermonaten resultieren aus einem hohen Energieangebot und der daraus folgenden Anfälligkeit für starke Gewitter über dem Kaiserstuhl; diese Ereignisse weisen jedoch eine hohe räumliche Variation auf (LUFT, 1980a). Die potentielle Verdunstung nach Haude beträgt für die Jahre 1972-1975 583,8 mm (LUFT, 1980a), wobei die höchsten Werte im Sommer erreicht werden, bedingt durch das Wasser- und Strahlungsangebot.

2.2. Frühere Studien

Die Beschreibungen beschränken sich auf Arbeiten, die sich auf die Prozessforschung in der Abflussbildung beziehen bzw. darin wichtige Erkenntnisse erbrachten. Die tatsächliche Zahl der in den Versuchsgebieten durchgeführten Arbeiten liegt demnach also höher.

Der Kaiserstuhl bzw. das Hydrologische Versuchsgebiet Ostkaiserstuhl ist schon seit über 30 Jahren Mittelpunkt intensiver hydrologischer Prozessforschung. Während das benachbarte, kleinterrassierte Rippach Einzugsgebiet bereits Anfang der siebziger Jahre untersucht wurde, begann die Prozessforschung im Löchernbach erst nach Ende der Flurbereinigungsmaßnahmen. Der Schwerpunkt der meisten Arbeiten lag in einem Vergleich eines relativ naturbelassenen (Rippach) und eines stark anthropogen veränderten Einzugsgebietes (Löchernbach). Besonders hervorzuheben sind hierbei die vielfältigen Arbeiten von Luft, Keller, Morgenschweis und Demuth. LUFT (1980b) führte Uraninversuche zur Bestimmung des kf-Wertes durch. Der mittlere kf-Wert für das Löchernbach Einzugsgebiet beträgt demnach 0,71*10-5 m/s. Die Bohrlochmethode nach Hooghoudt-Ernst brachte Werte im Bereich von 0,57-1,1*10-5 m/s. Der Aquifer ist nach DIN18130 als durchlässig zu bezeichnen (HÖLTING und

Coldewey, 2005).

LUFT ET AL. (1981) stellten eine deutlich veränderte Abflussbildung im Vergleich zum Rippach fest: auf einen nahezu identischen Niederschlag reagiert das Löchernbach Einzugsgebiet mit einer etwa 24-fach höheren Scheitelabflussspende. MORGEN-SCHWEIS und LUFT (1985) nennen als Folge der Flurbereinigungsmaßnahmen bis zu 12-fach erhöhte Scheitalabflussspenden, bis zu 11-fach höhere Direktabflussbeiwerte, eine Verringerung der Laufzeit von Hochwasserwellen, ein stärkeres Gefälle der Trockenwetterrezessionskurven und einen stark reduzierten Basis- und Niedrigwasserabfluss. Als Begründung für diese einschneidenden Veränderungen werden zum einen das asphaltierte Wegenetz genannt, das für den höheren Direktabfluss verantwortlich ist, und zum anderen eine Wechselwirkung aus durch Bodenverdichtung verringerter Infiltration und durch Drainage verursachter geringerer Perkolation und somit verminderter Grundwasserneubildung.

BUCHER und DEMUTH (1985) erstellten eine Wasserbilanz für die Hydrologischen Versuchsgebiete Ostkaiserstuhl für den Zeitraum vom Mai 1977 bis April 1980 (siehe Tabelle 2.2.1 auf Seite 15). Von Oktober bis März füllen sich die Gebietsspeicher, die Grundwasserneubildung übersteigt also die Verdunstung und den Gebietsabfluss, während das Gebiet im Sommer bedingt durch die höheren Verdunstungswerte einen Netto-Wasserverlust aufweist.

	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
V [%]	2	1	1	2	5	8	16	17	17	15	11	5
Ν	$53,\!3$	$43,\!8$	47,2	48,5	66,1	66,5	93,7	$76,\! 6$	94,1	98,1	41,8	42,2
А	$13,\!6$	15,0	20,9	34,4	25,2	23,7	$31,\!8$	$13,\!6$	$14,\!3$	19,5	8,8	$7,\!9$
N-A	39,7	28,7	26,3	14,1	40,9	41,8	61,9	63,0	$79,\!8$	$78,\! 6$	33,0	$34,\!3$
V	10,8	5,4	5,4	10,8	27,1	43,4	$86,\!8$	92,2	92,2	81,3	$59,\! 6$	27,1
N-A-V	$28,\!9$	$23,\!3$	20,9	3,3	$13,\!8$	-1,6	-24,9	-29,2	-12,4	-2,7	$-26,\!6$	7,2
Vorrat	28,9	52,2	73,1	76,4	90,2	88,4	63,7	$34,\!5$	22,1	19,4	-7,2	$0,\!0$

Tabelle 2.2.1.: Wasserhaushalt für die Jahre 1977 bis 1980 in [mm]. V=Verdunstung,A=Abflusshöhe, N=Niederschlag

DEMUTH und MAUSER (1983) beschäftigten sich mit dem Sedimenttransport in den Hydrologischen Versuchsgebieten Ostkaiserstuhl (Näheres dazu in Kapitel 5.2 auf Seite 41). RIEG ET AL. (1991) untersuchten den Einfluss der anthropogenen Eingriffe auf die Wasserqualität im Löchernbach; es wurde auf die Hauptanionen und -kationen analysiert. Während eines Abflussereignisses ging die Konzentration der gelösten Stoffe zurück; einzig die Ortho-Phosphat-Konzentration (PO_4^{-3}) stieg an. Ein Umstand, den RIEG ET AL. (1991) auf den erhöhten Anteil an Oberflächenabfluss und die damit verbundene höhere Sedimentfracht, an die das PO_4^{-3} gebunden ist, zurückführen. Die erste Hydrologische Modellierung im Löchernbach Einzugsgebiet wurde von VOGELBACHER (1985) mit dem USDAHL-Modell (U.S. Department of Agriculture Hydrograph Laboratory) vorgenommen. BLAU (1996) führte eine N-A-Modellierung mit dem NPSM-Modell (Nonpoint Source Model) durch. BLAU (1996) kam zu dem Ergebnis, dass der Abfluss, aufs Jahr betrachtet, vom Zwischenabfluss dominiert wird (40%), aber auch der Direktabfluss mit 31% zu fast einem Drittel zum Gesamtabfluss beiträgt. Eine Neukalibrierung des Modells mit Isotopendaten lieferte für den Oberflächenabfluss sogar Werte bis 37 %. Als Grund hierfür wird, wie bei den anderen Autoren auch, der hohe Versiegelungsgrad des Einzugsgebietes genannt.

Wichtige Ergebnisse, was die Prozessforschung betrifft, erbrachte UHLENBROOK (1995) mit der Untersuchung der Reaktion der ungesättigten Zone und der Oberflächenkomponente mit Uraninveruchen. Im Talbereich in ca. 700 m Entfernung vom Pegel speiste UHLENBROOK (1995) Uranin ein und beprobte die an das Testfeld mündenden Drainagen und den Pegel. Am Ausgang der Drainage wies der gemessene Uranindurchgang im ansteigenden Ast einen Vorpeak auf, der sich in Form eines kleinen Höckers auszeichnete. Nach dem eindeutigen Hauptpeak folgte im absteigenden Ast eine Konzentrationsschulter. Diese Form der Ganglinie war abgeschwächt auch am Pegel zu beobachten. Nach UHLENBROOK (1995) geht der erste Vorhöcker auf eine einzelne Makropore zurück (z.B. ein Mauseloch oder ein Regen-

wurmkanal). Der Hauptpeak wird mit dem allgemeinen Makroporensystem erklärt, was ein schnelles Weiterleiten des infiltrierenden Wassers gewährleistet. Die Schulter im absteigenden Ast wird mit Stofftransport durch die Bodenmatrix erklärt. Unter der Annahme eines Fließsystems im Boden beträgt die mittlere Verweilzeit des Wassers in der Bodenzone -inklusive der Passage der ca. 350 m Drainageleitungje nach verwendetem Stofftransportmodell 98 bis 156 min. Wenn Makroporen und Matrix als zwei getrennte Fließsysteme betrachtet werden, ergeben sich mittlere Verweilzeiten von 112 min (Makroporen) und 202 min (Matrix). Bereits nach 50 min kam es am Ausgang der Drainage allerdings schon zum Austritt sichtbarer Uranin-Konzentrationen. UHLENBROOK (1995) weist darauf hin, dass die drainierten Felder eine schnelle Reaktion auf Starkniederschläge zeigen und auch bei der Bildung von Direktabflusskomponenten nicht zu unterschätzen sind.

Bei dem von Uhlenbrook durchgeführten Oberflächenversuch wurde etwas oberhalb des Rohres von Diver04 (zur Lage des Rohres siehe Abbildung 6.1.2 auf Seite 46) auf der Straße während eines Niederschlagsereignisses Uranin aufgebracht und am Pegel beprobt. Bereits nach etwas über 20 min wurde am Pegel die maximale Konzentration gemessen, was die große Bedeutung der versiegelten Flächen bei der Hochwasserentstehung nochmals bekräftigt. CUI (1997) wendete des DIFGA-Modell (Differenzenganglinien Analyse) auf das Löchernbach Einzugsgebiet an und führte isotopische und wasserchemische Untersuchungen durch. Basierend auf der Datenreihe von 1977 bis 1980 hat der Direktabfluss einen Anteil von 41 % des Gesamtabflusses und liegt somit in der Größenordnung des von BLAU (1996) errechneten Zwischenabflusses. Für die Sommermonate wird der Direktabfluss sogar mit 50 % angegeben. Eine weitere Modellierung kommt von WAGNER (2002), der das von LANGE (1999) entwickelte nicht-kalibrierte ZIN-Modell auf den Löchernbach anpasste. WAGNER analysierte zwei Ereignisse, bei denen er in der gemessenen und modellierten Abflussganglinie einen Doppelpeak feststellte. Der Doppelpeak wird mit der unterschiedlichen Reaktion des Gebietes erklärt: der erste Peak ist zurückzuführen auf die schnelle Reaktion der Straßen, der zweite Peak wird vom Abfluss von den Terrassen gebildet. Makroporenabfluss lässt sich im absteigenden Ast durch halblogarithmisches Auftragen qualitativ nachweisen.
3. Methodik

In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene hydrologische Methoden verwendet und auch miteinander kombiniert. Ein erster Ansatz bezieht sich auf die reine Auswertung von am Pegel gewonnenen Daten, der zweite Ansatz sieht die Verwendung von Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit als natürliche Tracer vor.

3.1. Der Konvergenzansatz nach Leibundgut

Der Konvergenzanstz nach LEIBUNDGUT (1984) hat seinen Namen durch die Gegebenheit, dass in einem Einzugsgebiet der Abfluss (sowohl der oberirdische als auch der unterirdische) an einem Punkt, dem Einzugsgebiets-Durchbruch, konvergiert. Angaben über die zeitliche und räumliche Verteilung des Wassers im Einzugsgebiet sind im Abfluss verschlüsselt enthalten. So geben zum Beispiel die gemessenen physikalischen Größen Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit Hinweise auf Abflussbildungsprozesse und Herkunftsräume (Grundwasser, Oberflächenwasser etc.).

Mit den am Pegel gemessenen Daten wird nun versucht, über klassische hydrologische Methoden Informationen über das Einzugsgebiet zu erlangen. Es wird versucht, über Abflussbeiwerte, Vorfeuchteinformationen, Niederschlagsdauer, Abflussdauer, Abflussfülle etc. einfache Zusammenhänge der Abflussbildung herauszufinden.

Auswertungen, die sich nur auf Pegeldaten und den Niederschlag beziehen, werden als "black-box"-Ansatz bezeichnet. Dabei wird eine bekannte Eingangsgröße -im vorliegenden Fall der Niederschlag- über eine unbekannte Systemfunktion in eine messbare Ausgangsgröße umgeformt.

Alle gemessenen Ereignisse wurden nach verschiedenen Kriterien untersucht und verglichen.

3.2. Verwendete natürliche Tracer

Die für diese Arbeit verwendeten Tracer sind die natürlichen Tracer Temperatur und elektrische Leitfähigkeit.

3.2.1. Temperatur

Im Gegensatz zu künstlich eingegebenen Markierstoffen, wie z.B. Uranin, ist die Temperatur ein systemimmanenter, natürlicher Tracer.

Die Methode Temperatur als Tracer in hydrologischen Systemen zu benutzen, wurde bereits um 1900 von verschiedenen Forschern praktiziert (ANDERSON, 2005).

Ein großer Teil der Forschung bezieht sich auf Grundwasser-Untersuchungen. Die Feststellung von Fließwegen im Grundwasser und die Bestimmung von Verweilzeiten standen dabei im Vordergrund (z.B. TANIGUCHI, 1993; REITER, 2001; SAKURA, 1993; SCREATON ET AL., 2004; BENDERITTER ET AL., 1993; PAINTER ET AL., 2003; BUNDSCHUH,).

Fluss Grundwasser-Interaktionen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle in der Anwendung von Temperatur als Tracer (z.B. J. CONSTANZ ET AL., 2003; CONSTANZ und STONESTROM, ; FETTE ET AL., 2004).

Studien, in denen die Temperatur zur Klärung von Abflussbildungs-Fragen herangezogen wurde, sind wesentlich seltener und stammen vorwiegend aus Japan und den USA. KOBAYASHI ET AL. (1993) und KOBAYASHI ET AL. (1999) konzentrierten sich vor allem auf die Ganglinienseparation während Schneeschmelzereignissen, wobei neben der Temperatur auch die elektrische Leitfähigkeit verwendet wurde. Eine grundlegende Arbeit zum Thema stammt aus dem Panola Mountain Forschungs-Einzugsgebiet in Georgia, USA. SHANLEY und PETERS (1988) untersuchen dabei die Abflussbildung während Starkniederschlagsereignissen. Damalige Fortschrit-

te in der Datenlogger-Technologie machten es möglich, die Wassertemperatur sehr genau mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu erfassen.

Wenn sich im Gerinne der Anteil der zum Abfluss beitragenden Quellen, z.B. Grundwasser, Bodenwasser, Regenwasserwasser ändert, ist es auch wahrscheinlich, dass sich die Gerinnetemperatur ändert (SHANLEY und PETERS, 1988). Die Temperaturänderung wird umso größer sein, je stärker sich die einzelnen Abflusskomponenten untereinander in der Wassertemperatur unterscheiden. So kann es im Sommer während Basisabflusszeiten nach Niederschlagsereignissen zu einem Anstieg der Gerinnetemperatur kommen, weil das aktuell fallende Niederschlagswasser möglicherweise wärmer ist als der Basisabfluss, der vor allem aus Grundwasser gespeist wird.

Niederschlagswasser kann sich nach SHANLEY und PETERS (1988) auch auf einer bestehenden Festgesteinsoberfläche zusätzlich aufwärmen, was zu einer Erhöhung der Temperaturdifferenz zwischen Basisabfluss- und Niederschlagstemperatur führen kann und somit eine Separation in verschiedene Komponenten erleichtert. Aufgrund der Tatsache, dass im Löchernbach Einzugsgebiet bei Starkniederschlägen das Ereigniswasser eine große Rolle spielt und somit während Ereignissen der Direktabfluss der dominierende Abflussprozess ist, wird in dieser Arbeit versucht, die Abflussbildung während Ereignissen anhand von räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Temperaturmessungen näher zu untersuchen. Bedingt durch die Flurbereinigungsmaßnahmen muss das dichte Straßennetz mit insgesamt 4,6 % Flächenanteil als eigene Abflussbildungszone betrachtet werden.

Da der Zeitraum dieser Arbeit in die Sommermonate fiel, wurde die Temperatur als Tracer benutzt. Basierend auf der Theorie, dass Sommerniederschläge wärmer sind als der Basisabfluss bzw. dass man für diese Zwecke annehmen kann, dass die Niederschlagstemperatur ungefähr gleich der Lufttemperatur ist und dass sich der Niederschlag, der auf das Straßennetz fällt, noch zusätzlich auf den Straßen erwärmt, ist eine zumindest qualitative Separation zwischen Ereignis- und Vorereignis-Wasser bzw. zwischen Basisabfluss und Direktabfluss möglich. Ebenso wird versucht, an den das Straßennetz entwässernden Rohren das "Anspringen" eben dieser Rohre festzustellen, um Aussagen am Pegel über das Zustandekommen der Ganglinie von Abfluss und Temperatur zu machen.

Temperatur kann als idealer, aber nicht-konservativer Tracer angesehen werden. Das heißt, der Transport geschieht mit der Fließgeschwindigkeit des Wassers, die Stärke des Signals ist jedoch durch verschiedene Komponenten, z.B. Lufttemperatur, Fliessdauer etc. beeinflussbar.

Am Institut für Hydrologie sind auch bereits Arbeiten zum Thema Ganglinienseparation mit Temperatur und Leitfähigkeit als Tracer duchgeführt worden (z.B. HUGENSCHMIDT, 2006).

3.2.2. Leitfähigkeit

In einer ersten Gebietserkundung fiel die hohe Leitfähigkeit des Löchernbaches auf. Diese ist zurückzuführen auf den hohen Carbonatanteil des unterliegenden Ausgangsmaterials (Löss; siehe Kapitel 2.1.1). Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Indiz für die Anzahl der gelösten Stoffe in einer wässrigen Lösung. Je mehr Stoffe gelöst sind, desto höher ist dementsprechend die Leitfähigkeit.

Die Leitfähigkeit ist, wie auch die Temperatur, keine konservative Größe, sondern in direktem Maße von der Temperatur abhängig. Mit steigender Temperatur nimmt die Beweglichkeit der Ladungsträger zu, was auch zu einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit führt. Es muss jedoch das Lösungsgleichgewicht der Hauptbestandteile eines Wassers beachtet werden. Da der Löchernbach sehr carbonatreich ist, ist das Verhältnis Temperatur - Leitfähigkeit hier umgekehrt proportional. Die Löslichkeit von Calziumcarbonat CaCO3 nimmt -entgegen der Löslichkeit vieler anderer Stoffemit steigender Temperatur ab (siehe dazu Kapitel 7.2 auf Seite 90).

Zur Vermeidung von falschen Werten im Vergleich von Leitfähigkeiten, wird diese als spezifische Leitfähigkeit angegeben, d.h. die Leitfähigkeit wird auf eine Standardtemperatur (25 °C) normiert. Die Leitfähigkeit einer wässrigen Lösung nimmt zu, je länger der Kontakt des Wassers zum Substrat bzw. Ausgangsgestein besteht (siehe u.a. HÖLTING und COLDEWEY, 2005). Insofern ist es möglich, anhand der Leitfähigkeit zumindest qualitative Aussagen zur Verweilzeit und Herkunftsbestimmung einer Wasserkomponente im Einzugsgebiet zu machen.

3.2.3. Sediment

Sediment wird im Sinn der vorliegenden Arbeit auch als natürlicher Tracer betrachtet. Die Sedimentfracht gibt qualitativ Auskunft über den Herkunftsraum einer Abflusskomponente; so ist z.B. Oberflächenabfluss oft sedimentreicher als Grundwasserabfluss. Mit Hilfe von Sedimentganglinien wird versucht, eine Aussage über etwaigen Terrassenabfluss zu treffen.

3.3. Mischungsrechnungen

Für die Entwässerungsrohre konnten über die Temperatur semi-quantitative Angaben durch Mischungsrechnungen erlangt werden. Die Formel für die Mischungsrechnung ist identisch mit der für die Ganglinienseparation (EMMA: End Member Mixing Analysis) verwendete Formel:

$$Qc = Q_1 c_1 + Q_2 c_2 \tag{3.3.1}$$

mit Q und c als dem Abfluss und dessen Konzentration an einem bestimmten Stoff und Q_1c_1 und Q_2c_2 als die Komponenten des Abflusses mit ihren jeweiligen Konzentrationen des Stoffes, der zur Ganglinienseparation verwendet wird.

Für diese Arbeit wird die Gleichung mit den folgenden Elementen benutzt:

$$Q_u t_u = Q_o t_o + Q_R t_R \tag{3.3.2}$$

mit $Q_u t_u$ als dem Abfluss in Prozent im Gerinne oberhalb des Rohres und der zugehörigen Wassertemperatur in [°C], $Q_o t_o$ als dem Abfluss in Prozent unterhalb der Rohreinmündung mit der entsprechenden Temperatur und $Q_R t_R$ als dem Abfluss im Entwässerungsrohr mit der jeweiligen Temperatur.

Um nun den Anteil des Rohres am Abfluss auszurechnen, wird die Formel nach Q_R umgestellt:

$$Q_R = Q_o \frac{t_o - t_u}{t_o - t_R}$$
(3.3.3)

Da keine Abflüsse in Volumen pro Zeit errechnet werden können, wird Q_R in [%] angegeben; hierfür wird Q_o gleich 100 % gesetzt.

Für einige der Rohre konnten aufgrund der Wasserstandsmessungen mit den Divern hydraulisch Abflüsse mit der Formel nach *Prandtl-Colebrook* berechnet werden:

$$Q = A\left(-2 \cdot lg\left(\frac{2, 5 l \cdot v}{d\sqrt{2 \cdot g \cdot S \cdot d}} + \frac{k}{3, 7 l \cdot d}\right)\right)\sqrt{2 \cdot g \cdot S \cdot d}$$
(3.3.4)

- Q Abfluss in l/s
- A durchströmte Fläche
- v kinematische Viskosität; bei 20 °C 10⁻⁶ m²/s
- g Erdbeschleunigung 9,81 m/s²
- k Rauhigkeit; 0,75 mm
- d Rohrdurchmesser; 60 cm
- S Gefälle des Rohrabschnittes

Die Berechnungen wurden mit dem Programm Abflussbemessung Version 1.6 der Firma Softwarelösungen Hucke & Pülz durchgeführt. Das Gefälle der Rohrabschnitte wurde aus dem von der LUBW zur Verfügung gestellten DGM ermittelt, bezieht sich jedoch auf das Gefälle der Geländeoberfläche und nicht direkt auf die Rohre.

4. Messnetz

Um die für die vorliegende Arbeit benötigten Daten zu erlangen, war die Einrichtung eines adäquaten Messnetzes unumgänglich, da die Aufgabenstellung Daten erforderte, die in diesem Umfang und in der Art der Daten im Löchernbach zum größten Teil noch nicht erhoben worden sind.

4.1. Hydrometrische Ausstattung

4.1.1. Niederschlag

Ein Pluvio der Firma *OTT Messsysteme* wurde ungefähr im Einzugsgebietsschwerpunkt aufgestellt, an demselben Ort, der auch schon von WAGNER (2002) und UH-LENBROOK (1995) genutzt wurde. Der Vorteil dieses Standpunktes liegt darin, dass das Gerät auf Privatgrund montiert ist und somit Schutz vor Vandalismus bzw. Datenverfälschung durch z.B. Wanderer gewährleistet ist. Abbildung 4.1.1 auf Seite 25 zeigt den Standort des Pluvios im Einzugsgebiet. Die OTT-Pluvios messen nach dem Wägeprinzip mit einer Genauigkeit von 0,01 mm/min und können Intensitäten bis 15 mm/min registrieren. Die Auffangfläche beträgt wie beim Hellmann Niederschlagsmesser 200 cm², die Höhe der Auffangfläche liegt einen Meter über Grund. Der Niederschlagsmesser im Einzugsgebiet wurde alle 10 Tage ausgelesen.

4.1.2. Abfluss, Temperatur, Leitfähigkeit (Pegel)

Das Löchernbach Einzugsgebiet ist mit einem 4,5 ft H-flume-Pegel ausgestattet. Diese Art von Pegel erlaubt die Wasserstandsmessung bei geringen Abflüssen, hat aber genügend Kapazität, um auch hohe Abflüsse zu erfassen. Die 4,5 ft beziehen sich auf die maximale Einstauhöhe von 1,39 m; das entspricht einem Abfluss von 2,48 m³/s. Am Pegel wurden der Wasserstand, die Wassertemperatur und die elektrische Leitfähigkeit mit einem Micromec Datenlogger erfasst. Da der Pegel zuletzt von WAGNER (2002) benutzt wurde, musste in einem ersten Schritt abgelagertes Sediment bzw. bereits gebildeter Boden (die Sedimenthöhe im Einlaufbereich betrug 40 bis 50 cm) aus dem Pegelraum entfernt werden. Der Pegelschacht war bereits vor WAGNER (2002) schon länger nicht mehr benutzt worden und daher vollständig mit Schilf zugewachsen, das auch erst ausgeräumt werden musste, bevor die nötigen Geräte installiert werden konnten. Auch musste unterhalb des Pegels das Gerinne auf einigen Metern etwas eingetieft werden, damit sich der Wasserspiegel im Becken hinter dem Pegel senkte, um einen kompletten Wasser-Überfall zu gewährleisten, da es ansonsten zu Rückstau im Pegel gekommen wäre und die Wasserstand-Abfluss-Beziehung keine uneingeschränkte Gültigkeit mehr gehabt hätte.

Der gemessene Wasserstand wurde anhand folgender Wasserstands-Abfluss-Beziehung in einen Abfluss umgerechnet:

$$Q = 10^{[(0,23377(lgW)^2 + 1,2843(lgW - 0,4312)]}$$
(4.1.1)

mit Q als dem Abfluss in [l/s] und W als dem Wasserstand in [cm].

Wenn der maximale Wasserstand von 139 cm überschritten wird, tritt eine zweite Regressionsbeziehung in Kraft, die sich auf einen Überstau-Bereich bezieht und Ab-flussmessungen bis zu einem Wasserstand von 166 cm (ca. $5 \text{ m}^3/\text{s}$) erlaubt.

Der Speicher des Micromecs bot bei einminütiger Aufzeichnung der Werte Platz für ca. acht kontinuierlich gemessene Tage. Effektiv wurde der Pegel alle fünf Tage ausgelesen.

4.1.3. Wasserstand, Temperatur, Leitfähigkeit (Diver-Sonden)

An vielen Punkten im Gerinne wurden CTD-Diver der Firma Van Essen Instruments (Delft, Niederlande) installiert. Die CTD-Diver erfassen in hoher zeitlicher Auflösung Druck [mbar], Temperatur [°C] und elektrische Leitfähigkeit [μ S/cm]. Da der Druck sowohl die über dem Diver liegende Wassersäule umfasst als auch die auflastende Luftsäule, ist eine Kompensierung um den Luftdruck notwendig. Hierzu wurde in der Nähe des Pegels ein Baro-Diver in einen Baum gehängt, der nur den Luftdruck und die Lufttemperatur misst. Die von Van Essen Instruments mitgelieferte Auswerte-Software LDM (LoggerDataManager) umfasst zwar ein Tool für die Luftdruckkompensation, aufgrund beschriebener Probleme mit diesem automatisierten Vorgehen (z.B ADOLPH (2005)) wurde allerdings von vornherein auf diese Methode verzichtet und stattdessen eine manuelle Kompensation mit einem Tabellenkalkulationsprogramm vorgenommen.



