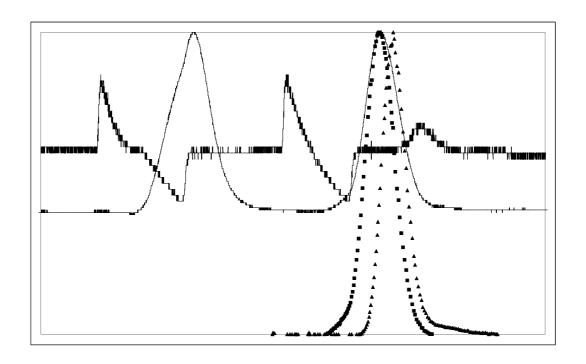
Institut für Hydrologie

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Alexander Fritz

Experimentelle Untersuchung der Abflusskonzentration in Bächen des Bruggaeinzugsgebiets



Diplomarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Ch. Leibundgut Freiburg i. Br., November 2001

Institut für Hydrologie

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Alexander Fritz

Experimentelle Untersuchung der Abflusskonzentration in Bächen des Bruggaeinzugsgebiets

Referent: Prof. Dr. Ch. Leibundgut

Koreferent: Dr. S. Uhlenbrook

Vorwort

Während einer experimentellen Arbeit ist man von vielen Dingen abhängig. Die Witterung sollte den Erwartungen entsprechen und dann eine trockene Periode liefern, wenn sie versuchstechnisch eingeplant ist oder ein Datenlogger sollte wie gewohnt Werte aufzeichnen und überrascht am Ende des Geländetages mit Datenverlust. Das Ersteres meistens nicht eintritt und letzteres sporadisch, mussten wohl schon alle erfahren, die experimentelle Feldarbeiten durchführen.

Umso erfreulicher ist es hingegen, wenn man die Unterstützung und das Wohlwollen einiger Menschen findet, ohne deren Einverständnis und Hilfe einige Versuche nicht stattgefunden hätten. Diesen möchte ich hier ein herzliches Dankeschön sagen.

Dipl.-Hyd. Jens Didszun, Dr. Nils Tilch und Dr. Stefan Uhlenbrook für die Ratschläge, Diskussionen und das offene Ohr für alle Fragen und Probleme in den vergangenen neun Monaten.

Erich Binder für die Vermessung der Gerinnestrecke des Schwallwellenversuchs am Zastlerbach mittels GPS.

Emil Blattmann für die Unterstützung bei technischen Problemen und schnelle Problemlösung bei Gerätedefekten.

Erwin Ehret für die fachkundige Einführung in die Wasserkraft im Bruggaeinzugsgebiet und seine Tipps bezüglich einer geeigneten Stelle für den Schwallwellenversuch.

Dr. Hanspeter Hodel für die schnelle und unbürokratische Zusendung seiner Dissertation.

Dipl.-Hyd. Paul Königer für die Einführung in das Programm FIELD.

Dipl.-Hyd. Christina Koppe für das Korrekturlesen und die kritischen Anmerkungen zum Diplomarbeitstext.

Dipl.-Hyd. Stephen Schrempp und der FEW für das Scannen der Deutschen Grundkarte 1:5000.

Karl Weber für die Erlaubnis und die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung des Schwallwellenversuchs am Zastlerbach.

Den zahlreichen Helfern beim Schwallwellenversuch am Zastlerbach, ohne die der Versuch nicht möglich gewesen wäre.

Den Leitern der Staatlichen Forstreviere St. Wilhelm und Schmelzplatz, Herrn Mayer und Herrn Röhmer-Litzmann, für das Entgegenkommen bei der Arbeit in ihren Revieren.

Ein Dank auch an all die nicht namentlich erwähnten, die in irgendeiner Form zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Diese Arbeit wurde nach den Regeln der neuen deutschen Rechtschreibung erstellt.

I Inhaltsverzeichnis

1	inna	itsverzeichnis	1
II	Abb	ildungsverzeichnis	iv
Ш	Tabo	ellenverzeichnis	vi
IV	Verz	zeichnis der verwendeten Abkürzungen	ix
V	Zusa	ammenfassung	X
VI	Sum	mary	xii
1	Einle	eitung	1
1.1	Prob	olemstellung	1
1.2	Ziels	setzung	3
1.3	Vorg	gehensweise	4
2	Das	Untersuchungsgebiet	5
2.1	Das	Einzugsgebiet der Brugga	5
	2.1.1	Die untersuchten Bäche	6
	2.1.2	Morphologieaufnahmen der Bäche	9
2.2	Einz	zugsgebiet des Zastlerbachs	13
3	Metl	hoden	15
3.1	Salz	verdünnungsversuche zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten in	Bächen15
	3.1.1	Grundlagen	15
	3.1.2	Einspeisemengenberechnung	20
	3.1.3	Verwendete Messgeräte	20
	3.1.4	Versuchsdurchführung	21

	3.1.5	Auswertung der Messungen	27
	3.1.6	Anwendung von Fließformeln	27
3.2	2 Schw	allwellenversuch am Zastlerbach	31
	3.2.1	Planung	31
	3.2.2	Einspeisemengenberechnung	35
	3.2.3	Durchführung	36
	3.2.4	Auswertung der in situ Messungen und Fluoreszenztraceranalyse	40
4	Ergel	onisse und Diskussion	. 42
4.	l Salzv	erdünnungsversuche zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten	42
	4.1.1	Ermittelte Fließzeiten und Fließgeschwindigkeiten	42
	4.1.2	Zusammenhang zwischen Gebietsparametern und Fließgeschwindigkeiten	46
	4.1.2.1	Zusammenhang zwischen Abfluss und Fließgeschwindigkeit	48
	4.1.2.2	Zusammenhang zwischen mittlerer Hangneigung und Fließgeschwindigkeit	49
	4.1.2.3	Zusammenhang zwischen Fläche des lokalen Einzugsgebietes und Fließgeschwindigkeit	52
	4.1.2.4	Multiple lineare Regression zur Überprüfung des Zusammenhangs von Abfluss und Hangneigung mit den Fließgeschwindigkeiten	
	4.1.2.5	Multiple lineare Regression zur Überprüfung des Zusammenhangs von Abfluss und lokaler Einzugsgebietsgröße mit den Fließgeschwindigkeiten	
	4.1.2.6		
	4.1.3	Wiederholbarkeit der Versuche	60
	4.1.4	Exemplarischer Vergleich der Ergebnisse des Dispersionsmodells FIELD n den Ergebnissen der C_{max} / $0.5C_{max}$ -Methode	
	4.1.5	Diskussion	62
	4.1.6	Fazit	63
4.2	2 Schw	allwellenversuch am Zastlerbach	65
	4.2.1	Ergebnisse	65
	4.2.1.1	Tracerdurchgangs- und Wasserstandskurven	65

	4.2.1	.2 Fließgeschwindigkeiten und Abflussmessungen	68
	4.2.2	Diskussion	75
	4.2.3	Fazit	77
5	Schl	ussfolgerungen	79
6	Lite	atur	83

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das Einzugsgebiet der Brugga	5
Abbildung 2: Übersichtskarte der untersuchten Bäche im Bruggaeinzugsgebiet	7
Abbildung 3: Morphologieklasse 1	10
Abbildung 4: Morphologieklasse 2	10
Abbildung 5: Morphologieklasse 3	11
Abbildung 6: Morphologieklasse 4	11
Abbildung 7: Das Einzugsgebiet des Zastlerbachs	14
Abbildung 8: Durchgangskurve zum C _{max} / 0,5 C _{max} -Verfahren	17
Abbildung 9: Krummenbach mit Messabschnitten, sowie den Mess- und Einspeisestellen	23
Abbildung 10: Durchgangskurve der Messstelle 1	24
Abbildung 11: Durchgangskurve der Messstelle2	25
Abbildung 12: Durchgangskurve der Messstelle 3	25
Abbildung 13: Durchgangskurve der Messstelle 4	26
Abbildung 14: Wehr am Zastlerbach. Links das Fallklappenwehr mit Gegengewichten und rechts der für die Erzeugung der Welle benutzte Schieber	32
Abbildung 15: Staubecken nach Entleerung. Deutlich ist das Abfallen des Beckens in Richtung des Kraftwerkseinlasses (links mit Rechen) zu erkennen	32
Abbildung 16: Übersichtskarte zum Schwallwellenversuch am 15.06.2001	34
Abbildung 17: Einspeisung von NaCl beim Öffnen des Schiebers	37
Abbildung 18: Einspeisung von Uranin in den Peak der Welle	37
Abbildung 19: Einspeisung von Sulforhodamin B in den auslaufenden Ast der Welle	38
Abbildung 20: Bachabschnitt vor dem Eintreffen der Welle	39
Abbildung 21: Bachabschnitt während des Wellendurchgangs	40
Abbildung 22: Anzahl der Messabschnitte pro Hangneigungsklasse	47
Abbildung 23: Hangneigung vs. maximale Fließgeschwindigkeit Zweite Kampagne	51
Abbildung 24: Hangneigung vs. intensive Fließgeschwindigkeit Zweite Kampagne	51
Abbildung 25: Hangneigung vs. maximale Fließgeschwindigkeit Trockenwetter	52
Abbildung 26: Hangneigung vs. intensive Fließgeschwindigkeit Trockenwetter	52
Abbildung 27: Übersicht der ermittelten intensiven Fließgeschwindigkeiten (Erste Messkampagne)	58

Abbildung 28	: Übersicht der ermittelten intensiven Fließgeschwindigkeiten (Zweite Messkampagne)	8
Abbildung 29	Übersicht der ermittelten intensiven Fließgeschwindigkeiten (Trockenwetter- Messkampagne)	9
Abbildung 30	Auf das Konzentrations-Maximum normierte Tracerdurchgangskurven und Änderung des Wasserstands an Messstelle 1	5
Abbildung 31	Auf das Konzentrations-Maximum normierte Tracerdurchgangskurven und Änderung des Wasserstands an Messstelle 2 / Pegel Zastler	6
Abbildung 32	Auf das Konzentrations-Maximum normierte Tracerdurchgangskurven und Änderung des Wasserstands an Messstelle 3	6
Abbildung 33	Auf das Konzentrations-Maximum normierte Tracerdurchgangskurven und Änderung des Wasserstands an Messstelle 4	7
Abbildung 34:	Maximale Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fließstrecke70	0
Abbildung 35	: Intensive Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fließstrecke70	0
Abbildung 36	Mittlere Fließgeschwindigkeit der Tracer und intensive Fließgeschwindigkeit der Welle in Abhängigkeit von der Fließstrecke	1
Abbildung 37	: Pegelbogen des Zastlerbachs für den 12. – 16.07.2001. Der Schwallwellenversuch ist an den zwei Peaks am 13.07.2001 gut zu erkennen.8	39

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der untersuchten Bäche	8
Tabelle 2:	Übersicht über die Morphologiestrukturen der untersuchten Bäche	12
Tabelle 3:	Daten der Multisonden (SOMET 1996).	20
Tabelle 4:	Daten des Messsets zur Abflussmessung (GÄßLER 1995: 12ff.)	21
Tabelle 5:	Erhobene Parameter des Markierversuchs am Krummenbach am 15.06.2001	24
Tabelle 6:	Messstellenübersicht zum Schwallwellenversuch am Zastlerbach	38
Tabelle 7:	Daten zur Einspeisung	39
Tabelle 8:	Daten der Eichung für die Fluoreszenztraceranalyse	41
	Ermittelte Fließgeschwindigkeiten und longitudinale Dispersivität der ersten Messkampagne (n.b. = nicht berechenbar)	42
Tabelle 10:	Ermittelte Fließgeschwindigkeiten und longitudinale Dispersivität der zweiten Messkampagne (n.b. = nicht berechenbar)	43
Tabelle 11:	Ermittelte Fließgeschwindigkeiten und longitudinale Dispersivität der Trockenwetter-Messkampagne (n.b. = nicht berechenbar)	44
Tabelle 12:	Bereiche der ermittelten Fließgeschwindigkeiten	45
Tabelle 13:	Zur Interpretation des Bestimmtheitsmaßes und des Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson (SCHLITTGEN 1993:179)	47
	Zusammenhang zwischen Abfluss und maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Erste Kampagne)	48
Tabelle 15:	Zusammenhang zwischen Abfluss und maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Zweite Kampagne)	48
	Zusammenhang zwischen Abfluss und maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Trockenwetter-Kampagne)	49
	Zusammenhang zwischen mittlerer Hangneigung und maximaler, intensiver sow mittlerer Fließgeschwindigkeit (Erste Kampagne)	
	Zusammenhang zwischen mittlerer Hangneigung und maximaler, intensiver sow mittlerer Fließgeschwindigkeit (Zweite Kampagne)	
	Zusammenhang zwischen mittlerer Hangneigung und maximaler, intensiver sow mittlerer Fließgeschwindigkeit (Trockenwetter-Kampagne)	
Tabelle 20:	Zusammenhang zwischen mittlerer Hangneigung und Fließgeschwindigkeit	51
Tabelle 21:	Zusammenhang zwischen lokaler Einzugsgebietsgröße und maximaler, intensive sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Erste Kampagne)	

	Zusammenhang zwischen lokaler Einzugsgebietsgröße und maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Zweite Kampagne)
	Zusammenhang zwischen lokaler Einzugsgebietsgröße und maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Trockenwetter-Kampagne)
	Zusammenhang zwischen Abfluss und Hangneigung mit maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Erste Kampagne)
	Zusammenhang zwischen Abfluss und Hangneigung mit maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Zweite Kampagne)
	Zusammenhang zwischen Abfluss und Hangneigung mit maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Trockenwetter-Kampagne)
	Zusammenhang zwischen Abfluss und lokaler Einzugsgebietsgröße mit maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Erste Kampagne)55
	Zusammenhang zwischen Abfluss und lokaler Einzugsgebietsgröße mit maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Zweite Kampagne)56
	Zusammenhang zwischen Abfluss und lokaler Einzugsgebietsgröße mit maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Trockenwetter-Kampagne)
Tabelle 30:	Wiederholbarkeit der Versuche unter ähnlichen Bedingungen60
Tabelle 31:	Exemplarischer Vergleich zwischen DM und C _{max} / 0,5C _{max} -Methode61
Tabelle 32:	Minimale Fließzeiten und Differenzen zur minimalen Wellen-Fließzeit68
Tabelle 33:	Intensive Fließzeiten und Differenzen zur intensiven Wellen-Fließzeit
	Übersicht der ermittelten Geschwindigkeiten beim Schwallwellenversuch am Zastlerbach
	Vergleich der mittleren Fließgeschwindigkeit der C_{max} / $0.5C_{max}$ -Methode mit der mittleren Fließgeschwindigkeit des Programms FIELD71
	Quotient aus intensiver Fließgeschwindigkeit der Welle und maximaler Fließgeschwindigkeit von NaCl und Uranin
	Quotient aus maximaler Fließgeschwindigkeit der Welle und maximaler Fließgeschwindigkeit von NaCl und Uranin
	Quotient aus intensiver Fließgeschwindigkeit der Welle und intensiver Fließgeschwindigkeit von NaCl und Uranin
	Quotient aus maximaler Fließgeschwindigkeit der Welle und intensiver Fließgeschwindigkeit von NaCl und Uranin
Tabelle 40:	Quotient aus intensiver Fließgeschwindigkeit der Welle und mittlerer Fließgeschwindigkeit von NaCl und Uranin

Tabelle 41: Quotient aus maximaler Fließgeschwindigkeit der Welle und mittlerer	
Fließgeschwindigkeit von NaCl und Uranin	73
Tabelle 42: Gewässerkundliche Hauptwerte für den Pegel Zastler am Zastlerbach	87
Tabelle 43: Wasserstands-Abflussbeziehung für den Pegel Zastler am Zastlerbach	88

IV Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGK	Deutsche Grundkarte im Maßstab 1:5000
DM	Dispersionsmodell
GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
TAC	tracer aided catchment model
TAC-D	tracer aided catchment model (distributed)
TK 25	Topographische Karte im Maßstab 1:25000
TK 50	Topographische Karte im Maßstab 1:50000

VZusammenfassung

Die Diplomarbeit ist im DFG-Bündelprojekt "Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung" eingebunden. Das Ziel dieses Projekts ist es, die Niederschlags- / Abfluss-Modellierung auf der Basis verschiedener experimenteller Verfahren zu verbessern. Voraussetzung für eine bessere prozessorientierte Modellierung des Wasser- und Stoffhaushalts und deren Dynamik in den Einzugsgebieten ist ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden Abflussbildungsprozesse. Das von Uhlenbrook (1999) entwickelte Einzugsgebietsmodell TAC (tracer aided catchment model) liefert bereits gute Ergebnisse auf Tageswertbasis. Für die Modellierung auf Tageswertbasis war es bisher nicht notwendig die Abflusskonzentration einzubeziehen. Als nächster Schritt ist nun die Modellierung in kürzeren Zeitschritten anvisiert (Roser 2001), welche die Abflusskonzentration in den Gerinnen berücksichtigen muss.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Informationen über die Fließgeschwindigkeiten der Hanggerinne und Hauptvorfluter zu erhalten. Zu diesem Zweck wurden 13 Hanggerinne und Hauptvorfluter nach Zugänglichkeit, gleichmäßiger Verteilung über das Einzugsgebiet und der mittleren Hangneigung ausgewählt. In zwei Messkampagnen mit hoher Gebietsvorfeuchte und einer Trockenwetter-Messkampagne wurden an diesen Bächen 82 Salzverdünnungsversuche zur Fließzeitbestimmung durchgeführt. Aus den ermittelten Fließzeiten für einzelne Messabschnitte konnten die maximalen, intensiven und mittleren Fließgeschwindigkeiten berechnet werden

Durch die Messungen während des sehr feuchten Frühjahrs und der sommerlichen Trockenwetterperiode konnte eine Übersicht über den Variationsbereich der Fließgeschwindigkeiten in den einzelnen Gerinnen geschaffen werden.

Aufgrund der ermittelten Fließzeiten war es möglich Zusammenhänge zwischen den Gebietsparametern Abfluss, Hangneigung, lokaler Einzugsgebietsgröße und den Fließgeschwindigkeiten zu überprüfen. Die sich ergebenden Zusammenhänge waren zufriedenstellend, bedürfen aber noch weiterer Messungen, gerade auch im Hinblick auf eine Übertragung auf ungemessene Bäche.

Die experimentell ermittelten Fließgeschwindigkeiten können einerseits zur Überprüfung der Abflusskonzentrations-Routine des TAC-D-Modells und als Datensatz für bestehende Stofftransportmodelle oder andererseits als Grundlage für experimentelle Untersuchungen benutzt werden, die Kenntnis über die Fließgeschwindigkeitsbereiche eines Gerinneabschnitts benötigen.

Mit den ermittelten Fließzeiten können auch Aussagen über die Ausbreitung von etwaigen Schadstoffen gemacht werden, die durch Verkehrunfälle auf den bachbegleitenden Straßen eingetragen werden können.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Geschwindigkeit einer künstlichen Hochwasserwelle im Vergleich mit der Fließgeschwindigkeit des Wassers zu untersuchen. Es ist bekannt, dass sich eine ablaufende Hochwasserwelle nach der Theorie der kinematischen Welle verhält, die mit der mittleren Fließgeschwindigkeit in einer bestimmten, von der Form des Gerinneabschnitts abhängigen, Beziehung steht. Es ist weiterhin bekannt, dass die Welle der

mittleren Fließgeschwindigkeit um einen bestimmten Betrag voreilt. Durch dieses Voreilen kann es zu einem Auftreten von pre-event water im Abfluss kommen, obwohl das Auftreten von Oberflächenabfluss und der Ausschluss von Piston-Flow und Groundwater-Ridging eine Dominanz von event water erwarten lassen (Nolan & Hill 1990). Ein exemplarischer Versuch zur Untersuchung der künstlichen Hochwasserwelle sollte klären, wie die Geschwindigkeit der Stoffkonzentration der Wellengeschwindigkeit einer ablaufenden Welle nacheilt. Bisher gab es keine Vorstellung darüber, in welcher zeitlichen und räumlichen Größenordnung dies im Brugga bzw. Zastlereinzugsgebiet stattfindet. Des weiteren sollte die Durchführung dieses Versuchs auch Erkenntnisse über die modelltechnische Behandlung von Hochwasserwellen im erweiterten TAC-Modell liefern.

Zur künstlichen Erzeugung einer Welle ist es nötig eine größere Menge Wasser schlagartig in einen Gerinneabschnitt zu entlassen um damit eine sogenannte Schwallwelle zu erzeugen. Für den Schwallwellenversuch wurde ein Wasserkraftwerks-Staubecken am Zastlerbach benutzt. Beim Öffnen des Beckens wurden dem ausströmenden Wasser NaCl, Uranin und Sulforhodamin B injiziert. Die Tracer wurden im zeitlichen Abstand beim Öffnen des Wehrs, in den Peak und in den auslaufenden Ast der Welle eingespeist. An vier bachabwärts gelegenen Messstellen wurden die Veränderungen des Wasserstandes sowie die Konzentrationsdurchgänge der Tracer registriert. Aus den so ermittelten Fließzeiten ließ sich die maximale, intensive und mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers sowie die maximale und intensive Fließgeschwindigkeit der Welle berechnen.

Die Auswertungen des Versuchs ergaben ein Voreilen der Welle vor der Fließgeschwindigkeit des Wassers. Durch Quotientenbildung aus der maximalen bzw. intensiven Fließgeschwindigkeit der Welle und der maximalen, intensiven und mittleren Fließgeschwindigkeit der Tracer konnten Faktoren ermittelt werden, die den Zusammenhang zwischen Wellengeschwindigkeit und Wassergeschwindigkeit beschreiben. Die sich teilweise ergebenden Diskrepanzen zwischen dem aus Laborversuchen für Rechteckgerinne ermittelten Faktor 1,67 und den experimentell festgestellten Faktoren kann einerseits in der abweichenden Gerinnegeometrie des Zastlerbachs liegen. Andererseits kann das Abfallen des Wasserstands unter den Ausgangswasserstand, durch das Schließen des Wehrs verursacht, für eine Verzögerung der Tracerwolken verantwortlich sein und dadurch diesen größeren Faktor verursachen.

Der Versuch hat gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, nach dem Modell der kinematischen Welle, künstlich eine Welle zu erzeugen, die der mittleren Fließgeschwindigkeit des Wassers voreilt. Besonders eindrucksvoll war hier die Deutlichkeit des Effekts auf die relativ kurze Fließstrecke von ca. 1 km. Der Versuch hat erste Aufschlüsse über das Verhalten einer Welle im Zastlerbach geliefert. Um zu überprüfen, wie ein Wellenablauf unter natürlichen Verhältnissen stattfindet, sind weitere Versuche notwendig. Im Hinblick auf die Untersuchung von Abflussbildungsprozessen wäre es interessant zu sehen, wie groß die Bedeutung dieses Effekts im Zastler- oder Bruggaeinzugsgebiet ist. Das heißt, eine durch eine Welle hervorgerufene Dominanz von pre-event water im Abfluss. Die Prozesse die zu einem Dominieren von pre-event water im Abfluss führen (Piston Flow oder Groundwater Ridging) würden demnach durch diesen Dritten ergänzt.

VI Summary

This study is a part of the DFG-project "Runoff-Generation and Catchment-Modeling". The aim of this project is to improve the Precipitation-Runoff-Modeling with the help of various field experiments. A better understanding of the runoff processes is a prerequisite for process orientated modeling of water and mass transport in catchment hydrology. The catchment model TAC (tracer aided catchment model) which is designed by UHLENBROOK (1999) provides good results on a daily basis. Because of the daily basis used by TAC until now it was not necessary to include runoff concentration. The aim of the next step in TAC-development is the modeling on an hourly basis (ROSER 2001) which has to consider the runoff concentration in brooks.

The aim of this study is to get information about the velocity of the flowing water in high gradient brooks and in the main brooks. For this purpose 13 high gradient brooks and main brooks were selected. The brooks were selected because of their accessibility, an equal distribution over the Brugga catchment and the average inclination of the watercourses. Two field campaigns were carried out during the wet spring and early summer and one campaign during the dry summer. 82 Salt-dilution-experiments were carried out to determine the travel time of the 13 brooks. With the help of this travel times the maximum, the intensive and the mean flow velocities were calculated.

Because of the experiments during the wet spring and early summer a general idea of flow velocity variation was given for each investigated brook section.

On the basis of the determined travel times it was possible to check for correlation between the catchment parameters discharge, mean inclination, local catchment area and the flow velocities. The resulting correlations turned out to be satisfying. But there is still a need for more investigation with regard to a transformation-function for unmeasured brooks.

The flow velocities determined by experiments could be used on one hand to check the runoff-concentration-module of the TAC-D-model and as input data for mass-transport-models. On the other hand they could be used for experimental investigations requiring knowledge about flow velocity.

Because of the flow velocities also statements concerning the spreading of pollutants caused by road accidents next to the brooks could be done.

The second part of this study is to investigate the relation between an artificial flood wave and the mean velocity of the flowing water. It is well-known that a flood wave traveling down a channel can be described by the kinematic wave theory and that there is a relationship between the velocity of the wave and the mean velocity of the flowing water. It is also known that the wave velocity is bigger than the mean velocity of the flowing water. Because of that an appearance of pre-event water is possible despite the appearance of surface runoff and the exclusion of Piston Flow and Groundwater Ridging (NOLAN & HILL 1990). An exemplary investigation should provide information about the velocity of an artificial generated wave in relation to the velocity of tracers. Until now there were no information about this effect in the Brugga- resp. Zastlerbach-catchment. The experiment should further provide data for the kinematic wave module of the TAC-D-model.

For the generation of the artificial flood wave the reservoir of a hydro-electric power station was instantly emptied. Three tracers were injected: Sodium chloride when the weir was opened, Uranine at the peak of the wave and Sulforhodamine B at the falling limb of the wave. At four sample points downstream the change of the water level and the change of the tracer concentrations were measured. With the help of the travel times the maximum, the intensive and the mean flow velocities were calculated.

The results of the experiment showed a time lag between the wave celerity and the mean velocity of the flowing water.

By Division of the maximum resp. intensive celerity through the maximum, intensive and mean velocity of the tracers a factor could be determined. This factor describes the relationship between celerity of the wave and the velocities of the flowing water. There were discrepancies between the theoretical relationships based on hydraulic laboratory tests and the relationships based on the experiment. On one hand the discrepancies could be a result of the different geometry of the Zastlerbach in comparison to the rectangular channel of the hydraulic laboratory tests. On the other hand the drop of the water level under the starting level caused by closing of the weir could be responsible for the slowing down of the tracer.

The experiment showed that it is possible to generate a artificial flood wave which celerity is faster than the mean velocity of the flowing water within a short reach of 1 km. The experiment has provided information how an artificial generated flood wave behaves in the Zastlerbach. The next step is to prove how wave traveling behaves under natural conditions. With regard to runoff generation it would be interesting how important this effect in the Brugga-and Zastlerbach catchment is. That is a dominance of pre-event water caused by a flood wave. The processes which cause pre-event water in the runoff would be supplemented by a third one.

Keywords: artificial generated flood wave, flow velocity, high gradient brooks, time lag, run-off-concentration

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Diplomarbeit ist im DFG-Bündelprojekt "Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung" eingebunden. Das Ziel dieses Projekts ist es, die Niederschlags- / Abfluss-Modellierung auf der Basis verschiedener experimenteller Verfahren zu verbessern. Voraussetzung für eine bessere prozessorientierte Modellierung des Wasser- und Stoffhaushalts und deren Dynamik in den Einzugsgebieten ist ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden Abflussbildungsprozesse. Das von UHLENBROOK (1999) entwickelte Einzugsgebietsmodell TAC (tracer aided catchment model) liefert bereits gute Ergebnisse auf Tageswertbasis. Als nächster Schritt ist nun die Modellierung in kürzeren Zeitschritten anvisiert (ROSER 2001).

Für die Modellierung auf Tageswertbasis war es bisher nicht nötig gewesen die Abflusskonzentration einzubeziehen. Durch einen grundlegenden Tracerversuch (LINDENLAUB 1998: 42 ff.) ist bekannt, dass das in den Gerinnen befindliche Wasser innerhalb eines Tages den Gebietsauslass der Brugga erreicht. Die Modellierung in kürzeren Zeitschritten muss nun die Abflusskonzentration berücksichtigen.

Zum Verständnis des Begriffes Abflusskonzentration wie er in der dieser Arbeit verstanden wird ist Folgendes grundlegend. Der Hauptvorfluter erhält einerseits einen Zustrom über diffus zutretendes Grundwasser und Bodenwasser sowie andererseits konzentriert über Hanggerinne. So kann Wasser aus hauptvorfluterfernen Teileinzugsgebieten durch die Abflusskonzentration in Hanggerinnen schnell in den Hauptvorfluter gelangen. Die Hanggerinne leisten daher einen hohen Beitrag zum Gesamtabfluss im Hauptvorfluter.

Über die Abflusskonzentration entlang von Hanggerinnen liegen bisher nur wenige Untersuchungsergebnisse vor. Von Interesse sind hier die räumliche und zeitliche Variation sowie deren zeitlich variabler Beitrag an der Abflussbildung im Hauptvorfluter. In die Untersuchung soll ebenfalls die Abflusskonzentration in Buselbach und St. Wilhelmer Talbach, den Hauptvorflutern des Bruggaeinzugsgebietes, einbezogen werden.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Geschwindigkeit einer künstlichen Hochwasserwelle im Vergleich mit der Fließgeschwindigkeit des Wassers zu untersuchen. Es ist bekannt, dass sich eine ablaufende Hochwasserwelle nach der Theorie der kinematischen Welle verhält. Sie steht mit der mittleren Fließgeschwindigkeit des Wassers in folgendem Zusammenhang (DINGMAN 1984: 252):

$$V_k = \frac{5}{3}V$$
 Gleichung 1.1

mit

V_k: Geschwindigkeit der kinematischen Welle

V: mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers

Auf die Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet und auf DINGMAN (1984) verwiesen.

Nach Heidel (1966) zitiert in Glover & Johnson (1974) variiert diese Beziehung. Für breite Rechteckgerinne gilt Gleichung 1.1.

Für breite parabolische Gerinne gilt:

$$V_k = 1,44 * V$$
 Gleichung 1.2

mit

V_k: Geschwindigkeit der kinematischen WelleV: mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers

Für Dreiecksgerinne gilt:

$$V_k = 1,33 * V$$
 Gleichung 1.3

mit

V_k: Geschwindigkeit der kinematischen Welle V: mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers

Die Bestimmung dieser Beziehung geht auf Laborversuche zurück, in denen die Fließzeit des Wassers zwischen zwei Messstellen mit dem ersten Abfallen der Konzentration der gelösten Inhaltsstoffe, aufgrund des Verdünnungseffekts, bestimmt wurde. Die Fließzeit der Welle zwischen zwei Punkten wurde mit der ersten Erhöhung des Wasserstands ermittelt (GLOVER & JOHNSON 1974: 305f.). GLOVER & JOHNSON verwendeten für die Untersuchung von niederschlagsbedingten Hochwasserwellen, aufgrund der Problematik bei der Bestimmung der ersten Zustandsänderung der Konzentrationen bzw. des Wasserstands, eine andere Methode. Für die Bestimmung der Fließzeiten zwischen zwei Messstellen wurden die Zeitpunkte ermittelt, zu denen 50 % des gesamten Konzentrationsrückgangs bzw. 50 % des gesamten Wasserstandsanstiegs erreicht waren.

Nolan & Hill (1990) untersuchten aufgrund der dargestellten Beziehung in Gleichung 1.1 den Effekt von Hochwasserwellen auf die Zusammensetzung des Abflusses aus event und pre-event water (Einzugsgebietsgröße 10,6 km²). Mit pre-event water wird Wasser bezeichnet, das sich schon vor einem Niederschlagsereignis im Einzugsgebiet befindet. Es wird auch als Vorereigniswasser oder "altes Wasser" bezeichnet. Unter event water, Ereigniswasser oder "neuem Wasser" versteht man das Wasser eines Niederschlagsereignisses. Nolan & Hill konnten nachweisen, dass Veränderungen in der stofflichen Zusammensetzung des abfließenden Wassers den Veränderungen der Abflussmenge hinterherhinken. Diese Zeitlücke tritt auch dann auf, wenn Geländebeobachtungen und Modellergebnisse hauptsächlich Oberflächenabfluss von versiegelten Flächen ergeben und demnach event water im Abfluss dominieren sollte. Dieser augenscheinliche Widerspruch zwischen dem vornehmlichen Auftreten von pre-event water im Abfluss und dem hauptsächlichen Zustrom von Oberflächenabfluss führt die beiden Autoren zu dem Schluss, dass der erste Anstieg des Abflusses durch den oben beschriebenen voreilenden Effekt der Hochwasserwelle verursacht wird. Hochwasserwellen die aus "altem" Flusswasser bestehen, erreichen vor dem "neuen" Wasser der versiegelten Flä-

chen flussabwärts gelegene Bereiche. Durch diesen Mechanismus kann der Abfluss aufgrund der oberflächlichen Zuflüsse sehr schnell steigen, aber dennoch zu großen Teilen aus "altem" Wasser zusammengesetzt sein. Die Daten zeigen im Gegensatz zur Untersuchung von GLOVER & JOHNSON (1974), dass diese Effekte auch in kleinen Einzugsgebieten auftreten können, besonders dann, wenn Teile des Einzugsgebietes versiegelt sind. GLOVER & JOHNSON (1974) gingen bei den Ergebnissen ihrer Untersuchungen davon aus, dass die Zeitspannen in Einzugsgebieten <100 km² zu gering sind um nachgewiesen zu werden.

Das Ergebnis des Versuchs ist einerseits interessant im Bezug auf die Abflussbildung im mesoskaligen Bereich. Andererseits liefert der Versuch Informationen für die modelltechnische Behandlung einer Hochwasserwelle mit dem Ansatz der kinematischen Welle im erweiterten TAC-Modell (ROSER 2001).

1.2 Zielsetzung

Eine wichtige Grundlage für die genannte Modellerweiterung ist die experimentelle Untersuchung der Abflusskonzentration mittels tracerhydrologischer Methoden. Die Versuche sollen zur Bestimmung der Variabilität auch bei unterschiedlichen Gebiets-Vorfeuchten durchgeführt werden.

Zusätzlich zur Überprüfung der Abflusskonzentrationsroutine des weiterentwickelten TAC-Modells, soll geprüft werden, ob es möglich ist, eine Übertragung auf ungemessene Gerinne durchzuführen; des weiteren ob sich verallgemeinernde Aussagen über den Zusammenhang zwischen Gebietsparametern und den ermittelten Fliesgeschwindigkeiten treffen lassen. Eine weitere Anwendung der erhobenen Daten ist die Möglichkeit Abschätzungen zur Ausbreitung einer Schadstoffwolke in den Gerinnen machen zu können. Da einige Bäche in unmittelbarer Nähe stark befahrener Straßen liegen, ist eine direkte Verschmutzung durchaus denkbar.

Auch als Grundlage für weitere experimentelle Untersuchungen könnten die Markierversuche genutzt werden. Z.B. die geplante Untersuchung zur Menge des Grundwasserzustroms in kurzen Messabschnitten in den St. Wilhelmer Talbach. Hier soll mittels kontinuierlicher Einspeisung eines Tracers eine konstante Konzentration im Talbach eingestellt werden. Jeder Zustrom würde eine Verdünnung verursachen und könnte so bilanziert werden. Die Kenntnis der Fließgeschwindigkeit ist hierbei notwendig, um die Ausbreitungszeit der Tracerwolke zu berechnen und somit den Zeitpunkt zu bestimmen, ab dem sich eine konstante Konzentration einstellt.

Ein exemplarischer Versuch zur Untersuchung der künstlichen Hochwasserwelle soll klären, wie die Geschwindigkeit der Stoffkonzentration der Wellengeschwindigkeit einer ablaufenden Welle nacheilt. Bisher gibt es keine Vorstellung darüber, in welcher zeitlichen Größenordnung dies im Bruggaeinzugsgebiet stattfindet. Die Frage ist, ob dies wie in NOLAN & HILL (1990) beschrieben messbar ist oder wie in GLOVER & JOHNSON (1974) dargestellt, in Einzugsgebieten < 100 km² nicht mehr nachweisbar ist. Falls dieser Effekt merklich auftritt, kann als ein weiterer Schritt versucht werden, dies in die Modellierung der Abflussbildung miteinzubeziehen.

1.3 Vorgehensweise

Im experimentellen Teil der Arbeit sollen durch Markierversuche mit Momentaneinspeisung, die Fließzeiten ausgewählter Hanggerinne und der Hauptvorfluter im Bruggaeinzugsgebiet ermittelt werden. Als Tracer eignet sich dafür handelsübliches Kochsalz (NaCl und Zusatzstoffe), das günstig erhältlich und problemlos einsetzbar ist. Durch den Einsatz mehrerer automatisch aufzeichnender Leitfähigkeitsmessgeräte entlang der zu untersuchenden Fließstrecken können Tracerdurchgangskurven bestimmt werden. Daraus lassen sich mittlere Verweilzeit, maximale, intensive und mittlere Fließgeschwindigkeit sowie die longitudinale Dispersivität bestimmen. Auch der Abfluss an der jeweiligen Messstelle kann mittels Integralmethode bestimmt werden.

Der Vorteil von Kochsalz und automatisch messender Geräte besteht darin, dass die Daten digital aufgezeichnet und einfach weiterverarbeitet werden können, die einfach anzuwendende Art des Verfahrens durch Bestimmung der Leitfähigkeit, sowie der geringe Aufwand an Hilfspersonal.

Die NaCl Markierversuche können so bequem von einer Person durchgeführt werden. Die Auswahl der Gerinne wird durch Geländebegehungen Ende März durchgeführt. Um eine entsprechende Datengrundlage zu erhalten, sollen 20 bis 25 Hanggerinne bzw. Teile der größeren Vorfluter Zastlerbach, Brugga und St. Wilhelmer Talbach herangezogen werden. Neben der Durchführung der Markierversuche werden auch die morphologischen Strukturen wie Poolsysteme und Gefälleveränderungen kartiert.

Für die Durchführung des Schwallwellenversuchs ist es nötig eine größere Menge Wasser schlagartig in einen Gerinneabschnitt zu entlassen um damit eine sogenannte Schwallwelle zu erzeugen. Hierfür kommen künstliche Rückhaltungen wie z.B. Wasserkraftwerksstaubecken in Frage. Für die Auswahl der geeigneten Stellen ist eine Ortsbegehung der Wasserkraftwerke im Brugga bzw. Zastlereinzugsgebiet nötig. Beim Öffnen des Beckens wird dem ausströmenden Wasser ein Tracer injiziert, der die mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers annimmt. An bachabwärts gelegenen Stellen werden die Veränderungen des Wasserstandes sowie die Durchgänge der Tracer registriert.

2 Das Untersuchungsgebiet

2.1 Das Einzugsgebiet der Brugga

Das Einzugsgebiet der Brugga liegt im südwestlichen Teil des kristallinen Schwarzwalds. Es besitzt eine Fläche von ca. 40 km². Zwischen Feldberggipfel (1493 m ü. NN) und Gebietsauslass am Pegel Oberried (434 m ü. NN) ergibt sich eine Höhendifferenz von 1059 m. Die mittlere Höhe beträgt 986 m ü. NN. 10 % des Einzugsgebietes weisen ein Gefälle von über 40° sowie ein mittleres Gefälle von 17,5°auf.

Rund 75 % der Einzugsgebietsfläche sind bewaldet. Die höheren Lagen werden von Fichtenwäldern dominiert, wohingegen in tieferen Lagen Tannen-Buchen-Gesellschaften zu finden sind. Die unbewaldeten Hochflächen und Talböden (ca. 22 %) werden von der Weidewirtschaft genutzt. Ackerbau ist im Einzugsgebiet der Brugga nicht zu finden. 3 % der Fläche werden als Siedlungsfläche genutzt.

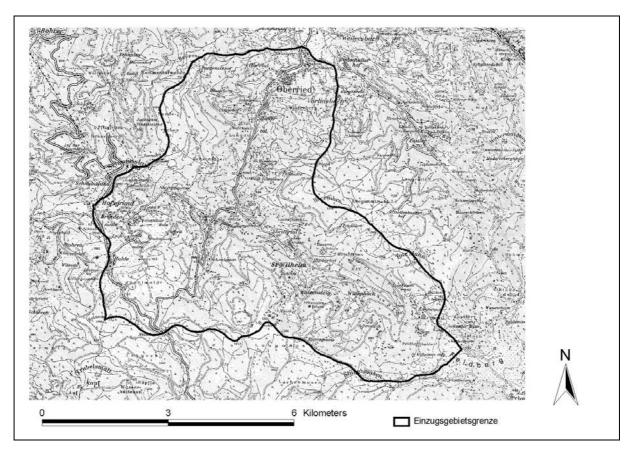


Abbildung 1: Das Einzugsgebiet der Brugga

Die Klimaelemente sind aufgrund der ausgeprägten Topographie des Einzugsgebietes durch starke räumliche Heterogenität geprägt. Der mittlere Jahresniederschlag liegt bei ca. 1700 mm. Davon fallen ein Drittel in den tiefen Lagen bzw. zwei Drittel in den hohen Lagen als Schnee. Die Jahresmitteltemperatur liegt zwischen 10,3 °C in den Tallagen und 3,2 °C am Feldberggipfel. Als Restgröße der Wasserbilanz ergibt sich die jährliche Verdunstung mit ca. 550 mm.

Die Morphologie des Gebietes kann in kuppige Hochlagen mit geringem Gefälle, bestehend aus Resten eines permischen bzw. tertiären Flachreliefs (LIEHL 1988, STAHR 1979) (ca. 20 %, Flächenanteil), steile Hangbereiche mit einem Gefälle bis zu 50 ° (ca. 75 % des Einzugsgebietes) und in die überwiegend schwach entwickelten Talböden (ca. 5 % Flächenanteil) unterteilt werden.

2.1.1 Die untersuchten Bäche

Für die Untersuchung der Fließgeschwindigkeiten wurden Hanggerinne und Hauptvorfluter des Bruggaeinzugsgebiets ausgewählt. Die zunächst angedachte Ausdehnung der Versuche auf 20 bis 25 Bäche im Brugga- und Zastlereinzugsgebiet wurde zugunsten einer höheren Wiederholrate der Versuche auf 13 Bäche begrenzt. Die Versuche können so bei feuchten Vorbedingungen und bei sommerlichem Trockenwetter durchgeführt werden um Unterschiede deutlich zu machen. Die Auswahl geschah nach folgenden Gesichtspunkten:

- Zugänglichkeit d.h. Einspeise- und Messstellen müssen ohne große Schwierigkeiten erreichbar sein. Idealerweise sind dies Kreuzungen zwischen Bach und Straße bzw. Weg. Dadurch ist auch die Möglichkeit der Bestimmung der Lokalität auf der Karte gegeben. Die Bestimmung der Koordinaten mit GPS (Global Positioning System) ist unter Wald nicht immer möglich, deshalb wurde darauf verzichtet. möglichst gleichmäßige Verteilung über das Untersuchungsgebiet
- Hangneigung, d.h. die vorkommenden Hangneigungen sollten für das Gebiet repräsentativ sein.

Nach intensiver Geländebegehung wurden die in Abbildung 2 dargestellten und in Tabelle 1 näher charakterisierten Bäche ausgewählt. Aufgrund des zur Verfügung stehenden Kartenmaterials wurden die Bäche in Abschnitte eingeteilt und wie in Kapitel 3.1 beschrieben untersucht.

Da sich die Erteilung einer Fahrgenehmigung für Forstwege zunächst verzögerte, wurden zunächst Bäche gemessen, die durch öffentlichen Strassen erreichbar sind. Hierzu zählt auch ein Bach im Zastlereinzugsgebiet, der aus obiger Einschränkung auf mehrmalige Wiederholung nicht einbezogen wurde.