Abbildung 4.1.1.: Standorte der Diver und des Pluvios

Die Diver können insgesamt 16.000 Messwerte im internen Speicher ablegen. Bedingt durch die Messanordnung und der in der Literatur beschriebenen schnellen Gebietsreaktion des Löchernbachs wurde ein Messintervall von einer Minute festgelegt, was einem Ausleseintervall von 11,1 Tagen entspricht. Effektiv wurden die Diver alle 10 Tage ausgelesen.

Die Diver wurden ursprünlich entwickelt, um im Grundwasser eingesetzt zu werden. ADOLPH (2005) weist jedoch darauf hin, dass unter bestimmten Umständen auch ein Einsatz in Oberflächengewässern möglich ist. Wichtig ist, dass die Diver in einem strömungsberuhigten Bereich installiert werden, damit Wellenschlag vermieden werden kann.

Gerade wenn nach Niederschlagsereignissen der Abfluss anstieg, konnte jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass die Bereiche, in denen die Diver installiert waren, noch strömungsberuhigt waren. Aber auch zu Basisabflusszeiten weisen die Wasserstandsganglinien teilweise zwei bis drei Zentimer große Sprünge auf, die nicht einfach mit Wellenschlag erklärt werden können. In einigen Fällen wurde deshalb auf eine Aggregierung zu dreiminütigen Mittelwerten zurückgegrifen, was zu einer leichten Glättung der Ganglinie führte, aber noch keinen Informationsverlust gerade im Peakbereich bedeutete.

Die Genauigkeit der Leitfähigkeitsmessung wird von Van Essen Instruments mit $\pm 50 \,\mu\text{S/cm}$ angegeben. Abbildung 4.1.1 auf Seite 25 gibt einen Überblick über die Orte, an denen Diver im Einzugsgebiet ausgebracht waren.

4.1.4. Temperatur



Abbildung 4.1.2.: Standorte der Stowaways

Zur Erfassung der Wassertemperatur standen insgesamt 18 Optic StowAway Temp-Datenlogger der Firma Onset Computer Corporation (Massachusetts, USA) zur Verfügung, von denen maximal 16 gleichzeitig im Einsatz waren. Bei der ersten Geländeerkundung wurden mit Hilfe eines Leitfähigkeitsmessgerätes LF 92 der Firma WTW (Wissenschaftlich Technische Werkstätten) interessante Stellen für die Platzierung der Temperaturlogger gesucht. Die Logger wurden demnach an wichtigen Stellen im Gerinne, in einigen Rohren und auch in mehreren Grundwasserdrainagen installiert, um einen möglichst genauen Überblick über die Wassertemperaturen im Gebiet zu erlangen. Abbildung 4.1.2 zeigt die Orte, an denen während der Messkampagne Stowaway-Logger platziert waren. Die Logger haben eine Auflösung von 0,16 °C und werden mit einer Genauigkeit von 0,2 °C angegeben.

Auch hier wurde als Messintervall eine Minute eingestellt, um keine relevanten Informationen zu verlieren. Der 8 Kilobyte Speicher des Logger fasst 7944 Werte, bei einem 1-Minuten-Intervall bedeutet dies einen Speicherzeitraum von 5,5 Tagen. Effektiv wurden die Stowaways bis auf wenige Ausnahmen alle fünf Tage ausgelesen.

4.1.5. Sediment

Für die Beprobung der Sedimentfracht wurde während einiger Ereignisse ein APEG (Automatisches Probe-Entnahme-Gerät) benutzt. Das Probenahmeintervall wurde auf drei Minuten eingestellt, je Durchgang wurden 42 Flaschen mit je 100 ml Bachwasser befüllt.

Da gezielt Ereignisse gemessen werden sollten, war es notwendig, den APEG automatisch starten zu lassen; der Start der Probenahme wurde durch den Wasserstand getriggert. Das heißt, sobald ein bestimmter Wasserstand überschritten war, schaltete sich der APEG ein. Als Startwert wurde ein Wasserstand von 11 cm gewählt. Ein niedrigerer Wasserstand hätte unter Umständen zur Beprobung von zu geringen Ereignissen geführt, bei einem höheren Startwert wäre zu viel vom ansteigenden Ast der Abflussganglinie gekappt worden.

4.2. Probleme

Im Rahmen der Messkampagne wurden nach und nach einige Probleme deutlich, die sich zum Teil in der Qualität der Messungen niederschlugen, sich auf der anderen Seite aber auch nicht vermeiden ließen.

4.2.1. Befestigung der Stowaways und Diver

Der Idealfall für die Befestigung der Logger wäre wie bei HUGENSCHMIDT (2006) die zentrale Befestigung mit Heringen direkt im Gerinne gewesen. Der Löchernbach ist allerdings in vielen Bereichen -z.B. bei den Einleitungen der Rohre ins Gerinnekünstlich zu einem trapezförmigen Profil aus Stein und Beton umgebaut worden: eine Befestigung in diesem Bereich war demnach nicht möglich. Auch im restlichen Gerinne gestaltete sich die Verankerung der Logger teilweise recht schwierig. Das ganze Gerinne ist mit Stahldraht und Stahlstiften verstärkt und hat einen sehr harten, steinigen Untergrund. An den meisten Stellen ließen sich die Heringe nicht ins Gerinnebett treiben. Die Stowaways wurden daraufhin an kleinen Metallträgern befestigt, die an einem dünnen Stahldraht hingen. Der Draht wurde dann mit Heringen in der Gerinneböschung fixiert, und die Logger hingen von der Böschung in das Gerinne herab. Je nach Größe der Ereignisse kam es vor, dass die Temperatur-Logger aus dem Gerinne gespült wurden und sich nicht mehr im Wasser befanden. Nachfolgende Ereignisse konnten von den betreffenden Loggern somit nicht mehr aufgezeichnet werden. Viele der (größeren) registrierten Ereignisse weisen daher zum Teil Datenlücken auf. Eine aufwändigere Befestigung der Logger -z.B. mit Bohrlöchern- wäre jedoch nicht zweckmäßig gewesen, da die Logger teilweise nur kurze Zeit an einem bestimmten Ort angebracht waren und dann umgesetzt oder ausgewechselt wurden.

Ebenso problematisch gestaltete sich die Positionierung in den Rohren. Da diese aus Beton bestehen, wäre auch hier eine dauerhafte Befestigung nicht ohne großen Aufwand -und Beschädigung der Rohre- möglich gewesen. Stattdessen wurden sowohl die Stowaways als auch die Diver an Stahlseilen und Heringen in der Böschung verankert und ins Rohr hineingehängt. Das hatte zur Folge, dass ebenfalls bei größeren Ereignissen die Geräte aus dem Rohr gespült wurden und auch keine vernünftigen Werte mehr lieferten.

4.2.2. Wasserstandsschwankungen

Der Pegel ist der einzige Punkt im Gerinne, an dem der Abfluss im Löchernbach Einzugsgebiet dauerhaft quantitativ erfasst wurde. Die Diver registrieren zwar auch den Wasserstand an verschiedenen Stellen im Einzugsgebiet, doch ist für die Umrechnung von Wasserstand in einen Abfluss eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung notwendig, die für keinen Abschnitt im Gerinne vorliegt. Die definierten, festen Querschnitte bei den Rohreinmündungen eignen sich wegen beschriebener mangelnder Befestigungsmöglichkeiten nicht für eine Abflussmessung, zumal sich die beiden einzigen Diver, die direkt im Gerinne angebracht waren, kurz vor dem Zusammenfluss von Biebenbach und Löchernbach in unbefestigten Gerinnestücken befanden.

Gleichermaßen ist die Wasserstandsmessung bei allen Divern kritisch zu betrachten. Infolge der nicht idealen Befestigungsmöglichkeiten und geringfügigen Gerinneveränderungen nach starken Abflussereignissen war die Lage der Diver an ihrem Standort nicht immer identisch. Das hat zur Folge, dass der an den Divern gemessene Wasserstand zu Zeitpunkten mit identischem Abfluss teilweise unterschiedlich ausfällt. Da der Wasserstand jedoch meist nur als qualitatives Merkmal zur Abflussveränderung herangezogen wird, ist dieser Umstand eher nebensächlich.

4.2.3. Reaktionszeiten der Logger

Der Löchernbach ist ein durch die verändernden anthropogenen Maßnahmen sehr schnell auf Niederschlagsereignisse reagierendes Gebiet.



Abbildung 4.2.1.: Verlauf der Temperaturen beim Reaktionszeiten-Versuch

Im Falle eines Loggers, der in einem Rohr zur oberflächlichen Entwässerung der Straßen installiert ist, kann folgendes Szenario auftreten: Der Logger zeigt entweder die Temperatur des Basisabflusses -sofern auch Grundwasser in das Rohr drainiert wird-, die Lufttemperatur oder die Temperatur des noch im Rohr gestauten Wassers. Bei einsetzendem Oberflächenabfluss wird der Logger von wärmerem Wasser umspült und die Temperatur steigt. Die vom Logger registrierte Temperatur steigt jedoch nicht in dem Maße wie die Temperatur des ihn umgebenden Wassers. Beim Maximum der Wassertemperatur hat der Logger diese Temperatur jedoch noch nicht erreicht und registriert noch einen kühleren Wert. Wenn die Temperatur des Oberflächenabflusses wieder abklingt, steigt die Temperatur der Logger möglicherweise aufgrund der Wärmespeicherkapazität des Plastik-Gehäuses noch kurz weiter an, verringert sich dann aber auch wieder. Die wahre Peak-Temperatur wurde nicht erfasst.

Zur Überprüfung der Reaktionszeiten der Temperaturlogger wurde ein kleiner Versuch durchgeführt. Zu Testzwecken wurden drei Stowaways verwendet; einer davon diente als Referenztemperatur und wurde einige Zeit vor den beiden anderen in einen Behälter mit warmem Wasser gelegt, um die Wassertemperatur anzunehmen. Die beiden anderen wurden 10 Minuten nach Logger-Start ins Wasser gelegt. Die Ergebnisse dieses Tests sind in Tabelle 4.2.1 zusammengefasst, Abbildung 4.2.1 auf Seite 29 zeigt die Temperaturverläufe.

	Referenz	Stow01	Stow02
Beginn [°C]	$32,98 \\ 32,59$	25,90	25,91
nach 4 min [°C]		31,77	31,97
erreichte Differenz		88%	90%

Tabelle 4.2.1.: Reaktionszeiten-Versuch der Stowaway-Temperaturlogger

Nach vier Minuten haben die Logger ungefähr 90 % des Temperatursprungs bewältigt. Weitere zwei Minuten vergehen, bis die Temperatur dem Fehlerbereich entsprechend vollständig angeglichen ist. Die Angleichung geht umso schneller vonstatten, je größer die Temperaturdifferenz ist.

Bei kurzen Niederschlagsereignissen bzw. geringen Kontaktzeiten der Logger mit dem Oberflächenabfluss muss also davon ausgegangen werden, dass die Peak-Temperaturen unter Umständen nicht bzw. nicht korrekt erfasst werden.

4.2.4. Zeitsynchronisation

Die Zeitsynchronisation zwischen den unterschiedlichen Messgeräten ist ein auf den ersten Blick möglicherweise trivial erscheinendes Problem.

Insgesamt waren im Rahmen der Messkampagne mit dem Pegel, dem Niederschlagsmesser, den Divern und den zahlreichen Temperatur-Loggern vier verschiedene Geräte-Typen im Einsatz, die alle eine eigene Zeiteinstellung aufweisen. Die Stowaways wurden mit der Computerzeit des Rechners im Computerraum gestartet, die Diver liefen mit der Systemzeit des Feldlaptops; der Micromec und der Pluvio haben eigene Systemzeiten.

In einem makroskaligen Einzugsgebiet ist der Fehler relativ gering, der aus nicht genau zeitsynchronisierten Messgeräten resultiert. Im Löchernbach jedoch, einem mikro- bis mesoskaligen Gebiet mit sehr schnellen Reaktionszeiten auf Niederschlagsereignisse, ist dieser Mangel an Genauigkeit indes nicht mehr zu vernachlässigen.

Da teilweise Stowaways und Diver in unmittelbarer Nähe zueinander benutzt wurden und Daten von beiden benötigt waren, um z.B. an einigen Rohren die Mischungsrechnungen durchzuführen, war es notwendig, dass der Zeitversatz zwischen beiden Geräten möglichst eine Minute nicht überschreitet. Um das zu gewährleisten, wurde neben dem am Pegel befindlichen Baro-Diver ein Stowaway aufgehängt. Die Temperaturkurven der beiden Logger wurden dann vor der Auswertung in ein Diagramm geplottet; der Zeitversatz in den Peaks wurde durch entsprechende Zeitkorrektur des Baro-Divers berichtigt; der so herausgefundene Zeitunterschied wurde dann bei allen Divern bereinigt.

4.2.5. Wasserstand am Pegel

Die Drucksonde am Pegel hat eine Auflösung von einem Zentimeter. Abbildung 4.2.2 zeigt ein Nomogramm zur Fehlerabschätzung bei verschiedenen Wasserständen, ausgehend von drei Wasserstandsanzeigegenauigkeiten. Daraus wird ersichtlich, dass bei einem Wasserstand von 5 cm (3,8 l/s) der relative Fehler des Abflusses bei über 30 % und bei einem Wasserstand von 4 cm (2,7 l/s) bei ca. 40 % liegt. Der relative Fehler nimmt mit steigendem Wasserstand ab, erreicht bei 20 cm (43,2 l/s) aber noch einen Wert von ungefähr 10 %.

Aus diesem Grund sind insbesondere bei Basisabfluss die Wasserstände kritisch zu betrachten.



Abbildung 4.2.2.: Nomogramm zur Fehlerabschätzung des Abflusses anhand des Wasserstandes. Aus LUFT ET AL. (1981)

4.2.6. Mischungsrechnungen

Bei den Mischungsrechnungen erweist sich die Auflösung der Temperaturlogger als Schwierigkeit, die eine kontinuierliche Mischungsrechnung für jedes Rohr unmöglich macht. Besonders im abfallenden Ast der Temperaturlinie kommt es aufgrund der Auflösung von 0,16 °C immer wieder zu Überschneidungen der Ganglinien der einzelnen Logger. Die Temperatur unterhalb eines Rohres setzt sich -Erwärmung bzw. Abkühlung durch die Lufttemperatur wird aufgrund der geringen Entfernung der Logger zueinander vernachlässigt- aus dem Abfluss oberhalb des Rohres und des Rohres selbst zusammen und müsste im Normalfall zwischen diesen beiden Temperaturen liegen. Es kann allerdings vorkommen, dass die Temperatur unterhalb des Rohres entweder gänzlich über oder unter den beiden anderen Temperaturen verläuft (siehe Kapitel 6 ab Seite 45). Verantwortlich hierfür sind zum einen die bereits genannte Auflösung als auch der geringe Zeitversatz zwischen den Loggern, der zum einen aus der räumlichen Entfernung der Logger zueinander resultiert als auch aus der zeitlichen Auflösung der Messintervalle auf eine Minute. Mischungsrechnungen an diesen Punkten liefern dann negative oder die 100 überschreitende Prozentwerte. Aus den genannten Gründen wurden Mischungsrechnungen nur für klar definierte Punkte der Temperaturganglinien vorgenommen; die Temperatur wurde dabei auf den Fehlerbereich von 0,2 °C gerundet.

4.3. Messzeitraum



Abbildung 4.3.1.: Niederschlag und Lufttemperatur während der Messperiode

Der Messzeitraum erstreckte sich insgesamt vom 10. Mai bis zum 22. August 2007.

Abbildung 4.3.1 auf Seite 32 verdeutlicht den Verlauf des Niederschlages und der Lufttemperatur.

Im April befand sich ein stabiles Hochdruckgebiet über Süddeutschland, das um den 14. Mai nur kurz unterbrochen wurde, sich aber bis zu einem Kaltlufteinbruch Ende Mai halten konnte. Die Monate Juni und Juli waren insgesamt sehr wechselhaft mit vielen warmen Tagen, aber auch großen Niederschlägen. Erst Anfang August kam es nach einem erneuten Kaltlufteinbruch zu einer längeren Trockenperiode, die fast bis zum Ende des Messzeitraumes andauerte.

Insgesamt fielen in der etwas über dreimonatigen Messperiode 396 mm Niederschlag; obwohl der Mai und der August nicht vollständig gemessen wurden, sind das über 30 mm mehr, als in der Periode 1977 bis 1980 in den Monaten Mai bis August fielen.

5. Auswertung der Pegeldaten

5.1. Ergebnisse und Interpretation

Abbildung 5.1.1 zeigt die Abflussganglinie am Pegel in Kombination mit dem Niederschlag .



Abbildung 5.1.1.: Niederschlag und Abflussganglinie

Während bis Ende Mai aufgrund der Wetterlage keine oder nur kleine Ereignisse registriert wurden, konnte am 1. Juni das erste Ereignis mit über 100 l/s Scheitelabfluss gemessen werden. Von Ende Juni bis Anfang August kam es dann relativ regelmäßig zu größeren und großen Ereignissen, Anfang August, kurz vor Beginn der längeren Trockenperiode, fand ein ca. 2-tägiger Dauerregen statt, der das Gebiet anscheinend aufsättigte.

Das größte Ereignis wurde am 21. Juni gemessen. Nach einem $2\frac{1}{2}$ stündigen Niederschlag mit 24,2 mm stieg der Abfluss von 3,8 l/s auf 1491 l/s an (Jährlichkeit von ca. 3 Jahren). Das zweitgrößte gemessene Ereignis überschritt die 1 m^3 /s Grenze ebenfalls: nach zwei Stunden und 25,1 mm Niederschlag erreichte der Abfluss einen Peak von 1030 l/s (Jährlichkeit von ca. 2 Jahren).

Das drittgrößte Ereignis erzielte nach einem etwas über vierstündigen Niederschlag mit 10,9 mm Niederschlagsmenge noch einen Abfluss von 419 l/s (Jährlichkeit von ca. 0,5 Jahren).

Insgesamt wurden im Laufe der Messperiode 73 durch verschiedene Niederschläge unterscheidbare Abflussereignisse gemessen (einige Ereignisse gingen ineinander über, ließen sich aber dennoch gut einzelnen Niederschlägen zuweisen). Ein Vergleich dieser 73 Ereignisse (siehe die Tabellen B.0.7 und B.0.8 auf den Seiten 115 und 119 im Anhang) untereinander lässt eine auf den Peakabflüssen basierende Klassifikation in verschiedene Ereignis-Klassen zu.

Tabelle 5.1.1.: Ereignis-Klassierungen

<u>1/1</u>	<10	10.00	00 50	F00 100	100 050	> 050
nasse [1/s]	< 10	10-20	20-50	500 - 100	100-250	$>\!\!250$
Ereignisse	25	12	13	11	8(9)	3

Die Unterteilung umfasst sechs Klassen, die in Tabelle 5.1.1 mit der jeweiligen Anzahl der gemessenen Ereignisse dargestellt werden. Der Wert in Klammern bei der Klasse 100-250 l/s bezieht sich auf die Gesamtzahl der gemessenen Ereignisse in dieser Größenordnung. Ein Ereignis von Anfang August konnte jedoch nicht verwendet werden; binnen 13 Stunden fielen 34 mm Niederschlag mit zahlreichen Niederschlagsspitzen, was eine Separation in einzelne Abflussereignisse aufgrund des Niederschlags unmöglich machte.

Tabelle 5.1.2 zeigt die Niederschlagsklassen mit einigen berechneten Kennwerten.

			0				
Klasse	$\begin{array}{c} {\rm Peak} \\ [\rm l/s] \end{array}$	Peak-Dauer [min]	N-Menge [mm]	N-Menge in 10 min [mm]	Max. Int. [mm/h]	N-max bis Peak-Mitte [min]	Abfluss- beiwert [%]
$\begin{array}{c} <\!10\\ 10\text{-}20\\ 20\text{-}50\\ 50\text{-}100\\ 100\text{-}250\\ >\!250\end{array}$	$6,5 \\ 14,8 \\ 30,0 \\ 77,1 \\ 182,0 \\ 980,1$	$60 \\ 13 \\ 5 \\ 2 \\ 2 \\ 1$	$1,7 \\ 2,6 \\ 5,5 \\ 6,7 \\ 8,0 \\ 21,8$	$\begin{array}{c} 0,54\\ 0,86\\ 1,31\\ 2,10\\ 3,53\\ 6,20 \end{array}$	$\begin{array}{r} 4,82\\ 5,94\\ 11,86\\ 15,63\\ 34,84\\ 49,70\end{array}$	$67 \\ 55 \\ 46 \\ 38 \\ 32 \\ 24$	2,5 2,6 3,9 5,6 5,9 7,9

Tabelle 5.1.2.: Niederschlagsklassen mit Durchschnitts-Kennwerten

Mit steigendem Abflusspeak geht die durchschnittliche Dauer des Peaks zurück. Das liegt daran, dass bei den kleinen Ereignissen oft kein klar definierter Niederschlagspeak vorhanden war und es sich oft nur um eine minimale Erhöhung des Basisabflusses handelte und nicht um einen tatsächlichen Abflussscheitel. Wie Abbildung 5.1.2 veranschaulicht, besteht zwischen der maximalen Niederschlagsintensität und dem Zeitraum bis zum Erreichen des Peaks ein abnehmend exponentieller Zusammenhang. Je höher die maximale Niederschlagsintensität ist, desto schneller wird am Pegel der Peakabfluss erreicht. Während nach kleinen Niederschlagsereignissen der Peakabfluss erst nach durchschnittlich 67 min erreicht wird, verkürzt sich dieser Zeitraum bei den großen Ereignissen auf unter 30 min. Mit den aus den Ereignisanalysen gewonnenen Erkenntnissen kann dies auch erklärt werden. Da eine höhere Niederschlagsintensität zwangsläufig über einen bestimmten Zeitraum hinweg auch eine höhere Niederschlagsmenge bedeutet, ist das Abflussvolumen im Gerinne höher als bei Ereignissen mit niedrigerer Intensität; die Fließgeschwindigkeit nimmt zu, was zu einem schnelleren Erreichen der Scheitelabflusswelle am Pegel führt (vergleiche hierzu Abbildung 6.6.1 auf Seite 80).



Abbildung 5.1.2.: Zusammenhang zwischen Niederschlags-Intensität und Dauer bis zum Abflusspeak anhand der gebildeten Abflussklassen

Parallel zur Niederschlagsintensität steigt auch die Niederschlagsmenge an. Hier muss jedoch unterschieden werden zwischen der Niederschlagsmenge des gesamten Ereignisses und der Niederschlagsmenge, die rund um die höchste Intensität fällt. Die Gesamtniederschlagsmenge allein ist noch kein Indiz für die Größe eines Ereignisses. Ebenso erweist sich die Niederschlagsdauer als kein brauchbarer Kennwert für die Klassifizierung, da kein Zusammenhang zwischen der Niederschlagsmenge und der Dauer des Niederschlagsereignisses besteht (siehe dazu Abbildung 5.1.3).



Abbildung 5.1.3.: Zusammenhang zwischen Niederschlagsmenge und Niederschlagsdauer für alle 73 Ereignisse

Die in Tabelle 5.1.2 auf Seite 36 angegebenen Abflussbeiwerte beziehen sich nur auf den Direktabfluss; der Basisabfluss wurde als vertikale Linie bis zum Ereignisende angenommen. Diese starke Vereinfachung entspricht natürlich nicht den tatsächlichen Begebenheiten, aus Zeitmangel wurde jedoch auf eine genauere Basisabfluss-Abtrennung verzichtet.

Die gemessenen Abflussbeiwerte unterscheiden sich sehr stark von den Abflussbeiwerten, die von anderen Autoren im Löchernbach errechnet worden sind. So geben LUFT ET AL. (1983) für sechs Ereignisse im Sommer 1978 Abflussbeiwerte bis zu 19,3 % für das Löchernbach Einzugsgebiet an. Für Einzelereignisse -ohne Beeinflussung durch vorangehende oder nachfolgende Ereignisse- liegen die größten Abflussbeiwerte, die in der Messperiode registriert wurden, meist bei unter 10 %. Es muss jedoch angeführt werden, dass die von LUFT ET AL. (1983) untersuchten Ereignisse Scheitelabflüsse von teilweise mehr als 3 m^3 /s aufwiesen und somit weitaus größer waren als das für diese Arbeit größte gemessene Ereignis.

Ebenso wurden für die Messperiode monatsweise Abflussbeiwerte erstellt (Tabelle 5.1.3 auf Seite 39). Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Monate Mai und

	Mai	Juni	Juli	August	gesamt		
Abfluss [mm]	3,5	$11,\!2$	8,5	$12,\!8$	36,0		
Niederschlag [mm]	$57,\!3$	$131,\!4$	104, 4	$91,\!8$	356,4		
Abflussbeiwert [%]	6,1	8,5	8,1	$13,\!9$	10,1		

August nicht als vollständige Monate in die Bilanz eingehen.

Tabelle 5.1.3.: Abflussbeiwerte vom 18.5. bis 22.8.

Mit den Angaben aus Tabelle 2.2.1 auf Seite 15 lassen sich für die Jahre 1977 bis 1980 Abflussbeiwerte berechnen, die mit 15,2% (Juli) bis hin zu 33,9% (Mai) deutlich über den Werten liegen, die für den Messzeitraum der vorliegenden Arbeit berechnet wurden, und dass, obwohl der Niederschlag im Zeitraum 1977 bis 1980 geringer ausfiel.

Als Erklärung für Unterschiede in den Abflussbeiwerten können mehrere Punkte aufgeführt werden. Zum einen wurde in allen früheren Studien von einer Einzugsgebietsgröße von 1,7 ha ausgegangen, obwohl das unterirdische Einzugsgebiet mit 1,8 ha angegeben wird. Wenn eine geringere Einzugsgebietsgröße in die Kalkulation einläuft, erhöht sich die Abflusshöhe und somit auch der Abflussbeiwert. Dies allein kann den enormen Unterschied in den Werten jedoch nicht erklären.

Ein wesentlich schwerer wiegender Fehler dürfte in der Abflussmessung selbst zu suchen sein. Während der Pegel bei früheren Studien eine Wasserstandsauflösegenauigkeit von einem Millimeter hatte, kann die für diese Arbeit verwendete Sonde den Druck lediglich mit einer Genauigkeit von einem Zentimeter auflösen, was insbesondere im Niedrigabflussbereich zu einem großen Fehler führt (siehe Kapitel 4.2.5 auf Seite 31).

Eine ausreichende Begründung kann jedoch nicht gefunden, der größte Fehler für diese doch beträchtlichen Unterschiede dürfte jedoch in der Genauigkeit der Abflussmessung zu suchen sein. Dies spielt allerdings eher eine Rolle bei der Berechnung des Abflussbeiwertes für den gesamten Messzeitraum als für die ereignisbasierten Abflussbeiwerte, da der relative Fehler in der Abflussmessung bei steigenden Wasserständen abnimmt und ohnehin nur der Ereignisabfluss zur Berechnung herangezogen wurde.