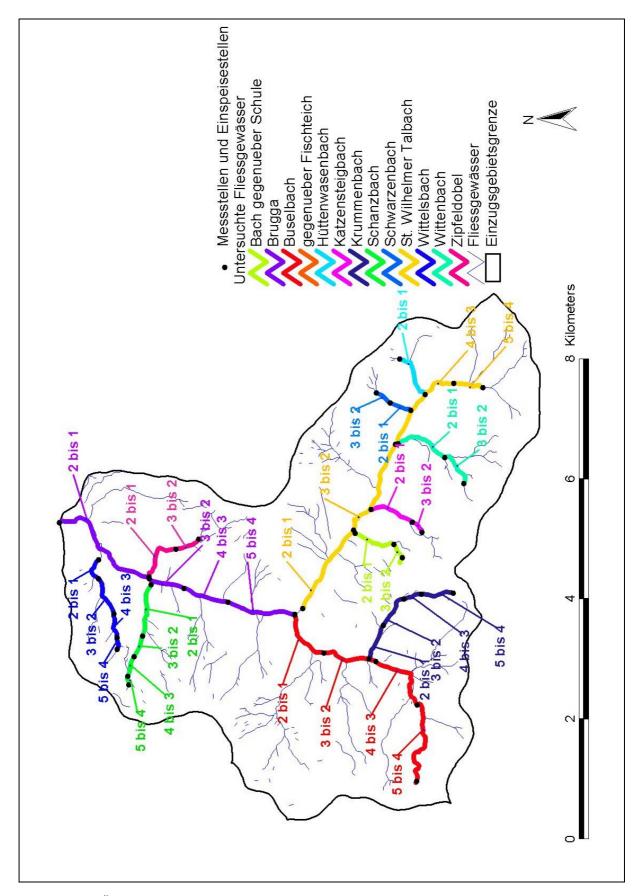


Abbildung 2: Übersichtskarte der untersuchten Bäche im Bruggaeinzugsgebiet

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Bäche

Bach	Einzugs-	Mess-	Länge des	Größe des	Mittlere Hang-
	gebiets-	ab-	Mess-	lokalen Ein-	neigung des Mess-
	größe [km²]	schnitt x bis y	abschnitts [m]	zugsgebiets [km²]	abschnitts [°]
Bach gegenüb. Fischteich	0,27		405		32,5
Bach gegenüber Schule	0,45	2 bis 1	782	0,4	16,9
Brugga	39,9	2 bis 1	2077	39,9	2,5
Brugga		3 bis 2	614	34,14	0,9
Brugga		4 bis 3	808	31,77	2,8
Brugga		5 bis 4	1147	29,51	3,0
Buselbach	12,24	2 bis1	902	12,24	8,9
Buselbach		3 bis 2	921	8,24	5,6
Buselbach		4 bis 3	1174	4,47	7,9
Buselbach		5 bis 4	1293	1,64	5,3
Hüttenwasenbach	0,77	2 bis 1	845	0,77	21,1
Katzensteigbach	1,34	2 bis 1	807	1,34	13,7
Katzensteigbach		3 bis 2	255	0,98	13,7
Krummenbach	1,30	2 bis 1	372	1,30	12,5
Krummenbach		3 bis 2	877	0,82	10,4
Krummenbach		4 bis 3	456	0,52	10,8
Krummenbach		5 bis 4	384	0,35	8,2
Schanzbach	1,94	2 bis 1	917	1,94	11,7
Schanzbach		3 bis 2	408	1,12	16,4
Schanzbach		4 bis 3	367	0,59	18,3
Schanzbach		5 bis 4	158	0,49	22,4
Schwarzenbach	0,45	2 bis 1	382	0,45	23,2
Schwarzenbach		3 bis 2	319	0,38	22,1
St. Wilhelmer Talbach	15,24	2 bis 1	1610	15,24	3,6
St. Wilhelmer Talbach		3 bis 2	1752	11,80	2,6
St. Wilhelmer Talbach		4 bis 3	1561	7,21	4,8
St. Wilhelmer Talbach		5 bis 4	517	2,63	6,7
Wittelsbach	1,85	2 bis 1	807	1,85	7,1
Wittelsbach		3 bis 2	356	1,31	10,5
Wittelsbach		4 bis 3	415	0,55	14,7
Wittelsbach		5 bis 4	182	0,36	16,0
Wittenbach	1,99	2 bis 1	922	1,99	11,0
Wittenbach		3 bis 2	540	1,57	13,5
Zipfeldobel	1,23	2 bis 1	811	1,23	9,2
Zipfeldobel		3 bis 2	451	0,81	14,1

2.1.2 Morphologieaufnahmen der Bäche

Die Bäche wurden teilweise abgegangen, um die Bachmorphologie aufzunehmen. Ziel war es hierbei eine Klassifikation der Morphologie zu erstellen, die Anhaltspunkte über die Rauhigkeit des Gerinnes liefert. Ziel dieser Arbeit ist es nicht umfangreiche Messungen der Gerinnerauhigkeit durchzuführen. Dies ist in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht möglich und erfordert auch einen größeren Aufwand an Geländevermessungen, was in dem teilweise schlecht zugänglichen Gelände nicht ohne weiteres möglich ist. Es wurde versucht, eine grobe Klassifizierung der Gerinnemorphologie der Bäche durchzuführen (Tabelle 1). Hierbei gingen folgende Kriterien ein:

- Durchschnittliche Gerinnebreite
- Größe der Steine und Blöcke im Gerinne
- Größe der Pool-Riffle-Systeme

Aufgrund der Kartierung lassen sich vier Klassen einteilen, die aufgrund ihrer Struktur große Ähnlichkeiten aufweisen (Abbildung 3, 4, 5 und 6)

- Klasse 1: Breite 0 bis 2 m, Größe der Steine bis 30 cm Durchmesser, mit großem Gefälle und Wildbachverbauung
- Klasse 2: Breite 0,5 bis 2 m, Größe der Steine bis 30 cm, ohne Wildbachverbauung
- Klasse 3: Breite 2 bis 5 m, Größe der Steine 30 bis 50 cm
- Klasse 4: Breite 2 bis 5 m, Größe der Steine > 50 cm Durchmesser



Abbildung 3: Morphologieklasse 1



Abbildung 4: Morphologieklasse 2



Abbildung 5: Morphologieklasse 3



Abbildung 6: Morphologieklasse 4

Tabelle 2: Übersicht über die Morphologiestrukturen der untersuchten Bäche

				u	
	Abschnitt x bis y	Durch- schnittliche Breite [m]	Steingröße [cm]	Step-pool- Systeme Sprunghöhen [m]	e
Bach	Abschnit x bis y	Durch- shnittlich Breite [m]	singrė [cm]	-po sten sten m]	Klasse
<u>m</u>	Abs x k	Du jihin Br	teir [c	-tep Sys run	$ \Xi $
				S ds	
gegenüb. Fischteich	2 bis 1	0,5-1 $1,5-2$	10 - 20	0,1	1
Hüttenwasenbach	1 bis 2	1,5-2	> 30	1	1
				Wildbachverbauung, Holzbalken	
				quer zur Fließrichtung, Wasser	
~ 1 1	41: 0	1.5	20	fließt tlw. über blanken Fels	
Schwarzenbach	1 bis 2	1,5-2	> 30	1	1
				Wildbachverbauung, Holzbalken	
Calayyamaanlaaala	2 his 2	1.5. 2	> 20	quer zur Fließrichtung	1
Schwarzenbach	2 bis 3	1,5 – 2	> 30	Wasser fließt tlw. über blanken	1
Katzensteigbach	2 bis 1	1 - 2	30	Fels 1 Kaskadenartiger Abfall >1	2
Katzensteigbach	3 bis 2	0,7	10 –15	Naskadenartiget Abrait >1 0,1	2
Krummenbach	2 bis 1	0,7	10-13 $10-20$	0,1	
Krummenbach	3 bis 2	1	$\frac{10-20}{10-20}$	0,2	
Krummenbach	4 bis 3	0,5	$\frac{10-20}{10-20}$	0,2	2
Krummenbach	5 bis 4	0,5	$\frac{10-20}{10-20}$	0,1	
Schanzbach	2 bis 1	0,3	$\frac{10-20}{15}$	0,1	
Schanzbach	3 bis 2	0,7	15	0,5	2
Schanzbach	4 bis 3	0,7	15	0,1	2
Schanzbach	5 bis 4	0,7	15	Viel Holz im Gerinne 0,1	2
	2 bis 1	1	> 20	10 – 20	
gegenüb. Schule Wittelsbach	2 bis 1	0,7	15	0,1	2
Wittelsbach	3 bis 2	0,7	15	0,1	2
Wittelsbach	4 bis 3	0,7	15	0,1	2
Wittelsbach	5 bis 4	0,7	15	0,1	2
Wittenbach	3 bis 2	1,5 – 2	> 30	0,4	2
Wittenbach	2 bis 1	0,7	15	0,1	2
Zipfeldobel	2 bis 1	1	20	0,1	2
Zipfeldobel	3 bis 2	1	> 20	0,2	
Brugga	2 bis 1	4 – 5	> 30	0,1	3
Brugga	3 bis 2	4 – 5	> 30	0,1	3
Buselbach	3 bis 2	2 –3	> 30	tlw. schlecht zugänglich 1	3
Buselbach	4 bis 3	3 – 4	> 30	8 8	
Buselbach	5 bis 4	1,5-2	> 30	0,1	3
St. Wilh. Talbach	2 bis 1	3 –4	> 30	0,5	
St. Wilh. Talbach	3 bis 2	3 –4	> 30	0,5	
St. Wilh. Talbach	4 bis 3	2 –3	> 30	0,5	
St. Wilh. Talbach	5 bis 4	2 - 3	> 30	0.5 - 1	3
Brugga	4 bis 3	4 – 5	> 50	,	4
Brugga	5 bis 4	4 – 5	> 50	1	4
Buselbach	2 bis 1	2 –3	> 50		4

2.2 Einzugsgebiet des Zastlerbachs

Für den in Kapitel 1 und Kapitel 3.2 beschriebenen Schwallwellenversuch wurde das Einzugsgebiet des Zastlerbachs in die Untersuchungen miteinbezogen.

Das Einzugsgebiet des Zastlerbachs liegt im Gneis- und Anatexitmassiv des Hochschwarzwalds und grenzt im Südwesten an das Bruggaeinzugsgebiet an. Zwischen Feldberg (1493 m ü. NN) und dem Gebietsauslass am Pegel Zastler (548 m ü. NN) ergibt sich eine Höhendifferenz von 945 m. Die mittlere Höhe des Einzugsgebiets liegt bei 1046 m u. NN.

80 % der Einzugsgebietsfläche sind bewaldet, wovon 65 % aus Nadelwäldern (Fichten, Douglasien, Tannen) und rund 35 % aus Laubwäldern (Buchen und sonstiger Baumbestand) bestehen (WALLNER 1989:111). Die waldfreien Teile des Einzugsgebietes werden hauptsächlich als Wiesen und Weiden genutzt sowie ein kleiner Teil als Siedlungsfläche und Straßen.

Die mittlere Jahrestemperatur liegt in den tieferen Lagen bei 5 bis 7 °C und in den Hochlagen bei 4 °C. Die mittlere jährliche Niederschlagssumme wird mit 1600 bis 2000 mm angegeben, wobei durch das ausgeprägte Relief mit Luv- und Lee-Effekten eine große Heterogenität gegeben ist (Trenkle & Rudloff 1989).

Das Gebiet zeigt ein ausgeprägtes Relief mit maximalen Höhendifferenzen von rund 950 m. Der schmale Kerbtalboden wird von steilen Talflanken mit Hangneigungen von über 54° umschlossen. In höheren Lagen gehen diese in eine Rückenlandschaft mit verhältnismäßig flachem Relief über.

Das Zastlertal wurde in den letzten Kaltzeiten glazial überprägt. Deutlich treten Moränen und Karen, Schuttkegel und Blockschutthalden in diesem Gebiet auf. Rezente Schutthalden mit Hangneigungen über 25° sind vorwiegend an den Süd-, Südwest- und Westhängen mit ihren häufigen Frostwechseln zu finden. (HÜTTNER & WIMMENAUER 1967)

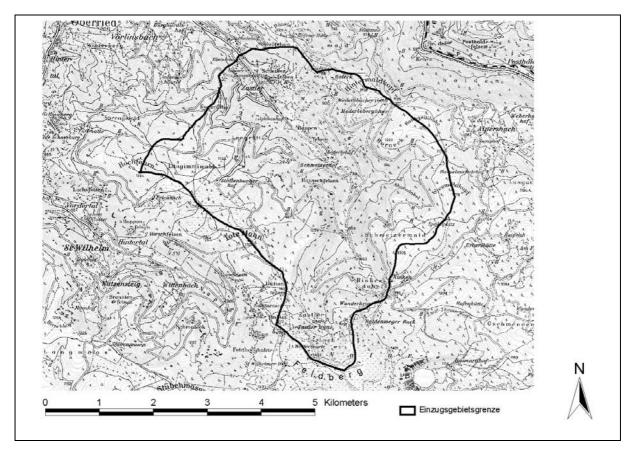


Abbildung 7: Das Einzugsgebiet des Zastlerbachs

3 Methoden

3.1 Salzverdünnungsversuche zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten in Bächen

3.1.1 Grundlagen

Wasser ist in reiner Form ein schlechter elektrischer Leiter. Destilliertes Wasser hat eine Grundleitfähigkeit von 6μ S/cm. Durch Lösungsprozesse kommt es zu einer Erhöhung der gelösten Ionen und dadurch zu einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit. In Abhängigkeit von der Geologie des Einzugsgebietes, den Niederschlägen und anthropogener Einflüsse stellt sich in den Gerinnen eine gebietsspezifische Leitfähigkeit ein.

Die Salzverdünnungsmessung wird auch als Mengenmessung mit Hilfe schwimmender Salzlösung oder Salzgeschwindigkeitsverfahren bezeichnet (HODEL 1993). Bei diesem Verfahren wird an einer oder mehreren Einspeisestellen eine bestimmte Menge Salz eingespeist und an einer oder mehreren abwärts gelegenen Messstellen der Durchgang der Salzwolke als Änderung der elektrischen Leitfähigkeit gemessen. Die Methode beruht auf der Tatsache, dass sich die eingespeiste Salzmenge nach homogener Durchmischung mit der Fließgeschwindigkeit des Wassers bewegt. Der Zusammenhang zwischen Ionenkonzentration und elektrischer Leitfähigkeit ist im betrachteten Konzentrationsbereich linear. Vor der Messung wird mit Bachwasser eine Verdünnungsreihe angesetzt um eine Eichbeziehung zwischen zugegebener Salzmenge und der elektrischen Leitfähigkeit herzustellen. Aufgrund dieser Eichbeziehung kann die Verdünnung der Salzwolke und der momentane Abfluss an der Messstelle bestimmt werden.

Es werden zwei Verfahren der Salzverdünnungsmessung unterschieden:

- Die Methode mit konstanter Einspeisung, bei welcher der Tracer über einen längeren Zeitraum mit konstanter Rate und Konzentration eingespeist wird. Für die konstante Einspeisung macht man sich das Prinzip der Mariott'schen Flasche zu nutze. Auf diese Art der Messung soll hier nicht näher eingegangen werden, da bei den durchgeführten Versuchen diese Methode keine Anwendung fand.
- Die Methode mit momentaner Einspeisung oder Integrationsmethode. Bei dieser Methode wird eine Salzlösung zeitlich punktförmig (Dirac-Impuls), d.h. in möglichst kurzer Zeit eingespeist. Nach einer bestimmten Messstrecke nach der homogene Durchmischung vorliegen muss, wird die Durchgangskurve der elektrischen Leitfähigkeit aufgezeichnet und über die zuvor erstellte Eichbeziehung in NaCl-Konzentrationen umgerechnet. Mittels Gleichung 3.1 kann der Abfluss an der Messstelle bestimmt werden.

$$Q = \frac{m}{\int (C(t) - C_0) * dt}$$
 Gleichung 3.1

mit

Q: Abfluss [m³/s]

m: Masse des eingespeisten Tracers [kg]

C(t): Konzentration des Tracers zum Zeitpunkt t [kg/m³]

C₀: Grundkonzentration des Gewässers [kg/m³]

Die Fließzeiten bzw. -geschwindigkeiten werden folgendermaßen unterschieden:

Die minimale Fließzeit t_{min} , ist die Zeit, die zwischen Einspeisung und erstem Auftreten des Tracers an der Probennahmestelle vergeht. Hieraus errechnet sich die maximale Fließgeschwindigkeit v_{max}

$$v_{\text{max}} = \frac{s}{t_{\text{min}}}$$
 Gleichung 3.2

mit

v_{max}: maximale Fließgeschwindigkeit [m/s]

s: Fließstrecke zwischen Einspeisestelle und Probennahmestelle [m]

t_{min}: minimale Fließzeit [s]

• Die intensive Fließzeit t_{int}, ist die Zeit, die zwischen Einspeisung und dem Durchgang des Maximums der Tracerkonzentration an der Probennahmestelle vergeht. Hieraus errechnet sich die intensive Fließgeschwindigkeit v_{int}

$$v_{\text{int}} = \frac{s}{t_{\text{int}}}$$
 Gleichung 3.3

mit

v_{int}: intensive Fließgeschwindigkeit [m/s]

s: Fließstrecke zwischen Einspeisestelle und Probennahmestelle [m]

t_{int}: intensive Fließzeit [s]

 Die mittlere Fließzeit t_{mit} oder Halbwertszeit. Sie ist bestimmt durch den Zeitpunkt an dem die Hälfte des insgesamt an der Beobachtungsstelle gefundenen Markierungsstoffes wieder ausgetreten ist. Die zugehörige Konzentration wird auch als Konzentrationsschwerpunkt bezeichnet (Käss 1992: 12f). Hieraus lässt sich die mittlere Fließgeschwindigkeit bestimmen. Für die Bestimmung der mittleren Fließgeschwindigkeit wurde das C_{max} / 0,5 C_{max} - Verfahren benutzt (LEIBUNDGUT 1998).

Es gilt:

C_{max}: maximale Konzentration der Tracerdurchgangskurve [μg/l]

t_{max}: Zeit zwischen Einspeisung und C_{max} [s]

0,5 C_{max}: die Hälfte der maximalen Konzentration [µg/l]

t' und t'': Zeit bei 0,5 C_{max}, auf dem ansteigenden bzw. abfallenden Ast der Tra-

cerdurchgangskurve

t' und t'' können aus der Durchgangskurve bestimmt werden (Abbildung 8).

$$\varphi' = \frac{t_{\text{max}}}{t'}$$
 Gleichung 3.4

$$\varphi'' = \frac{t_{\text{max}}}{t''}$$
 Gleichung 3.5

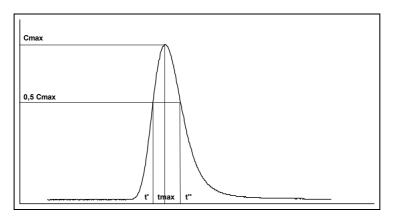


Abbildung 8: Durchgangskurve zum C_{max} / 0,5 C_{max}-Verfahren

Anschließend erfolgt Berechnung von $P_D(\varphi')$ und $P_D(\varphi'')$.

$$P_D = \frac{(1-\varphi)^2}{4*\sqrt{\varphi[\ln(2\varphi^{1.5})+1.5(1-\varphi)]*[\varphi\ln(2\varphi^{1.5})+1.5(1-\varphi)]}}$$
 Gleichung 3.6

mit

P_D: Dispersionsparameter [-]

Wenn $P_D(\phi') \neq P_D(\phi'')$, dann muss t_{max} nach oben oder unten verschoben werden, wobei t' und t'' beibehalten werden.

Danach erfolgt die Berechnung von t_{mit}:

$$t_{mit} = t_{max} * \left[\sqrt{1 + (3P_D)^2 + 3 * P_D} \right]$$
 Gleichung 3.7

mit

t_{mit}: mittlere Verweilzeit [s]

t_{max}: Zeit bei C_{max}, seit Einspeisung [s]

P_D: Dispersionsparameter [-]

Zum Schluss erfolgt die Berechnung von α_L und v_{mit}

$$\alpha_L = P_D * x$$
 Gleichung 3.8

mit

α_L: longitudinale Dispersivität [m]

P_D: Dispersionsparameter [-]

x: Strecke zwischen Einspeisestelle und Messstelle [m]

$$v_{mit} = \frac{x}{t_{mit}}$$
 Gleichung 3.9

mit

x: Strecke zwischen Einspeisestelle und Messstelle [m]

v_{mit}: mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

t_{mit}: mittlere Verweilzeit [s]

Neben dieser Methode wurde exemplarisch das Dispersionsmodell (DM) nach MALOSZEWSKI & ZUBER (1982) mithilfe des Programms FIELD (MALOSZEWSKI 1990) angewandt.

Das Dispersionsmodell erfasst den Mischungsprozess, der durch das heterogene Fließgeschwindigkeitsfeld eines Systems, im betrachteten Fall eines Gerinnes, hervorgerufen wird. Um die Heterogenität eines betrachten Systems zu beschreiben wird der Dispersionskoeffizient D verwendet. Für die durchgeführten Markierversuche kann die eindimensionale Form des DM angewendet werden. Die Verteilungsfunktion der mittleren Verweilzeiten ist gegeben durch folgende eindimensionale Lösung der Dispersionsgleichung.

$$g(t') = \frac{1}{\sqrt{4\pi \left(\frac{D}{vx}\right)\left(\frac{t'^3}{t_0}\right)}} \exp \left[-\frac{\left(1 - \frac{t'}{t_0}\right)^2}{4\left(\frac{D}{vx}\right)\left(\frac{t'}{t_0}\right)}\right]$$
 Gleichung 3.10

mit

D: Dispersionskoeffizient [m²/s]

v: mittlere Fließgeschwindigkeit des Tracers [m/s]

x: mittlere Fließweglänge [m]

Das Dispersionsmodell besitzt die beiden Anpassungsparameter mittlere Fließgeschwindigkeit und longitudinale Dispersivität. Das Programm FIELD bestimmt diese beiden Parameter über die zwei Schätzverfahren Momentenmethode und Summenkurvenmethode und ein Anpassungsverfahren auf der Basis der Methode der kleinsten Quadrate (MALOSZEWSKI 1991). Nach einem ersten Programmdurchlauf kann durch Veränderung der beiden Parameter eine visuelle Anpassung der theoretischen Durchgangskurve an die tatsächlich gemessenen Werte vorgenommen werden. Die visuelle Anpassung wird durch die Angabe der Modelleffizienz unterstützt. Zusätzlich kann die Tracerrückholrate berechnet werden.

Bei der Anwendung von FIELD ergab sich folgendes Problem. Das Programm kann nur einige hundert Messwerte einlesen. Das heißt, dass für jeden Markierversuch, der einige tausend Messwerte enthält eine Reduzierung der Messwerte auf die maximal mögliche Einleseanzahl erfolgen muss. Dies bedeutet, dass statt der gemessenen 1 bzw. 2 s Intervalle z.B. 50 s Intervalle für die Berechnung benutzt werden. Das Erstellen dieser Wertetabellen bedeutet angesichts der großen Anzahl von Markierversuchen einen großen Arbeitsaufwand. Ein exemplarischer Vergleich (Kapitel 4.1.4 und 4.2.1.2) der Messwerte hat jedoch gezeigt, dass die C_{max} / 0,5 C_{max}-Methode, für die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche, fast identische Ergebnisse für die mittleren Fließgeschwindigkeiten liefert. Deshalb wurde in der vorliegenden Arbeit bei der Auswertung der Salzverdünnungsversuche auf die Benutzung des Dispersionsmodells aus praktikablen Gründen verzichtet.

3.1.2 Einspeisemengenberechnung

Für die Bestimmung der einzuspeisenden Tracermenge wurde eine Faustformel verwendet, nach der pro 100 l/s Abfluss 1 kg NaCl eingespeist wird. Diese Formel wurde angewendet, da die einschlägige Literatur in aller Regel Mengenberechnungsformeln für Grundwassermarkierungen liefert.

Für die Markierversuche wurde handelsübliches Kochsalz der Saline Friedrichshall verwendet, das günstig in größeren Mengen erhältlich ist. Hierbei eignet sich sowohl grob- als auch feinkörniges Salz. Wobei sich letzteres bei geringen Wassertemperaturen schneller löst.