Bei einer näheren Betrachtung der Tabellen B.0.8 und B.0.7 auf den Seiten 119 und 115 im Anhang fällt jedoch auf, dass auch gleiche Niederschlagsintensitäten in den seltensten Fällen komplett identische Abflusspeaks hervorrufen, es müssen also noch andere Faktoren berücksichtigt werden.

Da keine Bodenfeuchtemessungen vorlagen, wurde versucht, über eine vereinfach-

te Variante des "antecedent precipitaion index" (api) die Vorfeuchtebedingungen zu charakterisieren. Der api $_x$ gibt ganz einfach die Summe des Niederschlags in den vorangegangenen x Tagen an. Der api ist jedoch nur bedingt brauchbar, um wirklich gute Aussagen über die im Gebiet zu einem bestimmten Zeitpunkt vorherrschende (Boden-)Feuchte zu machen. Wenn beispielsweise nach einem Niederschlag der nächste Tag entweder heiss und strahlungsintensiv wird oder bewölkt bleibt und nach wie vor hohe Luftfeuchtigkeit vorherrscht, ist der api zwar identisch, die aktuell vorliegende Bodenfeuchte kann sich zumindest in den oberen Bodenschichten aber erheblich unterscheiden und somit gegensätzliche Anfangsbedingungen produzieren. Die Vorfeuchte ist zudem für etwaigen Abfluss von den Terrassen wichtiger als bei den Straßen, die einen geringen Anfangsverlust duch Benetzung aufweisen, sonst aber von generellen Vorfeuchtebedingungen mehr oder weniger losgelöst sind.

Durch die reinen Temperatur- bzw. Leitfähigkeitsmessungen kann keine Aussage darüber getätigt werden, ob und wann auch Abfluss von den Terrassen zum Straßenabfluss dazukommt. In der Tabelle B.0.8 auf Seite 119 im Anhang ist in der Spalte [QStraßen [%]] der Abflussanteil eingetragen, der rein theoretisch während eines Ereignisses allein auf den Straßen gebildet werden könnte. Die Rechnung ist insofern sehr vereinfacht, da weder ein Anfangsverlust noch ein Abflussbeiwert für die Straßen berücksichtigt wurden; es wird in diesem Fall also davon ausgegangen, dass 100 % des auf die Straße fallenden Niederschlags abflusswirksam werden. Aber selbst wenn angenommen würde, dass nur 70 % des Niederschlags, der auf die Straßen fällt, auch tatsächlich zum Abfluss kommt, können immer noch viele Ereignisse fast ausschließlich durch Straßenabfluss erklärt werden (Spalte [QStraßen 0,7 [%]]). DEMUTH und MAUSER (1983) gelangen bei vier Einzelereignissen im Jahre 1981 zu ähnlichen Werten (71,4 bis 82,1%), wobei hier mit einem höheren Straßenanteil von 6% gerechnet wurde. Mit den Abflussbeiwerten aus Tabelle 5.1.2 auf Seite 36 kann unter Umständen auch auf einsetzenden Terrassenabfluss geschlossen werden. Die asphaltierten Straßen nehmen 4,6 % der Einzugsgebietsfläche ein; bei Abflussbeiwerten kleiner 4.6~% würde nicht einmal das komplette Straßennetz Abfluss liefern. Bei Ereignissen mit Abflussbeiwerten von mehr als 4,6 % reicht das Straßennetz allein nicht mehr aus, um den Abfluss aufzubringen; weitere Einzugsgebietsteile werden als Abflussbildungszonen aktiviert. Demnach weisen Ereignisse mit einem durchschnittlichen Scheitelabfluss ab ca. 77 l/s einen höheren Abflussbeiwert als 4,6 % auf, und somit liefern auch erst Ereignisse ab dieser Größenordnung Terrassenabfluss.

SCHUMACHER (1981) gibt für die Terrassen im Löchernbach Einzugsgebiet jedoch Infiltrationsleistungen von ca. 60 mm/h an; demnach dürfte selbst bei den sehr großen Ereignissen nur selten Oberflächenabfluss durch Infiltrationsüberschuss (Horton-Abfluss) auftreten. Zu Sättigungsflächenabfluss lassen sich daraus allerdings keine Schlüsse ziehen.

UHLENBROOK (1995) hat für die Abflusskomponente in der ungesättigten Zone mittlere Verweilzeiten von 112 bis 202 min herausgefunden (Kapitel 2.2 auf Seite 14). Bei Zeiten von unter einer Stunde vom Niederschlagsschwerpunkt bis zum Abflusspeak spielt diese Komponente im absteigenden Ast der Abflussganglinie eine möglicherweise nicht zu unterschätzende Rolle, hat jedoch für die Höhe des Peakabflusses keine Bedeutung, auch nicht bei hoher Vorfeuchte.

Nicht unterschätzt werden darf zum Beispiel die Verteilung des Niederschlages. Der Pluvio ist zwar relativ zentral im Gebiet aufgestellt, aber mit nur einem einzelnen Niederschlagsmesser sind Aussagen über die Zugrichtung von Niederschlags- bzw. Gewitterzellen unmöglich und somit auch die Aussage über gleichmäßige oder ungleichmäßige Beregnung des Gebietes.

5.2. Sediment-Proben

Für Abflussereignisse vom 7. August und vom 23. Juli liegen Sediment-Ganglinien vor. Die Abbildungen 5.2.1 und 5.2.2 (Seite 42) zeigen sowohl die Abflussganglinien als auch die zu bestimmten Zeiten während des Ereignisses gemessenen Sediment-Mengen.



Abbildung 5.2.1.: Sediment-Durchgang 23. Juli 2007

Auffällig ist, dass sich die Sediment-Ganglinien grundsätzlich voneinander unterscheiden. Während die Sediment-Mengen am 23. Juli die Abflussganglinie vom Ver-



Abbildung 5.2.2.: Sediment-Durchgang 7. August 2007

lauf her wiedergeben, ist am 7. August kein Zusammenhang zwischen Abfluss und Sedimentmenge zu erkennen. Bereits die erste Probenahme des Ereignisses am 7. August findet bei einem Abfluss von ca. 77 l/s statt und liegt mit 137 mg Sediment im Bereich der größten Sediment-Mengen am 23. Juli. Gerade zum Ende des Durchgangs vom Ereignis am 7. August muss berücksichtigt werden, dass der APEG verstopfte und nicht mehr ausreichend Bachwasser ziehen konnte; zu erkennen ist dies am Verlauf der letzten vier Probepunkte.

Die Sediment-Proben vom 23. Juli geben ebenso wie die Abflussganglinie zwei Peaks wieder, am 7. August weist die Abflussganglinie nur einen wirklichen Peak auf; im ansteigenden Ast ist ein kleiner Vorpeak im Ansatz zu erkennen, das mittransportierte Sediment erreicht bereits kurz nach Abflussbeginn sehr hohe Werte. In Abbildung 6.1.1 auf Seite 45 ist zu erkennen, dass sehr schnell und auch über mehrere Minuten anhaltend Niederschlag mit Intensitäten um 40 mm/h fiel. Es nicht als realistisch zu bewerten, dass das ganze Sediment ausschließlich von den Straßen stammt, auch die Terrassen müssen bereits relativ früh Abfluss geliefert haben.

DEMUTH und MAUSER (1983) haben ebenfalls Sedimentmessungen im Löchernbach durchgeführt und errechneten für vier verschiedene Ereignisse einen durchschnittlichen Schwebstoffabtrag von $16,47 \text{ g/m}^2$ allein für die asphaltierte Fläche (wobei hier darauf hingewiesen werden muss, dass eine asphaltierte Fläche von 6 % von 1,7 km² als Berechnungsgrundlage genommen wurde). Nach DEMUTH und MAUSER (1983) ist dieser Wert als realistisch anzusehen. Zusätzlich werden noch die Terrassenkanten bzw. die Böschungen als Sedimentquelle genannt, wohingegen die Terrassen selbst nur bei hohen Intensitäten Abfluss liefern; eine Angabe zu konkreten Niederschlagsintensitäten wird jedoch nicht gemacht.

Für die beiden Ereignisse vom 23. Juli und 7. August konnten auch Sediment-Kennwerte berechnet werden (Tabelle 5.2.1). Zusätzlich ist noch ein weiteres Ereignis vom 18. Juli mit aufgenommen.

Ereignis	N-Intensität [mm/h]	Scheitel- abfluss [l/s]	Gesamt- fracht [kg]	mittl. Schwebstoff- konzentration [g/l]	${ m Straßenabtrag}\ [{ m g/m^2}]$
7. August	40,5	1030	4038	1,5	48,8
23. Juli	38,4	152	320	0,9	3,9
18. Juli	14,7	89	143	$0,\!6$	1,7

Tabelle 5.2.1.: Sediment-Kennwerte für drei Ereignisse

Bei dem Ereignis vom 7. August ist der durchschnittliche Straßenabtrag mit 48.8 g/m^2 sehr hoch, es ist anzunehmen, dass diese Mengen nicht ausschließlich von den Straßen stammen können, sondern auch Terrassenabfluss stattgefunden haben muss. Bei den kleineren Ereignissen ist der berechnete Straßenabtrag deutlich geringer. Bei den von SCHUMACHER (1981) angegebenen Infiltrationsraten für die Terrassen hätte allerdings bei keinem der drei Ereignisse Terrassenabfluss entstehen dürfen. Es ist daher anzunehmen, dass die von SCHUMACHER (1981) ermittelten Werte nicht repräsentativ für das Gebiet sind bzw. sich die Infiltrationseigenschaften der Terrassen innerhalb der letzten 25 Jahre geändert haben. So kann z. B. das regelmäßige Befahren der Terrassen mit Traktoren zu einer weiteren Verdichtung geführt haben. Die Funktionsfähigkeit der Maulwurfdrainagen wurde bereits angesprochen; die potentiell schlechtere Entwässerung der Terrassen könnte auch vermehrt zu Sättigungsflächenabfluss führen, da das Wasser von potentiellen Stauhorizonten nicht mehr schnell genug abgeführt werden kann und sich der Boden somit von unten her aufsättigt.

Die Berechnungen für die Sedimentfrachten sind zudem noch leicht unterschätzt, da nicht das gesamte Abflussereignis für eine Berechnung herangezogen werden konnte, sondern nur der Abschnitt der Ganglinie, der beprobt wurde (der gestrichelte Bereich in den Abbildungen 5.2.2 auf Seite 42 und 5.2.1 auf Seite 41).

DEMUTH und MAUSER (1983) haben darauf hingewisen, dass bei nachlassenden Niederschlagsintensitäten das Sediment noch auf den Straßen abgelagert wird und somit erst bei einem nachfolgenden Niederschlagsereignis zum Abfluss kommt. Eigene Beobachtungen im Gebiet bestätigen diese Meinung. Allerdings könnte das heißen, dass im Grunde bei einem beprobten Ereignis das *vorhergehende* Ereignis zumindest zu einem Teil noch mitbeprobt wird. Ein auf ein großes Ereignis folgendes kleines Abflussereignis könnte demnach trotz geringer Niederschlagsintensitäten relativ hohe Sedimentfrachten aufweisen.

6. Ereignisanalysen

Im folgenden Kapitel werden Abflussereignisse verschiedener Größe auf ihre Abflussbildung untersucht. Für Ereignisse mit Scheitelabflüssen größer als 50 l/s stellte die Ganglinienanalyse kein Problem dar, bei kleineren Ereignissen waren die Temperaturdifferenzen im Gerinne meist nicht groß genug, um für eine Ganglinienanalyse verwendet zu werden.

Die Tabellen mit den Reaktionszeiten der Stowaways und Diver sind ab Seite 105 im Anhang B zu finden.



6.1. Ereignis vom 7. August 2007

Abbildung 6.1.1.: Lufttemperatur und Niederschlag während des Ereignisses vom 7. August 2007



Abbildung 6.1.2.: Anordnung der Diver und Stowaways am 7. August 2007

Niederschlagsmenge 25,1 mm, Scheitelabfluss 1030 l/s

Abbildung 6.1.2 auf dieser Seite zeigt die bei diesem Ereignis verwendeten Diver und Stowaways und ihre Standorte. Mit Niederschlagsbeginn um 6:30 Uhr sinkt die Lufttemperatur von 18,4 °C um ca. 1 °C und bleibt während der restlichen Zeit leicht über 17 °C.

Die Verläufe der Lufttemperatur und des Niederschlags sind in Abbildung 6.1.1 auf Seite 45 für die Dauer des Ereignisses dargestellt.

6.1.1. Löchernbach

Der im Entwässerungsrohr in den Terrassen platzierte Diver06 reagiert ab 6:38 Uhr mit einer Temperaturerhöhung. Die Wassertemperatur steigt von 14,4 °C auf 20,8 °C um 6:46 Uhr. Der 180 m weiter unterhalb an der Löchernbachquelle liegende Temperaturlogger Stow11 verzeichnet ab 6:40 Uhr einen Anstieg der Wassertemperatur von 14,3 °C auf 19,8 °C um 6:50 Uhr, was einer Fließzeit von 45 m/min entspricht. Der nächste unterhalb liegende Logger Stow04 ist 210 m von Stow11 entfernt. Stow04

weist im Gegegzug zu den oberen Loggern um 6:49 Uhr noch eine weitere kleine Temperaturspitze auf. Das Maximum des von der Quelle stammenden Wassers wird um 6:57 Uhr erreicht; die Fließzeit entspricht demnach 30 m/min und liegt deutlich unterhalb der Fließzeit im Rohr. Der Grund ist das etwas größere Gefälle des Rohres unter den Terrassen durch und auch die geringere Oberflächenrauhigkeit des Rohres im Vergleich zum Gerinne des Löchernbaches.



Abbildung 6.1.3.: Wassertemperaturverlauf der Logger Stow11 bis Stow09 (7. August 2007)

Bei Stow08 steigt die Wassertemperatur in zwei Stufen an. Der erste Anstieg beginnt um 6:38 Uhr, die Temperatur sinkt dann jedoch wieder, bevor um 6:50 Uhr der richtige Anstieg beginnt. Die maximale Temperatur wird gegen 7:00 Uhr erreicht. Mit einem Fließweg von 110 m zwischen Stow04 und Stow08 beträgt die Fließgeschwindigkeit des Wasserpaketes 27,5 m/min. Die Grundwasserdrainage Stow03 registriert ebenfalls eine Erhöhung der Wassertemperatur. Das ist jedoch nicht auf einen veränderten Grundwasserabfluss zurückzuführen, sondern liegt daran, dass die Drainage auf Höhe der Gerinnesohle in den Löchernbach einmündet. Der Logger ist zwar dementsprechend weit in das Rohr hineingeschoben, trotzdem kommt es bei großen Ereignissen zum Wassereintritt von Gerinnewasser in die Drainage, was dann eine Steigerung der vom Logger gemessenen Temperatur bewirkt.

Oberhalb von Stow09 mündet ein Rohr in den Löchernbach. Stow09 verzeichnet aus diesem Grund auch zwei deutliche Temperaturspitzen. Der im Rohr positionierte Diver05 zeigt einen Temperaturanstieg ab 6:45 Uhr, der unmittelbar an den kurz unterhalb liegenden Logger Stow09 weitergegeben wird. Der zweite Peak um 6:50 Uhr ist der Temperaturpeak der Quelle. Die Strecke von Stow08 zu Stow09 beträgt 130 m, die Peaks liegen 4 min auseinander, die Fließzeit beläuft sich also auf 32,5 m/min. Dieser Wert korrespondiert bei angesprochenem Fehlerbereich der Zeitmessung gut mit den vorigen Werten. Die Temperaturverläufe der Logger Stow11, 04, 08 und 09 sind in Abbildung 6.1.3 auf Seite 47 zu sehen.

Nach weiteren 180 m weist Stow04 drei Temperaturspitzen auf. Während die Spitzen zwei und drei den auch bei Stow09 gemessenen Peaks zugeordnet werden können, ist die Herkunft des ersten Temperaturmaximums nicht eindeutig. Auf der Strecke zwischen Stow09 und Stow14 befindet sich keine Straßenentwässerung, die für diesen deutlichen Anstieg verantwortlich sein könnte, und es ist als unwahrscheinlich zu erachten, dass eine Grundwasserdrainage ausschlaggebend für diese starke Temperaturveränderung ist.

Bei einem Starkregen konnte beobachtet werden, dass teilweise das auf den Straßen ablaufende Wasser bei einem dort befindlichen Picknickplatz nicht in die Entwässerung bei Stow19 lief, sondern daran vorbei und sich etwas oberhalb von Stow14 in Gerinnenähe sammelte. Bei einem entsprechend starken Niederschlag ist es durchaus möglich, dass das Wasser weiter ins Gerinne abfließt. Dafür spricht, dass Stow19 drei Minuten früher einen Temperaturanstieg zeigt. Diese Zeitdifferenz kann daraus resultieren, dass sich erst eine gewisse Menge in einer Pfütze ansammeln muss, bevor diese ins Gerinne überläuft.

Wenn wiederum die Anfangszeiten der Peaks als Startwerte genommen werden, ergeben sich für die Wasserpakete der beiden Peaks unterschiedliche Fließzeiten. Beim zweiten Peak (dem ersten von Stow09) beträgt die Fließzeit 30 m/min, für den dritten Peak (den zweiten von Stow09) kann eine Fließzeit von 45 m/min berechnet werden. Dies entspricht dem Wert, der an der Quelle gemessen wurde. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass dieser Wert den Tatsachen entspricht. Vielmehr ist die Auflösung der Logger für die schnelle Fließzeit verantwortlich zu zeichnen; da die Logger oft keine eindeutigen Ein-Minuten-Peaks aufweisen, sondern Plateauwerte, die sich über mehrere Minuten erstrecken, ist eine genaue Quantifizierung der Fließzeiten nicht möglich, da die Peaks viel Interpretationsspielraum lassen. Eine Fließzeit um 30 m/min wird als wahrscheinlich angesehen.

Das Rohr, das beim Picknickplatz ins Gerinne entwässert, zeigt ab 6:38 Uhr einen deutlichen Temperatursprung (Stow13) von 15,5 °C auf 20 °C in einem ersten kleinen Peak. Die Temperatur sinkt dann erst wieder und steigt ab 6:44 Uhr auf das Hauptmaximum von 20,5 °C.

Stow06 liegt direkt unterhalb des Picknickplatz-Rohres. Hier sind wie bei Stow14

drei Maxima zu sehen, allerdings liegt die Wassertemperatur über den Temperaturen von Stow14: die Maxima sind leicht und die Minima deutlich erhöht, die Struktur bleibt jedoch weitestgehend erhalten, nur der erste Peak ändert sein Aussehen etwas. Abbildung 6.1.4 zeigt die Abfolge der drei Stowaways 14, 13 und 06.



Abbildung 6.1.4.: Wassertemperaturverlauf der Logger Stow14 bis Stow06 während des Ereignisses vom 7. August 2007

Der erste Anstieg der Wassertemperatur im Rohr zeigt erst mit leichter Verzögerung eine Auswirkung auf den Logger im Gerinne unterhalb. Das Abflussvolumen ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausreichend, um eine Temperaturveränderung im Gerinne zu bewirken.

Mischungsrechnung RohrDiver04

Bevor der Abfluss im Gerinne am Picknickplatz einsetzt, beläuft sich der Beitrag des Rohres am Gesamtabfluss auf 50 %. Der erste Peak von Stow14 wird dann zu 61,7 % vom Rohr gebildet. Der Anteil steigt bis zum zweiten Peak auf 77 % an, geht bei der dritten und letzten Spitze aber wieder auf 48 % zurück.

Durch die geringen Temperaturdifferenzen im Peakbereich zeigt sich deutlich das Problem der Logger-Auflösung bzw. -Genauigkeit. Im extremsten Fall kann der Anteil des Rohres am zweiten Peak auf 28 % heruntergerechnet werden, wenn die Herstellerangabe zur Genauigkeit der Logger von 0,2 °C zur Fehlerberechnung zugrunde

gelegt wird. Ebenso spielt bei den Mischungsrechnungen, bei denen es auf möglichst exakte Ausgangswerte ankommt, die in Kapitel 4.2.3 angesprochene ungenügende Erfassung der korrekten Peaktemperatur eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Anders gestaltet sich die Situation bei Stow15. Der Dreier-Peak von Stow 06 ist nicht mehr vorhanden; es sind nur noch zwei Spitzen zu sehen. Der erste Anstieg der Wassertemperatur wird um 6:44 Uhr registriert, der dazugehörige Peak um 6:47 Uhr. Mit einer potentiellen maximalen Fließzeit von nur 3 min auf 350 m von Stow06 zu Stow15, ist auszuschließen, dass diese Spitze eine der Spitzen von Stow15 ist. Der erste Peak von Stow06 wird zudem vier Minuten später registriert als der erste bei Stow15. Auch hier ist nicht eindeutig, woher dieser Temperaturpeak stammt. Eine Rohreinleitung ist auf der Fließstrecke nicht vorhanden, nur einzelne Grundwasserdrainagen entwässern ins Gerinne.



Abbildung 6.1.5.: Wassertemperaturverlauf der Logger Stow15 bis Stow10 während des Ereignisses vom 7. August 2007

Der Hauptpeak von Stow15 ist die durch Dispersion zusammengelaufene Dreier-Spitze von Stow06, die vorher vorhandene deutlich zu unterscheidene Struktur ist demnach aufgelöst. Eine korrekte Bestimmung der Fließgeschwindigkeit ist nicht ohne weiteres möglich. Der Hauptpeak von Stow15 umfasst 17 min, bei Stow06 ist nicht deutlich, bei welchem der drei Peaks das größte Wasservolumen involviert ist und demnach den größten Einfluss auf die unterhalb positionierten Logger hat. Wenn die Peak-Mittelpunkte zur Berechnung herangezogen werden, beträgt die Fließzeit 13 min und die Fließgeschwindigkeit folglich 26,9 m/min.

Diver03 im Straßenentwässerungsrohr zeigt eine Reaktion ab 6:43 Uhr, Stow10, der unterhalb des Rohres im Gerinne stationiert ist, reagiert ab 6:42 Uhr. Dieser Zeitunterschied resultiert aus den unterschiedlichen Systemzeiten der zwei verschiedenen Logger-Typen, liegt aber noch im annehmbaren Fehlerbereich.

Stow10 zeigt zwei Temperaturspitzen. Die Temperatur steigt von 17,0 °C auf 20,8 °C an, sinkt dann wieder auf 18,7 °C ab und steigt erneut auf ca. 20 °C. Der erste Peak stimmt gut mit dem von Diver03 im Rohr gemessenen überein, der zweite stellt den zusammengelaufenen Dreier-Peak dar. Die Reaktion der drei Logger ist in Abbildung 6.1.5 auf Seite 50 zusammengefasst.

Mischungsrechnung RohrDiver03

Bei diesem Rohr gestaltet sich die Anteilsberechnung unproblematischer als beim vorigen. Der Beitrag des Rohres ist sehr gut allein optisch anhand des Peaks von Stow10 zu erkennen. 88,6 % des Abflusses beim ersten Peak von Stow14 sind auf das Rohr zurückzuführen. Der Anteil sinkt jedoch dann rapide, und beim zweiten Peak ist das Rohr nur noch für 8,3 % des Abflusses verantwortlich. Der nahezu gleiche Verlauf der Ganglinien von Stow15 und Stow11 deutet bereits darauf hin.

Auch Stow12 weist wieder drei Temperaturspitzen auf. Die zweite und dritte Spitze sind die bei Stow10 gemessenen, die erste Spitze kann hingegen nicht zweifelsfrei erklärt werden. Da der Abstand zwischen Stow12 und dem eingeleiteten Rohr nur ein bis zwei Meter beträgt, kann auch ein Rückstau im Gerinne hier nicht ausgeschlossen werden. Dafür spricht, dass der Temperaturanstieg erst 4 min nach dem Einsetzen des Abflusses im Rohr beginnt, was darauf hindeutet, dass der Abfluss im Rohr erst so weit zunehmen muss, bis sich das Wasser zurückstaut; zudem ist der Peak nicht sehr ausgeprägt und nur von geringer Dauer (siehe Abbildung 6.1.6 auf Seite 52).

Bei Stow18 ist das erste Maximum ebenfalls deutlich ausgeprägt und kann zweifelsfrei dem Rohr von Stow07 zugeordnet werden. Der erste Peak von Stow10 wird bei Stow18 nach 5 min gemessen, der zweite nach 4 min. Bei einer Strecke von 130 m zwischen den Geräten entsprechen die Zeiten Fließgeschwindigkeiten von 26 und 32,5 m/min und befinden sich somit im Bereich der vorher im Verlauf des Abflussereignisses gemessenen Geschwindigkeiten.

Mischungsrechnung RohrStow07

Auch hier funktioniert eine Mischungsrechnung relativ gut. Stow07 und Stow18 steigen zeitgleich an, der Abfluss wird zu diesem Zeitpunkt eindeutig von Stow07 domi-



Abbildung 6.1.6.: Wassertemperaturverlauf der Logger Stow12 bis Stow18 während des Ereignisses vom 7. August 2007

niert. Beim ersten Peak besteht der Abfluss bei Stow18 zu 91,9 % aus Rohr-Wasser. Der zweite Peak hingegen scheint in gleichem Maße sowohl von Stow12 als auch Stow07 Anteile zu beziehen, wobei mit dem Einsetzen des zweiten Peaks bei Stow12 die Ganglinie von Stow18 genau gleich derer von Stow12 verläuft und so auf einen verstärkten Einfluss des bereits im Gerinne vorhandenen Wassers hindeutet.

Kurz vor dem Zusammenfluss mit dem Biebenbach erfasst Diver01 Wasserstand, Temperatur und Leitfähigkeit (siehe Abbildung 6.1.7 auf Seite 53).

Die drei Temperaturmaxima sind auch hier deutlich erkennbar. Die Leitfähigkeit reagiert antiparallel zur Temperatur: bei steigender Temperatur nimmt die Leitfähigkeit ab; die Minima und Maxima korrespondieren sehr gut. Der Wasserstand zeichnet diesen Verlauf jedoch nicht exakt nach. Während in Temperatur und Leitfähigkeit die ersten beiden Rohre gerinneaufwärts zu unterscheiden sind, weist der Wasserstand nur einen Vorpeak auf. Das Hauptmaximum wird erst später beim Eintreffen des weiter oben im Einzugsgebiet gebildeten Abflusses erreicht. Die drei Rohre von Diver 04, 05 und 06 sind nicht als einzelne Spitzen erkennbar. Sehr gut ersichtlich wird hierbei aber die Zweiteilung des Abflusses, unterschieden nach Rohren: die ersten beiden Rohre liefern den ersten Teil der Ganglinie, der Hauptabfluss


Abbildung 6.1.7.: Verlauf des Ereignisses vom 7. August 2007 dargestellt an Diver01

stammt von den drei folgenden Rohren.

6.1.2. Biebenbach

Wenn auch die Situation, was die Entwässerung betrifft, im Biebenbach mit der Quelle und nur zwei weiteren Rohren einfacher ist als beim Löchernbach, gestaltet sich die Interpretation der Abflussbildung beim kürzeren Biebenbach schwieriger, was an der geringeren Anzahl der in diesem Teilstück ausgebrachten Datensammler liegt.