3.1.3 Verwendete Messgeräte

Für die automatische Messung und Aufzeichnung der elektrischen Leitfähigkeit standen drei Multisonden der Firma Somet und ein Abflussmessset (GÄßLER 1995), eine Eigenentwicklung des Instituts für Hydrologie zur Verfügung.

Die Multisonden (Tabelle 3) zeichnen zusätzlich zur Leitfähigkeit Temperatur, Wasserstand und pH auf.

Tabelle 3: Daten der Multisonden	(SOMET 1996))
----------------------------------	--------------	---

Messfühler	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Leitfähigkeits-Sonde	0 bis 2000 μS	1 μS	1 %
Drucksonde	0 bis 5 m	1 mm	0,1 %
Temperatur-Sensor	− 20 bis + 100°C	0,1 °C	0,1 °C
pH-Sonde	0 bis 14	0,01 pH	1 %

Die Multisonden besitzen eine Speicherkapazität von bis zu 7500 Messwerten pro Messfühler. Das Abflussmessset (Tabelle 4) zeichnet in der verwendeten Konfiguration nur die Leitfähigkeit auf, kann jedoch mit weiteren Messfühlern erweitert werden (GÄßLER: 1995), wie etwa beim Schwallwellenversuch am Zastlerbach am 13.07.2001 durch den zusätzlichen Einsatz einer Drucksonde und eines in situ Fluorimeters (Variosens).

Gerät / Messfühler	Verwendeter	Auflösung	Messfehler
	Messbereich		
Leitfähigkeits-	0 bis 1000μS/cm	1 μS/cm	Gesamtsystem
messgerät			2 μS/cm bei Messwert 100μS/cm
WTW LF 323 in Kom-			10 μS/cm bei Messwert 1000 μS/cm
bination mit mikromec			
Datenlogger			
Druckpegelsonde	0 bis 3,5 m	1 mm	< 0,1% des Endwertes
PDCR30/350/5			

Tabelle 4: Daten des Messsets zur Abflussmessung (GÄßLER 1995: 12ff.)

Der Vorteil des Abflussmesssets ist die Speicherkapazität von 36000 Messwerten, sodass dieser Logger in aller Regel an Messstelle 1 positioniert wurde, um bei Mehrfacheinspeisungen die Durchgänge aller Einspeisungen aufzuzeichnen. Die Messintervalle wurden während der ersten beiden Messkampagnen bei den Multisonden auf 2 s und bei dem Abflussmessset auf 1 s festgelegt. Die Trockenwetter-Messkampagne hingegen erforderte zur Erfassung der längeren Fließzeiten eine Einstellung auf 6 s Messintervalle.

Die Sonde des Abflussmesssets sollte, wenn nötig im Bachbett mit Steinen fixiert werden, um ein Verrutschen zu verhindern. Die Multisonden sind aufgrund des Edelstahlmantels relativ schwer und brauchen in aller Regel keine Befestigungsmaßnahmen. Allen Sonden gemeinsam ist die Anfälligkeit gegenüber Luftblasen im vorbeiströmenden Wasser, die eine stabile Messung der Leitfähigkeit verhindern. Deshalb ist nach dem Einbringen der Sonden in das Gerinne, der Leitfähigkeits-Messwert zu kontrollieren. Am Abflussmessset ist dies direkt am Gerät möglich, an den Multisonden nur über einen angeschlossenen PC.

Die Daten können nach Versuchsende über die serielle Schnittstelle eines PCs ausgelesen werden und in ein MS-Excel kompatibles Format konvertiert werden.

3.1.4 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Versuche soll anhand des Krummenbachs als Stellvertreter für die anderen untersuchten Bäche näher erläutert werden. Für die Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten entlang der Gerinnestrecke des Krummenbachs vom Ahornkopf bis zur Mündung in den Buselbach wurden vier Messabschnitte ausgewählt (Abbildung 9). Die Messstellen sind über Strassen bzw. Wege zugänglich und können so auf der Karte lokalisiert und eingezeichnet werden.

Der Beispielversuch fand am 15.06.2001 statt (Tabelle 5). Nach der Installation des Abflussmesssets an der Messstelle 1, wurde an der Messstelle 2 eingespeist. Anschließend wurde an der Messstelle 2 eine Multisonde installiert und an der darüberliegenden Messstelle 3 eingespeist und wiederum eine Multisonde installiert. Diese Prozedur fand ebenso an den Messstellen 4 und 5 statt, wobei an der Messstelle 5 nur eingespeist wurde. Die Aufzeichnungen der vier Markierversuche ergaben die Durchgangskurven, die in den Abbildungen 10, 11, 12 und 13 dargestellt sind.

Abbildung 10 zeigt den Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit an Messstelle 1. Aufgezeichnet wurden die Tracerdurchgangskurven der Einspeisungen an den Messstellen 2, 3 und 4. Die Durchgangskurve der Einspeisung an Messstelle 5 ist durch die begrenzte Datenspeicherkapazität des Datenloggers nicht mehr erfolgt. In Abbildung 11 ist der Tracerdurchgang der Einspeisung der Messstelle 3 und 4 dargestellt. In Abbildung 12 ist der Tracerdurchgang der Einspeisungen von Messstelle 4 und 5 und in Abbildung 13 der Tracerdurchgang der Einspeisung von Messstelle 5 zu sehen. Aufgrund dessen können nicht nur die Fließgeschwindigkeiten für die Strecke zwischen direkt benachbarter Einspeisestelle und Messstelle bestimmt werden, sondern auch für die Strecken zwischen übernächster und der abermals darüberliegenden Einspeisestelle und der Messstelle.

An einigen Stellen wurde der Abfluss mit dem Abflussmesskoffer bestimmt, der nach dem selben Messprinzip wie die Multisonden arbeitet. Aufgrund des eingebauten Taschencomputers ist eine direkte Berechnung und Ausgabe des Abflusses im Gelände möglich. Der Abflussmesskoffer wird in ausreichendem Abstand zur Einspeisestelle positioniert um den Durchgang der Salzwolke zu messen. Dieser Abstand darf einerseits nicht zu klein sein, damit ausreichende Durchmischung der Salzlösung mit dem Bachwasser stattfindet. Er darf andererseits auch nicht zu groß sein, damit die Fließzeit die Aufzeichnungszeit von ca. 1 Stunde nicht überschreitet. Es war aus diesem Grund fast nie möglich den Abflussmesskoffer an der gleichen Stelle zu positionieren wie die Multisonden. Aufgrund der teilweise schlechten Zugänglichkeit der Bachläufe zwischen den Messstellen wurde in aller Regel auf die Anwendung dieses Geräts verzichtet und der Abfluss anhand der Sondendaten berechnet.

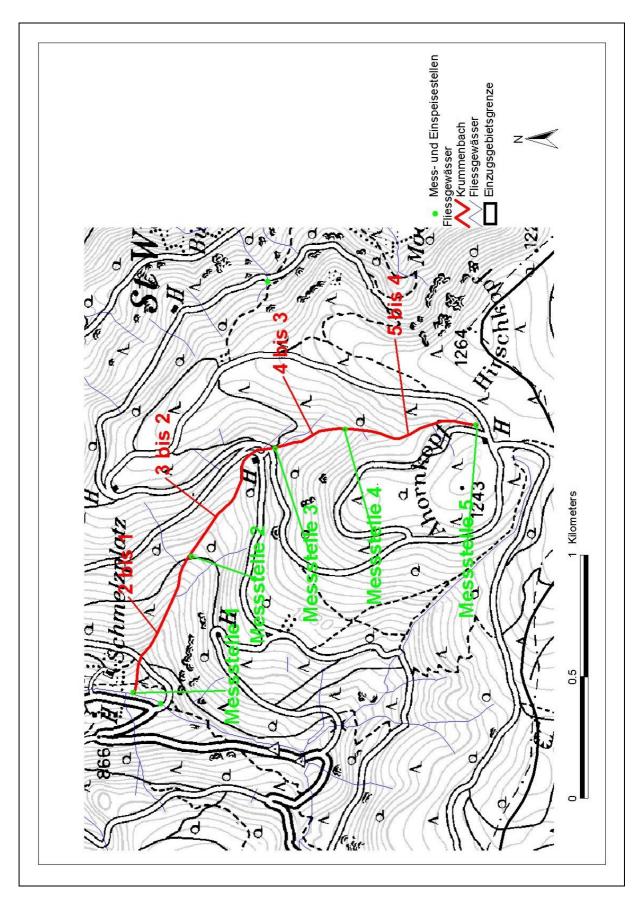


Abbildung 9: Krummenbach mit Messabschnitten, sowie den Mess- und Einspeisestellen

Tabelle 5: Erhobene Parameter des Markierversuchs am Krummenbach am 15.06.2001

Gewässer	Krummenbach				TK	8113			
					1:25000				
Datum	15.06.01								
	Sonde	Entfernung	durchschnitt-liche Hangneigung	Uhrzeit / Einspeise-zeit	elektrische Leitfähigkeit	Wasser- temperatur	Einspeise-menge Kochsalz	Abfluss gemessen mit Abflussmess- koffer	Abfluss berechnet anhand der Sondendaten
		[m]	[°]		[µS/cm]	[°C]	[kg]	[l/s]	[l/s]
Messstelle 1	Abflussmessset			-	37,70	9,30	. 01	• •	71,98
Entfernung		372,46	12,45						
Messstelle 2	1			13:05:50	35,70	8,50	1,5	41,00	39,11
Entfernung		877,11	10,37						
Messstelle 3	2			13:42:10	33,90	9,10	1,0	25,00	27,44
Entfernung		456,26	10,77						
Messstelle 4	3			16:03:00	33,80	7,90	1,0	14,10	14,19
Entfernung		384,21	8,18						
Messstelle 5				16:43:50	34,80	5,20	0,5		

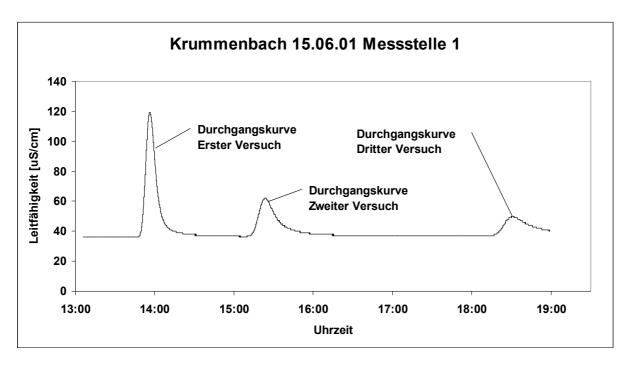


Abbildung 10: Durchgangskurve der Messstelle 1

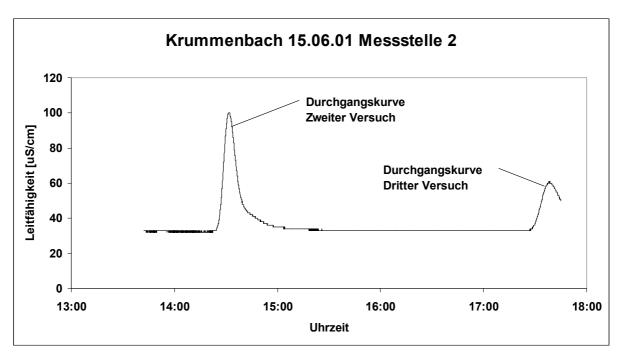


Abbildung 11: Durchgangskurve der Messstelle2

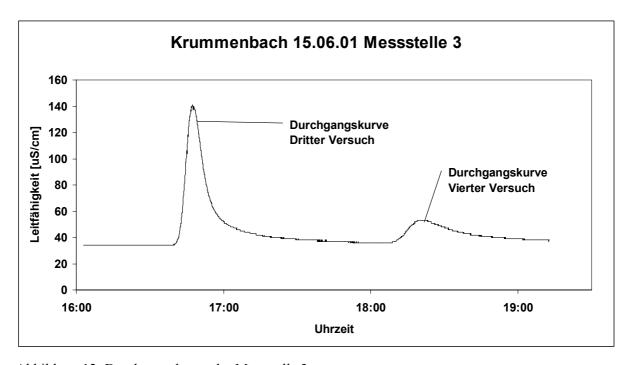


Abbildung 12: Durchgangskurve der Messstelle 3

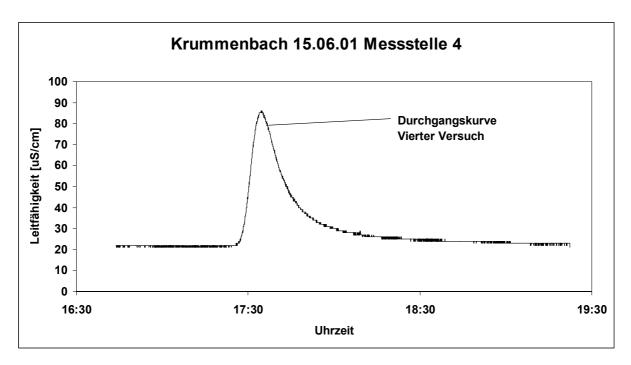


Abbildung 13: Durchgangskurve der Messstelle 4

Zu jeder Einspeisung wurden die Parameter Grundleitfähigkeit und Temperatur, sowie der Einspeisezeitpunkt protokolliert (Tabelle 5).

Diese Vorgehensweise wurde bei allen untersuchten Bächen angewendet. Zunächst erfolgte die Festlegung der Gerinneabschnitte aufgrund der Zugänglichkeit über Straßen und Wege anhand der DGK (**D**eutsche Grundkarte, Maßstab 1:5000) bzw. TK 25 und TK 50 (**T**opographische Karte, Maßstab 1:25000 bzw. 1:50000). Im Gelände fand dann die Ausbringung der Sonden, das Auflösen des Kochsalzes und die Einspeisung statt. Je nach Bachlänge erfolgten eine bis vier Einspeisungen pro Bach und eine Aufteilung in bis zu vier Gerinneabschnitte unterschiedlicher Länge.

Wichtig ist hierbei ein Vorarbeiten von der Mündung bachaufwärts. Diese Reihenfolge muss unbedingt eingehalten werden, damit die Tracerwolken sich nicht überlagern. Dies kann geschehen, wenn zunächst an einer bachaufwärts gelegenen Stelle und anschließend unterhalb eingespeist wird. Hierdurch kommt es zu nicht interpretierbaren Ergebnissen. Selbst mit der angewandten Methode kann es vorkommen, dass eine zweite Tracerwolke die erste einholt, bevor diese vollständig durchgegangen ist. Dies ist zum Beispiel bei der zeitlich versetzten Einspeisung in zwei Seitengerinne der Fall.

An einem Geländetag sind, aufgrund der langen Fließzeiten, mit den vier vorhandenen Loggern maximal vier Einspeisungen zu schaffen.

Zunächst wurden zwei Messkampagnen geplant: eine im Frühjahr mit hoher Vorfeuchte des Gebietes und eine zur sommerlichen Trockenwetterperiode. Da sich das feuchte Frühjahr in den Sommer hineinzog, wurde eine zweite Messkampagne bei hoher Vorfeuchte durchgeführt, wobei auch Messlücken von Fehlmessungen der ersten Kampagne geschlossen werden konnten. Die Trockenwettermessungen wurden im August und September durchgeführt um

ausreichend viele niederschlagsfreie Tage im Vorlauf der Messungen zu haben. Es war bedingt durch Datenlogger-Ausfall und unzureichenden Tracerdurchgangskurven nicht möglich für jede Messkampagne die gleiche Anzahl an Versuchen auszuwerten.

3.1.5 Auswertung der Messungen

Nach den in Kapitel 3.1.1 beschrieben Verfahren wurden maximale, intensive und mittlere Fließgeschwindigkeit berechnet. Weiterhin erfolgte eine Berechnung des Abflusses und der longitudinalen Dispersion. Da nicht alle Markierversuche auswertbare Durchgangskurven zeigten, mussten einige Markierversuche verworfen werden. Die Fließstrecken und mittleren Hangneigungen der einzelnen Messstrecken wurden hauptsächlich aus der DGK ermittelt, die im Laufe der Arbeit für das untersuchte Gebiet auch als digitale Version vorlag. Die weniger detaillierten TK 25 und TK 50 wurden nur in den Fällen hinzugezogen in denen das betreffende Gebiet auf der DGK nicht kartiert bzw. Bachläufe nicht eingezeichnet waren.

3.1.6 Anwendung von Fließformeln

Ziel dieser Arbeit ist es Fließgeschwindigkeiten in den Hanggerinnen und Hauptvorflutern des Bruggaeinzugsgebietes zu ermitteln. Hier sind zunächst folgende Fragen zu beantworten.

Variante A:

- Sollen in der für die Feldarbeit zur Verfügung stehenden Zeit möglichst viele Fließzeit-Messungen an wenigen Bäche durchgeführt werden um statistisch verwertbare Daten zu erhalten?
- Sollen die gemessenen Werte mit Fließformeln aus der Literatur ausgewertet werden?

oder

Variante B:

- Sollen in der für die Feldarbeit zur Verfügung stehenden Zeit Fließzeit-Messungen an vielen Bäche mit einigen Wiederholungen durchgeführt werden um ein größeres Gebiet abzudecken?
- Soll versucht werden aus den gewonnenen Daten Zusammenhänge zwischen Gebietseigenschaften und Fließgeschwindigkeiten zu ermitteln?

Voraussetzungen für Variante A sind Fließformeln, welche die Fließgeschwindigkeiten in Bergbächen zu beschreiben vermögen.

Die von HODEL (1993) entwickelte Fließformel für Bergbäche in der allgemeinen Form lautet:

$$v_T = a * \left(\frac{Q}{Q_x * I^{0.5}}\right)^b$$
 Gleichung 3.11

mit

v_T: Translationsgeschwindigkeit [m/s]

Q: Abflussmenge [m³/s]

 Q_x : Bezugswassermenge [m³/s]

I: Bachgefälle [%]

a, b: Koeffizienten der Translationsgeschwindigkeitsformel [-]

Zur Bestimmung der Translationsgeschwindigkeiten in Bergbächen werden die folgenden schon mit Koeffizienten versehenen Formeln empfohlen.

Bergstrecken ohne ausgeprägte Kaskadierung

$$v_T = 0.19 * \left(\frac{Q}{Q_x * I^{0.5}}\right)^{0.64}$$
 Gleichung 3.12

Sehr steile Bergbachstrecken mit ausgeprägter Kaskadierung

$$v_T = 0.46 * \left(\frac{Q}{Q_x * I^{0.5}}\right)^{0.63}$$
 Gleichung 3.13

Nach RICKENMANN (1996) gilt (mit Überlappung im Gefällebereich zwischen 0,6 und 1 %):

für Gefälle größer 0,6 %:

$$V = 0.37 * g^{0.33} * Q^{0.34} * \frac{J^{0.20}}{d_{90}^{0.35}}$$
 Gleichung 3.14

für Gefälle kleiner 1,0 %:

$$V = 0.96 * g^{0.36} * Q^{0.29} * \frac{J^{0.35}}{d_{90}^{0.23}}$$
 Gleichung 3.15

mit

V: mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

g: Erdbeschleunigung [m/s²]

Q: Abfluss $[m^3/s]$

J: Gefälle [%]

d₉₀: charakteristische Korngröße, wobei 90 % Gewichtsanteile des Sohlenmaterials feiner

sind [m]

Im Bruggaeinzugsgebiet können Gleichung 3.12 und 3.14 bzw. Gleichung 3.15 grundsätzlich Verwendung finden.

Zu den Parametern im einzelnen ist Folgendes zu bemerken. HODEL (1993: 128) gibt zur Ermittlung der Bezugswassermenge den Abfluss an, der bettbildend wirkt. Das heißt der Abfluss, der über das Niedrig- und Mittelwasserbett tritt. Für die Bestimmung dieses Abflusses ist eine längere Zeitreihe der Abflüsse für das entsprechende Gerinne notwendig. Wenn diese für den entsprechenden Bach nicht vorhanden ist, kann nach HODEL (1993: 128) eine Übertragung der Zeitreihen von benachbarten Gebieten erfolgen. Sollte auch dies nicht der Fall sein muss die Bezugswassermenge abgeschätzt werden.

Hier taucht das erste Problem bei der Anwendung dieser Formel auf. Für das Bruggaeinzugsgebiet existieren nur für die Hauptvorfluter Messreihen, aus denen die Bezugswassermenge abgeleitet werden könnte. Für die Hanggerinne sind diese Daten nicht vorhanden.

Der zweite Parameter ist die Bestimmung des Bachgefälles. Die Bestimmung kann im Gelände durch die exakte Vermessung der Gerinnestrecke erfolgen. Die Vermessung der Hanggerinne gestaltet sich hier aufgrund der schlechten Zugänglichkeit bzw. der behinderten Sicht mit optischen Vermessungs-Instrumenten als schwierig bis unmöglich. Eine Vermessung mit GPS ist aufgrund der Abschirmung durch den meist vorhandenen Wald und dadurch gestörten Sattelitenempfang ebenfalls nicht möglich, zumal die ungenaue Höhenmessung des GPS eine exakte Höhenbestimmung verhindert.

Die Formel von RICKENMANN (1996) enthält zusätzlich zum Gefälle einen Parameter, der die Korngrößenverteilung beschreibt. Dieser Wert muss für jeden Messabschnitt an mehreren

Stellen bestimmt werden. Dies ist im Bruggaeinzugsgebiet möglich, wird jedoch aufgrund der oft schwierigen Zugänglichkeit der Messstrecken deutlich erschwert.

Aufgrund des hohen Aufwandes für die Gerinnevermessung und die Korngrößenbestimmung bzw. fehlender Parameter für den gerinnebildenden Abfluss ist die Variante A für die Untersuchung der 13 ausgewählten Bäche nicht geeignet.

Aus den oben genannten Gründen wird in der folgenden Arbeit die Variante B favorisiert. Das bedeutet die Fließzeiten-Messung, mit mehreren Wiederholungen, an den 13 Bächen die in Kapitel 2.1.1 beschrieben sind sowie die Überprüfung auf einen Zusammenhang zwischen Gebietsparametern und Fließgeschwindigkeiten.

3.2 Schwallwellenversuch am Zastlerbach

3.2.1 Planung

Nach einem Ortstermin bei den Wasserkraftwerken in Hofsgrund und in Oberried-Zastler, wurde aufgrund der besseren Durchführbarkeit, die Anlage am Zastlerbach ausgewählt (Abbildung 14). Der Stauraum versorgt über eine Druckleitung ein Wasserkraftwerk (Leistung: 20 kW und 32 kW, Turbinen: 2x Francis Spiralturbine, Durchfluss: 206 l/s und 310 l/s, Höhenunterschied: 15 m, Baujahr: 1948 und 1958). Da dieses Becken nur eine begrenzte Wassermenge zur Verfügung stellt, ist es nötig die sommerliche Niedrigwasserperiode abzuwarten, um eine möglichst große Erhöhung über den regulären Abfluss des Gerinnes zu erhalten. Für die Durchführung des Schwallwellenversuchs war es nötig, eine größere Menge Wasser schlagartig in den unterhalb gelegenen Gerinneabschnitt zu entlassen. Das Staubecken kann leicht über einen Schieber geöffnet werden, sodass eine rasche Entleerung stattfinden kann und eine ablaufende Welle entsteht. Da keine Unterlagen über die Größe des Stauraums verfügbar waren, musste das Becken vermessen werden, was ein ungefähres Volumen von 98 m³ ergab. Das Staubecken bietet zwei Möglichkeiten zur Entleerung (Abbildung 14). Auf der linken Seite ein Fallklappenwehr, das den Wasserstand im Becken reguliert. In Abhängigkeit von der dem Becken zuströmenden Wassermenge verändert das Wehr seine Neigung. Eine zweite Möglichkeit bietet ein Schieber auf der rechten Seite des Wehrs. Zunächst war angedacht das Fallklappenwehr in die horizontale zu kippen und dadurch die Welle zu erzeugen. Da das Becken allerdings in Richtung des Kraftwerkseinlasses abfällt, wurde der rechte Schieber geöffnet um das Becken vollständig entleeren zu können (Abbildung 15).



Abbildung 14: Wehr am Zastlerbach. Links das Fallklappenwehr mit Gegengewichten und rechts der für die Erzeugung der Welle benutzte Schieber



Abbildung 15: Staubecken nach Entleerung. Deutlich ist das Abfallen des Beckens in Richtung des Kraftwerkseinlasses (links mit Rechen) zu erkennen

Um den Laufzeitunterschied zwischen Welle und Fließgeschwindigkeit des Wassers bzw. einer Stoffkonzentration zu ermitteln, ist es notwendig den Ablauf der Welle über die Änderung des Wasserstandes, sowie die Fließgeschwindigkeit des Wassers zu beobachten. Letzteres geschieht durch den Einsatz von Tracern. Hierzu wird beim Öffnen des Wehrs dem aus-

strömenden Wasser ein künstlicher Tracer zugegeben, der mit der Fließgeschwindigkeit des Wassers mitverfrachtet wird. Der Durchgang dieses Tracers wird, wie bei der Salzverdünnungsmethode in Kapitel 3.1 beschrieben, an unterhalb gelegenen Messstellen gemessen. Der Ablauf der Welle wird über die Änderung des Wasserstandes mit Hilfe von Drucksensoren aufgezeichnet. Die mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers wird über die Konzentrationsdurchgangskurven von NaCl, Uranin und Sulforhodamin B bestimmt. Der Durchgang von NaCl kann in situ direkt über die elektrische Leitfähigkeit bestimmt werden. Die Konzentration der Fluoreszenztracer wird im Labor bestimmt. Es wurden drei Tracer verwendet, um einerseits bei Ausfall von Leitfähigkeitsmessgeräten die Fluoreszenztracer auswerten zu können und andererseits um verschiedene Zeitpunkte der ausströmenden Welle markieren zu können. Die Beschränkung auf die Fließstrecke von ca. 1 km wurde gemacht, da keinerlei Erfahrungswerte darüber vorlagen, über welche Fließstrecken die Wasserstandsänderungen durch die Welle noch beobachtbar sind.

Bei der Verwendung von Fluoreszenztracern in Oberflächengewässern ist deren Lichtempfindlichkeit zu beachten. Da Uranin eine hohe Lichtempfindlichkeit besitzt, wurde der Versuch am späten Nachmittag bei bedecktem Himmel durchgeführt um die Zerstörung durch Lichteinfluss gering zu halten. Sulforhodamin B hat eine niedrige Lichtempfindlichkeit und ist in dieser Hinsicht unkritisch.

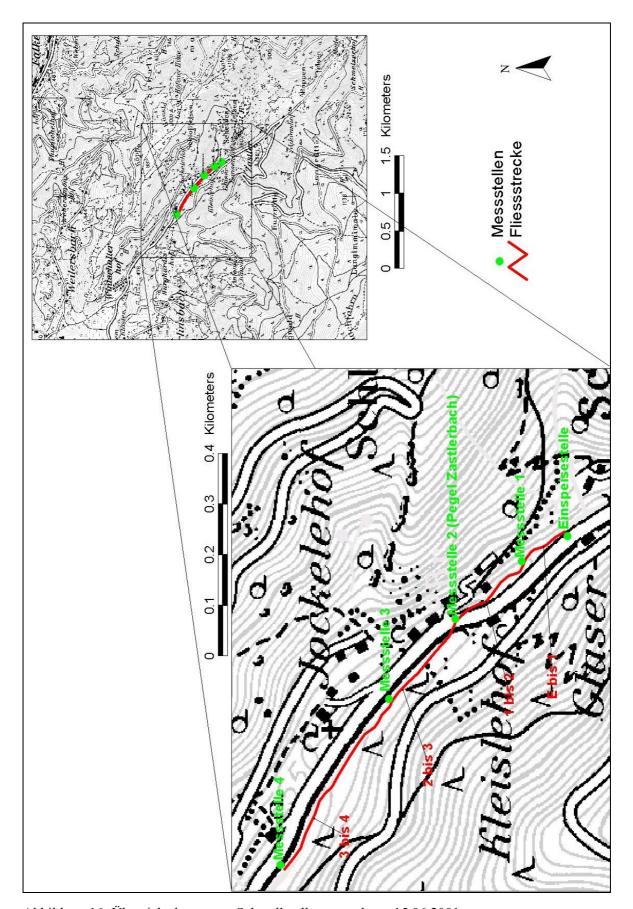


Abbildung 16: Übersichtskarte zum Schwallwellenversuch am 15.06.2001

3.2.2 Einspeisemengenberechnung

Bei der Festlegung der Einspeisemenge war es wichtig unter der Sichtbarkeitsgrenze zu bleiben, um die Anlieger des Zastlerbachs nicht durch gefärbtes Bachwasser zu beunruhigen. Für Uranin liegt sie unter günstigen Umständen in offenen Wasserläufen bei $1\mu g/l$ (KÄSS 1992:68). Die niedrigen Nachweisgrenzen von Uranin $(0,002 \mu g/l)$ und Sulforhodamin B $(0,007 \mu g/l)$ (BEHRENS 1999: 13) kommen diesem Bestreben entgegen.

Da die meisten Formeln zur Einspeisemengenberechnung für Grundwassermarkierungen entwickelt wurden, wurde im vorliegenden Fall auf die Formel von Käss (1992: 311) zurückgegriffen, die universell anwendbar ist:

M = L * k * B Gleichung 3.16

mit

M: Markiermittelmenge [kg]

L: Entfernung zum wichtigsten Beobachtungspunkt [km]

k: Beiwert für das Markierungsmittel [ohne Angabe der Maßeinheit]

Uranin: 1
Sulforhodamin B: 4
NaCl: 20000

B: Faktor für die Rahmenbedingungen [ohne Angabe der Maßeinheit]

Dieser Faktor berücksichtigt Bedingungen, die weder durch die Entfernung noch durch markierungsmitteltypische Eigenschaften erfasst werden können.

Es gilt:

0,1-0,9 für Oberflächengerinne mit raschem Durchfluss.

2 – 4 bei Einspeisung lichtempfindlicher Tracer in Oberflächengewässer.

Bemerkung zur Maßeinheit der Einspeisemenge:

Für die Markiermittelmenge sind in Käss (1992: 311) als Einheit Kilogramm angegeben. Dies muss sich jedoch um einen Druckfehler handeln. Bei der Berechnung mit Kilogramm als Einheit würden bei einem Fließweg von 1 km und NaCl als Tracer und Faktor 0,1-0,9 zwischen 2000 und 18000 kg NaCl benötigt. Die Einheit Gramm ist hier die Einheit, die realistische Werte liefert.

Die Einspeisemengenberechnung für den Schwallwellenversuch ergibt folgendes:

```
L
                    1 km (größte Fließstrecke = Strecke bis zu Messstelle 4)
k_{IJr}
                    1 (Uranin)
                    4 (Sulforhodamin B)
k_{SRB}
              20000 (NaCl)
k_{NaCl}
                  0,6 (NaCl)
В
\mathbf{B}
                    2 (Uranin und Sulforhodamin B)
Daraus folgt:
M_{NaCl} = 12000 g = 12 kg
M_{Ur} = 2 g
M_{SRB} = 8 g
```

Aus Gründen der Sichtbarkeit wurde bei Uranin auf 1 g reduziert. Sulforhodamin B wurde aufgrund der negativen Sorptionseigenschaften, verursacht durch das aufgewirbelte Sediment, auf 10 g aufgerundet.

3.2.3 Durchführung

Für die Beobachtung der ablaufenden Welle wurden vier Messstellen ausgewählt (Abbildung 16). Jede Messstelle wurde mit einem automatischen Messgerät ausgestattet, das den Wasserstand und die Leitfähigkeit im 1 bzw. 2 Sekundentakt aufzeichnete. Zusätzlich wurde Messstelle 2 mit einem Unterwasserfluorimeter (Variosens) bestückt, das es gestattet die Konzentration eines Fluoreszenztracers in situ zu messen. Durch Filterwechsel ist es möglich verschiedene Tracer zu messen, allerdings nur einen Tracer pro Gerät (LEIBUNDGUT 1999). Während dieses Versuchs wurde Uranin gemessen. Zum Einsatz kamen weiterhin die in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Geräte, wobei das Abflussmessset zusätzlich mit einer Drucksonde und dem Fluorimeter bestückt waren. Für die Probenahme waren an jeder Messstelle 3 bis 4 Personen im Einsatz um in vorgegebenen Intervallen Proben für die Fluoreszenztraceranalyse zu nehmen. Zur Zeitsynchronisation erhielt jede Gruppe jeweils eine gleichzeitig gestartete Stoppuhr.

In einem ersten Versuch wurde nur NaCl zum ausströmenden Wasser hinzugegeben (Abbildung 17). Dieser Versuch diente dazu, eine erste Übersicht über die Fließzeiten der Welle und der Salzwolke für die Probennahme der Fluoreszenztracer im zweiten Versuch zu gewinnen. Die Salzlösung wurde direkt beim Öffnen des Wehrs zum ausströmenden Wasser gegeben.

Beim zweiten Versuch (Tabelle 7) wurde NaCl beim Öffnen, Uranin in den Peak (Abbildung 18) und Sulforhodamin B in den abfallenden Ast der ausströmenden Wassermenge gegeben (Abbildung 19). An den einzelnen Messstationen wurde aufgrund der im ersten Versuch ermittelten Zeiten mit der Probennahme in festgelegten Intervallen (Tabelle 6) begonnen. Entlang der Gerinnestrecke war das ablaufen der Welle auch visuell zu beobachten.



Abbildung 17: Einspeisung von NaCl beim Öffnen des Schiebers



Abbildung 18: Einspeisung von Uranin in den Peak der Welle



Abbildung 19: Einspeisung von Sulforhodamin B in den auslaufenden Ast der Welle

Tabelle 6: Messstellenübersicht zum Schwallwellenversuch am Zastlerbach

Messstelle	Entfernung von der Einspeisestelle	Mittlere Hang- neigung	Geräte	Erste Probennahme (Stoppuhrzeit)	Proben- nahmeinterval- le bei Versuch 2 (Stoppuhrzeit)	Anzahl der Proben
1	126		Multisonde 1	01:26:00	10 s	84
		4,53				
2	337	E bis M2	Abflussmessset	01:27:30	10 s (bis 01:42:30)	139
		2,04			20 s (bis 01:58:30)	
3	573	E bis M3	Multisonde 2	01:32:00	15 s	140
		0,8				
4	999	E bis M4	Multisonde 3	01:36:20	10 s (bis 01:38:00)	210
		1,15			15 s (bis 01:53:30)	
					20 s (bis 02:16:50)	
					30 s (bis 02:51:00)	

Tabelle 7: Daten zur Einspeisung

Start der 15:24:12	Stoppul	hren							
Versuch	Einspeisemen- ge NaCl		Einspeisezeit	Einspeismenge Uranin		Einspeisezeit	Einspeisemeng e	Sulforhodamin R	Einspeisezeit
1		12 kg			-	-		-	-
2	,	12 kg	16:50:22		1 g	16:50:34		10 g	16:51:25



Abbildung 20: Bachabschnitt vor dem Eintreffen der Welle



Abbildung 21: Bachabschnitt während des Wellendurchgangs

Nach dem Versuch wurden die Probennahmestellen und der Verlauf des Gerinnes mit GPS vermessen. Die GPS-Daten konnten direkt im GIS (Geographisches Informationssystem) zur Bestimmung der Entfernungen verwendet werden. Die mittlere Hangneigung zwischen den Messstellen wurde aus der digitalen TK50 ermittelt, da die Höhendaten der GPS-Vermessung zu große Ungenauigkeiten aufweisen.

3.2.4 Auswertung der in situ Messungen und Fluoreszenztraceranalyse

Die Fließzeiten und –geschwindigkeiten wurden nach dem in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Verfahren berechnet. Für die Leitfähigkeits-Messungen konnten direkt die digitalen Sondendaten verwendet werden. Die Daten der Fluoreszenztracer konnten erst nach der Analyse mit dem Perkin Elmer Spektralfluorimeter LS 50 B im Labor ausgewertet werden. Die in Braunglasflaschen abgefüllten Proben wurden bis zur Analyse in den Probennahmeboxen unter Lichtabschluss aufbewahrt.

Uranin und Sulforhodamin B sind sehr gut nebeneinander nachweisbar. Als Xanthenfarbstoffe besitzen beide Tracer einen ähnlichen Wellenlängenabstand zwischen Anregung und Fluoreszenz (Uranin 21 nm, Sulforhodamin B 18 nm). Dieser Umstand führt dazu, dass das Synchronscanverfahren, bei dem Excitations- und Emissionswellenlänge mit konstantem Abstand über einen Wellenlängenbereich verändert wird, gut zur Analyse geeignet ist (Käss 1992: 32f und 83f). Für die Analyse wurde ein Wellenlängenbereich von 460 bis 650 nm mit einem Wellenlängenabstand von 20 nm gewählt. Da die Uraninfluoreszenz stark pH-abhängig ist, wurden die Proben durch Zugabe von NaEDTA-Puffer auf einen pH-Wert >10 eingestellt

(BEHRENS 1988, zit. in Käss 1992: 51). In diesem Bereich erreicht Uranin seine größte Fluoreszenzintensität (Käss 1992:23). Sulforhodamin B zeigt hingegen keine pH-Abhängigkeit der Fluoreszenz (Käss 1992:33).

Zur Kalibrierung wurde eine Eichreihe erstellt, die analog zu den Proben Uranin und Sulforhodamin B gleichzeitig enthielt und mit NaEDTA-Puffer versetzt wurde. Die Eichbeziehungen sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Daten der Eichung für die Fluoreszenztraceranalyse

	Uranin	Sulforhodamin B
Eichstandards [µg/l]	0,05; 0,1; 0,5; 1;5; 10;25	0,05; 0,1; 0,5; 1; 5; 10; 25;
		50; 100; 500
Eichbeziehungen	y = 0.0277 x0.0430	y = 0.8397 x0.0187
$y = Konzentration [\mu g/l]$ x = Fluoreszenzintensität	$R^2 = 0.9982$	$R^2 = 1$

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Salzverdünnungsversuche zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten

4.1.1 Ermittelte Fließzeiten und Fließgeschwindigkeiten

Nach der in Kapitel 3.1.5 beschriebenen Methode wurden die Versuche ausgewertet und ergaben die in den Tabellen 9, 10 und 11 angegebenen Fließgeschwindigkeiten. Die Nummerierung der Messstellen erfolgte von unten nach oben, d.h. Messstelle 1 liegt unterhalb von Messstelle 2 etc.

Tabelle 9: Ermittelte Fließgeschwindigkeiten und longitudinale Dispersivität der ersten Messkampagne (n.b. = nicht berechenbar)

Datum	Bach und Messstrecke	Fließstrecke [m]	mittlere Hangneigung [°]	Abfluss [1/s]	longitudinale Dispersivität [m]	maximale Fließgeschwindigkeit [m/s]	intensive Fließgeschwindigkeit [m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
11.04.01	geg. Fischteich 2 bis 1	405	31,5	6	3,37	0,34	0,26	0,249
	Bach gegenueber Schule 2 bis 1	782	16,9	27	7,65	0,09	0,08	0,070
	Brugga 2 bis 1	2077	2,5	1676	n.b.	1,49	0,41	n.b.
	Brugga 3 bis 2	614	0,9	1278	n.b.	0,47	0,42	n.b.
	Brugga 4 bis 3	808	2,8	1212	n.b.	0,60	0,51	n.b.
	Brugga 5 bis 4	1147	3,0	1547	4,84	0,68	0,55	0,539
	Buselbach 2 bis 1	902	8,9	777	3,18	0,53	0,43	0,422
	Buselbach 3 bis 2	921	5,6	495	3,63	0,47	0,38	0,371
_	Buselbach 4 bis 3	1174	7,9	337	2,86	0,35	0,30	0,297
	Buselbach 5 bis 4	1293	5,3	44	2,20	0,27	0,23	0,226
	Huettenwasenbach 2 bis 1	845	21,1	57	6,37	0,22	0,18	0,167
	Katzensteigbach 2 bis 1	807	13,7	60	2,35	0,72	0,59	0,583
-	Krummenbach 2 bis 1	372	12,4	113	0,94	0,17	0,14	0,140
-	Krummenbach 3 bis 2	877	10,4	45	2,41	0,41	0,33	0,326
	Krummenbach 4 bis 3	456	10,8	33	1,24	0,23	0,20	0,191
	Krummenbach 5 bis 4	384	8,2	19	1,67	0,17	0,14	0,132
	Schanzbach 2 bis 1	917	11,7	122	1,83	0,60	0,52	0,509
	Schanzbach 4 bis 3	367	18,3	38	6,66	0,27	0,21	0,186
	Schwarzenbach 2 bis 1	382	23,2	20	9,32	0,17	0,11	0,102
	Schwarzenbach 3 bis 2	319	22,1	22	4,23	0,18	0,13	0,123
	St. Wilhelmer Talbach 5 bis 4	517	6,7	46	1,64	0,06		0,080
-	Wittelsbach 2 bis 1	807	7,1	85	n.b.	1,03		n.b.
	Wittelsbach 3 bis 2	356	10,5	85	1,38	0,17	0,14	0,135
	Wittenbach 2 bis 1	922	11,0	449	2,39	0,59	0,50	0,490
	Wittenbach 3 bis 2	540	13,5	237	5,20	0,65		0,501
	Zipfeldobel 2 bis 1	811	9,2	116	1,90	0,41	0,36	0,350
21.05.01	Zipfeldobel 3 bis 2	451	14,1	61	9,40	0,32	0,26	0,216

Tabelle 10: Ermittelte Fließgeschwindigkeiten und longitudinale Dispersivität der zweiten Messkampagne (n.b. = nicht berechenbar)

Datum	Bach und Messstrecke	Fließstrecke [m]	mittlere Hangneigung [º]	Abfluss [I/s]	longitudinale Dispersivität [m]	maximale Fließgeschwindigkeit [m/s]	intensive Fließgeschwindigkeit [m/s]	mittlere Flicßgeschwindigkeit [m/s]
31.05.01	geg. Fischteich 2 bis 1	405	31,5	4	7,90	0,10	0,07	0,062
11.06.01	Buselbach 5 bis 4	1293	5,3	149	1,40	0,20	0,18	0,179
11.06.01	Buselbach 2 bis 1	902	8,9	734	3,61	0,52	0,41	0,408
	Huettenwasenbach 2 bis 1	845	21,1	43	7,09	0,25	0,19	0,183
	Katzensteigbach 3 bis 2	255	13,6	93	3,77	0,68	0,50	0,464
	Katzensteigbach 2 bis 1	807	13,7	187	5,49	0,55	0,47	0,446
	Krummenbach 5 bis 4	384	8,2	14	1,64	0,15	0,13	0,121
	Krummenbach 3 bis 2	877	10,4	39	2,01	0,35	0,29	0,290
	Krummenbach 4 bis 3	456	10,8	27	1,27	0,21	0,17	0,167
	Krummenbach 2 bis 1	372	12,4	72	0,84	0,15	0,12	0,121
	Schanzbach 2 bis 1	917	11,7	59	1,72	0,37	0,32	0,312
	Schanzbach 3 bis 2	408	16,4	20	2,34	0,21	0,16	0,158
-	Schanzbach 4 bis 3	367	18,3	16	4,24	0,14		0,097
	Schanzbach 5 bis 4	158	22,4	4	9,22	0,07	0,04	0,032
	Schwarzenbach 3 bis 2	319	22,1	48	1,35	0,20	0,19	0,188
	St. Wilhelmer Talbach 3 bis 2	1752	2,6	797	n.b.	0,48	0,47	n.b.
	St. Wilhelmer Talbach 2 bis 1	1610	3,6	1158	n.b.	0,49	0,50	n.b.
	St. Wilhelmer Talbach 4 bis 3	1561	4,8	352	n.b.	0,40	0,36	n.b.
	St. Wilhelmer Talbach 5 bis 4	517	6,7	193	2,78	0,41	0,31	0,300
	Wittelsbach 2 bis 1	807	7,1	55	n.b.	0,68	0,59	n.b.
	Wittelsbach 3 bis 2	356	10,5	44	1,05	0,13	0,11	0,111
	Wittelsbach 4 bis 3	415	14,7	25	n.b.	0,21	0,19	n.b.
	Wittelsbach 5 bis 4	182	15,9	11	0,67	0,22	0,17	0,167
	Wittenbach 2 bis 1	922	11,0	91	3,28	0,29	0,23	0,224
06.06.01	Wittenbach 3 bis 2	540	13,5	66	2,21	0,24	0,20	0,191

Aufgrund der nicht immer vollständigen Aufzeichnung der Tracerdurchgänge konnten nicht für alle Messstrecken mittlere Fließgeschwindigkeiten angegeben werden (n.b.). Die mittlere Fließgeschwindigkeit und die longitudinale Dispersivität wurde wie beschrieben mit dem $C_{max}/0.5$ C_{max} -Verfahren ermittelt. Zusätzlich wurden nach dem Dispersionsmodell nach MALOSZEWSKI & ZUBER (1982) mit dem Programm FIELD (MALOSZEWSKI 1990) ausgewählte Tracerdurchgangskurven ausgewertet und mit dem $C_{max}/0.5$ C_{max} -Verfahren verglichen (Kapitel 4.1.4)

Bei Bächen, die mit nur einer Einspeisung an der obersten Messstelle gemessen wurden, wurden die maximalen bzw. intensiven Fließgeschwindigkeiten der Teilabschnitte durch Differenzenbildung ermittelt. Im konkreten Fall des St. Wilhelmer Talbachs wurde an Messstelle 5 eingespeist und die maximalen bzw. intensiven Fließgeschwindigkeiten bis zu den Messstellen 4, 3, 2 und 1 bestimmt. Zum Beispiel wurde die maximale bzw. intensive Fließgeschwindigkeit zwischen den Messstellen 4 und 3 durch die Differenz der maximalen bzw. intensiven Fließgeschwindigkeiten zwischen den Messstellen 5 bis 4 und 5 bis 3 gebildet. Im Folgenden

sind nur die Fließgeschwindigkeiten zwischen direkt aufeinanderfolgenden Messstellen angegeben und ausgewertet. Die Auswertung beschränkte sich auf diese Fließgeschwindigkeiten um nicht mehrfach den gleichen Messwert einzubeziehen und dadurch eine Überbewertung desselben zu verursachen.