Der obere Teil des Biebenbachs liegt während der Basisabflusszeiten am Pegel in der Regel trocken, der dort positionierte Diver07 zeigt also an, wann die Quelle anspringt. Stow20 soll den Beginn der Entwässerung der oberhalb einmündenden Rohre dokumentieren. Diver02 befindet sich kurz vor dem Zusammenschluss mit dem Löchernbach.



Abbildung 6.1.8.: Wassertemperaturverläufe bei den im Biebenbach gelegenen Datenloggern (7. August 2007)

Diver07 registriert ab 6:47 Uhr einen Anstig der Temperatur, der "Wasserstand" steigt ebenfalls deutlich; das heißt, dass ab 6:47 Uhr die Quelle zu schütten beginnt. Der Wasserstand zeigt einen Hauptpeak mit einem kleinen Vorpeak, die Temperatur steigt zu einem Hauptmaximum an, sinkt und verharrt dann gute 10 min auf einem Plateauwert.

Stow20 verdeutlicht einen Temperaturanstieg ab 6:43 Uhr, der Verlauf ist ähnlich dem bei Diver07. Der Temperaturverlauf von Diver02 (Beginn um 6:53 Uhr) deckt sich weitestgehend mit dem von Diver07, der Wasserstand weist jedoch vor dem Hauptpeak im ansteigenden Ast noch einen Rücken auf.

Da Stow20 nur einen Peak aufweist und das Eintreffen des Wasserpaketes von Diver07 nicht als eigenständige Spitze erkennbar ist, ist anzunehmen, dass das Wasser von der Quelle im anstiegenden Ast von Stow07 dort eintrifft und den weiteren Verlauf überprägt. Bei Diver02 sind die beiden Abflusskomponenten hingegen durch unterschiedliche Wasserstände zu erkennen. Der Rücken im ansteigenden Ast ist auf die beiden Rohre oberhalb Stow20 zurückzuführen, der Hauptteil des Abflusses wird jedoch von der Quelle gebildet.

Die Entfernungen von Diver02 zu Stow20 und zur Quelle betragen 330 respektive 725 m. Die Fließzeit von Stow20 bis Diver02 beträgt 10 min, von Diver07 bis Diver02 22 min (gemessen am Wasserstand). Die Fließgeschwindigkeiten ergeben sich jeweils zu 33 m/min und kongruieren mit den im Löchernbach gemessenen Fließzeiten. Abbildung 6.1.8 veranschaulicht den Temperaturverlauf der beiden Diver 02 und 07 sowie des Temperaturloggers Stow20.

Die Unterschiede in der Peaktemperatur zwischen Diver07 und Stow20 resultieren aus den verschieden langen Fließwegen durch die Entwässerungsrohre. Es ist anzumerken, dass ab 10 Uhr bei Diver07 kein Wasserfluss mehr festgestellt wird; der Wasserstand erreicht den Ausgangszustand (trockenes Bachbett). Die Abbildung 6.1.9 fasst das Abflussgeschehen am Biebenbach bei Diver02 zusammen.



Abbildung 6.1.9.: Verlauf des Ereignisses vom 7. August 2007, dargestellt an Diver02

6.1.3. Pegel

Die Reaktion des Pegels (Abfluss, Temperatur und Leitfähigkeit) ist in Abbildung 6.1.10 auf Seite 56 dargestellt.

Obwohl sich die Wasserstandsganglinien von Diver01 und 02 ähneln, verdeutlicht Abbildung 6.1.11 auf Seite 57, dass das Abflussgeschehen am Pegel fast ausschließlich vom Löchernbach-Arm bestimmt wird. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Leitfähigkeitsangaben nur qualitative Aussagen erlauben, da die Elektroden der Diver mit Beschlag zugesetzt waren und somit keine korrekten Werte mehr lieferten (die Leitfähigkeiten vor Ereignisbeginn wurden per Regression auf realistische Werte



gesetzt). Der Verlauf der Leitfähigkeit wird qualitativ natürlich dennoch sehr gut abgebildet.

Abbildung 6.1.10.: Reaktion des Pegels auf das Ereignis vom 7. August 2007

Auf der Basis der Mischungsrechnungen kann der Abfluss am Pegel teilweise in seine Komponenten aus den entsprechenden Rohren aufgeteilt werden. Grundlage dieser Berechnungen ist die Annahme, dass der Löchernbach-Arm während des gesamten Ereignisses einen um einen konstanten Faktor höheren Abfluss liefert. Es wird daher angenommen, dass 80 % des Abflusses vom Löchernbach gebildet werden und der Biebenbach nur die verbleibenden 20 % liefert. Da angenommen werden kann, dass diese Aufteilung nicht während des gesamten Ereignisses erhalten bleibt, stellt diese Annahme eine starke Vereinfachung dar. Die Verläufe der Leitfähigkeit stützen die angenommene starke Dominanz des Löchernbaches. Abbildung 6.1.12 auf Seite 58 zeigt die berechneten Ganglinien der drei dem Pegel am nächsten liegenden Rohre.



Abbildung 6.1.11.: Elektrische Leitfähigkeit während des Ereignisses vom 7. August 2007

Es sei jedoch angemerkt, dass die in die Berechnungen einfließenden Faktoren jeweils einen relativ großen Fehler in sich tragen. Zudem kann auch der abfallende Ast nur zum Teil wiedergegeben werden; es ist also anzunehmen, dass die Beiträge der Rohre nicht einfach abrupt stoppen, sondern auch mehr oder weniger langsam auslaufen. Die Loggerauflösung gestattet in diesem Bereich jedoch keine genaueren Berechnungen, weshalb auf diesen Teil auch in der Darstellung verzichtet wird.

Der grau unterlegte Bereich in Abbildung 6.1.12 auf Seite 58 ist der Gesamtabfluss des Gebietes, der grüne Teil stellt den Abfluss des Löchernbaches dar. Die berechneten Rohre sind gelb, blau und violett abgesetzt. Das Rohr von Diver05 und die Quelle konnten nicht in die Berechnung miteinbezogen werden. Der Rest des Löchernbach-Abflusses stammt somit theoretisch von diesen beiden Rohren bzw. von bereits im Gerinne enthaltenem Wasser. Auffällig sind die unterschiedlichen Beiträge der Rohre; während das Rohr von Stow07 (Entwässerung der Mitteltrasse) nur sehr wenig Wasser liefert, bringt in diesem Fall vor allem das am Picknickplatz gelegene RohrDiver04 alleine über 400 l/s Abfluss. Das Rohr von Diver03 ist dem Temperaturverlauf zufolge an beiden Peaks beteiligt; Wasserstand und Wassertemperatur haben jedoch häufig unterschiedliche Peakzeiten, was auch noch einen gewissen Fehler mit sich bringt.

Abbildung 6.1.13 auf Seite 58 zeigt die potentiellen Einzugsbereiche der einzelnen



Abbildung 6.1.12.: Anteile der Rohre für das Ereignis vom 7. August



Abbildung 6.1.13.: Ungefähre Einzugsgebiete der einzelnen Rohre

Rohre. Eine genaue Abgrenzung ist anhand des digitalen Geländemodells nicht ohne weiteres möglich; die Abgrenzung beruht auf Geländebegehungen und kann daher keinesfalls als vollkommen korrekt angesehen werden. Vielmehr dient die Grafik nur zur Verdeutlichung, welcher Abflussanteil aus welchem ungefähren Gebietsteil stammt. Die Farbgebung ist Abbildung 6.1.12 angepasst.

6.2. Ereignis vom 23. Juli 2007



Abbildung 6.2.1.: Lufttemperatur und Niederschlag während des Ereignisses vom 23. Juli 2007

Niederschlagsmenge 10,3 mm, Scheitelabfluss 152 l/s

In Abbildung 6.2.2 auf Seite 60 sind die verwendeten Geräte und ihre Standorte eingetragen.

Die Lufttemperatur und der Niederschlag vor und während des Ereignisses sind in Abbildung 6.2.1 sehen.

Um 17:20 Uhr setzt der Regen ein, zum gleichen Zeitpunkt beginnt auch die Lufttemperatur zurückzugehen. Von 20,5 °C um 17:00 Uhr senkt sich die Lufttemperatur binnen einer Stunde um ca. 3 °C und bleibt für die übrige Zeit des Ereignisses relativ konstant bei 17,5 °C. Der Niederschlagsschwerpunkt liegt zwischen 17:46 und 17:52 Uhr.

6.2.1. Löchernbach

Diver06 zeigt ab 17:41 Uhr einen Anstieg im Temperaturverlauf, und bis 17:55 Uhr steigt die Temperatur von 14 °C auf 21,5 °C. Für die 180 m Passage durch das un-



Abbildung 6.2.2.: Anordnung der Diver und Stowaways am 23. Juli 2007

ter der Terrasse durchlaufende Rohr bis Stow11 benötigt das Wasserpaket 4 min, die Fließgeschwindigkeit beträgt 45 m/min und liegt damit unterhalb der Rohr-Fließzeit des vorher beschriebenen Ereignisses. Der Temperatur-Peak wird bei Stow11 um 17:58 Uhr gemessen, der erste Anstieg der Temperatur um 17:49 Uhr. Stow04 weist erneut im ansteigenden Ast einen kleinen Vorpeak auf, der mit dem kleinen Entwässerungsrohr, das die südwestlich gelegene Straße mit einem einzelnen Gulli entwässert, erklärt werden kann. Ab 17:58 Uhr beginnt der Anstieg zum Hauptmaximum, das um 18:03 Uhr erreicht wird. Bei 5 min Fließzeit auf 210 m ergibt das zwischen Stow11 und Stow04 eine Fließgeschwindigkeit von 42 m/min.

Stow08 zeigt den kleinen Vorpeak von Stow04 nicht mehr im Temperaturverlauf. Der Anstieg beginnt um 17:58 Uhr, das Maximum wird um 18:06 Uhr erreicht. Da ebenfalls um 17:58 Uhr bei Stow04 erst der Anstieg zum Hauptmaximum beginnt, muss der bei Stow08 verzeichnete Anstieg auf das kleine Rohr zurückzuführen sein; im Laufe des ansteigenden Astes überlagert jedoch das von der Quelle stammende Wasser den Abfluss aus dem kleinen Rohr. Der Peak hat eine Fließzeit von drei Minuten (18:03 bis 18:06) und somit bei einer Distanz von 90 m zwischen Stow04 und Stow08 eine Fließgeschwindigkeit von 30 m/min. Der Rückgang der Fließgeschwindigkeit ist auch hier zu beobachten und auf das abnehmende Gefälle des Gerinnes zurückzuführen. Die Temperaturverläufe der Datenlogger Stow11, 04 und 08 sind in Abbildung 6.2.3 dargestellt.



Abbildung 6.2.3.: Wassertemperaturverlauf der Logger Stow11 bis Stow08 (23. Juli 2007)

Diver05 verzeichnet für das den Südwestteil des Löchernbach-Arms entwässernde Rohr ab 17:55 Uhr einen Temperaturanstieg; der etwas unterhalb im Gerinne platzierte Logger Stow10 springt ebenfalls um 17:55 Uhr an. Die erste Temperaturspitze ist somit auf das Rohr von Diver05 zurückzuführen; der zweite Anstieg beginnt um 18:06 Uhr und hat das Maximum um 18:11 Uhr erreicht. Die sechs Minuten, die zwischen den Peakzeiten von Stow08 und Stow10 liegen, entsprechen bei einer Strecke von 120 m einer Fließzeit von 20 m/min.

Die Grundwasserdrainage Stow03 zeigt ebenfalls eine Temperaturveränderung mit zwei deutlichen Spitzen. Wiederum sind diese aber nicht auf verändertes Grundwasserabflussverhalten zurückzuführen, sondern auf in das Drainagerohr eindringende Wasser aus dem Gerinne.

Die Reaktionen der Stowaways 10, 18 und 09 sind Abbildung 6.2.4 auf Seite 62 zu entnehmen.

Stow18 ist in einem Rohr angebracht, das zwar keine Straße, nach Aussage eines ansässigen Landwirtes aber den linksseitigen Talbereich entwässert und größer di-



Abbildung 6.2.4.: Wassertemperaturverlauf der Logger Stow10 bis Stow09 (23. Juli 2007)

mensioniert ist als die übrigen Grundwasserdrainagen, die im Talbereich im Boden ausgebracht sind. Stow18 zeigt ab 17:35 bzw. 17:51 Uhr eine verhaltene Reaktion. Die Wassermenge, die aus dem Rohr austritt, ist dennoch sehr gering, da Stow09, unmittelbar unterhalb des Rohres im Gerinne gelegen, keinerlei Reaktion zeigt und ein exaktes Abbild des Temperaturverlaufs von Stow10 ist.

Abbildung 6.2.5 auf Seite 63 illustriert die Temperaturen, die an den Loggern Stow14, 13 und 06 gemessen wurden.

Stow14 zeigt erneut drei Peaks, wobei wiederum die Herkunft des ersten nicht ganz eindeutig ist. Als Erklärung kann abermals der direkt von der Straße am Picknickplatz ins Gerinne -ohne Umweg über ein Rohr- einlaufende Oberflächenabfluss angesehen werden. Stow19, direkt in einem Gulli für den Straßenabfluss in der Nähe des Gerinnes untergebracht, signalisiert einsetzenden Oberflächenabfluss um 17:37 Uhr, der Anstieg der Temperatur von Stow14 startet um 17:50 Uhr. Die 13 min könnten der Zeitabschnitt sein, der nötig war, um eine genügend große Wasserlache auszubilden, bis das Wasser daraus ins Gerinne abfließen kann.

Die beiden nachfolgenden Temperaturmaxima sind auf die Spitzen von der Quelle und aus dem Rohr von Diver05 zurückzuführen. Die Peaks haben von Stow09 beide Male Laufzeiten von sechs Minuten, die Fließgeschwindigkeit beläuft sich bei einem



Abbildung 6.2.5.: Wassertemperaturverlauf der Logger Stow14 bis Stow06 (23. Juli 2007)

Abstand von 180 m zwischen Stow
09 und Stow
14 auf 30 m/min und passen somit gut zu den vorher ermittelten Fließgeschwindigkeiten.

Stow06, hinter der Rohreinmündung von Diver04 im Gerinne befestigt, zeigt, wie Stow14 auch, drei Temperaturmaxima, allerdings in leicht veränderter Form. Während Peak zwei und drei bei Stow06 sowohl von der Ausprägung als auch vom Zeitversatz her klar den beiden letzten Spitzen von Stow14 zugeordnet werden können, ist dies beim ersten Maximum nicht ohne weiteres möglich. Die zeitliche Dauer der Peaks und auch die Temperaturen entsprechen sich zwar, der Zeitversatz zwischen den Spitzen ist für eine Fließstrecke von nur einigen Metern deutlich zu lang. Ein Rückstau des austretenden Wassers aus dem Rohr kann an dieser Stelle ausgeschlossen werden, da zwischen Stow14 und dem Rohr eine kleine Gerinnestufe zu überbrücken ist.

Stow06 zeigt beim ersten Temperatuanstieg einen kleinen Rücken, der mit dem ersten Peak von Stow14 korrespondiert, danach steigt die Temperatur aber noch weiter. Auffällig ist jedenfalls, dass wie beim vorigen Ereignis eine Angleichung der Maxima und Minima stattgefunden hat. Bei Stow14 beträgt die Temperaturdifferenz zwischen dem ersten Peak und dem darauf folgenden Minimum 1,8 °C, bei Stow06 fällt dieser Unterschied mit nur 0,5 °C deutlich geringer aus.

Das Rohr von Stow13 ist demnach für den ersten Peak verantwortlich, zeigt aber auf

die beiden nachfolgenden Spitzen nur einen geringen Einfluss. Ein Test mit Sediment zu erhöhten Basisabflusszeiten Anfang August zeigte, dass noch einige Meter nach der Rohreinmündung zwei vollständig getrennte Stromstriche vorlagen. Bei einem Abflussereignis findet zwar aufgrund der erhöhten Turbulenz im Gerinne eine stärkere Durchmischung statt, es kann jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass sich die Temperaturen je nach Gerinneseite doch noch leicht unterscheiden. Stow06 liegt in diesem Fall eher im Bereich des Stromstriches von Stow14.



Abbildung 6.2.6.: Wassertemperaturverlauf der Logger Stow15 bis Stow01 (23. Juli 2007)

Mischungsrechnung RohrDiver04

Bei diesem Ereignis gestaltet sich die Mischungsrechnung für dieses Rohr etwas einfacher als beim vorigen, da die Temperaturdifferenzen in den Peakbereichen mit deutlich mehr als 1 °C größer sind, als am 7. August. Vor Niederschlagsbeginn verhält sich die Abflussaufteilung ähnlich der vom 7. August: 55,7 % des Abflusses von Stow06 können auf das Rohr zurückgeführt werden. Bis zur ersten Temperaturspitze von Stow06 ist dann keine weitere Mischungsrechnung möglich, weil die Ganglinien der Ausgangskomponenten beide oberhalb derer von Stow14 verlaufen. Dieser Umstand ist erneut auf das verzögerte Reagieren der Logger -speziell von Stow14zurückzuführen. Die Temperaturdifferenzen im Mischungsbereich hinter dem Rohr sind zu Anfang des steigenden Abflusses nicht ausreichend groß, um eine schnelle Temperaturumstellung zu gewährleisten. Der erste Peak wird zu ungefähr gleichen Teilen vom Rohr als auch vom Gerinne oberhalb gestellt (50,7 zu 49,3 %), doch bereits kurz nach dem ersten Temperaturmaximum geht der Einfluss des Rohres stark zurück, und die beiden anderen Spitzen werden -gemäß der Auflösung der Loggerfast gänzlich vom Abfluss aus dem Gerinne oberhalb des Rohres gestellt.

Nach 350 m ist der Dreier-Peak bei Stow15 durch erhöhte Dispersion aufgrund Turbulenz nicht mehr so stark erkennbar. Es sind dennoch drei Spitzen vorhanden, obwohl diese nicht genau den Peaks von Stow06 entsprechen. Der erste Peak der Wassertemperatur bei Stow15 findet bereits um 17:54 Uhr statt, der erste Peak von Stow06 erst um 18:00 Uhr. Demnach ist ausgeschlossen, dass das Wasserpaket, das für diese Erhöhung verantwortlich ist, auch bei Stow06 gemessen wurde. Die Maxima eins und zwei von Stow06 sind auf den 350 m Fließstrecke zusammengelaufen, der dritte Peak ist jedoch weiterhin einzeln zu sehen. Die Zeitunterschiede beziffern sich jeweils auf 15 min, die Fließzeit lässt sich folglich zu 23,3 m/min berechnen. Diver03 zeigt ab 17:47 Uhr eine Abfluss- bzw. Temperaturveränderung an, Stow01, etwa 40 m unterhalb der Rohreinmündung gelegen, macht dessen Beitrag durch einen klaren Peak deutlich; die nachfolgenden Temperaturmaxima sind die bei Stow15 gemessenen (siehe Abbildung 6.2.6 auf Seite 64).

Mischungsrechnung RohrDiver03

In diesem Fall ist zu beachten, dass sich der Logger Stow01 etwa 40 m unterhalb der Rohreinmündung befindet. Abbildung 6.2.1 auf Seite 59 zeigt jedoch, dass eine mögliche Beeinflussung durch die Lufttemperatur so gut wie ausgeschlossen werden kann. Die Situation ist dem vorigen Ereignis sehr ähnlich, mit Ausnahme der diesmal zwei zu unterscheidenden Peaks nach dem Temperaturpeak des Rohres von Diver03. Die erste Temperaturspitze von Stow01 besteht zu 81 % aus dem Abfluss des Rohres. Der Anteil geht unmittelbar nach dem ersten Maximum jedoch stark zurück, und die beiden weiteren Spitzen bestehen fast ausschließlich aus dem bereits bei Stow15 im Gerinne vorhandenen Wasser.

Der Zeitunterschied im Eintreffen zwischen den Peaks von Stow15 und Diver03 ist auf die verschiedenen Systemzeiten der Diver und Stowaways zurückzuführen. Das Rohr von Stow07 verzeichnet ab 17:48 Uhr einen starken Temperaturanstieg, die maximale Temperatur wir 17:58 Uhr erreicht.

Die zusammengefasste Reaktion des Löchernbach-Arms bei Diver01 ist in Abbildung 6.2.7 auf Seite 66 gezeigt.

Der erste Anstieg der Temperatur und des Wasserstandes ist auf Stow07 zurückzuführen, das zweite breitere und größere Maximum auf das Rohr von Diver03.



Abbildung 6.2.7.: Verlauf des Ereignisses vom 23. Juli 2007, dargestellt an Diver01

Erstaunlicherweise sinkt der Wasserstand beim zweiten Temperaturanstieg erst ab und beginnt dann wieder zu steigen. Der höchste Anstieg des Wasserstandes beginnt mit dem Eintreffen der dritten Temperaturwelle, die den Zusammenfluss von den Rohren von Diver04 und Diver05 darstellt. Das Wasser von der Quelle ist nicht mehr als eigenständiger Wasserstands-Peak zu erkennen, sondern nur noch als leichte Temperaturerhöhung gegen 18:50 Uhr.

6.2.2. Biebenbach

Sowohl Wasserstand als auch Temperatur steigen bei Diver07 ab 17:55 Uhr an. Während der höchste Wasserstand bereits um 17:57 Uhr aufgenommen wird, erreicht die Temperatur ihren Höchststand von 20,1 °C erst um 18:11 Uhr. Stow20 vermerkt eine steigende Wassertemperatur bereits zwei Minuten früher, um 17:53 Uhr. Wie auch beim vorigen Ereignis liegt die maximale Temperatur etwas über der bei Diver07 gemessenen, was erneut auf die Fließstrecke in den einzelnen Rohren zurückgeführt werden kann.

Am Auslass des Biebenbachs steigt die Wassertemperatur bei Diver02 ab 18:01 Uhr



Abbildung 6.2.8.: Verlauf des Ereignisses vom 23. Juli 2007 dargestellt an Diver02

an, erreicht um 18:05 Uhr einen ersten Höchststand, sinkt dann aber wieder leicht ab. Der Hauptanstieg beginnt um 18:08 Uhr, der dazugehörige Peak wird gegen 18:29 Uhr registriert. Beim vorigen Ereignis weist Diver02 nur einen Peak auf, bei diesem Ereignis gibt es im ansteigenden Ast noch einen Vorpeak in der Temperatur. Allein anhand der Temperaturverläufe (siehe Abbildung A.0.2 auf Seite 102) kann in diesem Fall keine konkrete Aussage über die Abfolge der Abflussbildung gemacht werden, und Wasserstände stehen nur am Anfang und am Ende des Biebenbaches zur Verfügung. Abbildung 6.2.8 veranschaulicht den Hergang des Ereignisses bei Diver02.

6.2.3. Pegel

Zusammenfassend zeigt Abbildung 6.2.9 auf Seite 68 im Anhang das Geschehen am Pegel. Aus Vergleichen der Verläufe von Temperatur, Leitfähigkeit und der Wasserstände bzw. des Abflusses wird auch hier deutlich, dass die Abflussbildung stark vom Löchernbach dominiert wird und der Biebenbach keinen großen Einfluss auf die Ganglinien hat.

Auch für dieses Ereignis war eine Abflussaufteilung am Pegel möglich, allerdings



Abbildung 6.2.9.: Reaktion des Pegels auf das Ereignis vom 23. Juli 2007

zu den im vorigen Kapitel bereits genannten Unsicherheiten und Fehlerbereichen. Abbildung 6.2.10 auf der nächsten Seite zeigt die Auftrennung in die verschiedenen Rohre.

Wie bei dem Ereignis vom 7. August hat das erste Rohr vom Pegel aus (Rohr-Stow07) nur einen sehr geringen Einfluss auf die Höhe des Abflusses. Das Rohr von Diver03 erreicht höhere Abflüsse als das beim vorigen Ereignis dominante Rohr von Diver04. In diesem Fall ist aber auch der Beitrag der vorderen beiden Rohre wesentlich deutlicher anhand der Gesamtabflussganglinie zu erkennen. Dieser erste Peak wird aber anscheinend fast ausschließlich von RohrDiver03 gestellt. Auch hier ist zumindest nach dem Temperaturverlauf zu erkennen, dass das Rohr auch noch am zweiten Peak einen großen Anteil hat. Der Abfluss zu Beginn des zweiten Peaks wird wahrscheinlich aber nur sehr gering von diesem Rohr gebildet, vielmehr sind Verschiebungen zwischen Temperaturpeak und Wasserstandspeak ursächlich für diesen Verlauf; der Einfluss dieses Rohres auf den Abfluss im Gerinne müsste also bereits einige Minuten früher zurückgehen.



Abbildung 6.2.10.: Anteile der Rohre vom 23. Juli

6.3. Ereignis vom 19. Juli 2007

Niederschlagsmenge 4.8 mm, Scheitelabfluss 77 l/s

Die bei diesem Ereignis verwendeten Messgeräte entsprechen dem Aufbau vom vorigen Ereignis, mit dem einzigen Unterschied, dass der Temperaturlogger Stow15 anstelle von Diver06 im Abflussrohr in den Terrassen platziert ist. Abbildung 6.3.1 auf Seite 70 veranschaulicht den Niederschlags- und Lufttemperaturverlauf während des Ereignisses.

Der Niederschlag setzt ab 10:20 Uhr richtig ein, der meiste Niederschlag wird mit 0,9 mm in 2 min um 10:34 Uhr gemessen. Die Lufttemperatur geht bis 11:04 Uhr kontinuierlich auf 17,6 °C zurück, steigt dann aber wieder langsam an und erreicht um 11:40 Uhr die Ausgangstemperatur von 20,1 °C.

6.3.1. Löchernbach

Stow15 in den Terrassen zeigt ein erstes Ansteigen der Temperatur um 10:27 Uhr, bis zum Peak vergehen 15 min. Stow11 registriert die Abflusswelle anhand steigender Temeratur um 10:35 Uhr, die Temperaturspitze wird 10:46 Uhr erreicht. Die Fließgeschwindigkeit lässt sich zu 45 m/min ermitteln und stimmt insofern mit den berechneten Geschwindigkeiten der beiden größeren Ereignisse überein. Die Wassertemperaturverläufe der Logger Stow11 bis Stow 08 sind in Abbildung 6.3.2 auf Seite



Abbildung 6.3.1.: Niederschlag und Lufttemperatur während des Ereignisses vom 19. Juli 2007

71 zu sehen.

Der kleine Vorpeak von Stow04 kann erneut mit dem vorher ins Gerinne entwässernden kleinen Rohr erklärt werden. Das Hauptmaximum bei Stow04 findet um 10:53 Uhr statt. Bei einer Differenz von 7 min ergibt sich auf 210 m Fließstrecke eine Fließgeschwindigkeit von 30 m/min.