Tabelle 11: Ermittelte Fließgeschwindigkeiten und longitudinale Dispersivität der Trockenwetter-Messkampagne (n.b. = nicht berechenbar)

Datum	Bach und Messstrecke	Fließstrecke [m]	mittlere Hangneigung [°]	Abfluss [1/s]	longitudinale Dispersivität [m]	maximale Fließgeschwindigkeit [m/s]	intensive Fließgeschwindigkeit [m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
	Bach gegenueber Schule 2 bis 1	782	16,9	12	8,69	0,05	0,04	0,035
	Buselbach 3 bis 2	921	5,6	219	n.b.	0,16	0,15	n.b.
	Buselbach 4 bis 3	1174	7,9	92	2,76	0,13	0,11	0,109
	Buselbach 2 bis 1	902	8,9	0	n.b.	0,16	0,17	n.b.
	Huettenwasenbach 2 bis 1	845	21,1	22	9,93	0,09	0,08	0,069
	Katzensteigbach 3 bis 2	255	13,6	43	0,69	0,12	0,09	0,103
	Katzensteigbach 2 bis 1	807	13,7	26	n.b.	0,15		n.b.
	Krummenbach 3 bis 2	877	10,4	10	3,60	0,19	0,16	0,156
	Krummenbach 2 bis 1	372	12,4	29	0,97	0,06	0,05	0,051
	Schanzbach 2 bis 1	917	11,7	29	1,57	0,20	0,17	0,171
	Schanzbach 3 bis 2	408	16,4	7	4,54	0,12	0,10	0,087
	Schwarzenbach 3 bis 2	319	22,1	5	4,27	0,09	0,07	0,059
	Schwarzenbach 2 bis 1	382	23,2	14	n.b.	0,06	0,05	
	St. Wilhelmer Talbach 3 bis 2	1752	2,6	187	n.b.	0,19	0,19	n.b.
	St. Wilhelmer Talbach 2 bis 1	1610	3,6	224 83	n.b.	0,24	0,21	n.b.
	St. Wilhelmer Talbach 4 bis 3	1561	4,8	35	n.b.	0,15	0,14	n.b.
	St. Wilhelmer Talbach 5 bis 4 Wittenbach 2 bis 1	517 922	6,7	19	2,61	0,15 0,10	0,11 0,08	0,1050
	Wittenbach 3 bis 2	540	11,0 13,5	19	n.b. 3,27	0,10	0,08	n.b. 0,075
	Zipfeldobel 2 bis 1	811		29	1,90	0,10	0,08	0,073
	Zipfeldobel 3 bis 2	451	9,2 14,1	25	1,90	0,13	0,11	0,121
04.09.01	Zipieiuobei 5 bis 2	431	14,1	23	1,14	0,12	0,03	0,076

Tabelle 12 gibt einen Überblick über die Bereiche in denen sich die ermittelten Fließgeschwindigkeiten bewegen. Hier wurde der jeweils größte bzw. kleinste Wert jeder Messstrecke eingetragen.

Tabelle 12: Bereiche der ermittelten Fließgeschwindigkeiten

Bach und Messstrecke	Bereiche der maximalen Fließgeschwindigkeiten [m/s]	Bereiche der intensiven Fließgeschwindigkeiten [m/s]	Bereiche der mittleren Fließgeschwindigkeiten [m/s]
Bach gegenüber Schule 2 bis 1	0,05 - 0,09	0,04 - 0,08	0,035 - 0,070
Bach gegenüber Fischteich 2 bis 1	0,10 - 0,34	0,07 - 0,26	0,062 - 0,249
Brugga 2 bis 1	1,49	0,41	n.b.
Brugga 3 bis 2	0,47	0,42	n.b.
Brugga 4 bis 3	0,60	0,51	n.b.
Brugga 5 bis 4	0,68	0,55	0,539
Buselbach 2 bis 1	0,16 - 0,53	0,17 - 0,43	0,408 - 0,422
Buselbach 3 bis 2	0,16 - 0,47	0,15 - 0,38	0,371
Buselbach 4 bis 3	0,13 - 0,35	0,11 - 0,30	0,109 - 0,297
Buselbach 5 bis 4	0,20 - 0,27	0,18 - 0,23	0,179 - 0,226
Hüttenwasenbach 2 bis 1	0,09 - 0,25	0,08 - 0,19	0,069 - 0,183
Katzensteigbach 2 bis 1	0,15 - 0,72	0,14 - 0,59	0,446 - 0,583
Katzensteigbach 3 bis 2	0,12 - 0,68	0,09 - 0,50	0,103 - 0,464
Krummenbach 2 bis 1	0,06 - 0,17	0,05 - 0,14	0,051 - 0,140
Krummenbach 3 bis 2	0,19 - 0,41	0,16 - 0,33	0,156 - 0,326
Krummenbach 4 bis 3	0,21 - 0,23	0,17 - 0,20	0,167 - 0,191
Krummenbach 5 bis 4	0,15 - 0,17	0,13 - 0,14	0,121 - 0,132
Schanzbach 2 bis 1	0,20 - 0,60	0,17 - 0,52	0,171 - 0,509
Schanzbach 3 bis 2	0,12 - 0,21	0,10 - 0,16	0,087 - 0,158
Schanzbach 4 bis 3	0,14 - 0,27	0,11 - 0,21	0,097 - 0,186
Schanzbach 5 bis 4	0,07	0,04	0,032
Schwarzenbach 2 bis 1	0,06 - 0,17	0,05 - 0,11	0,102 - 0,102
Schwarzenbach 3 bis 2	0,09 - 0,20	0,07 - 0,19	0,059 - 0,188
St. Wilhelmer Talbach 2 bis 1	0,24 - 0,49	0,21 - 0,50	n.b.
St. Wilhelmer Talbach 3 bis 2	0,19 - 0,48	0,19 - 0,47	n.b.
St. Wilhelmer Talbach 4 bis 3	0,15 - 0,40	0,14 - 0,36	n.b.
St. Wilhelmer Talbach 5 bis 4	0,06 - 0,41	0,05 - 0,31	0,080 - 0,300
Wittelsbach 2 bis 1	0,68 - 1,03	0,59 - 0,91	n.b.
Wittelsbach 3 bis 2	0,13 - 0,17	0,11 - 0,14	0,111 - 0,135
Wittelsbach 4 bis 3	0,21	0,19	n.b.
Wittelsbach 5 bis 4	0,22	0,17	0,167
Wittenbach 2 bis 1	0,10 - 0,59	0,08 - 0,50	0,224 - 0,490
Wittenbach 3 bis 2	0,10 - 0,65	0,08 - 0,50	0,075 - 0,501
Zipfeldobel 2 bis 1	0,13 - 0,41	0,11 - 0,36	0,121 - 0,350
Zipfeldobel 3 bis 2	0,12 - 0,32	0,05 - 0,26	0,076 - 0,216

4.1.2 Zusammenhang zwischen Gebietsparametern und Fließgeschwindigkeiten

Ein Ziel der Arbeit ist es auch zu untersuchen, ob es einen Zusammenhang zwischen Gebietseigenschaften und der maximalen, intensiven oder mittleren Fließgeschwindigkeit gibt und ob sich Parameter zur Übertragung auf ungemessene Bäche ableiten lassen.

Es wurden folgende Vergleiche angestellt bzw. Hypothesen geprüft:

- Zusammenhang des Abflusses mit den Fließgeschwindigkeiten
- Zusammenhang der Hangneigung mit den Fließgeschwindigkeiten Bedingen größere Hangneigungen auch größere Fließgeschwindigkeiten?
- Zusammenhang der lokalen Einzugsgebietsgröße mit der Fließgeschwindigkeit
- Zusammenhang der aufgenommenen Morphologie mit der Fließgeschwindigkeit Hier lassen sich keine Zusammenhänge finden, da die Bäche oft gleiche Morphologie-klassen aufweisen und deshalb keine Korrelation möglich ist.
- Multiple lineare Regression des Abflusses und der Hangneigung mit der Fließgeschwindigkeit
- Multiple lineare Regression des Abflusses und der lokalen Einzugsgebietsgröße mit der Fließgeschwindigkeit
- Multiple lineare Regression der lokalen Einzugsgebietsgröße und der Hangneigung mit der Fließgeschwindigkeit. Dieser Zusammenhang war nicht überprüfbar, da die beiden Eingangsvariablen nicht unabhängig voneinander sind.
- Unterschied zwischen erster bzw. zweiter Messkampagne (feuchte Vorbedingungen und der Trockenwetterkampagne d.h. die Variation der Fließgeschwindigkeiten
- Unterschied zwischen Hanggerinne und dem Hauptvorfluter St. Wilhelmer Talbach
- Sind die Versuche unter gleichen bzw. ähnlichen Bedingungen reproduzierbar?

Für den Vergleich zwischen den Gebietsparametern und den Fließgeschwindigkeiten wurden Hangneigungsklassen anhand der Raumgliederung gebildet. Die Raumgliederung beruht auf den folgenden Prozessen. Im betrachteten Fall sind Solifluktionsprozesse in den periglazialen Bereichen während der Kaltzeiten von Relevanz. Im Hangneigungsbereich von 6 bis 12 ° dominierte die geregelte Solifluktion, die zur Bildung von Stein- und Feinerdestreifen führte. Im Hangneigungsbereich > 12 ° dominierte Abspül-Solifluktion, die von starker Oberflächen-Abspülung begleitet war. Aufgrund der Abspülprozesse ist feines Material ausgetragen worden (WEISE 1983). Dies sollte in den zu dieser Hangneigungsklasse gehörenden Gerinnen zu einer Dominanz von grobem Material führen.

Die Einteilung erfolgte dementsprechend in die Klassen 0 bis 6°, 6 bis 12° und 12 bis 62°. Die Klasse 0 bis 6° enthält hier die Hauptvorfluter St. Wilhelmer Talbach und Brugga sowie den obersten Teil des Buselbachs. Abbildung 22 zeigt die Anzahl der Messabschnitte pro Hangneigungsklasse.

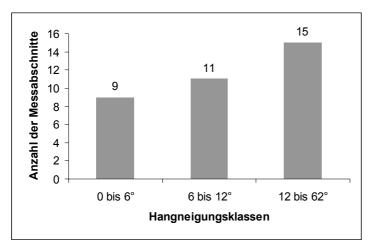


Abbildung 22: Anzahl der Messabschnitte pro Hangneigungsklasse

Für den Vergleich der Stärke des Zusammenhangs der Gebietsparameter mit den maximalen, intensiven und mittleren Fließgeschwindigkeiten werden die Angaben in Tabelle 13 hinzugezogen.

Tabelle 13: Zur Interpretation des Bestimmtheitsmaßes und des Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson (SCHLITTGEN 1993:179)

Bestimmtheitsmaß R ²	Korrelationskoeffizient	Interpretation
	nach Bravais-Pearson	
0,00	0,0	kein Zusammenhang
0,01 – 0,25	0.0 - 0.5	schwacher Zusammenhang
0,25 - 0,64	0,5-0,8	mittlerer Zusammenhang
0,64 – 0,99	0.8 - 1.0	starker Zusammenhang
1,00	1,0	perfekter Zusammenhang

In den folgenden Tabellen ist jeweils die Anzahl n der Messwerte und das Bestimmtheitsmaß R² angegeben.

4.1.2.1 Zusammenhang zwischen Abfluss und Fließgeschwindigkeit

Zunächst wurde die Beziehung zwischen Abfluss und Fließgeschwindigkeit mittels linearer Regression geprüft. Hierbei wurde jede Messkampagne getrennt betrachtet. Es lässt sich folgendes erkennen.

Erste Kampagne

Tabelle 14: Zusammenhang zwischen Abfluss und maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Erste Kampagne)

Hangneigung	maximale Fließgeschwindigkeit	intensive Fließgeschwindigkeit	mittlere Fließgeschwindigkeit
0.1.1.60	7		
0 bis 6°	mittlerer Zusammen-	starker Zusammenhang,	starker Zusammenhang,
	hang, $n = 6$, $R^2 = 0.51$	$n = 6, R^2 = 0.64$	$n = 3, R^2 = 0.97$
6 bis 12°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	mittlerer Zusammen-
	hang, $n = 11$, $R^2 = 0.07$	hang, $n = 11$, $R^2 = 0.06$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.32$
12 bis 62°	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-
	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.29$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.28$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.30$

Zweite Kampagne

Tabelle 15: Zusammenhang zwischen Abfluss und maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Zweite Kampagne)

Hangneigung	maximale	intensive	mittlere
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit
0 bis 6°	starker Zusammenhang,	starker Zusammenhang,	-
	$n = 4, R^2 = 0.74$	$n = 4, R^2 = 0.85$	n = 1
6 bis 12°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	mittlerer Zusammen-
	hang, $n = 9$, $R^2 = 0.18$	hang, $n = 9$, $R^2 = 0.13$	hang, $n = 8$, $R^2 = 0.52$
12 bis 62°	mittlerer Zusammen-	starker Zusammenhang,	starker Zusammenhang,
	hang, $n = 12$, $R^2 = 0.59$	$n = 12, R^2 = 0.68$	$n = 11, R^2 = 0.70$

Trockenwetter-Kampagne

Tabelle 16: Zusammenhang zwischen Abfluss und maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Trockenwetter-Kampagne)

Hangneigung	maximale	intensive	mittlere
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit
0 bis 6°	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	-
	hang, $n = 4$, $R^2 = 0.30$	hang, $n = 4$, $R^2 = 0.35$	n = 0
6 bis 12°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	mittlerer Zusammen-
	hang, $n = 7$, $R^2 = 0.07$	hang, $n = 7$, $R^2 = 0.17$	hang, $n = 5$, $R^2 = 0.32$
12 bis 62°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-
	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.10$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.06$	hang, $n = 8$, $R^2 = 0.21$

4.1.2.2 Zusammenhang zwischen mittlerer Hangneigung und Fließgeschwindigkeit

Mittels linearer Regression wurde hier der Zusammenhang zwischen mittlerer Hangneigung und den Fließgeschwindigkeiten geprüft. Hierbei wurde jede Messkampagne getrennt betrachtet. Es ist folgendes erkennbar.

Erste Kampagne

Tabelle 17: Zusammenhang zwischen mittlerer Hangneigung und maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Erste Kampagne)

Hangneigung	maximale	intensive	mittlere
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit
0 bis 6°	schwacher Zusammen-	mittlerer Zusammenhang,	starker Zusammen-
	hang, $n = 6$, $R^2 = 0.14$	$n = 6, R^2 = 0.31$	hang, $n = 3$, $R^2 = 0.69$
6 bis 12°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	mittlerer Zusammen-
	hang, $n = 11$, $R^2 =$	hang, $n = 11$, $R^2 = 1*10^{-5}$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.31$
	0,0004		
12 bis 62°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-
	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.09$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.11$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.11$

Zweite Kampagne

Tabelle 18: Zusammenhang zwischen mittlerer Hangneigung und maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Zweite Kampagne)

Hangneigung	maximale	intensive	mittlere
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit
0 bis 6°	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	-
	hang, $n = 4$, $R^2 = 0.72$	hang, $n = 4$, $R^2 = 0.76$	n = 1
6 bis 12°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-
	hang, $n = 9$, $R^2 = 0.23$	hang, $n = 9$, $R^2 = 0.20$	hang, $n = 8$, $R^2 = 0.02$
12 bis 62°	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-
	hang, $n = 12$, $R^2 = 0.25$	hang, $n = 12$, $R^2 = 0.26$	hang, $n = 11$, $R^2 = 0.29$

Trockenwetter-Kampagne

Tabelle 19: Zusammenhang zwischen mittlerer Hangneigung und maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Trockenwetter-Kampagne)

Hangneigung	maximale	intensive	mittlere
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit
0 bis 6°	starker Zusammenhang,	starker Zusammenhang,	-
	$n = 4, R^2 = 0.46$	$n = 4, R^2 = 0.60$	n = 0
6 bis 12°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	starker Zusammenhang,
	hang, $n = 7$, $R^2 = 0.09$	hang, $n = 7$, $R^2 = 0.14$	$n = 5, R^2 = 0.92$
12 bis 62°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-
	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.14$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.09$	hang, $n = 8$, $R^2 = 0.06$

Eine zusätzliche Fragestellung war hier, ob Bäche mit größerer Hangneigung größere Fließgeschwindigkeiten aufweisen. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 20 aufgeführt.

Messkampagne	maximale	intensive	mittlere
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit
1	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-
	hang, $n = 27$, $R^2 = 0.18$	hang, $n = 27$, $R^2 = 0.15$	hang, $n = 23$, $R^2 = 0.11$
2	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	schwacher Zusammen-
	hang, $n = 25$, $R^2 = 0.27$	hang, $n = 25$, $R^2 = 0.33$	hang, $n = 20$, $R^2 = 0.17$
Trockenwetter	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-
	hang, $n = 21$, $R^2 = 0.51$	hang, $n = 21$, $R^2 = 0.54$	hang, $n = 13$, $R^2 = 0.34$

Tabelle 20: Zusammenhang zwischen mittlerer Hangneigung und Fließgeschwindigkeit

Aufgrund der Ergebnisse ist erkennbar, dass bei der ersten Kampagne nur ein schwacher Zusammenhang vorliegt. Bei der zweiten und bei der Trockenwetter-Kampagne lässt sich bei den maximalen und intensiven Fließgeschwindigkeiten ein mittlerer Zusammenhang erkennen, was als Tendenz zu geringeren maximalen und intensiven Fließgeschwindigkeiten bei größerer Hangneigung zu werten ist (Abbildung 23, 24, 25 und 26). Die mittlere Fließgeschwindigkeit ergibt nur bei Trockenwetterabfluss einen mittleren Zusammenhang und lässt sich daher nicht interpretieren.

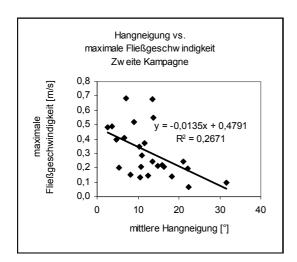


Abbildung 23: Hangneigung vs. maximale Fließgeschwindigkeit Zweite Kampagne

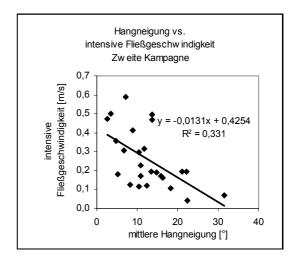


Abbildung 24: Hangneigung vs. intensive Fließgeschwindigkeit Zweite Kampagne

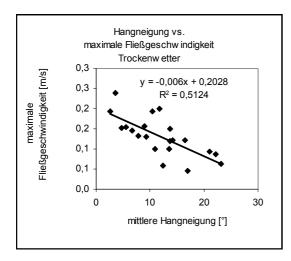


Abbildung 25: Hangneigung vs. maximale Fließgeschwindigkeit Trockenwetter

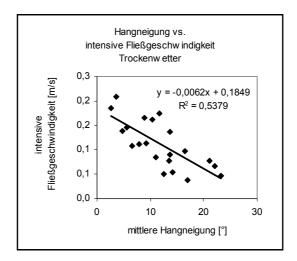


Abbildung 26: Hangneigung vs. intensive Fließgeschwindigkeit Trockenwetter

4.1.2.3 Zusammenhang zwischen Fläche des lokalen Einzugsgebietes und Fließgeschwindigkeit

Für jeden Messabschnitt wurde im GIS das lokale Einzugsgebiet bestimmt, die zugehörige Fläche bestimmt und die oben bereits erwähnte Klassifizierung nach Hangneigungsklassen der Raumgliederung erstellt.

Mit Hilfe der linearen Regression wurde der Zusammenhang zwischen lokalem Einzugsgebiet und Fließgeschwindigkeit ermittelt. Hierbei wurde jede Messkampagne getrennt betrachtet. Es lässt sich folgendes erkennen.

Erste Kampagne

Tabelle 21: Zusammenhang zwischen lokaler Einzugsgebietsgröße und maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Erste Kampagne)

Hangneigung	maximale	intensive	mittlere
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit
Alle	mittlerer Zusammen-	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-
Messungen	hang, $n = 27$, $R^2 = 0.35$	hang, $n = 27$, $R^2 = 0.12$	hang, $n = 23$, $R^2 = 0.21$
0 bis 6°	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	starker Zusammenhang,
	hang, $n = 6$, $R^2 = 0.47$	hang, $n = 6$, $R^2 = 0.50$	$n = 3, R^2 = 0.94$
6 bis 12°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-
	hang, $n = 11$, $R^2 = 0.03$	hang, $n = 11$, $R^2 = 0.02$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.11$
12 bis 62°	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-
	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.46$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.48$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.50$

Zweite Kampagne

Tabelle 22: Zusammenhang zwischen lokaler Einzugsgebietsgröße und maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Zweite Kampagne)

Hangneigung	maximale	intensive	mittlere	
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	
Alle	schwacher Zusammen-	mittlerer Zusammen-	schwacher Zusammen-	
Messungen	hang, $n = 25$, $R^2 = 0.23$	hang, $n = 25$, $R^2 = 0.34$	hang, $n = 20$, $R^2 = 0.22$	
0 bis 6°	starker Zusammenhang,	starker Zusammenhang,	-	
	$n = 4, R^2 = 0.9$	$n = 4, R^2 = 0.96$	n = 1	
6 bis 12°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	mittlerer Zusammen-	
	hang, $n = 9$, $R^2 = 0.22$	hang, $n = 9$, $R^2 = 0.17$	hang, $n = 8$, $R^2 = 0.53$	
12 bis 62°	schwacher Zusammen-		schwacher Zusammen-	
	hang, $n = 12$, $R^2 = 0.18$	schwacher Zusammen-	hang, $n = 11$, $R^2 = 0.21$	
		hang, $n = 12$, $R^2 = 0.19$		

Trockenwetter-Kampagne

Tabelle 23: Zusammenhang zwischen lokaler Einzugsgebietsgröße und maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Trockenwetter-Kampagne)

Hangneigung	maximale	intensive	mittlere
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit
Alle	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	schwacher Zusammen-
Messungen	hang, $n = 21$, $R^2 = 0.43$	hang, $n = 21$, $R^2 = 0.56$	hang, $n = 13$, $R^2 = 0.12$
0 bis 6°	starker Zusammenhang,	starker Zusammenhang,	-
	$n = 4, R^2 = 0.99$	$n = 4, R^2 = 0.99$	n = 0
6 bis 12°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	mittlerer Zusammen-
	hang, $n = 7$, $R^2 = 0.0016$	hang, $n = 7$, $R^2 = 0.10$	hang, $n = 5$, $R^2 = 0.33$
12 bis 62°	schwacher Zusammen-	mittlerer Zusammen-	schwacher Zusammen-
	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.23$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.31$	hang, $n = 8$, $R^2 = 0.15$

4.1.2.4 Multiple lineare Regression zur Überprüfung des Zusammenhangs von Abfluss und Hangneigung mit den Fließgeschwindigkeiten

Im folgenden sind die Ergebnisse der Beziehung zwischen Abfluss und Hangneigung mit den Fließgeschwindigkeiten dargestellt (Tabelle 24, 25 und 26).