Stow08 zeigt den kleinen Vorpeak von Stow04 auch noch ansatzweise an, das Hauptmaximum wird um 10:59 Uhr erreicht. Die Fließgeschwindigkeit lässt sich bei einer Strecke von 90 m zwischen Stow04 und Stow08 zu 15 m/min errechnen. Die geringere Temperaturabnahme im Peak von Stow04 auf Stow08, im Gegensatz zu Stow15 auf Stow11, lässt sich zum einen mit der geringeren Fließstrecke erklären und zum anderen mit einer wärmeren Lufttemperatur im Freien im Vergleich zu der Temperatur in den Entwässerungsrohren.

Diver05 erfasst ab 10:42 Uhr einen Anstieg der Wassertemperatur. Die wenig unterhalb im Gerinne liegenden Logger Stow 10 und Stow09 geben diesen Anstieg ebenfalls sehr gut wieder (siehe Abbildung 6.3.3 auf Seite 72).

Stow18, in einer großen Drainage gelegen, zeigt wieder nur eine sehr gering ausfallende Reaktion auf die Niederschläge; das Abflussvolumen ist zu gering, um Auswirkungen auf die Temperatur von Stow09 zu zeigen. Von Stow08 bis Stow10 braucht der Peak 7 min, bei 120 m Fließstrecke beträgt die Fließgeschwindigkeit 17,1 m/min; zum



Abbildung 6.3.2.: Wassertemperaturen der Logger Stow11 bis Stow08 (19. Juli 2007)

10 m unterhalb liegenden Logger Stow09 ist der Peak 9 min unterwegs. Die Fließgeschwindigkeit verringert sich nochmals und beläuft sich auf 14,4 m/min. Dieser zeitliche Unterschied bei nur 10 m Fließstrecke hebt nochmals die zeitliche Unsicherheit hervor, die bei solch kurzen Distanzen, sowohl durch die einminütige Auflösung der Messintervalle als auch auf die spätere Rundung auf glatte Minutenwerte, auftritt.

Am Picknickplatz unterscheidet sich die Situation bei den drei Loggern insgesamt leicht von den vorigen Ereignissen (siehe Abbildung 6.3.4 auf Seite 73).

Stow14 gibt die bei Stow09 gemessenen Temperaturerhöhungen nach 180 m noch gut wieder. Die Peaks haben Laufzeiten von 10 bzw. 11 min und demnach auf der 180 m langen Strecke Fließzeiten von 18 respektive 16,4 m/min.

Der zusätzliche Peak bei Stow14, der auch schon bei den größeren Ereignissen beobachtet werden konnte, ist auch bei diesem Ereignis zu sehen. Stow19 reagiert ab 10:36 Uhr auf beginnenden Oberflächenabfluss, bei Stow14 wird der Anstieg erst 10 min später, um 10:36 gemessen. Der zeitliche Abstand ist größer als bei den bereits beschriebenen Ereignissen, lässt sich aber auf die geringere Niederschlagsmenge und -intensität zurückführen und liefert somit eine plausible Begründung für dieses Temperaturmaximum. Der Umstand, dass die Temperatur bei Stow14 auch unterhalb derer von Stow19 liegt, spricht ebenfalls für die Theorie des "Pfützenabflusses":



Abbildung 6.3.3.: Wassertemperaturen der Logger Stow10 bis Stow09 (19. Juli 2007)

das ins Gerinne fließende Wasservolumen ist geringer als das bei Stow19 ins Rohr abfließende.

Stow13 zeigt insgesamt vier deutlich zu unterscheidende Temperaturspitzen an: einen ersten Vorpeak im ansteigenden Ast und dann noch drei weitere. Bei den beiden vormals beschriebenen Fällen zeigt Stow13 nach dem kleinen Vorpeak nur einen einzelnen großen Peak auf. Da bei Stow13 mehrere Entwässerungsrohre von verschiedenen Straßenabschnitten zusammenlaufen, kommt es auch zu verschiedenen Abflusswellen und damit zu Temperaturunterschieden im Abfluss. Bei den größeren Ereignissen ist die Trennung mehr oder weniger bis auf die erste Temperaturspitze aufgehoben, da die Abflussfolge zeitlich nicht mehr aufgelöst werden kann. Der Einfluss von Stow13 auf die Temperatur im Gerinne zeigt sich in diesem Fall sehr deutlich. Der Temperaturverlauf von Stow06 folgt bei den ersten drei Maxima klar dem Temperaturgang von Stow13. Erst das vierte und letzte Maximum wird wieder vom Gerinneabfluss von Stow14 dominiert. Der höchste Wasserstand im Rohr wird zum Zeitpunkt des dritten Peaks gemessen.

Mischungsrechnung RohrDiver04

Während beim ersten Peak nicht genau aufgelöst werden kann, wie das kleine Maximum zustande kommt, folgen die beiden nächsten Spitzen eindeutig dem Tem-



Abbildung 6.3.4.: Wassertemperaturen der Logger Stow14 bis Stow06 (19. Juli 2007)

peraturverlauf von Stow13. 77,4 % des Abflusses beim zweiten Peak sind nach der Mischungsrechnung auf das Rohr zurückzuführen. Doch bereits beim zweiten Peak sinkt der Anteil auf 27,3 %, und der letzte Peak wird ausschließlich von Stow14 gestellt.

Diver03 misst ab 10:36 Uhr eine Temperaturerhöhung, die um 10:41 Uhr auch bei Stow01 aufgezeigt wird (Abbildung 6.3.5 auf Seite 74).

Nachfolgend auf den Peak vom Rohr von Diver03 weist Stow01 noch einen weiteren deutlichen Anstieg mit zwei Maxima auf, sowie eine langgezogene leichte Erhöhung der Temperatur. Die Peaks um 11:10 und 11:17 Uhr entsprechen Peak Nummer zwei und drei von Stow06, die nicht sehr klare Erhöhung der Temperatur im Anschluss daran ist der vierte Peak von Stow06. Die Fließstrecke von Stow06 zu Stow01 ist 400 m lang, die Zeiten der einzelnen Peaks belaufen sich der Reihe nach auf 25, 19 und 28 min, die Fließgeschwindigkeiten entsprechen 16, 21 und 14,3 m/min. Die Werte lassen sich damit in die zuvor ermittelten Geschwindigkeiten eingliedern.

Nach Stow01 befindet sich bis zum Auslass des Löchernbachs kein Logger mehr im Gerinne, nur Stow07 zeigt an, dass ab 10:37 Uhr die Wassertemperatur im Rohr, das den Vorderteil der Mitteltrasse entwässert, ansteigt und somit Oberflächenabfluss ins Gerinne entwässert.



Abbildung 6.3.5.: Wassertemperaturen der Logger Diver03 und Stow01 (19. Juli 2007)

Abbildung 6.3.6 auf Seite 75 fasst den Abflussverlauf im Löchernbach bei Diver01 zusammen. Vier Temperaturmaxima sind sehr gut auszumachen, die letzte bei Stow01 gemessene Temperaturerhöhung ist jedoch nur noch angedeutet und nicht mehr eindeutig vom Lufttemperaturverlauf zu differenzieren. Die Herkunft der Temperaturspitzen ist aufrund des vorigen Verlaufs gut zu unterscheiden: der erste Peak geht auf das Rohr von Stow07 zurück, der größte und breiteste Peak stammt aus dem Rohr von Diver03. Das Rohr vom Picknickplatz (Diver04) verursacht die dritte Spitze, und das Rohr von Diver05 führt zum dritten Peak. Der Peak von der Quelle ist aufgrund des längsten Fließweges und damit stärkerer Dispersion nahezu aufgelöst und nicht mehr klar zu benennen.

6.3.2. Biebenbach

Abbildung A.0.3 auf Seite 102 im Anhang zeigt die Reaktion der im Biebenbach angebrachten Logger auf den Niederschlag.

Diver07 und Diver02 zeigen vom Temperaturverlauf her eine ähnliche Reaktion mit einem klar erkennbaren Vorpeak und einem langgezogenen Hauptpeak. Stow20 weist erneut nur eine Temperaturspitze auf.



Abbildung 6.3.6.: Reaktion von Diver01 auf das Ereignis vom 19. Juli 2007

Der Anstieg der Wassertemperatur beginnt bei Diver07 um 10:44 Uhr, bei Stow20 drei Minuten früher, und Diver02 registriert ab 10:52 Uhr steigende Werte. Der erste Vorpeak bei Diver02 hängt jedoch nicht mit dem Vorpeak von Diver07 zusammen, da es bei einer Strecke von 725 m und sechs Minuten im Peakversatz eine Fließgeschwindigkeit von 120 m/min bedeuten würde, was ein für das Löchernbach Einzugsgebiet unrealistischer Wert ist. Vielmehr scheint bei diesem Ereignis der Abfluss von den beiden Rohren vor Stow20 dominiert zu sein. Der erneute Temperaturanstieg bei Diver07 ab 10:50 Uhr hängt mit dem Trockenfallen der Quelle zusammen, es wird keine Wassertemperatur mehr gemessen, sondern die Lufttemperatur. Die gesamte Reaktion von Diver02 wird in Abbildung A.0.1 auf Seite 101 im Anhang verdeutlicht.

6.3.3. Pegel

Abbildung 6.3.7 auf Seite 76 gibt den Ablauf des Ereignisses am Pegel wieder. Auch bei diesem Ereignis zeigt sich, dass der Hauptteil des Abflusses vom Löchernbach-Arm stammt: die Ganglinien von elektrischer Leitfähigkeit und Temperatur nehmen bei Diver01 und am Pegel einen gleichen Verlauf an. Die Peaks bei der Temperatur am Pegel entsprechen denen von Diver01 und können genau gleich erklärt werden. Die sinkende Leitfähigkeit am Pegel zu Beginn des Ereignisses resultiert wahrscheinlich aus dem Dachabfluss von zwei in unmittelbarer Pegelnähe stehenden Scheunen. Bei nachlassendem Niederschlag steigt die Leitfähigkeit auch sofort wieder an, bis dann der Abfluss aus dem Gebiet richtig einsetzt.



Abbildung 6.3.7.: Gebietsreaktion auf das Ereignis vom 19. Juli 2007

6.4. Ereignis vom 26. Juni 2007

Niederschlagsmenge 4,2 mm, Scheitelabfluss 35 l/s

Niederschlag und Gang der Lufttemperatur sind in Abbildung 6.4.1 auf Seite 77 dargestellt.

Obwohl die Niederschlagsmenge nur wenig geringer als beim vorigen Ereignis ausfällt, beträgt der daraus resultierende Abfluss am Pegel nur etwa die Hälfte. Ausschlaggebend hierfür ist die längere Niederschlagsdauer mit insgesamt geringeren



Abbildung 6.4.1.: Niederschlag und Temperatur während des Ereignisses vom 26. Juni 2007

Intensitäten (siehe zum Vergleich Abbildung 6.3.1 auf Seite 70).

Im Gegensatz zu den drei oben beschriebenen Fällen sind die Temperaturdifferenzen im Gerinne -die Wassertemperatur folgt bei einigen Loggern sehr stark der Lufttemperatur- bei diesem Ereignis nicht ausreichend, um nur anhand der Daten der Stowaways Rückschlüsse auf die Abflussbildung zu ziehen. Die von den Divern in den Entwässerungsrohren aufgezeichneten Werte, insbesondere die der elektrischen Leitfähigkeit, ermöglichen jedoch mit den Erkenntnissen aus den bisherigen Analysen ein Aufschlüsseln auch bei diesem geringen Abfluss.

Abbildung 6.4.2 auf Seite 78 zeigt den Verlauf des Ereignisses am Pegel. Während nur ein Abflusspeak erkennbar ist und die Wassertemperatur sehr unruhig verläuft und nur eine leichte Erhöhung zwischen 11 und 12 Uhr aufweist, zeigt die elektrische Leitfähigkeit ein viel deutlicheres Bild.

Während das erste Absinken der Leitfähigkeit auf Niederschlag ins Gerinne und Abfluss von den Scheunendächern zurückzuführen ist, lässt sich die erste richtige Verringerung auf das Rohr von Stow07 zurückführen. Der Knick bedeutet das Ankommen des Wassers aus dem Rohr von Diver03. Die drei übrigen Minima entsprechen den Abflüssen der Rohre von Diver04 und 05 sowie der Löchernbach-Quelle. Der Biebenbach hat auch bei diesen geringen Abflüssen keine Auswirkung auf die Ganglinie, der Pegel folgt im Verlauf dem Löchernbach-Arm. Abbildung A.0.4 auf Seite 103 im Anhang stellt die Leitfähigkeitsverläufe der Diver01 und 02 nebeneinander.



Abbildung 6.4.2.: Reaktion des Pegels beim Ereignis vom 26. Juni 2007

6.5. Hydraulische Abflussberechnungen

Für die Rohre von Diver03 und Diver04 konnten bei den Ereignissen von August und Juli hydraulisch Abflüsse berechnet werden. Die Scheitelabflüsse der Rohre sind in Tabelle 6.5.1 zusammengestellt.

	Rohr Diver03		Rohr Diver04		
Datum	Wasserstand	Abfluss	Wasserstand	Abfluss	
	[cm]	[l/s]	[cm]	[l/s]	
7. August	28	482	50	1543	
23. Juli	13	115	24	530	
19. Juli	8	43	18	311	

Tabelle 6.5.1.: Berechnete Rohr-Abflüsse mit Rohr-Gefälle aus dem Laserscan-DGM

Auffällig sind vor allem die großen Unterschiede zwischen den beiden Rohren. Das Rohr von Diver04 liefert bei allen Ereignissen mehr als das Dreifache des Abflussvolumens vom Rohr von Diver03. Diese Unterschiede machen sich auch beim Abfluss am Pegel bemerkbar: der zweite Abflusspeak ist bei den oben beschriebenen Ereignissen immer bedeutend größer als der erste. Somit wird deutlich, dass die Straßenentwässerungsrohre keinen identischen Abfluss liefern. Die berechnete Höhe der Abflüsse ist hingegen diskussionswürdig. Insbesondere die Abflüsse vom RohrDiver04 sind sehr hoch und sogar immer weitaus höher als die Scheitelabflüsse am Pegel. Die Abflusswelle wird beim Durchlaufen des Gerinnes zwar noch verformt und somit abgeflacht, die berechneten Werte erscheinen aber dennoch viel zu hoch. Eine mögliche Erklärung hierfür ist zum einen die Wasserstandsmessung, zum anderen aber auch das angenommene Gefälle für die Rohre, da es durchaus sein kann, dass die Rohre nicht das gleiche Gefälle wie die Geländeoberfläche aufweisen, sondern zumindest im letzten Abschnitt im Talbereich wesentlich flacher verlaufen.

Allein die Abflussfülle von RohrDiver04 für das Ereignis vom 7. August liegt mit über 6600 m^3 fast doppelt so hoch wie die am Pegel berechnete Abflussfülle (3400 m³). Mit dem Gefälle der Geländeoberfläche (bei Diver04 5,8 % und bei Diver03 2,8 %) ergeben auch die errechneten Basisabflüsse wenig Sinn. Der Wasserstand im Rohr bei Diver04 beträgt zu Basisabflusszeiten etwa 2-3 cm. Die daraus berechneten Abflüsse liegen dann zwischen 3,6 und 8,1 l/s. Nach Schätzungen dürfte der Abfluss aus diesem Rohr jedoch tatsächlich etwa 0,5 bis 1,5 l/s betragen. Erst eine drastische Reduzierung des Gefälles auf 1/10 des Gelände-Gefälles liefert mit 1 l/s einen realistischen Wert. Tabelle 6.5.2 zeigt die berechneten Abflüsse mit verändertem Rohr-Gefälle.

	Rohr Diver03		Rohr Diver04		
Datum	Wasserstand	Abfluss	Wasserstand	Abfluss	
	[cm]	[l/s]	[cm]	[l/s]	
7. August	28	203	50	451	
23. Juli	13	48	24	155	
19. Juli	8	18	18	91	

Tabelle 6.5.2.: Berechnete Rohr-Abflüsse mit stark reduziertem Rohr-Gefälle (0,5 %)

Die so berechneten Werte sind wesentlich wahrscheinlicher als die zuvor angegebenen. Die Abflussfülle für RohrDiver04 beläuft sich nun auf etwa 1950 m³ für das Ereignis vom 7. August, was aber immer noch sehr hoch erscheint. Der Scheitelabfluss von 451 l/s scheint jedoch zumindest vom Scheitelabfluss her in einem vernünftigen Bereich zu liegen. Die Aufteilung der Ganglinie (Abbíldung 6.1.12 auf Seite 58) zeigt im Peakbereich für das Rohr von Diver04 einen Abfluss von etwas über 400 l/s an. Durch Dispersion liegt der Abfluss am Pegel natürlich unterhalb des Abflusses im Rohr, insofern ist diese Übereinstimmung ein Indiz dafür, dass die Werte die richtige Größenordnung haben könnten.

6.6. Fließgeschwindigkeiten

Zur Berechnung der Fließzeiten wurden die Startzeitpunkte der Veränderungen von Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit an den in den Entwässerungsrohren angebrachten Divern und Stowaways verwendet. Mit der Bedingung, dass die Temperaturveränderung den gleichen Startzeitpunkt wie die Veränderung der Leitfähigkeit zu Abflussbeginn zeigt, wurde anhand der Leitfähigkeitsganglinie am Pegel die Fließzeit der einzelnen Abflusswellen aus den Rohren berechnet.

Abbildung 6.6.1 zeigt die errechneten Fließgeschwindigkeiten aufgetragen gegen die Entfernung vom Pegel. Da bei dem Abflussereignis mit über 1 m³ Scheitelabfluss die Abflusswellen aus dem hinteren Einzugsgebietsteil nicht klar voneinander zu trennen waren, konnte keine Fließzeitenberechnung durchgeführt werden.



Abbildung 6.6.1.: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Fließgeschwindigkeit und Entfernung zum Pegel bei unterschiedlichen Scheitelabflüssen

Es ist erkennbar, dass die Fließgeschwindigkeit der ins Gerinne einmündenden Abflusswellen aus den Rohren mit zunehmender Entfernung vom Pegel über die gesamte Lauflänge zunimmt. Die Abflüsse, die weiter oben im Gebiet ins Gerinne gelangen, haben also eine höhere durchschnittliche Fließgeschwindigkeit als die Abflüsse, die aus den weiter unten im Talbereich ins Bachbett mündenden Rohren stammen. Es wird zudem deutlich, dass die Unterschiede in den Fließgeschwindigkeiten während eines Ereignisses -die Steigung der Regressionsgeraden nimmt zu- umso größer sind, je höher der Scheitelabfluss am Pegel ist. Die Zunahme der Fließgeschwindigkeiten der einzelnen Abflusswellen während eines Ereignisses ist mit der Steigung des Gerinneprofils zu erklären. Abbildung 6.6.2 zeigt den Löchernbach-Arm im Höhenprofil.



Abbildung 6.6.2.: Höhenlängsprofil des Löchernbaches. Erstellt anhand des 1×1 m Laserscan-DGMs der LUBW (2007)

Der Bachlauf ist in Segmente von 300 m unterteilt, und es wird ersichtlich, dass vom Pegel an das Gefälle stetig zunimmt. Die Unterschiede in der Steigung der Regressionsgeraden sind auf den ersten 900 m relativ gering, die Steigung nimmt auf den letzten 400 m bis zur Quelle aber stark zu. Die Steigungen der einzelnen Segmente sind in Tabelle 6.6.1 zusammengefasst.

Tabelle 6.6.1.: Gefälle der einzelnen Gerinne-Teilstücke

Segment	0-300	300-600	600-900	900-1200	1200-1330
Steigung [%]	$1,\!9$	2,0	2,2	4,7	$7,\!2$

6.7. Fazit

Anhand der durchgeführten Ereignisanalysen kann eine gewisse Gesetzmäßigkeit in der Abflussbildung im Löchernbach festgestellt werden.

Zuerst ist anzumerken, dass der Abfluss im Löchernbach Einzugsgebiet fast ausschließlich vom Löchernbach-Arm dominiert wird und der Biebenbach-Arm größtenteil zu vernachlässigen ist. Begründet werden kann dies zum einen mit der kleineren Teileinzugsgebietsfläche des Biebenbaches und zum anderen in der Anzahl der in die jeweiligen Arme entwässernden Rohre. Während in den Löchernbach fünf große Straßenentwässerungsrohre einmünden, sind es beim Biebenbach nur drei, die auch insgesamt kürzer sind und somit weniger Straßen(-fläche) entwässern. Die eindeutige Dominanz des Löchernbaches ist bei den beschriebenen Ereignissen gut in den Temperatur- und Leitfähigkeitverläufen zu erkennen; dieser Punkt konnte aufgrund der genannten Probleme bei der Messung jedoch leider nicht durch Mischungsrechnungen bestätigt werden. Der Anteil des Löchernbaches am Gesamtabfluss kann demnach nur geschätzt werden, dürfte aber bei rund 70-90 % liegen.

Ebenfalls gut zu erkennen ist die Wellenfortpflanzung im Gerinne, die mit den Temperaturloggern aufgezeigt werden kann. Aufgrund der Auflösung der Logger und der beschriebenen Problemen (siehe Kapitel 4.2.3 auf Seite 29) kann der Ablauf des Abflussereignisses im Gerinne jedoch erst ab einem gewissen Abfluss beobachtet werden, da bei kleinen Ereignissen die Temperaturdifferenzen nicht ausreichen, um ein Wasserpaket die Gerinnestrecke entlang durch die Logger identifizieren zu können. Ausschlaggebend hierfür sind zum einen die Lufttemperatur aber auch die Niederschlagsmenge bzw. -intensität. Ein Wasserpaket muss so groß sein, dass es eine Temperaturveränderung im Gerinne bewirkt. Deshalb kann die Wellenfortpflanzung nicht für die kleineren Ereignisse beschrieben werden.

Die Fließgeschwindigkeiten nehmen von der Quelle bis zum Pegel ab, da sich das Gefälle des Gerinnes ändert.

Das Anspringen der Rohre auf Niederschlagsereignisse findet ungefähr zeitgleich statt, wobei sich herausgestellt hat, dass das Rohr am Picknickplatz (RohrDiver03) immer ein paar Minuten früher den Temperaturanstieg bzw. Leitfähigkeitsabfall verzeichnet. Anhand der am Pegel gemessenen Daten kann somit erklärt werden, welches Rohr zu welcher Zeit den Abfluss liefert.

Bereits WAGNER (2002) hat in seiner Arbeit auf den für ihn charakteristischen Doppelpeak bei Abflussereignissen im Löchernbach hingewiesen. WAGNER (2002) führt die in der Abflussganglinie am Pegel gemessenen zwei Abflussspitzen auf unterschiedliches Abflussverhalten der Terrassen zurück. Demnach sind die beiden Abflussmaxima aufzutrennen in Abfluss von den Straßen (erster Peak) und Terrassenabfluss (zweiter Peak). Anhand der in dieser Arbeit während Abflussereignissen gewonnenen Temperatur- und Leitfähigkeitsdaten im Gerinne kann die Doppelpeak-Theorie noch etwas präzisiert werden.

Vielmehr wird aus den durchgeführten Ereignisanalysen deutlich, dass es möglich ist, den Löchernbach-Arm bei der Abflussbildung zweizuteilen. Den ersten Teil bilden die beiden ersten Rohre von Stow07 und Diver03. Deren Beitrag ist sowohl an Diver01 als auch am Pegel deutlich durch den Temperatur- bzw. Leitfähigkeitsverlauf zu erkennen. Der zweite und von der Abflussmenge her bei den untersuchten Ereignissen bedeutsamere Teil ist auf die drei übrigen Rohre von Diver04 und 05 und auf die Quelle zurückzuführen. Somit bedingt die Fließstrecke von ca. 360 m zwischen RohrDiver03 und RohrDiver04 den Zeitversatz zwischen den Abflusspeaks; die übrigen Rohre liegen –mit Ausnahme der Quelle– alle näher beieinander. Das verhältnismäßig langsame Auslaufen der Ganglinie bis zum Einsetzen des Basisabflusses kann in diesen Fällen durch die Quelle erklärt werden; aufgrund der langen Fließstrecke ist die Dispersionswirkung auf die Abflusswelle so groß, dass die am Pegel ankommende Welle sehr langgezogen ist und somit keinen Peak im eigentlichen Sinne mehr hervorruft.

Die hydraulischen Abflussberechnungen für die zwei Rohre stützen diese Theorie ebenfalls. Die berechneten Werte sind zwar als zu hoch zu bewerten, die Größenordnungen, insbesondere die deutlichen Unterschiede in den Abflüssen der beiden Rohre, dürften jedoch stimmen. Bei diesen Beispielen war die Zweiteilung des Gebietes bzw. die Zweiteilung in den Abflussbeiträgen gut zu erkennen.

Diese Erklärung ist sehr wahrscheinlich jedoch nur gültig für Ereignisse, bei denen der Niederschlag verhältnismäßig kurz ausfällt, nur eine einzelne klar definierte Niederschlagsspitze aufweist und im Idealfall das Gebiet gleichmäßig überregnet. Die gewählten Beispiele sind -mit Ausnahme von dem Ereignis am 7. August– in diesem Sinne also vermutlich Idealfälle, wobei bei nur einem Niederschlagsmesser im Gebiet keine Aussage über eine gleichförmige Überregnung gemacht werden kann und nur anzunehmen ist, dass die Niederschlagsverteilung ideal war. Aufgrund der nur geringen Größe des Einzugsgebietes dürfte eine ungleichmäßige Überregnung eine Verzerrung der Abflussganglinie bewirken, da je nach Zuglinie der Niederschlagszelle bestimmte Bereich zuerst Niederschlag empfangen und dementsprechend auch zuerst abflusswirksam werden.

So treten zum Beispiel Fälle auf, bei denen die beiden Abflussmaxima ungefähr identische Höhen aufweisen (siehe Abbildung A.0.5 auf Seite 103 im Anhang) oder sogar die Maxima so vertauscht sind, dass die erste Spitze einen größeren Abfluss hervorruft als die zweite (Abbildung A.0.6 auf Seite 104 im Anhang). Bei dem überwiegenden Teil der Ereignisse ist jedoch die Zweiteilung, wie oben beschrieben, in mehr oder weniger ausgeprägter Form vorzufinden.

Die Sediment-Messungen stützen die Theorie der Löchernbach-Zweiteilung im Ereignisfall. So weist auch die Sediment-Ganglinie vom 23. Juli zwei Peaks auf (Abbildung 5.2.1 auf Seite 41); unter Vernachlässigung des Beitrages durch den Biebenbach-Arm stammt der erste Sediment-Beitrag von den beiden vorderen Rohren Stow07 und Diver03, während der größere Teil auf die restlichen Rohre und die Quelle zurückzuführen ist. Da der APEG erst ab einem Wasserstand von 11 cm (entspricht 14,41/s) beginnt, Proben zu ziehen, kann über den ersten Teil der ansteigenden Abflussganglinie leider keine Aussage gemacht werden. Es ist jedoch nicht anzunehmen, dass ein weiterer Sediment-Peak zu beobachten gewesen wäre.