Erste Kampagne

Tabelle 24: Zusammenhang zwischen Abfluss und Hangneigung mit maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Erste Kampagne)

Hangneigung	maximale	intensive	mittlere	
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	
0 bis 6°	mittlerer Zusammen-	starker Zusammenhang,	perfekter Zusammen-	
	hang, $n = 6$, $R^2 = 0.622$	$n = 6, R^2 = 0.657$	hang, $n = 3$, $R^2 = 1.0$	
6 bis 12°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	mittlerer Zusammen-	
	hang, $n = 11$, $R^2 = 0.094$	hang, $n = 11$, $R^2 = 0.080$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.452$	
12 bis 62°	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	
	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.293$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.284$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.301$	

Zweite Kampagne

Tabelle 25: Zusammenhang zwischen Abfluss und Hangneigung mit maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Zweite Kampagne)

Hangneigung	maximale	intensive	mittlere	
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	
0 bis 6°	starker Zusammenhang,	starker Zusammenhang,	-	
	$n = 4, R^2 = 0.812$	$n = 4, R^2 = 0.9$	n = 1	
6 bis 12°	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	
	hang, $n = 9$, $R^2 = 0.344$	hang, $n = 9$, $R^2 = 0.277$	hang, $n = 8$, $R^2 = 0.537$	
12 bis 62°	mittlerer Zusammen-	starker Zusammenhang,	starker Zusammenhang,	
	hang, $n = 12$, $R^2 = 0.607$	$n = 12, R^2 = 0,689$	$n = 11, R^2 = 0.710$	

Trockenwetter-Kampagne

Tabelle 26: Zusammenhang zwischen Abfluss und Hangneigung mit maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Trockenwetter-Kampagne)

Hangneigung	maximale	intensive	mittlere	
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	
0 bis 6°	starker Zusammenhang,	starker Zusammenhang,	-	
	$n = 4, R^2 = 0.661$	$n = 4, R^2 = 0.834$	n = 0	
6 bis 12°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	starker Zusammenhang,	
	hang, $n = 7$, $R^2 0.116 =$	hang, $n = 7$, $R^2 = 0.214$	$n = 5, R^2 = 0.933$	
12 bis 62°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	
	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.155$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.094$	hang, $n = 8$, $R^2 = 0.206$	

4.1.2.5 Multiple lineare Regression zur Überprüfung des Zusammenhangs von Abfluss und lokaler Einzugsgebietsgröße mit den Fließgeschwindigkeiten

Im folgenden sind die Ergebnisse der Beziehung zwischen Abfluss und lokaler Einzugsgebietsgröße mit den Fließgeschwindigkeiten dargestellt (Tabelle 27, 28 und 29).

Erste Kampagne

Tabelle 27: Zusammenhang zwischen Abfluss und lokaler Einzugsgebietsgröße mit maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Erste Kampagne)

Hangneigung	maximale	intensive	mittlere	
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	
0 bis 6°	mittlerer Zusammen-	starker Zusammenhang,	perfekter Zusammen-	
	hang, $n = 6$, $R^2 = 0.509$	$n = 6, R^2 = 0.686$	hang, $n = 3$, $R^2 = 1,00$	
6 bis 12°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	mittlerer Zusammen-	
	hang, $n = 11$, $R^2 = 0.099$	hang, $n = 11$, $R^2 = 0.081$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.471$	
12 bis 62°	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	
	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.464$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.493$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.513$	

Zweite Kampagne

Tabelle 28: Zusammenhang zwischen Abfluss und lokaler Einzugsgebietsgröße mit maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Zweite Kampagne)

Hangneigung	maximale	intensive	mittlere	
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	
0 bis 6°	starker Zusammenhang,	starker Zusammenhang,	-	
	$n = 4, R^2 = 0.991$	$n = 4, R^2 = 0.990$	n = 1	
6 bis 12°	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	
	hang, $n = 9$, $R^2 = 0.301$	hang, $n = 9$, $R^2 = 0.299$	hang, $n = 8$, $R^2 = 0.527$	
12 bis 62°	mittlerer Zusammen-	starker Zusammenhang,	starker Zusammenhang,	
	hang, $n = 12$, $R^2 = 0.604$	$n = 12, R^2 = 0.697$	$n = 11, R^2 = 0.715$	

Trockenwetter-Kampagne

Tabelle 29: Zusammenhang zwischen Abfluss und lokaler Einzugsgebietsgröße mit maximaler, intensiver sowie mittlerer Fließgeschwindigkeit (Trockenwetter-Kampagne)

Hangneigung	maximale	intensive	mittlere	
	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit	
0 bis 6°	starker Zusammenhang,	starker Zusammenhang,	-	
	$n = 4, R^2 = 0.994$	$n = 4, R^2 = 0.986$	n = 0	
6 bis 12°	schwacher Zusammen-	schwacher Zusammen-	mittlerer Zusammen-	
	hang, $n = 7$, $R^2 = 0.080$	hang, $n = 7$, $R^2 = 0.228$	hang, $n = 5$, $R^2 = 0.331$	
12 bis 62°	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	mittlerer Zusammen-	
	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.249$	hang, $n = 10$, $R^2 = 0.310$	hang, $n = 8$, $R^2 = 0.27$	

4.1.2.6 Räumlicher Vergleich der Kampagnen mit hoher Vorfeuchte mit der Trockenwetterkampagne

In den Abbildungen 27, 28 und 29 sind die ermittelten intensiven Fließgeschwindigkeiten im räumlichen Überblick dargestellt. Es lässt sich während den Kampagnen mit hoher Vorfeuchte eine größere Variation der maximalen Fließgeschwindigkeit erkennen als während der Trockenwetter-Messkampagne. Im Allgemeinen sind die Fließgeschwindigkeiten während der Trockenwetter-Messkampagne geringer. Es zeigt sich, dass die Hanggerinne geringere Fließgeschwindigkeiten aufweisen als der St. Wilhelmer Talbach.

Bei der Betrachtung der Bäche im Vergleich mit der Raumgliederung zeigt sich folgendes:

- Wittenbach und Katzensteigbach, die über Moränenmaterial fließen, haben im Vergleich zu Schwarzenbach und Hüttenwasenbach bei hoher Gebietsvorfeuchte größere Fließgeschwindigkeiten. Hüttenwasenbach und Katzensteigbach weisen in etwa die gleiche Fließstrecke auf. Während der ersten Messkampagnen hatten sie gleiche Abflüsse. In folgenden Untersuchungen sollte deshalb geklärt werden, ob die Geschwindigkeiten der "Moränenbäche" immer größer sind im Vergleich zu den Bächen auf Hangschutt ohne Decklage. Im Niedrigwasserbereich nähern sich die Fließgeschwindigkeiten, trotz unterschiedlicher Abflüsse, an.
- Hüttenwasenbach und Schwarzenbach zeigen bei ähnlichen Abflüssen ähnliche Fließgeschwindigkeiten, das kann ein Hinweis auf die Übertragbarkeit sein. Dies muss in weiteren vergleichenden Untersuchungen noch geklärt werden. Die vorhandenen Daten reichen hier zu weiteren Aussagen nicht aus.
- Bach gegenüber Fischteich hier zeigt sich, wie bei anderen Bächen die Wiederholbarkeit des Versuchs in Kampagne 1 und 2. Interessant ist, dass eine Trockenwettermessung nicht möglich war, da der Bach in diesem Messzeitraum trocken gefallen war.
- Schanzbach und Zipfeldobel, die Bäche der beiden gegenüberliegenden Dobeltäler lassen aufgrund der Datenlage keinen Vergleich zu. Hier sind ebenfalls noch weitere Messreihen notwendig.
- Gut erkennbar sind in den Abbildungen 27, 28 und 29 die Erhöhungen der Fließgeschwindigkeiten beim Erreichen des St. Wilhelmer Tals bzw. des Bruggatals.

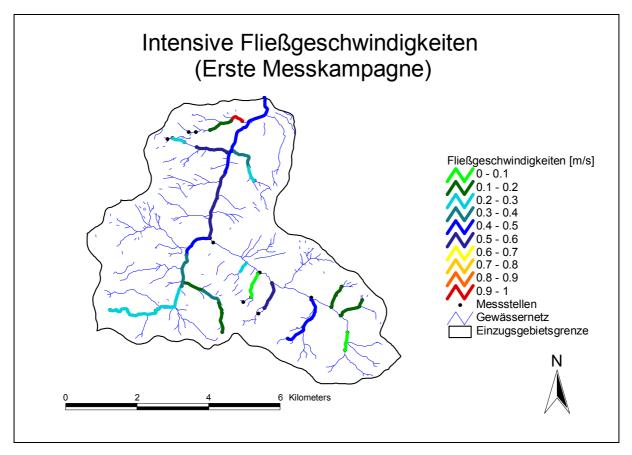


Abbildung 27: Übersicht der ermittelten intensiven Fließgeschwindigkeiten (Erste Messkampagne)

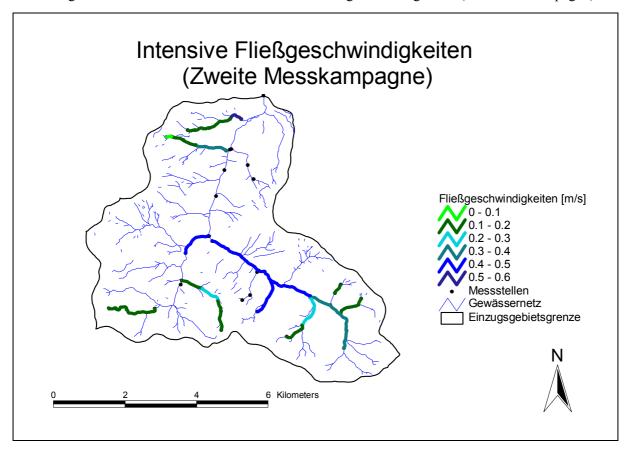


Abbildung 28: Übersicht der ermittelten intensiven Fließgeschwindigkeiten (Zweite Messkampagne)

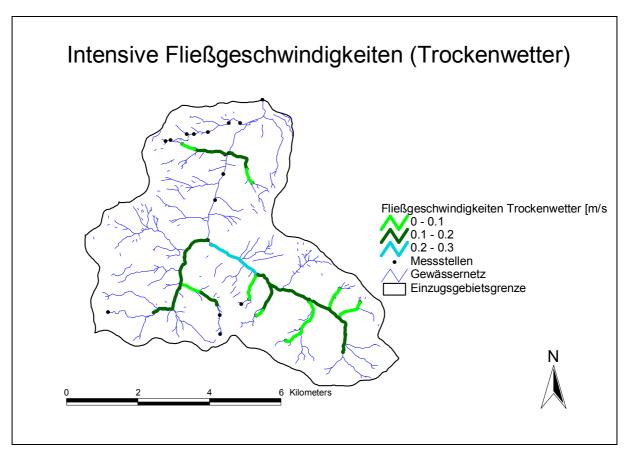


Abbildung 29: Übersicht der ermittelten intensiven Fließgeschwindigkeiten (Trockenwetter-Messkampagne)

4.1.3 Wiederholbarkeit der Versuche

Die Vorfeuchte des Gebietes war während der ersten und zweiten Kampagnen sehr ähnlich. Dadurch konnte der Nachweis geführt werden, dass die Versuche unter ähnlichen Bedingungen ähnliche Ergebnisse produzieren (Tabelle 30). Das heißt, die Versuche sind reproduzierbar.

Tabelle 30: Wiederholbarkeit der Versuche unter ähnlichen Bedingungen

Datum	Bach	Fließstrecke von Messstelle x bis Messstel-	Fließweglänge	mittlere Hang- neigung [°]	Abfluss [l/s]	Maximale Fließgeschwin- digkeit [m/s]	Intensive Fließgeschwin- digkeit [m/s]	mittlere Fließ- geschwindig- keit [m/s]
11.06.01	Buselbach	4 bis 1	2997	7,5	734	0,387	0,347	0,346
03.05.01	Buselbach	4 bis 1	2997	7,5	777	0,393	0,350	0,349
11.06.01	Buselbach	2 bis1	902	8,9	734	0,520	0,414	0,408
03.05.01	Buselbach	2 bis1	902	8,9	777	0,525	0,429	0,422
31.05.01	Hüttenwasenbach	2 bis 1	845	21,1	43	0,245	0,193	0,183
10.05.01	Hüttenwasenbach	2 bis 1	845	21,1	57	0,221	0,176	0,167
15.06.01	Krummenbach	5 bis 4	384	8,2	14	0,153	0,126	0,121
23.05.01	Krummenbach	5 bis 4	384	8,2	19	0,166	0,138	0,132
15.06.01	Krummenbach	5 bis 3	840	9,6	27	0,165	0,144	0,136
23.05.01	Krummenbach	5 bis 3	840	9,6	33	0,185	_	_
15.06.01	Krummenbach	3 bis 2	877	10,4	39	0,346	0,295	0,290
23.05.01	Krummenbach	3 bis 2	877	10,4	45	0,406	0,332	0,326
15.06.01	Krummenbach	4 bis 2	1333	10,5	39	0,264	0,233	_
23.05.01	Krummenbach	4 bis 2	1333	10,5	45	0,302	_	_
15.06.01	Krummenbach	4 bis 3	456	10,8	27	0,207	0,172	0,167
23.05.01	Krummenbach	4 bis 3	456	10,8	33	0,233	0,195	0,191
24.04.01	Wittelsbach	5 bis 3	597	15,1	23	0,274	0,235	0,095
18.06.01	Wittelsbach	5 bis 3	597	15,1	25	0,217	0,185	0,181

4.1.4 Exemplarischer Vergleich der Ergebnisse des Dispersionsmodells FIELD mit den Ergebnissen der C_{max} / 0,5 C_{max} -Methode

Für den Versuch am Krummenbach wurde das Dispersionsmodell nach MALOSZEWSKI & ZUBER (1982) exemplarisch mit der $C_{max}/0.5C_{max}$ -Methode verglichen (Tabelle 31). Die Ergebnisse zeigen sehr gute Übereinstimmungen. Für die weiteren Auswertungen wurde der besseren Handhabbarkeit wegen (s. Kapitel 3.1.1), die $C_{max}/0.5C_{max}$ -Methode verwendet.

Tabelle 31: Exemplarischer Vergleich zwischen DM und C_{max} / 0,5C_{max}-Methode

Bach und Mess-	mittlere Fließge-	mittlere Fließge-	longitudinale	longitudinale
strecke	schwindigkeit	schwindigkeit	Dispersivität	Dispersivität
	FIELD	$C_{max}/0.5C_{max}$	FIELD	C_{max} / 0,5 C_{max} -
	[m/s]	Methode		Methode
		[m/s]		
Krummenbach	0,12	0,12	1,959	1,638
5 bis 4				
(15.06.01)				
Krummenbach	0,17	0,17	1,431	1,266
4 bis 3				
(15.06.01)				
Krummenbach	0,29	0,29	2,160	2,017
3 bis 2				
(15.06.01)				
Krummenbach	0,12	0,12	0,9141	0,838
2 bis 1				
(15.06.01)				

4.1.5 Diskussion

Die während der drei Messkampagnen durchgeführten Markierversuche ermöglichen einen Überblick über die Fließgeschwindigkeitsverteilung im Einzugsgebiet der Brugga. Durch die Messungen während des sehr feuchten Frühjahrs und während der sommerlichen Trockenwetterperiode konnte eine Übersicht über den Variationsbereich der Fließgeschwindigkeiten in den einzelnen Gerinnen geschaffen werden. Die Bandbreite der möglichen Fließgeschwindigkeiten ist sicherlich größer, kann jedoch durch maximal drei Messungen pro Gerinneabschnitt nicht ermittelt werden.

Die Überprüfung auf den Zusammenhang zwischen allen Hangneigungen und Fließgeschwindigkeit ergab eine Tendenz zu geringeren Fließgeschwindigkeiten bei größeren Hangneigungen. Das ist zunächst überraschend, da man bei größerem Gefälle größere Fließgeschwindigkeiten erwarten würde. Hier kommt der Einfluss der Sohlstruktur der Hanggerinne stärker zum Tragen als in den Hauptvorflutern. Durch die geringeren Abflüsse und Wasserstände ragen die Steine und Blöcke durch die Wasseroberfläche und verursachen einen größeren Energieverlust als dies überströmte Steine und Blöcke der gleichen Größe in den Hauptvorflutern tun. Die Variation dieses Einflusses ist bei geringen Wasserständen sehr groß und wird mit steigendem Wasserstand geringer (DITTRICH 1998: 46ff., ABERLE 2000: 20f.).

Bei der Prüfung des *Zusammenhangs zwischen Abfluss und Fließgeschwindigkeit* ergab sich bei den Hangneigungen von 0 bis 6° eine mittlere bis starke Korrelation. Bäche dieser Hangneigung sind der St. Wilhelmer Talbach und die Brugga, aber auch der obere Teil des Buselbachs. Dieser Zusammenhang ist zufriedenstellend. In diesem Hangneigungsbereich sind die mittleren Fließgeschwindigkeiten nicht aussagekräftig, da sie aufgrund unzureichender Tracerdurchgangskurven nicht berechnet werden konnten oder wie im Fall der ersten Messkampagne nur drei Werte vorliegen.

Die Hangneigungen von 6 bis 12° zeigen bei der maximalen und intensiven Fließgeschwindigkeit nur einen schwachen Zusammenhang. Die mittleren Fließgeschwindigkeiten zeigen jedoch einen mittleren Zusammenhang.

Die Hangneigungsklasse 12 bis 62° zeigt bei hohen Vorfeuchten und demnach höheren Abflüssen mittlere bis starke Zusammenhänge. Anders verhält es sich jedoch bei den Trockenwetterabflüssen, die eine schwache Beziehung zeigen.

Die Prüfung des Zusammenhangs zwischen Fließgeschwindigkeit und mittlerer Hangneigung zeigt bei 0 bis 6° kein einheitliches Bild in der Stärke des Zusammenhangs. Bei der maximalen Fließgeschwindigkeit ist von einer schwachen Korrelation auszugehen, da bei der zweiten und der Trockenwetter-Kampagne nur vier Messwerte vorhanden sind und dadurch die mittleren bis starken Korrelationen verursacht. Dies gilt auch für die intensiven Fließgeschwindigkeiten. Die mittlere Fließgeschwindigkeit kann hier aufgrund der fehlenden Werte nicht zu Aussagen benutzt werden.

Die Hangneigungsklasse 6 bis 12° liefert für die maximale und intensive Fließgeschwindigkeit schwache Beziehungen. Die mittlere Fließgeschwindigkeit zeigt nur während der zweiten Messkampagne keinen Zusammenhang, ansonsten einen mittleren bis starken Zusammenhang.

Die Hangneigungen von 12 bis 62° zeigen nur in der zweiten Messkampagne einen mittleren Zusammenhang. Die beiden anderen Kampagnen wiesen eine schwache Korrelation auf.

Die Prüfung des Zusammenhangs zwischen Fließgeschwindigkeit und lokaler Einzugsgebietsfläche ergab insgesamt schwache Korrelationen mit einzelnen Ausreißern. Bei der Hangneigungsklasse 12 bis 62° scheint eine Tendenz zum mittleren Zusammenhang vorzuliegen.

Die Untersuchung auf die *Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeiten von Abfluss und Hangneigung* wird bei der Hangneigungsklasse 0 bis 6° durch die geringe Anzahl der Messwerte überschätzt. Die Hangneigungsklasse 6 bis 12° zeigt nur bei der zweiten Messkampagne mittlere Zusammenhänge. Die Klasse 12 bis 62° zeigt bei hoher Gebietsvorfeuchte mittlere Zusammenhänge und bei Trockenwetter einen schwachen Zusammenhang.

Wie bei der obigen linearen Regression werden die Werte für 0 bis 6° bei der *linearen Regression von Abfluss und Fläche des lokalen Einzugsgebietes mit den Fließgeschwindigkeiten* durch die geringe Anzahl der Messungen überschätzt. Wie oben zeigt auch hier die Hangneigungsklasse 6 bis 12° nur während der zweiten Messkampagne mittlere Zusammenhänge. Die Klasse 12 bis 62° zeigt hingegen bei allen Messkampagnen mittlere Zusammenhänge.

Interessant sind auch die Vergleiche zwischen Bächen gleicher Fließlänge und unterschiedlichen Ausgangssubstraten bedingt durch die Quartärgeologie. Beispiele hierfür sind der Hüttenwasenbach und der Katzensteigbach mit den jeweiligen Messabschnitten 2 bis 1. Andererseits sind auch die Vergleiche bei gleicher Quartärgeologie interessant. Hierzu sind allerdings noch weitere Messungen notwendig. Bei beiden Vergleichen könnten Übertragungsfunktionen erarbeitet werden, die es ermöglichen würden durch Messung eines Gerinnes, die Bedingungen in ähnlichen aber ungemessenen Gerinnen zu bestimmen.

4.1.6 Fazit

Die Analyse auf Zusammenhang zwischen Gebietseigenschaften und Fließgeschwindigkeiten zeigt mitunter gute Korrelationen. Dennoch muss man sich den Grenzen dieser Aussagen bewusst sein. Aufgrund der Anzahl der durchgeführten Messungen lassen sich keine aussagekräftigen Statistiken erstellen. Die Ergebnisse der Regressionsanalysen sind heterogen.