Die Ereignisgröße bzw. der Scheitelabfluss spielt ebenfalls eine wichtige Rolle für den Verlauf der Abflussganglinie. Die beiden größten Ereignisse der Messperiode lassen vermuten, dass ab einem gewissen Abfluss die Zweiteilung aufgehoben ist und im Prinzip nur ein Maximum auftritt (siehe dazu Abbildung 6.1.10 auf Seite 56 und Abbildung A.0.7 auf Seite 104 im Anhang), wobei bei beiden Ereignissen der erste Peak als Rücken im ansteigenden Ast noch erkennbar ist.

Deutlicher fällt der Unterschied bei den kleineren Ereignissen bis zu ca. 60 l/s auf, die nicht durch Konvektivereignisse, sondern durch länger andauernde Niederschläge mit insgesamt relativ geringer Niederschlagsmenge und nur niedrigen Intensitäten zustande kommen. Bei den meisten registrierten kleineren Ereignissen ist die oben erwähnte Struktur gänzlich aufgelöst, und es gibt entweder nur einen einzigen Abflusspeak oder gleich mehrere, ausgelöst durch Niederschlag ohne klar definierte Spitzen bzw. mit mehreren Maxima. Vorherrschend ist hier allerdings die Ein-Peak-Variante wie bei dem in Kapitel 6.4 auf Seite 76 beschriebenen Ereignis vom 26. Juni 2007.

Ereignis	1. Peak $[l/s]$	2. Peak $[l/s]$	Zeitdifferenz [min]
11.07.2007	205	144	8
27.06.2007	95	168	12
23.07.2007	89	152	15
29.07.2007	89	95	23
19.07.2007	43	77	22

Tabelle 6.7.1.: Zeitdifferenzen zwischen den Abflusspeaks bei fünf Ereignisse

Wenn die Zeitdifferenzen zwischen den beiden Peaks und die Scheitelabflusshöhe gegeneinander aufgetragen werden, ist zu erkennen, dass zwischen diesen Parametern ein deutlicher Zusammenhang besteht (siehe Abbildung 6.7.1 auf Seite 85). Verwendet wurden hierfür die fünf größeren Ereignisse, bei denen der Doppelpeak deutlich



Abbildung 6.7.1.: Scheitelabfluss geplottet gegen die Zeitdifferenz der Doppelpeaks für fünf Ereignissen

ausgeprägt ist (siehe Tabelle 6.7.1 auf Seite 84). Je größer der Scheitelabfluss eines Ereignisses ist, desto kürzer ist die zwischen den beiden Abflussspitzen verstreichende Zeit; hierbei spielt es anscheinend keine Rolle, ob der erste oder der zweite Peak der größere ist.

Dieses Ergebnis steht in Einklang mit der Erkenntnis, dass die Fließgeschwindigkeiten der Abfluswellen der Rohre zur Quelle hin zunehmen (siehe Abbildung 6.6.1 auf Seite 80). Je größer das Ereignis ist, desto größer wird der Unterschied in den Fließgeschwindigkeiten, weshalb auch die Zeitdifferenz zwischen den beiden Abflussspitzen zwangsläufig geringer wird.

7. Grundwasser

Der Hauptteil dieser Arbeit beschäftigt sich zwar mit der schnellen Abflusskomponente "Oberflächenabfluss", es wurden jedoch auch einige Untersuchungen zum Grundwasser durchgeführt. Die Ergebnisse werden in diesem Kapitel kurz dargestellt.

7.1. Grundwasser-Drainagen



Abbildung 7.1.1.: Lage der Grundwasser-Temperaturlogger

Im Laufe der Messperiode waren mehrere Stowaway Temperatur-Logger auch in Grundwasserdrainagen platziert, vorwiegend, um damit überprüfen zu können, ob im Falle eines Niederschlagsereignisses eine messbare Veränderung der Grundwassertemperatur stattfindet. Zudem konnte teilweise mit den Loggern der Temperaturverlauf über einen längeren Zeitraum verfolgt werden. In Abbildung 7.1.1 auf Seite 87 ist zu sehen, an welchen Orten die Stowaways in Grundwasserdrainagen platziert waren.

Stow12 befindet sich am Westende des terrassierten Bereichs, nur einige Dekameter von der Waldgrenze entfernt am Fuße einer Terrasse. Die Drainage ist auf dem Plan nicht eingezeichnet, entwässert aber vermutlich nur eine einzelne Terrasse. Das drainierte Wasser fließt dann am Straßenrand entlang in den nächsten Gulli und trägt mit bei zum Abfluss der Quelle.

Stow01 befindet sich im Talbereich, trägt aber als eine der wenigen Drainagen im Tal zur Entwässerung von Terrassen bei.

Stow03 liegt sich in einer Drainage unmittelbar neben dem Rohr von Diver05. Auch diese Drainage ist im vorhandenen Kartenwerk nicht verzeichnet, entwässert aber anscheinend einen Teil des südwestlich gelegenen Talbereiches.

Stow19 ist der Logger, der sich in einem offensichtlich vom Grundwasser gespeisten Brunnen am Picknickplatz befindet.



Abbildung 7.1.2.: Temperaturverläufe von drei Grundwasser-Loggern

Die Stowaways 01 und 12 sind bereits nach einigen Wochen aus den Drainagen genommen worden, weil bei Abflussereignissen keine Temperaturveränderung festgestellt werden konnte. Eine zuerst vermutete Temperaturänderung bei Stow03 konnte nachträglich auf ins Drainagerohr eindringendes Gerinnewasser zurückgeführt wer-
den (vergleiche Kapitel 6).

In Abbildung 7.1.2 auf Seite 88 sind die Temperaturverläufer der drei Logger Stow03, 01 und 12 zu sehen. Die Peaks bei Stow01 sind darauf zurückzuführen, dass der Logger teilweise nicht mehr komplett im Drainagerohr lag, sondern leicht aus dem Rohr herausragte und somit zusätzlich noch stark der Lufttemperatur ausgesetzt war. Die übrigen einzelnen Spitzen bei den Ganglinien sind keine Maxima, die auf erhöhte Grundwassertemperatur hindeuten, sondern ebenfalls auf in die Drainagerohre eindringendes Wasser bzw. Beeinflussung durch die Lufttemperatur.



Abbildung 7.1.3.: Ganglinien von Stow03 und der Lufttemperatur (geglättet)

Auffällig ist, dass alle drei Ganglinien im aufgezeichneten Zeitraum insgesamt steigen –wobei Stow03 von Ende Juni bis Anfang Juli eine ca. zweiwöchige Rezession verzeichnet–, die Ganglinie von Stow03 aber immer 1-2 °C über den Ganglinien von Stow01 und 12 liegt. Es hat den Anschein, dass die Ganglinie von Stow03 etwas schneller steigt als die Temperaturverläufe der beiden anderen Logger. Da die Zeitreihen der Stowaways 01 und 12 jedoch zu kurz sind, um definitive Aussagen zu ermöglichen, bewegt man sich damit im Bereich der Spekulation. Erstaunlich ist jedoch die nahezu 100 %ige Deckung der Ganglinien der beiden Logger; ob diese sich auch im weiteren Verlauf der Messperiode erhalten hätte, kann nur vermutet werden.

Abbildung 7.1.3 zeigt die Ganglinie von Stow03 zusammen aufgetragen mit einer

geglätteten Lufttemperaturganglinie.

Sowohl das erste Maximum von Stow03 als auch das Minimum folgen ca. 2-3 Wochen nach dem ersten Maximum bzw. Minimum der Lufttemperatur. Hiermit auf eine mittlere Verweilzeit des bei Stow03 austretenden Grundwassers von 2-3 Wochen zu schließen, dürfte ohne weitere Untersuchungen jedoch etwas vorschnell sein. Insofern sollte der "Zusammenhang" erst als reine Beobachtung stehen bleiben.

Der Temperaturunterschied zwischen den Ganglinien von Stow03 und Stow01/12 könnte ein verschiedenes Alter respektive eine unterschiedlich lange Verweilzeit im Boden bedeuten. Wenn davon ausgegangen wird, dass der Boden auf den Terrassen aufgrund häufigerer Bearbeitung mit schwerem Gerät (im Messzeitraum konnte fast nur auf den Terrassen der Gebrauch von Traktoren beobachtet werden) stärker verdichtet ist als der kolluviale Talbereich, könnte der Temperaturunterschied damit möglicherweise erklärt werden.

Dagegen sprechen die von SCHUMACHER (1981) durchgeführten Infiltrationsversuche im Löchernbach Einzugsgebiet. SCHUMACHER (1981) ermittelte für die Terrassen Infiltrationsraten von 60-64 mm/h und für das Tal einen deutlich geringeren Wert (37 mm/h). Am Pegel allerdings wurden Werte von 77 mm/h gemessen. Da diese Messungen mittlerweile aber bereits mehr als 25 Jahre zurückliegen, darf nicht ausgeschlossen werden, dass sich im Laufe der Zeit Änderungen bezüglich des Infiltratonsverhaltens ergeben haben, zumal 1981 die Flurbereinigungen erst wenige Jahre zurücklagen. Insofern werden die von SCHUMACHER (1981) ermittelten Werte nicht für eine Interpretation herangezogen, die aufgrund der nur geringen Datenlage ohnehin nicht fundiert wäre.

Festgehalten werden kann jedoch, dass es offensichtlich unterschiedliche Grundwassersysteme im Löchernbach Einzugsgebiet gibt; ausreichende Erklärungen dafür können jedoch nicht geliefert werden.

7.2. Temperatur- und Leitfähigkeits-Längsprofile

An sechs verschiedenen Tagen sind Temperatur- und Leitfähigkeits-Längsprofile im Gerinne aufgenommen worden, um Grundwassereinleitungen zu detektieren bzw. festzustellen, ob durch die Einleitungen merkliche Unterschiede bei den Parametern Temperatur und Leitfähigkeit hervorgerufen werden.

Fünf Profile wurden vom Löchernbach aufgenommen, eines vom Biebenbach. Die Messungen verliefen so, dass vom Pegel aus alle 20 m sowohl eine Temperatur- als auch Leitfähigkeitsmessung mit einem LF-92 durchgeführt wurde. Alle Längsprofile wurden innherhalb eines Monats vom 12. Juli bis zum 11. August erstellt, meistens gegen Mittag oder Nachmittag, teilweise aber zu unterschiedlichen Witterungsbedingungen.

7.2.1. Löchernbach



Abbildung 7.2.1.: Längsprofile vom 1. und 11. August



vom 11. August.

Temperatur und Leitfähigkeit zeigen keinen konstanten Verlauf, sondern springen von der Quelle aus gesehen in bestimmten Abständen auf ein höheres (Leitfähigkeit) oder niedrigeres (Temperatur) Niveau. Diese Sprünge sind mit der Einleitung von Grundwasser zu erklären, das durch eine längere Bodenpassage bzw. längere Verweilzeiten im Gebiet zum einen höher mineralisiert ist (siehe z. B. (CUI, 1997)) und zum anderen abgekühlt wird.

Wenn das Wasser nun im Gerinne fließt, wärmt es sich durch kurzwellige Strahlung und den Bodenwärmestrom (vom Gerinnebett her) auf, und die elektrische Leitfähigkeit geht zurück. Dies ist auf den hohen Gehalt an Ca^{2+} und HCO_3^- im Abfluss zurückzuführen. Die Löslichkeit von $CaCO_3$ nimmt mit abnehmender Wassertemperatur zu; dementsprechend verringert sich der Anteil an gelöstem $CaCO_3$, wenn die Wassertemperatur zunimmt: während Ca^{2+} und HCO_3^- eine elektrische Ladung tragen und somit elektrischen Strom leiten können, trägt das ungeladene $CaCO_3$ -Molekül nicht zur Leitfähigkeit des Wassers bei, die Leitfähigkeit sinkt also.

Die Sprünge von Temperatur und Leitfähigkeit finden an den gleichen Stellen statt wie beim Längsprofil vom 1. August. Die beiden Profile unterscheiden sich jedoch in einigen Punkten. Der 1. August war ein warmer bis heißer Tag, am 29.7. hatte es zwar ein Abflussereignis mit über $400 \, l/s$ gegeben, der Abfluss am Pegel betrug dennoch nur 2-3 l/s.

Am 11. August belief sich der Abfluss am Pegel noch auf 12-14 l/s, vom 7. bis zum Mittag des 11. Augustes fielen insgesamt 70 mm Niederschlag, die daraus resultierenden Abflüsse hatten Scheitelwerte von 200 bis über 1000 l/s.

Die Wassertemperaturen am 1. August liegen deutlich über denen vom 11. August. Der 1. August war ein Strahlungstag, zudem konnte sich die Wassertemperatur durch den nur geringen Abfluss im Gerinne schnell erhöhen. Ferner dürften auch die Fließgeschwindigkeiten geringer gewesen sein, was eine längere Fließzeit zur Folge hatte, in der das Wasser der kurzwelligen Strahlung ausgesetzt war.

7.2.2. Biebenbach

Abbildung 7.2.2 auf Seite 93 zeigt das am 6. August aufgenommene Längsprofil vom Biebenbach.

Hier fällt auf, dass der Biebenbach erst ab einer Entfernung von ca. 350 m hinter der eigentlichen "Quelle" Wasser führte. Auch sind auch die Sprünge im Temperaturund Leitfähigkeitsverlauf teilweise nicht ganz so deutlich wie die Sprünge beim Löchernbach. Der mit "6" gekennzeichnete Sprung bzw. die vermeintliche Einleitung



Abbildung 7.2.2.: Längsprofil Biebenbach 6. August 2007

von Grundwasser lässt nur Temperaturunterschied erkennen, nicht jedoch einen Unterschied in der Leitfähigkeit. Der Grund hierfür könnte auch die Auflösung des LF-92 mit 0,1 °C sein.

Des Weiteren ist es interessant, dass –im Gegensatz zum Löchernbach– die Leitfähigkeit nicht auf ein höheres Niveau springt, sondern zumindest bei "1" und "3" stark absinkt, die Temperatur jedoch beide Male zurückgeht.

7.2.3. Fazit

Die Sprünge im Längsprofil von Löchernbach und Biebenbach lassen sich mit Entfernungsmessungen in den Gerinnen gut einzelnen Rohren und Drainagen zuweisen (7.2.3 auf Seite 94).

Während beim Biebenbach anscheinend nahezu alle Drainagen und Rohre so viel Abfluss liefern, dass es zumindest zu einer geringfügigen Änderung im Temperatur- und Leitfähigkeitsverlauf kommt, ist die Situation beim Löchernbach anders. Allem Anschein nach liefern von den über 20 vorhandenen Rohren und Drainagen nur sieben merklichen Abfluss.

Bereits UHLENBROOK (1995) hat darauf hingewiesen, dass anscheinend nicht mehr alle Drainagen durchgehend durchlässig sind, da bei dem von ihm durchgeführten Markierversuch mit Uranin nicht an allen mit dem Testfeld vermutlich in Verbindung



Abbildung 7.2.3.: Rohre und Drainagen, bei denen ein Leitfähigkeits- und Temperatursprung nachgewiesen werden konnte

stehenden Drainagen Tracer nachgewiesen werden konnte.

So wird der Basisabfluss im Löchernbach im Grunde von vier Rohren / Drainagen und der Quelle gestellt, da nur diese wirklich nennenswerte Veränderungen im Temperaturund Leitfähigkeitsverlauf hervorrufen. Die meisten der kleineren Drainagestücke in der Hälfte zum Pegel hin liefern anscheinend keinen oder keinen ausreichenden Abfluss. Gründe hierfür könnten die von UHLENBROOK (1995) angesprochene Verstopfung der Drainagen sein oder ein zum Pegel hin auskeilender Grundwasserspiegel, der in der unteren Hälfte unter der Drainagetiefe liegt. Da keine Grundwasserstände erfasst wurden, kann dies jedoch nur als Vermutung geäußert werden. Dagegen spricht dann auch, dass die Messungen am 11. August bei hohem Basisabfluss und einem mutmaßlich höheren Grundwasserspiegel nicht wesentlich anders ausfallen als am 1. August bei sehr niedrigem Abfluss.

Für den 11. August wurden Mischungsrechnungen für die Punkte 2, 3 und 4 in Abbildung 7.2.3 durchgeführt. Diese entsprechen den Rohren und Drainagen von Stow01, Stow03 und Stow13 (siehe dazu Abbildung 7.1.1 auf Seite 87 und Abbildung 6.1.2 auf Seite 46). Das Ergebnis ist in Tabelle 7.2.1 auf Seite 95 zu sehen, die Werte in Klammern sind die Nummerierungen aus Abbildung 7.2.3.

	· · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3		0
	Tempe	eratur	Leitfäh	igkeit
Logger	Drainage $[\%]$	Gerinne [%]	Drainage $[\%]$	Gerinne [%]
$\overline{\text{Stow01}(2)}$	24	76	31	69
Stow 03 (3)	67	33	23	77
Stow13 (4)	12	88	14	86

 Tabelle 7.2.1.:
 Mischungsrechnungen
 Basisabfluss
 11.
 August
 2007

Auffällig ist vor allem der Unterschied der Ergebnisse bei den beiden verwendeten Berechnungsgrundlagen: die über die Temperatur berechneten Prozentsätze weichen teilweise sehr stark von den mit der Leitfähigkeit berechneten ab. Am größten ist die Differenz bei Stow03. Die Temperatur des Drainage-Abflusses unterscheidet sich nur geringfügig von den Wassertemperaturen im Gerinne, der Unterschied bei der Leitfähigkeit ist bedeutend größer (siehe dazu Tabelle 7.2.2). Aufgrund der Temperaturauflösung von 0,1 °C kann es insbesondere bei nur geringen Differenzen zu möglicherweise stark verfälschten Werten kommen. Die aus der Leitfähigkeit berechneten Werte sind dementsprechend vertrauenswürdiger, da die Auflösung 1 μ S/cm beträgt.

Tabelle 7.2.2.: Grundlagen für die Basisabfluss-Mischungsrechnungen

	Stow01		Sto	Stow03		Stow13	
Lage	LF	Temp	LF	Temp	LF	Temp	
oberhalb	932	16,6	953	16,6	972	17,3	
im Rohr	1016	$14,\!9$	1089	16,9	1105	$14,\!9$	
unterhalb	958	16,2	984	$16,\!8$	990	17,0	

Der Einfluss der Drainagen nimmt gerinneabwärts merklich ab. Das muss aber nicht auf eine geringere Schüttung der Drainagen zurückzuführen sein, sondern liegt vor allem daran, dass das Wasservolumen im Gerinne zunimmt und etwaige Zuleitungen auch bei identischer Schüttung infolgedessen nur einen kleineren Prozentsatz des Abflusses ausmachen.

Mit den Mischungsrechnungen der drei Drainagen vom 11. August ist es möglich, den Abfluss das Löchernbachgerinne aufwärts hochzurechnen, da in diesem Fall alle Messungen mit demselben Gerät (LF-92) durchgeführt wurden und eine Verfälschung der Werte durch Ablagerungen wie an den Divern ausgeschlossen ist. Da vom Zusammenfluss von Löchernbach und Biebenbach bis zum Picknickplatz bei Rohr-Stow13/Diver04 keine Mischungsrechnungen durchgeführt wurden, weil die Einleitungen zu gering waren, wird der Beitrag von diesem Bereich auf 15 % geschätzt. Als Ausgangswert am Pegel werden 131/s angenommen, da der Abfluss während der Aufnahme des Profils von 14,4 auf 12,2 l/s wechselte. Tabelle 7.2.3 zeigt das Ergebnis der Berechnungen an ("Drainagen" bezeichnet die nicht genau lokalisierbaren, geringen Einträge zwischen Stow13 und dem Zusammenfluss von Löchern- und Biebenbach).

	Abfluss	[l/s]
$\mathbf{Quelle}{\rightarrow}\mathbf{Pegel}$	Leitfähigkeit	Temperatur
Quelle	3,7	2,3
Stow01	1,7	0,7
Gerinne	5,4	3,0
Stow03	$1,\!6$	6,2
Gerinne	7,0	9,2
Stow13	$1,\!1$	$1,\!3$
Gerinne	8,1	11,1
Drainagen	$1,\!4$	1,4
Löchernbach	9,5	13,0
Biebenbach	$3,\!5$	0
Pegel	13,0	13,0

Tabelle 7.2.3.: Abflüsse aus Drainagen und Rohren berechnet mit Leitf. und Temp.

Die berechneten Werte unterscheiden sich teilweise relativ stark voneinander. Das liegt zum einen daran, dass bei der Abflussauftrennung beim Zusammenfluss von Löchernbach und Biebenbach die Temperaturrechnung keinen Abfluss vom Biebenbach erbrachte und zum anderen, dass mit der Temperatur der Beitrag von Stow03 sehr stark überschätzt wird (Stow03 liefert relativ warmes Grundwasser). Die anhand der Leitfähigkeit berechneten Werte sind entsprechend vertrauenswürdiger. Der Anteil von Stow13 dürfte im Verhältnis zu den kleineren Drainagen Stow01 und Stow03 viel zu gering angegeben sein; besonders hier ergaben sich Probleme mit getrennten Stromstrichen unterhalb des Rohres. Die Anteile der anderen Rohre sind demnach überschätzt. Der größte Teil des Basisabflusses wird daher von der Quelle gestellt, die drei Drainagen liefern in etwa identischen Abfluss, der Beitrag des unteren Bereichs des Löchernbach-Arms wird mit 1,4 l/s wahrscheinlich in der richtigen Größenordnung liegen.

Im Vergleich mit dem Abfluss während Ereignissen, bei denen der Abfluss hauptsächlich aus dem Terrassenbereich stammt, wird ein nicht zu unterschätzender Teil des Basisabflusses auch im (hinteren) Talbereich generiert.

8. Synthese aus den Ergebnissen und Ausblick

Im Löchernbach ist der entstehende Abfluss während Niederschlagsereignissen anhand der Temperatur vom Vorereigniswasser zu unterscheiden. Der Niederschlag nimmt beim Fallen ungefähr die Lufttemperatur an und erwärmt sich zusätzlich am Boden durch das asphaltierte Straßennetz. Dieser Effekt konnte sogar nachts beobachtet werden; durch die Wärmespeicherfähigkeit der Straßen lag die Temperatur des auf den Straßen gebildeten Abflusses oberhalb der Lufttemperatur.

Mit den Temperatur- und Leitfähigkeitsmessungen im Gerinne des Löchernbaches konnte für verschiedene Ereignisse der Abflussbildungsprozess nachvollzogen werden. Bei kleinen Ereignissen (< 50 l/s) waren die Temperaturunterschiede zwischen dem bereits im Gerinne vorhandenen Wasser und dem neu entstehenden (Oberflächen-) Abluss zu gering, um die Einleitung aus den Rohren korrekt erfassen, geschweige denn eine Wellenfortpflanzung im Gerinne beobachten zu können. Grund hierfür sind die durch nur mäßige Niederschläge gebildeten geringen Abflussvolumina, die nicht ausreichen, um die Temperatur im Gerinne signifikant zu verändern.

Bei den untersuchten Ereignissen konnte aufgrund der Temperatur- und Leitfähigkeitsdaten der in den Rohren platzierten Logger der Zeitpunkt des einsetzenden Abflusses von den Straßen beobachtet werden. Die Temperaturlogger im Gerinne gestatteten dann eine Verfolgung der Abflusswellen bzw. Wasserpakete im Gerinne. Der Beitrag eines jeden Rohres ist somit als Temperaturmaximum in den Ganglinien zu erkennen. Anhand dieser Daten konnten Fließgeschwindigkeiten für die Abflüsse aus den einzelnen Rohren ermittelt werden.

Ebenso war es möglich, am Pegel die Abflussganglinie zumindest qualitativ in einzelne von den Rohren generierte Abflüsse aufzuteilen. Diese Temperaturmessungen gestatten über Umwege auch eine qualitative Aussage über die Abflüsse aus den Rohren. In der vorliegenden Arbeit war dies jedoch nur für einen Teil der Rohre möglich; zudem ist der relative Fehler aufgrund verschiedener Faktoren recht groß. Insgesamt kann die gewählte Methode jedoch als Erfolg gewertet werden. Es stellt sich nun die Frage, inwieweit diese Art der Ganglinienseparation auch in anderen Gebieten angewendet werden kann. Das Löchernbach Einzugsgebiet ist für diese Art der Untersuchung ideal: das Gebiet ist mit 1,8 km² klein, weist mit 4,6 % Flächenanteil einen hohen Versiegelungsgrad auf und bietet aufgrund der vielen Straßenentwässerungen optimale Bedingungen für den Einsatz von Temperatur und Leitfähigkeit als Tracer.

Die Einzugsgebietsgröße ist ein wichtiger Faktor für die Benutzung von Temperatur als Tracer. Da die Temperatur ein nicht-konservativer Tracer ist, ist sie im Verlauf des Fließprozesses verschiedenen Größen ausgesetzt, die zu einer Veränderung der Wassertemperatur führen. Lufttemperatur, kurzwellige Strahlung und der Bodenwärmestrom sind da als wichtigste Einflußfaktoren zu nennen. Insgesamt führen diese zu einer Angleichung der Wassertemperaturen von neu entstandenem Ereignisabfluss und der Wassertemperatur im Gerinne. Bereits die relativ kurzen Fließwege im Löchernbach (ungefähr 1,3 km Gerinnelänge) führen zu einer deutlichen Abschwächung der Temperatur eines Wasserpaketes. Zusätzlich führt Dispersion zu einer Abflachung der Abflusswelle und verstärkt somit noch einmal den Prozess des Temperaturangleichs, da das relative Volumen abnimmt und daher Temperaturänderungen schneller vonstatten gehen (ein geringes Wasservolumen verändert seine Temperatur schneller als ein größeres).

Die Temperaturauflösung und auch die Reaktionszeiten der Logger sind ebenso zu beachten. Im vorliegenden Fall hatten die Temperaturlogger eine Genauigkeit von 0,2 °C. Wenn sich verschiedene Abflüsse "überschneiden" und Mischungsrechnungen angesetzt werden sollen, kann diese Auflösung jedoch zu Problemen führen. In dieser Arbeit ergaben sich insbesondere zu Beginn des einsetzenden Rohrabflusses und dann beim Abklingen desselbigen aus der Auflösung gewisse Fehler, da bei nur geringen Temperaturunterschieden eine Auftrennung nicht mehr möglich ist. Bislang scheint die Temperaturgenauigkeit von 0,2 °C für diese Art der Logger jedoch noch oberster Stand der Technik zu sein. Kostengünstige Datenlogger mit einer Auflösung von 0,1 °C oder darunter wären wünschenswert.

Ein weiterer wichtiger Punkt als Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieser Methode ist ein hoher Anteil an Oberflächenabfluss am Gesamtabfluss, da insbesondere bei oberflächlich gebildeten Abflüssen eine entsprechende Temperaturdifferenz erwartet werden kann. Die Abflüsse sollten im Idealfall auch noch punktgenau in das Hauptgerinne eingeleitet werden. Zudem sollte an jeder Einleitung ein Dreier-Satz Logger ausgebracht sein, um Mischungsrechnungen durchführen zu können. Mögliche Einsatzgebiete sind demnach zum Beispiel kleine Gebirgseinzugsgebiete, die vielleicht sogar (ephemere) Gerinne auf Festgestein aufweisen. Die Gesteinsunterlage würde in diesem Fall –vergleichbar den Straßen im Löchernbach– zu einer Temperaturerhöhung des abfließenden Wassers führen.

Des Weiteren bieten sich städtische Einzugsgebiete für diese Methode an, da gerade in urbanen Räumen durch den hohen Versiegelungsgrad sehr viel Oberflächenabfluss entsteht. Ein dichtes Kanal- und Gerinnenetzwerk sorgt für den Abtransport des anfallenden Wassers. Hier hat das Verfahren möglicherweise Potential, Hochwasservorhersage-Modelle zu stützen bzw. bei der Kalibrierung selbiger zu helfen.

Mit der Leitfähigkeit verhält es sich ähnlich; in der vorliegenden Arbeit war es mit der Leitfähigkeit sogar noch möglich, die Beiträge der einzelnen Rohre nachzuweisen, wenn die Temperaturmethode bereits aufgrund zu starker Nivellierung versagte. Es gibt jedoch einige Punkte, die den Einsatz der Leitfähigkeit einschränken. An erster Stelle ist die Messung der Größe selbst zu nennen. Die Temperatur ist ein sehr leicht und auch kostengünstig zu erfassender Parameter; Leitfähigkeitsmessgeräte sind hingegen komplizierter und darum auch teurer als Temperaturlogger. Die Diver der Firma van Essen Instruments registrieren zwar sowohl Temperatur als auch elektrische Leitfähigkeit in hoher Auflösung, sind dementsprechend aber auch kostenintensiver. Für die breite Anwendung bzw. für eine kontinuierliche Messung an vielen Punkten eignen sich daher die verhältnismäßig günstigen Temperaturlogger besser.

A. Grafiken



Abbildung A.0.1.: Reaktion von Diver02 auf das Ereignis vom 19. Juli 2007



Abbildung A.0.2.: Wassertemperaturverläufe der im Biebenbach angebrachten Logger



Abbildung A.0.3.: Temperaturverlauf der im Biebenbach angebrachten Datenlogger



Abbildung A.0.4.: Verlauf der Leitfähigkeiten der beiden Diver 01 und 02 beim Ereignis vom 26. Juni 2007



Abbildung A.0.5.: Niederschlag und Pegelreaktion beim Ereignis vom 29. Juli 2007



Abbildung A.0.6.: Niederschlag und Pegelreaktion beim Ereignis vom 11. Juli 2007



Abbildung A.0.7.: Niederschlag und Pegelreaktion beim Ereignis vom 21. Juni 2007

B. Tabellen

Stowaway Reaktion TempVorher PeakTemp Peak Ende Differenz Uhrzeit $[^{\circ}C]$ Uhrzeit Uhrzeit $[^{\circ}C]$ $[^{\circ}C]$ 14,319,86:50 $5,\!6$ stow12/11 6:406:53stow04 2 16, 618,46:48 1,86:4516:49stow086:3816,517,36:456:490,8stow036:4417,119,06:486:501,93.2stow19 6:3717.620.86:437:0317,91,8stow146:4219,76:476:4915,520,0 4,5stow136:386:426:43stow066:4116,820,26:51 3,4 stow15 2 6:4417,017,46:476:530,5stow10 26:4217,120,86:516:57 3,7stow01 3 17,118,96:476:446:481,8stow076:4015,820,56:467:034,7stow18 2 6:4117,120,46:466:47 3,2 stow20 6:4316, 620,57:007:043,9Stowaway Reaktion **TempVorher** PeakTemp Peak Ende Differenz Uhrzeit $[^{\circ}C]$ $[^{\circ}C]$ Uhrzeit Uhrzeit $[^{\circ}C]$ 17,72,1stow04 2 6:5019,86:5719,5stow086:5017,16:587:032,4stow036:5718,419,47:027:061,0stow14 6:5218,219,86:566:59 $1,\!6$ stow13 6:4418,520,56:517:061,9stow06 6:5319,520,36:576:590,8stow15 2 6:5617,319,97:067:082,6stow $10 \ 2$ 18,720,17:087:00 1,5stow01 3 6:5017,920,77:007:012,8stow18 2 6:5019,120,56:577:011,5Differenz Reaktion TempVorher PeakTemp Ende Stowaway Peak Uhrzeit $[^{\circ}C]$ Uhrzeit Uhrzeit $[^{\circ}C]$ $[^{\circ}C]$ 7:02 19,019,77:06stow147:080,7stow06 7:03 19,720,0 7:067:080,3stow01 3 7:0419,420,0 7:107:120,7stow18 2 7:0419,220,07:107:110,8

Tabelle B.0.1.: Reaktion der Stowaways auf das Ereignis vom 7. August

TEMP	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$
Diver06	6:38	$14,\!4$	$19,\!9$	6:42	
Diver05	6:44	16,1	20,0	6:52	$3,\!9$
Diver04	6:39	$15,\!8$	$20,\!6$	6:43	4,8
Diver03	6:43	18,0	21,2	5:20	3,2
Diver01	6:47	$17,\!5$	$20,\!6$	6:52	3,0
Diver07	6:47	$17,\!1$	20,0	7:03	2,9
Diver02	6:54	16,7	$19,\! 6$	7:12	2,9
PEGEL	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	[cm]	$[\mathbf{cm}]$	Uhrzeit	[cm]
Diver06	6:37	7,1	14,7	6:41	$7,\!6$
Diver05	6:41	$_{3,8}$	14,8	6:45	$11,\!0$
Diver04	6:40	3,4	51,9	7:15	48,5
Diver03	6:41	14,2	$23,\!6$	6:48	$9,\!4$
Diver01	6:45	9,4	27,9	6:57	$18,\! 6$
Diver07	6:46	$1,\!2$	25,9	7:04	24,7
Diver02	6:51	4,0	$25,\!5$	7:01	21,5
\mathbf{LF}	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[\mu S/cm]$	$[\mu {f S}/{f cm}]$	Uhrzeit	$[\mu {f S}/{f cm}]$
Diver06	6:37	772,0	82,0	6:46	690,0
Diver05	6:44	855,0	64,0	6:51	791,0
Diver04	6:39	474,0	92,0	6:43	382,0
Diver03	6:44	870,0	59,0	7:11	811,0
Diver01	6:47	783,0	107,0	6:51	676,0
Diver02	6:53	704,0	104,0	7:02	600,0
TEMP	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	[°C]	[°C]	Uhrzeit	[°C]
Diver06	6:43	18,8	20,8	6:51	_
Diver04	6:45	$18,\! 6$	20,8	6:59	2,3
Diver01	6:54	20,0	20,9	7:04	0,9
PEGEL	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	[cm]	[cm]	Uhrzeit	[cm]

Tabelle B.0.4.: Reaktion der Diver auf das Ereignis vom 7. August 2007

Diver06	6:43	$11,\!8$	19,7	6:51	7,9
Diver05	6:53	0,9	$13,\!9$	7:25	$13,\!0$
Diver03	7:05	22,0	37,7	7:24	15,7
Diver01	7:02	$27,\!6$	49,2	7:20	$21,\!6$
Diver07	7:07	$25,\!3$	$25,\!6$	7:11	$0,\!3$
Diver02	7:05	25,0	36,8	7:19	$11,\!8$
\mathbf{LF}	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[\mu S/cm]$	$[\mu S/cm]$	Uhrzeit	$[\mu {f S}/{f cm}]$
Diver04	6:45	480,0	59,0	6:51	421,0
Diver01	6:54	$317,\!0$	$118,\! 0$	7:01	199,0
TEMP	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[^{\circ}\mathbf{C}]$	$[^{\circ}\mathbf{C}]$	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$
Diver01	7:07	$19,\!9$	20,4	7:13	$0,\!5$
PEGEL	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
					r 1
	Uhrzeit	[cm]	$[\mathbf{cm}]$	Uhrzeit	[cm]
Diver03	Uhrzeit 7:27	[cm] 37,4	[cm] 37,8	Uhrzeit 7:30	[cm] 0,4
Diver03 Diver01	Uhrzeit 7:27 7:28	[cm] 37,4 46,2	[cm] 37,8 48,5	Uhrzeit 7:30 7:32	[cm] 0,4 2,3
Diver03 Diver01	Uhrzeit 7:27 7:28	[cm] 37,4 46,2	[cm] 37,8 48,5	Uhrzeit 7:30 7:32	[cm] 0,4 2,3
Diver03 Diver01 LF	Uhrzeit 7:27 7:28 Reaktion	[cm] 37,4 46,2 Vorher	[cm] 37,8 48,5 Peak	Uhrzeit 7:30 7:32 Peak	[cm] 0,4 2,3 Differenz
Diver03 Diver01 LF	Uhrzeit 7:27 7:28 Reaktion Uhrzeit	[cm] 37,4 46,2 Vorher $[\mu S/cm]$	[cm] 37,8 48,5 Peak [μS/cm]	Uhrzeit 7:30 7:32 Peak Uhrzeit	[cm] 0,4 2,3 Differenz $[\mu S/cm]$
Diver03 Diver01 LF Diver01	Uhrzeit 7:27 7:28 Reaktion Uhrzeit 7:06	[cm] 37,4 46,2 Vorher [μS/cm] 294,0	[cm] 37,8 48,5 Peak [μS/cm] 124,0	Uhrzeit 7:30 7:32 Peak Uhrzeit 7:14	[cm] 0,4 2,3 Differenz [µS/cm] 170,0
Diver03 Diver01 LF Diver01	Uhrzeit 7:27 7:28 Reaktion Uhrzeit 7:06	[cm] 37,4 46,2 Vorher [μS/cm] 294,0	[cm] 37,8 48,5 Ρeak [μS/cm] 124,0	Uhrzeit 7:30 7:32 Peak Uhrzeit 7:14	[cm] 0,4 2,3 Differenz [μS/cm] 170,0
Diver03 Diver01 LF Diver01 LF	Uhrzeit 7:27 7:28 Reaktion Uhrzeit 7:06 Reaktion	[cm] 37,4 46,2 Vorher [μS/cm] 294,0 Vorher	[cm] 37,8 48,5 Peak [μS/cm] 124,0 Peak	Uhrzeit 7:30 7:32 Peak Uhrzeit 7:14 Peak	[cm] 0,4 2,3 Differenz [μS/cm] 170,0 Differenz
Diver03 Diver01 LF Diver01 LF	Uhrzeit 7:27 7:28 Reaktion Uhrzeit 7:06 Reaktion Uhrzeit	[cm] 37,4 46,2 Vorher [μS/cm] 294,0 Vorher [μS/cm]	[cm] 37,8 48,5 Peak [μS/cm] 124,0 Peak [μS/cm]	Uhrzeit 7:30 7:32 Peak Uhrzeit 7:14 Peak Uhrzeit	[cm] 0,4 2,3 Differenz [μS/cm] 170,0 Differenz [μS/cm]
Diver03 Diver01 LF Diver01 LF Diver01	Uhrzeit 7:27 7:28 Reaktion Uhrzeit 7:06 Reaktion Uhrzeit 7:16	[cm] 37,4 46,2 Vorher [μS/cm] 294,0 Vorher [μS/cm] 133,0	[cm] 37,8 48,5 Peak [μS/cm] 124,0 Peak [μS/cm] 124,0	Uhrzeit 7:30 7:32 Peak Uhrzeit 7:14 Peak Uhrzeit 7:21	[cm] 0,4 2,3 Differenz [µS/cm] 170,0 Differenz [µS/cm] 9,0

TEMP	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$
Diver06	17:41	14,2	rausgespült		
Diver05	17:55	16,1	20,4	18:03	4,3
Diver04	17:38	$15,\!9$	19,0	17:46	3,1
Diver03	17:47	$17,\! 6$	$19,\!8$	17:51	2,2
Diver01	17:57	$17,\!9$	20,1	8:01	2,2
Diver07	17:56	$17,\!3$	20,1	2:38	$2,\!8$
Diver02	18:01	17,1	19,0	18:05	$1,\!9$
PEGEL	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	[cm]	[cm]	Uhrzeit	[cm]
Diver06	17:43		rausgespült		
Diver05	17:54	3,6	20,9	17:56	$17,\!3$
Diver04	17:50	4,6	17,5	17:57	12,9
Diver03	17:48	$13,\!3$	19,0	17:51	5,7
Diver01	17:55	$11,\!8$	$25,\!6$	17:59	$13,\!8$
Diver07	17:55	1,7	19,7	17:57	18,0
Diver02	17:58	3,7	18,7	18:09	$15,\!0$
		T 7 1	D 1	D 1	D 107
LF'	Reaktion	Vorher	Peak		Differenz
D: 00	Uhrzeit	$[\mu S/cm]$	$[\mu S/cm]$	Uhrzeit	$[\mu S/cm]$
Diver06	17:40	777,0	rausgespult	10.00	000.0
Diver05	17:55	860,0	60,0 421.0	18:02	800,0
Diver04	17:30	919,0	431,0	17:45	488,0
Diver03	17:50	880,0	533,0	17:51	347,0 560.0
Diver01	17:57	807,0	239,0	18:00	568,0
Diver02	18:00	651,0	252,0	18:05	399,0
TEMP	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$	[°C]	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$
Diver04	17:48	18,9	19,7	17:51	0,9
Diver03	17:52	19,7	$21,\!6$	18:03	$1,\!9$
Diver01	18:03	19,7	20,9	18:16	$1,\!2$
Diver02	18:08	18,4	19,8	18:29	$1,\!4$
PEGEL	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz

 Tabelle B.0.5.: Reaktion der Diver auf das Ereignis vom 23. Juli 2007

	Uhrzeit	[cm]	[cm]	Uhrzeit	[cm]
Diver05	17:58	7,3	$9,\!8$	18:00	2,5
Diver04	18:00	16,3	21,7	18:02	$5,\!4$
Diver03	17:52	17,4	22,5	17:53	$5,\!1$
Diver01	18:02	22,1	23,1	18:04	1,0
\mathbf{LF}	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[\mu S/cm]$	$[\mu S/cm]$	Uhrzeit	$[\mu {f S}/{f cm}]$
Diver04	17:48	474,0	287,0	17:50	187,0
Diver03	17:52	574,0	48,0	17:56	526,0
Diver01	18:02	439,0	129,0	18:11	310,0
Diver02	18:07	346,0	133,0	18:15	213,0
TEMP	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$
Diver04	17:52	18,8	21,5	18:08	2,7
Diver01	18:22	19,3	20,1	18:29	$0,\!8$
PEGEL	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[\mathbf{cm}]$	[cm]	$\mathbf{Uhrzeit}$	$[\mathbf{cm}]$
Diver04	18:05	$19,\!3$	$21,\!6$	18:08	2,3
Diver01	18:14	$19,\!9$	24,9	18:18	5,0
\mathbf{LF}	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[\mu S/cm]$	$[\mu S/cm]$	Uhrzeit	$[\mu {f S}/{f cm}]$
Diver04	17:51	336,0	121,0	17:54	215,0
Diver01	17:20	477,0	253,0	18:24	224,0
TEMP	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$
Diver01	18:38	19,8	20,0	18:50	$0,\!2$
PEGEL	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[\mathbf{cm}]$	[cm]	Uhrzeit	$[\mathbf{cm}]$
Diver01	18:20	$22,\!9$	29,1	18:25	6,2
- –	_				
\mathbf{LF}	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[\mu S/cm]$	$[\mu S/cm]$	Uhrzeit	$[\mu S/cm]$
Diver04	17:57	139,0	66,0	18:00	73,0

Diver01	18:26	297,0	236,0	18:29	$61,\!0$
LF	Reaktion Uhrzeit	Vorher $[\mu S/cm]$	${f Peak} \ [\mu S/cm]$	Peak Uhrzeit	${f Differenz} \ [\mu S/cm]$
Diver01	18:34	268,0			268,0

TEMP	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[^{\circ}\mathbf{C}]$	$[^{\circ}C]$	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$
Diver05	10:42	$16,\! 0$	$19,\!8$	10:52	3,7
Diver04	10:30	$15,\!2$	$19,\!9$	10:37	4,8
Diver03	10:36	$18,\!4$	21,1	10:50	2,7
Diver01	10:45	17,7	$19,\! 6$	10:49	$1,\!9$
Diver07	10:44	17,2	$18,\!9$	10:50	1,7
Diver02	10:52	$17,\! 0$	$18,\! 5$	10:56	$1,\!5$
PEGEL	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	$\mathbf{Uhrzeit}$	[cm]	[cm]	Uhrzeit	[cm]
Diver05	10:39	3,6	$15,\! 6$	10:43	$12,\!0$
Diver04	10:34	4,8	$10,\!8$	10:38	$_{6,0}$
Diver03	10:35	$11,\!6$	$18,\! 6$	10:38	7,0
Diver01	10:42	$12,\! 6$	22,9	10:48	$10,\!3$
Diver07	10:42	1,7	$14,\!4$	10:45	12,7
Diver02	10:48	4,5	$13,\!5$	11:02	$_{9,0}$
\mathbf{LF}	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[\mu S/cm]$	$[\mu {f S}/{f cm}]$	Uhrzeit	$[\mu \mathbf{S/cm}]$
Diver05	10:42	$695,\! 0$	81,0	10:50	$614,\! 0$
Diver04	10:29	867,0	250,0	10:36	617,0
Diver03	10:37	841,0	561,0	10:38	280,0
Diver01	10:44	843,0	296,0	10:48	$547,\! 0$
Diver02	10:51	708,0	349,0	10:55	359,0
TEMP	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$
Diver04	10:39	$17,\!9$	$20,\!6$	11:00	2,7
Diver01	10:53	19,1	20,3	11:05	$1,\!2$
Diver07	10:54	18,7	19,0	11:02	$0,\!3$
Diver02	10:59	$18,\! 0$	19,3	11:27	1,3
PEGEL	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	$\mathbf{Uhrzeit}$	[cm]	[cm]	Uhrzeit	[cm]
Diver04	10:40	7,1	$15,\!4$	10:44	8,3
D_{inver}^{i} 02	10.39	14.8	18.7	10:40	3.9

 Tabelle B.0.6.: Reaktion der Diver auf das Ereignis vom 19. Juli 2007

Diver01	10:50	20,3	21,9	10:55	1,6
\mathbf{LF}	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[\mu S/cm]$	$[\mu \mathbf{S}/\mathbf{cm}]$	Uhrzeit	$[\mu \mathbf{S}/\mathbf{cm}]$
Diver04	10:38	443,0	122,0	10:32	321,0
Diver03	10:39	739,0	72,0	10:44	667,0
Diver01	10:52	$511,\!0$	193,0	11:02	318,0
Diver02	10:58	444,0	154,0	11:09	290,0
TEMP	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$
Diver01	11:12	18,8	19,6	11:17	0,8
PEGEL	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	[cm]	[cm]	Uhrzeit	[cm]
Diver04	10:49	$13,\!4$	18,1	10:53	4,7
Diver01	11:00	19,9	23,0	11:05	3,1
\mathbf{LF}	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[\mu S/cm]$	$[\mu S/cm]$	Uhrzeit	$[\mu {f S}/{f cm}]$
Diver01	11:10	543,0	227,0	11:15	316,0
TEMP	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$
Diver01	11:23	19,4	19,5	11:26	$0,\!1$
PEGEL	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	[cm]	[cm]	Uhrzeit	$[\mathbf{cm}]$
Diver04	10:58	$15,\!3$	20,7	11:00	$5,\!4$
Diver01	11:10	23,8	25,5	11:17	1,7
\mathbf{LF}	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[\mu S/cm]$	$[\mu {f S}/{f cm}]$	Uhrzeit	$[\mu \mathbf{S}/\mathbf{cm}]$
Diver01	11:20	384,0	275,0	11:25	109,0
LF	Reaktion	Vorher	Peak	Peak	Differenz
	Uhrzeit	$[\mu S/cm]$	$[\mu \mathbf{S}/\mathbf{cm}]$	Uhrzeit	$[\mu \mathbf{S}/\mathbf{cm}]$
Diver01	11:34	$394,\!0$	296,0	11:52	98,0

			5			
Stowaway	Reaktion	TempVorher	PeakTemp	\mathbf{Peak}	Ende	Differenz
-	Uhrzeit	- [°C]	[°C]	Uhrzeit	Uhrzeit	[°C]
stow 12/11	17.49	14.4	20.2	17.58	18.05	5.8
stow04 2	17:53	16.8	19.0	17:56	10.00	2.3
stow08	17:58	17.3	20.0	18.06	18.10	2.8
stow03	17.50	16.8	18.2	18.00	18.05	2,0
stow 10 1	17.57	10,0	20.6	18.04	18.03	1,4
stow10_1	17.00	17,2	20,0	17.41	17.40	0.2
stow 18	17.55	17,1	17,4	17.41	17.49	0,3
stow09	17:55	17,4	20,5	18:02	18:05	3,1
stow19	17:37	17,4	21,5	17:47	1	4,1
stow14	17:50	18,4	19,7	17:53	17:55	1,3
stow13	17:38	15,7	19,5	17:50		3,8
stow06	17:48	16,9	19,7	18:00	18:02	2,8
$stow15_2$	17:49	17,1	17,8	17:54	17:57	$0,\!6$
$stow01_2$	17:54	17,3	20,7	18:03	18:11	3,4
stow07	17:48	15,7	21,4	18:03	18:06	5,7
stow 20	17:53	16,7	$20,\!6$	18:08	18:14	4,0
Stowerser	Dealstian	TownVonhon	DecleTerrer	Deals	Endo	Differenz
Stowaway		1emp vorner				
10/11	Unrzeit			Unrzeit	Unrzeit	
stow12/11	18:59	18,7	19,0	19:06	19:10	0,3
$stow04_2$	17:58	18,2	20,3	18:04	10.00	2,1
stow03	18:20	17,0	17,3	18:26	18:29	0,3
$stow10_1$	18:06	18,9	20,0	18:11	18:18	1,1
stow18	17:51	17,3	18,4	17:56		1,1
stow09	18:06	19,0	20,0	18:12	18:18	1,0
stow19	17:50	21,0	21,5	17:55	18:00	$0,\!5$
stow14	18:03	17,9	19,5	18:08		$1,\!6$
stow 13	17:52	18,9	21,3	18:05	18:10	2,4
stow06	18:06	19,2	19,5	18:09		0,3
stow 15 2	18:09	17.3	19.7	18:19	18:21	2,4
$stow01^2$	18:15	18.5	19.7	18:22	18:25	1.1
stow07	18:57	19.7	20.0	19:03	19:06	0.3
5001101	10.01		_0,0	10.00	10100	0,0
						D .0
Stowaway	Reaktion	Tempvorner	PeakTemp	Реак	Ende	Differenz
	Uhrzeit	[°C]	[°C]	Uhrzeit	Uhrzeit	[°C]
stow 12/11	19:42	17,7	18,5	19:54	20:00	0,8
$stow04_2$	18:58	18,4	18,5	18:59	19:13	0,2
$stow10_1$	19:47	18,4	18,5	19:49	20:00	0,2
stow19	18:50	20,2	20,5	18:55	19:02	0,3
stow14	18:12	18,9	19,7	18:18	18:30	0,8
stow 13	19:44	19,2	19,4	19:45	20:00	0,2
stow06	18:15	19,0	19,4	18:19	18:43	0,3
stow 15 2	18:28	19,4	19,7	18:34	18:45	0,3
$stow01^2$	18:32	19,4	19,7	18:38	18:50	0,3
stow07	19:38	18.4	19.7	19:50	19:52	1,3
stow20	19:43	18.1	18.4	19:51	20:07	0.3
20020	10.10	10,1	10,1	10:01	20:01	0,0
	D		D 1			D 100
Stowaway	Reaktion	LempVorher	Peak Temp	Peak	Ende	Differenz
	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$	[°C]	Uhrzeit	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$
$stow04_2$	19:49	17,9	18,0	19:50	19:59	$_{0,2}$
stow19	19:25	18,1	20,0	19:38	19:45	1,9
stow06	19:53	18.5	18.7	19:54	19:56	0.2

Tabelle B.0.2.: Reaktion der Stowaways auf das Ereignis vom 23. Juli 2007

Stowaway	Reaktion	TempVorher	PeakTemp	Peak	Ende	Differenz
U	$\mathbf{Uhrzeit}$	[°C]	[°C]	Uhrzeit	Uhrzeit	[°C]
stow $15 1$	10:27	14,0	20,0	10:42	10:46	6,1
stow 12/11	10:35	$14,\! 6$	19,5	10:46	10:50	5,0
$stow04_2$	10:40	16,4	19,3	10:53	11:02	2,9
stow08	10:51	17,1	19,2	10:59	11:08	2,1
stow03	10:40	16,5	17,1	10:44	10:47	$0,\!6$
stow10_1	10:42	16,8	19,8	10:49	10:52	3,1
stow18	10:39	17,4	18,1	10:44	10:45	$0,\!6$
stow09	10:43	17,1	19,7	10:49	10:53	$2,\!6$
stow19	10:26	17,0	21,3	10:44	10:53	4,4
stow14	10:36	17,9	19,3	10:40	10:42	$1,\!5$
stow 13	10:29	14,9	19,4	10:36	10:37	4,5
stow06	10:34	16,7	18,9	11:38		2,2
stow01_2	10:41	17,1	20,2	10:52	10:57	3,1
stow07	10:37	16,0	19,0	10:52	11:10	3,1
stow 20	10:41	17,1	20,2	10:56	11:02	3,1
Stowaway	Reaktion	TempVorher	PeakTemp	Peak	Ende	Differenz
·	$\mathbf{Uhrzeit}$	[°C]	$[^{\circ}C]$	Uhrzeit	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$
stow03	10:52	16,6	17,0	10:53		0,3
stow10_1	10:57	17,9	19,2	11:06	11:19	$1,\!3$
stow09	10:58	18,1	19,2	11:07	11:17	$1,\!1$
stow19	11:04	21,1	21,6	11:12	11:19	$0,\!5$
stow14	10:53	17,4	19,0	10:59	11:00	$1,\!6$
stow 13	10:39	18,4	20,2	10:47	10:49	$1,\!8$
stow06	10:40	18,1	19,7	10:48	10:50	$1,\!6$
stow01_2	11:04	18,2	19,4	11:10		$1,\!1$
Stowaway	Reaktion	TempVorher	PeakTemp	Peak	Ende	Differenz
·	$\mathbf{Uhrzeit}$	[°C]	[°C]	Uhrzeit	Uhrzeit	[°C]
stow03	11:03	16,6	17,3	11:09		0,6
stow14	11:05	17,9	19,0	11:18	12:01	1,1
stow13	10:55	19,2	19,7	10:59	11:00	$0,\!5$
stow06	10:55	18,9	19,4	11:01		$0,\!5$
stow01_2	11:16	19,0	19,2	11:17	11:20	$0,\!2$
_						
Stowaway	Reaktion	TempVorher	PeakTemp	Peak	Ende	Differenz
	$\mathbf{Uhrzeit}$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	Uhrzeit	Uhrzeit	$[^{\circ}C]$
stow13	11:07	18,9	19,7	11:20	11:22	$0,\!8$
stow06	11:10	18,5	19,0	11:20	11:31	0,5

Tabelle B.0.3.: Reaktion der Stowaways auf das Ereignis vom 19. Juli 2007

erten Ereignisse
registrie
n Pegel
r alle ar
ht übeı
Übersicl
0.1
Щ.
Tabelle l

Zr.	Beginn	QBeginn	\mathbf{QEnde}	Dauer	\mathbf{peak}	Peak Mitte	QFuelle	QEreignis
		[1/s]	[1/s]	[hh:mm]	[1/s]		$[m^3]$	$[m^3]$
Η	28.05.2007 03:02	5,1	5,1	16:17	35,4	28.05.2007 08:37	635	336
7	29.05.2007 $05:24$	5,1	6,6	2:07	10,2	29.05.2007 06:32	65	26
က	29.05.2007 07:33	6,6	6,6	3:16	14,4	29.05.2007 09:21	123	45
4	31.05.2007 $22:29$	5,1	8,3	3:03	16,9	01.06.2007 00:07	117	61
Ŋ	01.06.2007 01:32	8,3	71,5	1:00	88,5	$01.06.2007 \ 02.20$	200	170
9	01.06.2007 $02:33$	71.5	66,2	0:22	82,6	$01.06.2007 \ 02:39$	104	17
4	01.06.2007 02.56	66,2	8,3	7:52	186,0	$01.06.2007 \ 03:38$	277	742
×	$01.06.2007 \ 10.59$	10,2	10,2	2:01	14,4	01.06.2007 11:37	81	2
6	$02.06.2007\ 19:06$	6,6	6,6	2:18	14,4	$02.06.2007 \ 19:26$	84	29
10	$05.06.2007 \ 16:16$	3,8	3,8	21:08	56,4	$05.06.2007\ 16:46$	548	259
11	07.06.2007 18:40	3,8	3,8	2:16	6,6	$07.06.2007 \ 19:36$	87	56
12	09.06.2007 14:14	2,7	2,7	4:20	10,2	$09.06.2007 \ 15:29$	125	83
13	$10.06.2007\ 21.56$	3,8	3,8	10:56	71,5	$10.06.2007\ 23.09$	469	319
14	$11.06.2007\ 16:09$	2,7	14,4	1:59	28,5	11.06.2007 17:24	96	22
15	11.06.2007 $18:09$	14,4	2,7	16:57	28,5	11.06.2007 19:07	735	337
16	$15.06.2007 \ 11:48$	2,7	2,7	0:49	3,8	15.06.2007 $12:12$	11	3 G
17	15.06.2007 $14:39$	2,7	3,8	14:17	28,5	$15.06.2007\ 15.56$	369	230
18	$16.06.2007 \ 04.57$	3,8	3,8	3:16	5,1	$16.06.2007\ 06:39$	57	12
19	$17.06.2007\ 01.40$	3,8	3,8	4:41	6,6	$17.06.2007\ 02.52$	95	31
20	$17.06.2007\ 21.59$	3,8	3,8	14:43	76,9	$18.06.2007\ 00:07$	718	517

Nr.	Beginn	QBeginn	\mathbf{QEnde}	Dauer	\mathbf{peak}	Peak Mitte	QFuelle	QEreignis
		[1/s]	[1/s]	[hh:mm]	[1/s]		$[m^3]$	$[m^3]$
21	20.06.2007 05:03	3,8	3,8	2:44	25,3	20.06.2007 05:31	100	63
22	$20.06.2007 \ 21.51$	2,7	3,8	5:14	5,1	20.06.2007 $23:16$	76	25
23	21.06.2007 03.06	3,8	19,5	5:57	1491,2	21.06.2007 $03:55$	3940	3859
24	$21.06.2007\ 09:04$	19,5	19,5	6:11	195,2	21.06.2007 10:23	1290	856
25	$22.06.2007 \ 09:28$	6,6	6,6	4:02	28,4	22.06.2007 10:43	203	107
26	$22.06.2007\ 21:35$	6,6	6,6	11:02	39,2	22.06.2007 $22:40$	342	80
27	25.06.2007 17:30	3,8	3,8	2:37	8,3	25.06.2007 18:37	59	23
28	26.06.2007 $08:10$	3,8	3,8	2:06	8,3	26.06.2007 09:09	48	19
29	$26.06.2007\ 11:02$	3,8	3,8	3:30	35,4	$26.06.2007 \ 11:59$	155	107
30	$26.06.2007 \ 19.57$	5,1	5,1	1:19	6,6	26.06.2007 20:36	31	2
31	27.06.2007 14:09	3,8	5,1	1:34	6,6	$27.06.2007 \ 14:55$	33	12
32	27.06.2007 15.44	5,1	5,1	17:49	168,4	27.06.2007 16:08	759	432
33	$02.07.2007\ 01:40$	2,7	2,7	4:38	6,6	02.07.2007 02.53	20	25
34	$02.07.2007\ 07.49$	3,8	3,8	0:46	5,1	$02.07.2007 \ 08:12$	13	က
35	$02.07.2007\ 17.59$	2,7	2,7	15:25	204,5	02.07.2007 18:27	646	496
36	$03.07.2007\ 13:35$	3,8	5,1	2:03	6,6	03.07.2007 14:21	43	15
37	$03.07.2007\ 15:39$	5,1	6,6	1:19	22,3	$03.07.2007\ 16:22$	59	35
38	03.07.2007 17:00	10,2	8,3	6:40	51,8	$03.07.2007 \ 18:10$	460	261
39	03.07.2007 $23:41$	8,3	43,2	1:24	224,2	04.07.2007 $00:06$	560	518
40	$04.07.2007 \ 01:06$	47,4	10,2	13:50	71,5	04.07.2007 01:32	918	410
41	$04.07.2007\ 15:36$	10,2	3,8	18:39	16,9	$04.07.2007\ 16:08$	1606	694
42	$08.07.2007 \ 13.19$	3,8	3,8	1:24	5,1	$08.07.2007\ 13.59$	25	9
43	09.07.2007 23:32	3,8	3,8	2:06	8,3	$10.07.2007\ 00:16$	44	15

116

Nr.	Beginn	QBeginn	\mathbf{QEnde}	Dauer	\mathbf{peak}	Peak Mitte	QFuelle	QEreignis
		[1/s]	[1/s]	[hh:mm]	[1/s]		$[m^3]$	$[m^3]$
44	10.07.2007 07:34	3,8	3,8	1:22	6,6	10.07.2007 07:59	25	6
45	$10.07.2007\ 09:34$	3,8	3,8	2:11	8,3	10.07.2007 $10:28$	26	46
46	11.07.2007 13:06	2,7	8,3	2:57	204,6	11.07.2007 13:22	380	351
47	11.07.2007 16:04	8,3	8,3	1:40	16,9	11.07.2007 16:31	75	25
48	12.07.2007 00:36	6,6	6,6	1:39	10,2	12.07.2007 01:35	51	12
49	$18.07.2007\ 02.50$	2,7	6,6	3:19	88,5	18.07.2007 04:02	279	247
50	$18.07.2007\ 06:10$	6,6	14,4	1:33	22,3	18.07.2007 06:51	92	55
51	18.07.2007 07:44	14,4	5,1	2:48	28,5	18.07.2007 08:18	151	100
52	19.07.2007 10:27	2,7	2,7	7:03	76,9	19.07.2007 11:18	290	221
53	21.07.2007 $22:28$	2,7	2,7	6:36	5,1	21.07.2007 23:43	26	33
54	$22.07.2007\ 06.59$	3,8	3,8	2:31	8,3	22.07.2007 07:52	55	21
55	$23.07.2007 \ 17:45$	2,7	2,7	15:54	151,8	23.07.2007 18:26	735	580
56	24.07.2007 17:13	3,8	3,8	1:52	5,1	24.07.2007 18:09	34	8
57	29.07.2007 00:21	2,7	2,7	3:28	16,9	29.07.2007 01:00	87	53
58	29.07.2007 18:07	2,7	66,2	1:13	88,5	29.07.2007 19:10	111	66
59	29.07.2007 19:21	66,2	5,1	2:45	94,6	29.07.2007 19:31	233	183
60	29.07.2007 22:07	5,1	5,1	9:38	418,6	29.07.2007 22:43	1374	1197
61	$02.08.2007 \ 05.50$	2,7	2,7	3:22	5,1	02.08.2007 07:27	52	19
62	07.08.2007 $06:39$	1,7	12,2	4:28	1030,4	07.08.2007 07:30	3441	3414
63	07.08.2007 11:08	12,2	6,6	7:44	39,2	07.08.2007 11:48	318	134
64	$07.08.2007\ 18:53$	6,6	6,6	1:05	8,3	$07.08.2007 \ 19:25$	32	9
65	08.08.2007 05:13	5,1	5,1	5:00	19,5	$08.08.2007 \ 06.18$	174	82
66	08.08.2007 11:37	5,1	5,1	1:44	6,6	08.08.2007 12:21	41	6

$\mathbf{N}_{\mathbf{r}}$.	Beginn	QBeginn	QEnde	Dauer	peak	Peak Mitte	QFuelle	QEreignis
		[1/s]	[1/s]	[hh:mm]	$[\mathbf{l}/\mathbf{s}]$		[m ³]	
67	$08.08.2007 \ 14:53$	5,1	5,1	2:27	6,6	08.08.2007 16:06	58	13
68	08.08.2007 18:50	5,1	6,6	2:11	8,3	$08.08.2007 \ 19:48$	58	18
69	08.08.2007 21:02	6,6	6,6	20:12	244,8	09.08.2007 09:29	12817	10056
70	17.08.2007 $13:11$	3,8	3,8	$4{:}00$	6,6	17.08.2007 14:25	83	28
71	21.08.2007 07:36	3,8	3,8	5:50	28,5	21.08.2007 10:43	240	160
72	21.08.2007 16:32	5,1	10,2	2:47	121, 3	21.08.2007 17:15	401	350
73	21.08.2007 19:20	8,3	8,3	1:39	16,9	21.08.2007 19:41	72	23

Tabelle B.0.8.: Übersicht über alle vom Pluvio registrierten Ereignisse

$\mathbf{Nr}.$	NDauer	\mathbf{NMenge}	QStraßen	Qstraßen 0,7	maxN (10min)	$\max N$	maxN Peak	api5	api3	api1
	[h:mm]	[mm]	[%]	[%]	[mm]	[mm/h]	[h:mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	21:40	18,0	22	16	1,08	4,20	1:05	1,5	1,3	1,3
7	2:20	1,6	19	13	0,61	5,10	1:06	26,2	26,2	22,2
က	2:00	2,5	22	16	0,86	4,50	1:17	28,2	28,1	16,4
4	3:00	4,9	15	11	0,99	5,10	1:09	32,5	7,2	0,9
Ŋ	1:20	5,7	36	25	4,35	24,30	0:42	38,8	13,4	7,3
9	0:10	0,0	32	22	0,63	3,00	0:23	48,2	22,4	16,7
7	2:00	7,6	118	83	2,15	12,90	0:48	49,1	23,3	17,6
x	3:30	1,5	9	4	0,52	3,60	0.53	59,5	30,8	27,1
6	1:00	1,9	19	13	1,09	9,60	0:28	38,2	30,1	0,3
10	0:20	5,1	61	42	3,35	27,30	0:20	32,8	2,7	0,0
11	0:10	1,3	52	36	1,30	13,20	0.56	9,6	6,9	0,0
12	0:50	2,3	43	30	1,34	1,34	1:09	9,2	2,3	0,0
13	2:20	8,5	45	32	2,28	10,50	0:41	5,4	5,4	0,0
14	1:00	2,9	32	23	2,12	23,10	0.56	16,6	14,3	11,2
15	1:00	3,0			1,89	8,40	0:57	19,8	17,5	14,5
16	1:00	0,3	14	10	0,08	1,50	0:42	23,3	4,6	4,6
17	5:40	5,6	49	35	1,76	14,70	1:02	23,3	4,6	4,6
18	1:40	0,8	19	13	0,19	1,50	1:13	19,5	12,0	11,5
19	3:40	2,9	13	6	0,72	9,60	1:58	13,0	13,0	1,0
20	6:00	12,3	50	35	2,40	10,50	0:39	16,8	16,8	3,8

119

Nr.	NDauer	\mathbf{NMenge}	QStraßen	Qstraßen 0,7	$\max N (10min)$	$\max N$	maxN Peak	api5	api3	api1
	[h:mm]	[mm]	[%]	[%]	[mm]	[mm/h]	[h:mm]	[mm]	[mm]	[mm]
21	0:30	3,5	22	15	1,75	29,40	0:19	33,0	16,3	0,2
22	0:30	1,2	25	18	1,07	9,90	1:26	26,0	20,5	5,5
23	2:40	24,2	192	134	10,35	77,10	0:25	28,3	7,6	7,4
24	2:20	7,8	133	93	2,06	8,40	0:43	57,1	37, 3	31,7
25	2:20	3,8	34	24	1,26	6,00	0.57	64, 6	48,5	11,2
26	0:30	2,7	35	25	1,92	24,30	0:36	68,7	53,8	5,6
27	2:20	2,5	11	∞	0,61	3,90	1:31	52,4	4,3	0,8
28	0:40	1,8	13	6	0,90	8,40	1:01	24,6	5,0	4,7
29	1:40	3,3	39	28	1,20	9,00	0:49	18,0	7,3	6,9
30	0:40	0,7	13	6	0,36	5,70	0.54	21,7	12,7	8,7
31	0:10	1,0	14	10	0,85	6,30	0.53	19,8	16, 3	5,1
32	0:30	4,0	130	91	2,79	33,30	0:24	20,8	17,3	6,1
33	3:10	2,3	13	6	0,68	3,00	0.59	11,7	0,7	0, 6
34	1:40	1,0	3	2	0,32	2,10	0:48	14,4	4,0	4,0
35	0:10	7,0	86	09	4,27	52,80	0:27	6,1	5,4	4,7
36	2:20	1,8	10	2	0,44	2,70	1:09	12,3	12,3	7,0
37	1:10	2,1	20	14	0,71	5,10	0:42	14,8	14,8	9,5
38	3:00	5,8	55	38	1,10	6,60	0:38	17,6	17,5	12,2
39	0:40	6,7	94	66	3,78	36,60	0:22	20,6	20,5	13,6
40	2:10	2,3			1,29	12,30	0:34	26, 6	26,5	19,6
41	0:10	1,3			1,34	14,10	0:44	31,0	30,6	21,5
42	1:00	1,5	ю	33	0,63	3,30	0.53	26,9	0,9	0,0
43	0:20	1,5	12	6	1,23	10,20	0.58	3,5	2,2	0,3

Nr.	NDauer	NMenge	QStraßen	Qstraßen 0,7	$\max N (10min)$	maxN	maxN Peak	api5	api3	api1
	[h:mm]	[mm]	[%]	[%]	[mm]	[mm/h]	[h:mm]	[mm]	[mm]	[mm]
44	1:30	1,0	7	IJ	0,35	3,90	0:27	6,0	5,0	3,0
45	0.50	1,0	57	40	0,55	4,20	0.56	7,3	6,4	4,4
46	0:30	6,0	71	50	5,79	63,00	0.16	8,1	7,7	0,0
47	0:40	1,4	22	15	1,06	6,00	0:43	8,4	6,5	0,4
48	1:20	1,0	15	10	0,43	4,80	1:31	11,2	9,3	3,2
49	2:10	6,5	46	32	1,95	14,70	0:36	0,6	0, 6	0,1
50	1:20	2,9	23	17	0,94	9,30	0:43	7,1	7,1	6,7
51	1:30	2,7	44	31	0,61	6,30	0:36	10,0	10,0	9,6
52	1:00	4,8	55	39	3,10	27,60	0:44	12,8	12,8	0,5
53	1:10	1,8	22	16	0,41	2,40	1:17	18,4	5,6	0,0
54	1:00	1,8	14	10	0,54	7,80	0:30	20,0	7,7	2,1
55	2:50	10,3	68	48	3,28	38,40	0:36	9,5	4,0	0,0
56	1:10	1,1	9	9	0,49	5,70	1:21	15,2	14,4	10,5
57	0.50	3,0	22	15	1,27	9,90	0:26	1,5	0,1	0,1
58	0:40	1,7	72	50	0,86	6,90	1:04	3,2	3,1	3,1
59	1:00	5,5	40	28	1,81	28,20	0:41	4,9	4,9	4,9
09	$4{:}20$	10,9	132	92	3,32	31,50	0:21	10, 4	10,3	10,2
61	2:20	2,0	12	8	0,42	3,30	0.59	21,3	0,0	0,0
62	2:00	25,1	164	115	4,94	40,50	0:26	1,5	0,2	0,1
63	1:20	2,4	67	47	0,94	7,80	0:34	26,0	25,3	25,2
64	0:40	0,8	9	7	0,34	2,70	0.57	28,6	27,9	27,9
65	3:30	3,1	32	23	0,42	3,30	1:00	29,2	29,0	28,9
66	0:40	0,5	21	15	0,17	1,50	2:21	32,2	32,1	6,9

$\mathbf{N}_{\mathbf{r}}$.	NDauer	\mathbf{NMenge}	$\mathbf{QStraßen}$	Qstraßen 0,7	$\max N (10min)$	$\max N$	maxN Peak	api5	api3	api1
	[h:mm]	[mm]	[%]	[%]	[mm]	[mm/h]	[h:mm]	[mm]	[mm]	[mm]
67	1:20	0, 6	25	17	0,16	1,80	1:48	32,7	32,6	4,8
68	1:20	0,8	28	20	0,24	2,10	0.54	33,3	33,3	5,3
69	16:50	34,0			1,03	8,40	8:31	34,1	34,0	5,3
70	0:50	1,5	23	16	0,48	3,90	1:05	2,3	0, 6	0,2
71	3:30	5,8	33	23	0,87	6,60	0:41	2,7	0,4	0,3
72	1:50	7,2	58	41	4,10	33, 30	0:39	8,2	6,3	6,2
73	0:50	1,1	24	17	0,42	3,90	0:31	15,4	13,6	13,5

C. Fotos



Abbildung C.0.1.: Straßenabfluss



Abbildung C.0.2.: Wasser sammelt sich in Gerinnenähe



Abbildung C.0.3.: Basisbabfluss / freigeräumter Pegel



Abbildung C.0.4.: Abflussereignis vom 11. Juli 2007
Literaturverzeichnis

- ADOLPH, G. (2005): Abflussdynamik und natürliche Tracer zur Beschreibung der Gebietsreaktion.
- ANDERSON, M. (2005): Heat as a Groundwater Tracer. Ground Water, Vol. 43 (6).
- BENDERITTER, Y., ROY, B., TABBAGH, A. (1993): Flow Characterization Through Heat Transfer Evidence in a Carbonate Fractured Medium: First Approach. Water Resources Research, Vol. 29 (11).
- BLAU, P. (1996): N-A-Modellierung in kleinen Einzugsgebieten und der Vergleich mit unterschiedlichen Methoden der Ganglinienseparation. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., unveröffentlicht.
- BUCHER, B., DEMUTH, S. (1985): Vergleichende Wasserbilanz eines flurbereinigten und eines nicht flurbereinigten Einzugsgebietes im Ostkaiserstuhl für den Zeitraum 1977 -1980. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 29. Jahrgang, Heft 1.
- BUNDSCHUH, J. (): Modelling annual variations of spring and groundwater temperatures associated with shallow aquifer systems. Journal of Hydrology, 142: 427-444.
- CONSTANZ, J., STONESTROM, D. (): Heat as a tracer of water movement near streams. USGS Fact Sheet. 2004.
- CUI, Y. (1997): Different approaches towards an understanding of runoff generation. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 7.
- DEMUTH, S. (1992): Dreisamniederung und östlicher Kaiserstuhl. Freiburger Geographische Hefte, Heft 36, Hrgb.: R. Mäckel: 227-238.
- DEMUTH, S., MAUSER, W. (1983): Messung und Bilanzierung der Schwebstoffracht -Untersuchungen im Ostkaiserstuhl 1981. Beiträge zur Hydrologie, Jahrgang 9, Heft 2: 33-55.
- EGGELSMANN, R. (1981): Dränanleitung. 2te Auflage, Paul Parey, Hamburg.
- ENDLICHER, W. (1978): Geländeklimatologische Untersuchungen im Weinbaugebiet des Kaiserstuhls. Dissertation, Albet-Ludwigs-Univerität Freiburg i. Br.

- ENDLICHER, W. (1980): Geländeklimatologische Untersuchungen im Weinbaugebiet des Kaiserstuhls. Berichte des deutschen Wetterdienstes, Nr. 150.
- FEICHTINGER, F. (1960): Die Maulwurfdränung eine Form der Bodenmelioration. Der Förderungsdienst 8, Heft 10. Wien.
- FETTE, M., HOEHN, E., WEHRLI, B. (2004): Infiltration von Flusswasser ins Grundwasser. Wasser, Energie, Luft, 96. Jahrgang, Heft 11/12.
- GEILENKEUSER, H. (1970): Beiträge zur Morphogenese der Lößtäler im Kaiserstuhl. Freiburger Geographische Hefte, Heft 9.
- GLA (1959): Geologische Exkursionskarte des Kaiserstuhls. Hrsg. vom Geologischen Landesamt Baden-Württemberg, Landesvermessungsamt Baden-Württemberg.
- HÄDRICH, F., STAHR, K. (2001): Die Böden des Breisgaus und angerenzender Gebiete. Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg i. Br., Band 91.
- HÖLTING, B., COLDEWEY, W. (2005): Hydrogeologie Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 6. Auflage, Elsevier GmbH München ISBN: 978-3-8274-1526-4.
- HUGENSCHMIDT, C. (2006): Kontinuierliche Tracer zur hydrolgischen Prozessforschung in bewaldeten Einzugsgebieten. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., unveröffentlicht.
- J. CONSTANZ, COX, M., SU, G. (2003): Comparison of Heat and Bromide as Groundwater Tracers Near Streams. Ground Water, Vol. 41 (5).
- KAMMERER, G. (2006): Regelung des Bodenwasserhaushaltes. LVA-Nr. 815.303. Universität für Bodenkultur Wien, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft.
- KOBAYASHI, D., ISHII, Y., KODAMA, Y. (1999): Stream temperature, specific conductance and runoff process in mountain watersheds. Hydrological Processes, 13: 865-876.
- KOBAYASHI, D., KODAMA, Y., NOMURA, M., ISHII, Y., SUZUKI, K. (1993): Comparison of snowmelt hydrograph separation by recession analysis and by stream temperature and conductance. Tracers in Hydrology, IAHS No. 215.
- KRÄMER, A. (1999): Anwendung des Wasserhaushalts- und Gewässergütemodells MPSM auf hydrologische Versuchsgebiete im Kaiserstuhl. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i Br., unveröffentlicht.
- LANGE, J. (1999): A non-calibrated rainfall-runoff model for large arid catchments, Nahal Zin, Israel. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

- LEIBUNDGUT, C. (1984): Zur Erfassung hydrologischer Messwerte und deren Übertragung auf Einzugsgebiete verschiedener Dimensionen. Geomethodica, Veröffentlichungen des 9. Basler Geomethodischen Colloquiums, Vol. 9: 141-170.
- LUFT, G. (1980a): Abfluß und Retention im Löß, dargestellt am Beispiel des hydrologischen Versuchsgebietes Rippach, Ostkaiserstuhl. Beiträge zur Hydrologie, Sonderheft 1.
- LUFT, G. (1980b): Kennzeichnung der Fliessrichtung und der hydraulischen Leitfähigkeit in schluffigen Aquiferen mittels Uranin-Markierungsversuchen. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 24. Jahrgang, Heft 2: 37-41.
- LUFT, G., MORGENSCHWEIS, G., KELLER, R. (1981): Auswirkungen von Großterrassierungen auf hydrologische Prozesse im Ostkaiserstuhl. Wasser und Boden, Nr. 9: 436-442.
- LUFT, G., MORGENSCHWEIS, G., VOGELBACHER, A. (1983): Influence of large-scale changes of relief on runoff characteristics and their consequences for flood-control design. IAHS Publikation, Nr. 147: 99-112.
- MERTIN, W. (1965): Bodenverbesserung durch Maulwurfdränung im Vogelsberg. Dissertation an der Landwirtschaftlichen Fakultät der Justus Liebig-Universität Gießen.
- MOHR, B., STADELBAUER, J. (1982): Freiburg im Breisgau, Kaiserstuhl, nördliches Markgräflerland. Geographischer Exkursionsführer der Region Basel, Lieferung 22, Herausgegeben von der Geographisch-Ethnologischen Gesellschaft Basel.
- MORGENSCHWEIS, G., LUFT, G. (1985): Einfluss von grossflächigen Reliefungestaltungen bei Flurbereinigungen in südbadischen Weinbaugebieten auf Landschafts- und Wasserhaushalt. Erdkunde, Band 39, Heft 1: 1-11.
- PAINTER, S., WINTERLE, J., ARMSTRONG, A. (2003): Using Temperature to Test Models of Flow Near Yucca Mountain, Nevada. Ground Water, Vol. 41 (5).
- REITER, M. (2001): Using precision temperature logs to estimate horizontal and vertical groundwater flow components. Water Resources Research, Vol. 37 (3).
- RIEG, A., DEMUTH, S., LEIBUNDGUT, C. (1991): Human impact on the water quality in a small research basin in Germany. IAHS Publ., Nr. 203: 239-247.
- SAKURA, Y. (1993): Groundwater Flow estimated from Temperatures in the Yonezawa Basin, Northeast Japan. IAHS Publ. No. 215.
- SCHUMACHER, N. (1981): Standortspezifischer Bodenwasserhaushalt im großterrassiert umgestalteten Ostkaiserstuhl. Diplomarbeit am Geographischen Institut I der Albert-Ludwigs Universität Freiburg im Breisgau, unveröffentlicht.

- SCREATON, E., MARTIN, J., GINN, B., SMITH, L. (2004): Conduit Properties and Karstification in the Unconfined Floridan Aquifer. Ground Water, Vol. 42 (3).
- SHANLEY, J., PETERS, N. (1988): Preliminary observations of streamflow generation during storms in a forested piedmont watershed using temperature as a tracer. Journal of Contaminant Hydrology, 3: 349-365.
- TANIGUCHI, M. (1993): Evaluation of Vertical Groundwater Fluxes and Thermal Properties of Aquifers Based on Transient Temperature-Depth Profiles. Water Resources Research, Vol. 29 (7).
- UHLENBROOK, S. (1995): Untersuchung von schnellen Abflusskomponenten. Eine Untersuchung mit Hilfe von Tracerversuchen im östlichen Kaiserstuhlgebiet, unter besonderer Berücksichtigung der ungesättigten Zone. Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg - unveröffentlicht.
- VOGELBACHER, A. (1985): Simulation der Wasserbilanz in terrassierten Lössgebieten. Beiträge zur Hydrologie, Kirchzarten.
- WAGNER, A. (2002): Anwendung eines nicht-kalibrierten Niederschlag-Abfluss-Modells in den hydrologischen Versuchsgebieten des Ostkaiserstuhls. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., unveröffentlicht.

Ehrenwörtliche Erklärung

Ehrenwörtliche Erklärung:

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

Ort, Datum

Unterschrift