Als weitere Schritte kann nun folgendes angegangen werden. Wie bisher durchgeführt eine Vergrößerung der Datengrundlage und weitere Regressionsanalysen zur Überprüfung der Korrelation von Gebietseigenschaften mit den Fließgeschwindigkeiten. Als Alternative oder zusätzlich zu diesen Untersuchungen kann eine Auswertung mittels der in (Kapitel 3.1.6) eingeführten Fließgeschwindigkeitsformeln erfolgen. Hierzu bedarf, es wie schon erwähnt, zusätzliche Parametererhebungen im Gelände. Auf jeden Fall ist das Gefälle bzw. die mittlere

Hangneigung der Gerinnestrecke zu bestimmen. Hier kann an exemplarischen Bachabschnitten untersucht werden ob es möglich ist, die im Gelände vermessenen Hangneigungen durch die in dieser Arbeit aus der DGK bzw. TK25 / TK50 bestimmten mittleren Hangneigungen zu ersetzen. Hierdurch würde das Vermessungs-Problem der unzugänglichen Gerinnestrecken gelöst. Für die Anwendung der Gleichung 3.11 (S.28) nach HODEL (1993) muss zusätzlich die Bezugswassermenge ermittelt werden. Dies kann nur durch eine längere Messreihe ermittelt werden bzw. durch Abflussmessungen bei Hochwasserabflüssen, die laut Definition (Kapitel 3.1.6) dem gerinnebildenden Abfluss sehr nahe kommen.

Für Gleichung 3.14 (S.29) nach RICKENMANN (1996) muss die Korngrößenverteilung bestimmt werden. Dies ist nur durch Feldaufnahmen möglich, die, wenn sie einen repräsentativen Anteil der Bäche im Einzugsgebiet erfassen wollen, sehr umfangreich werden.

Insgesamt gesehen bedarf es für Fließgeschwindigkeitsberechnungen in Abhängigkeit vom Abfluss weiterer Feldarbeiten.

Durch diese weiteren Feldarbeiten können auch Unterschiede im Ausgangssubstrat der Bachsohlen, verursacht durch unterschiedliche Quartärgeologie, und deren Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit herausgearbeitet werden.

Die durch diese Arbeit ermittelten Fließgeschwindigkeiten können in vielerlei Hinsicht angewendet werden. Einerseits zur Überprüfung von Ergebnissen der Abflusskonzentrationsroutine des erweiterten TAC-Modells (ROSER 2001), als Datensatz für bestehende Stofftransport-Module oder andererseits als Grundlage für den in Kapitel 1 erwähnten Versuch zur Untersuchung des Grundwasserzustroms in den St. Wilhelmer Talbach. Insgesamt gesehen sind die Fließgeschwindigkeiten viel geringer als dies zu Beginn der Arbeit angenommen wurde. Auch bei höheren Abflüssen erreichten die intensiven Fließgeschwindigkeiten höchstens 0,5 m/s. Bei den Trockenwetter-Messungen waren die Fließgeschwindigkeiten insgesamt homogener mit intensiven Fließgeschwindigkeiten von höchstens 0,21 m/s.

Ein interessanter Nebenaspekt soll auch nicht unerwähnt bleiben. Die bestimmten minimalen Fließzeiten lassen eine Abschätzung über die Ausbreitung von Schadstoffwolken infolge von Unfällen zu. Besonders gefährdet scheint hier die stark befahrene L 126 von Oberried in Richtung Notschrei zu sein, die abschnittsweise nur im Abstand von 1 bis 2 m entlang des Buselbachs verläuft. Entsprechendes Interesse an diesen Daten wurde schon zu Anfang der Arbeit vom Forstreviersleiter Schmelzplatz geäußert.

4.2 Schwallwellenversuch am Zastlerbach

4.2.1 Ergebnisse

4.2.1.1 Tracerdurchgangs- und Wasserstandskurven

Wie in Kapitel 3.2 bereits erwähnt konnten die in situ Messwerte Leitfähigkeit, Uraninfluoreszenz des VARIOSENS, sowie der Wasserstand direkt ausgewertet werden. Die Fluoreszenztracer-Proben mussten hingegen im Labor analysiert werden. In den Abbildungen 30, 31, 32 und 33 sind die auf den jeweiligen Konzentrations-Maximum normierten Tracerkonzentrationen, sowie die Veränderung des Wasserstands in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Deutlich sind die Wasserstandsänderungen aufgrund des zweimaligen Wellenablaufs in zu erkennen.

Zu beachten ist, dass an Messstelle 2 während des Versuchs ein Defekt des Leitfähigkeits-Messgerätes aufgetreten ist, sodass keine elektrische Leitfähigkeit aufgezeichnet wurde.

Das Varisosens konnte aufgrund des hohen Schwebstoffgehalts des Wassers keine verwertbaren Werte der Uraninfluoreszenz liefern (Abbildung 31). Die Variosensdaten finden aus diesem Grund auch keine weitere Verwendung.

Nach jedem Wellendurchlauf ist ein Rückgang des Wasserstandes unter den Ausgangswert zu beobachten. Dies wird durch das Schließen des Wehrs nach dem Entleeren des Beckens verursacht und dauert an bis das Becken wieder aufgefüllt ist und überläuft. Man könnte sagen der "Bach läuft leer".

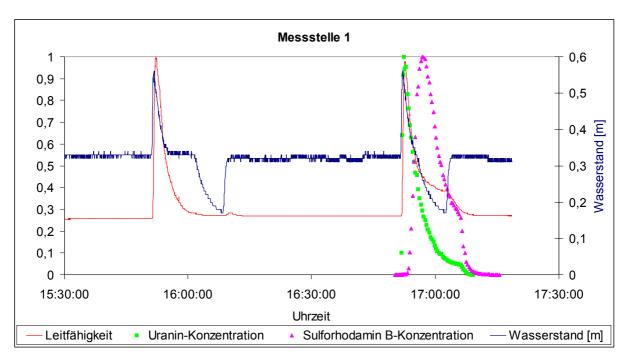


Abbildung 30: Auf das Konzentrations-Maximum normierte Tracerdurchgangskurven und Änderung des Wasserstands an Messstelle 1

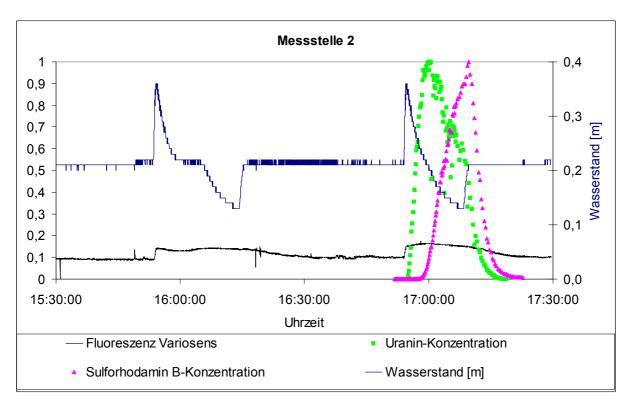


Abbildung 31: Auf das Konzentrations-Maximum normierte Tracerdurchgangskurven und Änderung des Wasserstands an Messstelle 2 / Pegel Zastler

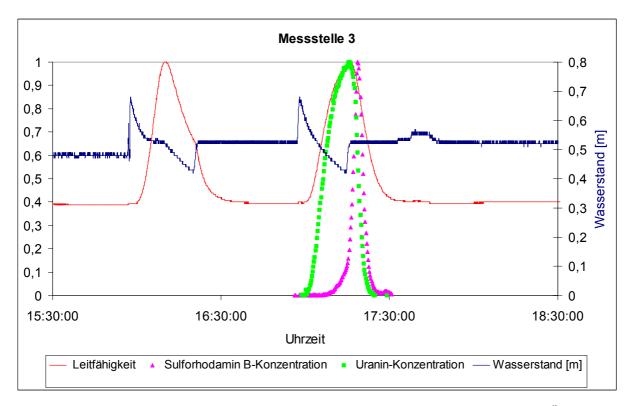


Abbildung 32: Auf das Konzentrations-Maximum normierte Tracerdurchgangskurven und Änderung des Wasserstands an Messstelle 3

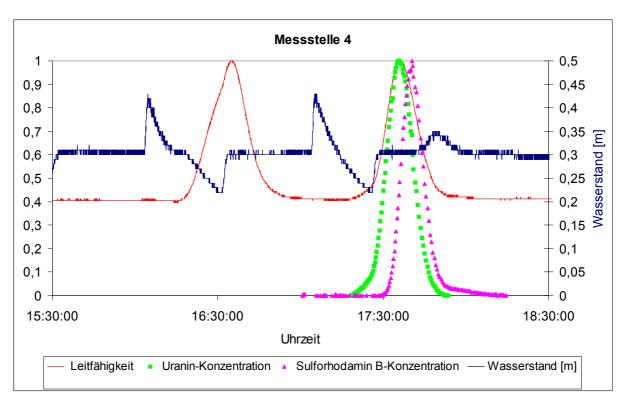


Abbildung 33: Auf das Konzentrations-Maximum normierte Tracerdurchgangskurven und Änderung des Wasserstands an Messstelle 4

In Abbildung 32 und 33 ist ein dritter relativ kleiner Anstieg des Wasserstands zu sehen. Dieser wird durch die Wiederinbetriebnahme des Wasserkraftwerks nach Versuchsende (18:30 Uhr) verursacht. Das Kraftwerk liegt etwas oberhalb der Messstelle 2, deren Wasserstandskurve diesen Anstieg nicht zeigt, da die Messungen hier schon früher beendet wurden. Deutlich kann man auf den vier Abbildungen die zunehmende Zeitdifferenz zwischen dem Eintreffen der Welle und den Durchgängen der Tracerwolken erkennen. Bei Messstelle 1 treffen die Maxima der Welle und der NaCl-Konzentration noch annähernd gleichzeitig ein (28 s Differenz) während bei Messstelle 4 eine Zeitdifferenz von 31 Minuten auftritt. Tabelle 32 und 33 zeigen die ermittelten Fließzeiten der einzelnen Messstellen, sowie die Differenzen zur Wellengeschwindigkeit.

Interessant ist auch die Tatsache, das Uranin obwohl später als NaCl eingespeist (Tabelle 7 S.39) an den einzelnen Messstellen vor der NaCl eintrifft (Tabelle 32 und 33). Dies könnte mit der größeren Dichte der Salzlösung zusammenhängen, die zunächst ein Absinken des Tracers auf den Gewässerboden verursacht. Dagegen spricht die Einspeisung von NaCl beim Öffnen des Wehrs mit anschließender turbulenter Durchmischung durch das ausströmende Wasser.

Tabelle 32: Minimale Fließzeiten und Differenzen zur minimalen Wellen-Fließzeit

Strecke (Messstelle x bis y)	Fließstrecke	minimale Fließzeit NaCl	Differenz NaCl Welle	minimale Fließzeit Uranin	Differenz Uranin Welle	minimale Fließzeit Sulforhodamin B	Differenz Sulforhodamin B Welle	minimale Fließzeit der Welle
	[m]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]
E bis 1	126,00	1,50	0,23	1,30	0,03	1,78	0,52	1,27
E bis 2	337,00	Ausfall	-	4,47	0,87	6,12	2,52	3,60
E bis 3	573,00	10,37	3,53	9,37	2,53	16,02	9,18	6,83
E bis 4	999,00	29,73	16,00	32,47	18,73	38,28	24,55	13,73

Tabelle 33: Intensive Fließzeiten und Differenzen zur intensiven Wellen-Fließzeit

Strecke (Messstelle x bis y)	Fließstrecke	intensive Fließzeit NaCl	Differenz NaCl Welle	intensive Fließzeit Uranin	Differenz NaCl Welle	intensive Fließzeit Sulforhodamin B	Differenz NaCl Welle	intensive Fließzeit der Welle
	[m]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]
E bis 1	126,00	2,23	0,47	1,80	0,03	5,45	3,68	1,77
E bis 2	337,00			8,13	3,77	18,28	13,92	4,37
E bis 3	573,00	25,70	18,13	25,13	17,57	27,28	19,72	7,57
E bis 4	999,00	45,87	31,00	45,13	30,27	48,95	34,08	14,87

4.2.1.2 Fließgeschwindigkeiten und Abflussmessungen

Bei der weiteren Auswertung wurden die maximalen, intensiven und mittleren Fließgeschwindigkeiten der Tracer sowie die maximale und intensive Fließgeschwindigkeit der Welle berechnet. Hierbei wurde sowohl die $C_{max}/0.5$ C_{max} -Methode, als auch das DM (Kapitel 3.1.1) angewendet. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der $C_{max}/0.5$ C_{max} -Methode und dem DM findet sich in Tabelle 35. Hier muss erwähnt werden, dass streng genommen bei instationären Verhältnissen weder die $C_{max}/0.5$ C_{max} -Methode noch das DM verwendet wer-

den dürfen. Um dennoch Aussagen über die mittlere Fließgeschwindigkeit machen zu können, wurde die mittlere Fließgeschwindigkeiten über diese beiden Methoden berechnet.

Tabelle 34 und die Abbildungen 34, 35 und 36 zeigen die berechneten Fließgeschwindigkeiten. Abbildung 34 bzw. Abbildung 35 zeigt, dass die maximalen bzw. intensiven Fließgeschwindigkeiten mit zunehmender Strecke kleiner werden und sich die Fließgeschwindigkeiten der Tracer ab Messstelle 4 (bzw. Messstelle 3 für intensive Fließgeschwindigkeiten) annähern. Dies kann durch Retention der Tracer in Pools und Kehrwassern geschehen oder durch das Absinken des Wasserstands aufgrund der Wehrschließung zurückzuführen sein. Das Absinken des Wasserstands bewirkt eine Verzögerung der Tracer durch die Erhöhung der Rauhigkeit. Ein weiterer Grund ist die Einstellung von stabilen Fließgeschwindigkeiten sowohl für die Tracer, als auch für die Wellengeschwindigkeit. Die Welle erreicht im Laufe der Messstrecke einen stabilen Zustand, da sich maximale und intensive Fließgeschwindigkeit annähern und die Welle keine Verformung erleidet und nur noch Translation stattfindet und demnach der Theorie der kinematischen Welle folgt.

Tabelle 34: Übersicht der ermittelten Geschwindigkeiten beim Schwallwellenversuch am Zastlerbach

	maximale Fließgeschwindigkeit NaCl	intensive Fließgeschwindigkeit NaCl	mittlere Fließgeschwindigkeit NaCl	maximale Fließgeschwindigkeit Uranin	intensive Fließgeschwindigkeit Uranin	mittlere Fließgeschwindigkeit Uranin	maximale Fließgeschwindigkeit Sulforhodamin B	intensive Fließgeschwindigkeit Sulforhodamin B	mittlere Fließgeschwindigkeit Sulforhodamin B	maximale Fließgeschwindigkeit der Welle	intensive Fließgeschwindigkeit der Welle
	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
E bis 1	1,40	0,94	0,34	1,62	1,17	0,51	1,18	0,39	0,25	1,66	1,19
E bis 2	Ausfall	Ausfall	Ausfall	1,26	0,69	0,43	0,92	0,31	0,32	1,56	1,29
E bis 3	0,92	0,37	0,38	1,02	0,38	0,40	0,60	0,35	0,35	1,40	1,26
E bis 4	0,56	0,36	0,36	0,51	0,37	0,36	0,43	0,34	0,34	1,21	1,12

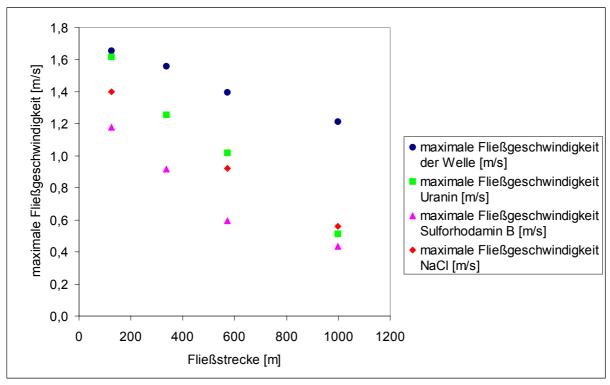


Abbildung 34: Maximale Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fließstrecke

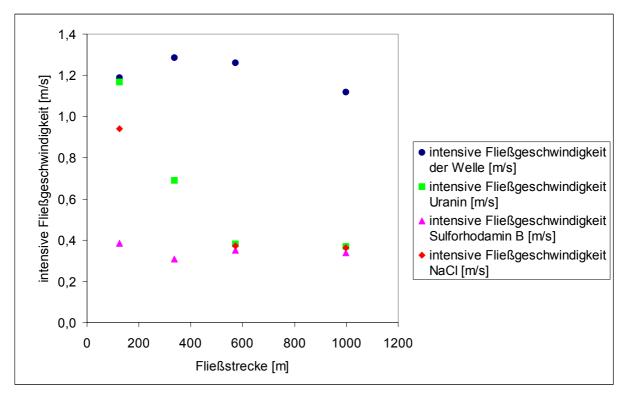


Abbildung 35: Intensive Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fließstrecke

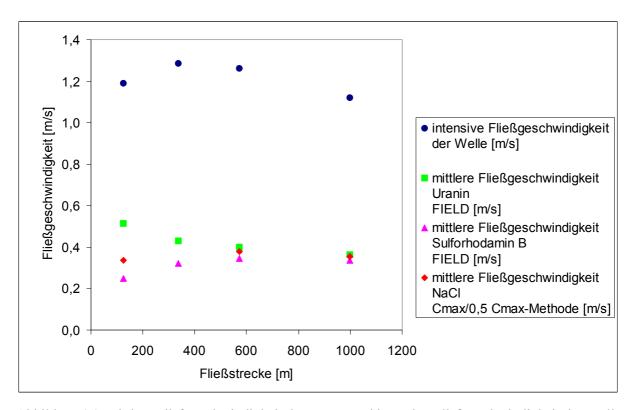


Abbildung 36: Mittlere Fließgeschwindigkeit der Tracer und intensive Fließgeschwindigkeit der Welle in Abhängigkeit von der Fließstrecke

Tabelle 35: Vergleich der mittleren Fließgeschwindigkeit der C_{max} / 0,5 C_{max} -Methode mit der mittleren Fließgeschwindigkeit des Programms FIELD

	mittlere Fließgeschwindigkeit Uranin Cmax/0,5Cmax-Methode	mittlere Fließgeschwindigkeit Uranin FIELD	longitudinale Dispersivität Uranin Cmax/0,5Cmax-Methode	longitudinale Dispersivität Uranin FIELD	mittlere Fließgeschwindigkeit Sulforhodamin B Cmax/0,5Cmax	mittlere Fließgeschwindigkeit Sulforhodamin B FIELD	longitudinale Dispersivität Sulforhodamin B Cmax/0,5Cmax-Methode	longitudinale Dispersivität Sulforhodamin B FIELD
	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]
E bis 1	0,61	0,51	14,31	28,92	0,26	0,25	14,19	15,90
E bis 2	0,38	0,43	40,04	29,86	0,33	0,32	9,70	7,74
E bis 3	0,41	0,40	17,66	12,00	0,35	0,35	0,83	1,05
E bis 4	0,36	0,36	5,17	5,42	0,34	0,34	3,03	2,95

Es zeigt sich, das die C_{max} / $0.5C_{max}$ -Methode und das DM ähnliche bzw. gleiche Werte für die mittlere Fließgeschwindigkeit liefern. In den obigen Tabellen und Diagrammen sind für die Fluoreszenztracer die Ergebnisse von FIELD angegeben. Für die Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit wurde aus den in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Gründen auf die Berech-

nung mit FIELD verzichtet. In den Werten der longitudinalen Dispersivität unterscheiden sich die beiden Methoden. Da die longitudinale Dispersivität hier keine weitere Verwendung findet, stellt diese Abweichung kein Problem dar.

Um zu überprüfen ob die ermittelten Werte für die mittlere Fließgeschwindigkeit und der intensiven bzw. maximalen Fließgeschwindigkeit der Welle der in Kapitel 1.1 eingeführten theoretischen Geschwindigkeitsbeziehung nach Gleichung 1.1 (S.1) folgen, wurden diese entsprechend Gleichung 4.1 in Beziehung gesetzt. Zusätzlich zur Bildung des Quotienten aus maximaler bzw. intensiver Wellengeschwindigkeit und der mittleren Fließgeschwindigkeit des Wassers wurden auch die Quotienten aus intensiver bzw. maximaler Fließgeschwindigkeit der Welle und den maximalen und intensiven Fließgeschwindigkeiten der Tracer NaCl und Uranin gebildet. Sulforhodamin B wurde nicht einbezogen, da dieses erst in den auslaufenden Ast der Welle eingespeist wurde. Es ergibt sich das Bild in den Tabellen 38, 39, 40 und 41.

$$\frac{V_k}{V} = a$$
 Gleichung 4.1

mit

V_k: Geschwindigkeit der kinematischen Welle

V: mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers

a: Faktor, der den Zusammenhang zwischen kinematischer Welle und mittlerer Fließgeschwindigkeit des Wassers beschreibt

Tabelle 36: Quotient aus intensiver Fließgeschwindigkeit der Welle und maximaler Fließgeschwindigkeit von NaCl und Uranin

	intensive Fließgeschwindigkeit Welle / maximale Fließgeschwindigkeit NaCl	intensive Fließgeschwindigkeit Welle / maximale Fließgeschwindigkeit Uranin
E bis 1	0,85	0,74
E bis 2		1,02
E bis 3	1,37	1,02 1,24
E bis 4	2,00	2,18

Tabelle 37: Quotient aus maximaler Fließgeschwindigkeit der Welle und maximaler Fließgeschwindigkeit von NaCl und Uranin

	maximale Fließgeschwindigkeit Welle / maximale Fließgeschwindigkeit NaCl	maximale Fließgeschwindigkeit Welle / maximale Fließgeschwindigkeit Uranin
E bis 1	1,18	1,03
E bis 2		1,24
E bis 3	1,52	1,24 1,37 2,36
E bis 4	2,17	2.26

Tabelle 38: Quotient aus intensiver Fließgeschwindigkeit der Welle und intensiver Fließgeschwindigkeit von NaCl und Uranin

	intensive Fließgeschwindigkeit Welle / intensive Fließgeschwindigkeit NaCl	intensive Fließgeschwindigkeit Welle / intensive Fließgeschwindigkeit Uranin
E bis 1	1,26	1,02
E bis 2		1,86
E bis 3	3,40 3,09	1,86 3,32 3,04
E bis 4	2.00	2.04

Tabelle 39: Quotient aus maximaler Fließgeschwindigkeit der Welle und intensiver Fließgeschwindigkeit von NaCl und Uranin

	maximale Fließgeschwindigkeit Welle / intensive Fließgeschwindigkeit NaCl	maximale Fließgeschwindigkeit Welle / intensive Fließgeschwindigkeit Uranin
E bis 1	1,76	1,42
E bis 2		2,26
E bis 3	3,76 3,34	2,26 3,68 3,29
E bis 4	3 34	3 20

Tabelle 40: Quotient aus intensiver Fließgeschwindigkeit der Welle und mittlerer Fließgeschwindigkeit von NaCl und Uranin

	intensive Fließgeschwindigkeit Welle / mittlere Fließgeschwindigkeit NaCl	intensive Fließgeschwindigkeit Welle / mittlere Fließgeschwindigkeit Uranin
E bis 1	3,54	2,32
E bis 2		2,98
E bis 3	3,33	3,15
E bis 4	3,15	2,32 2,98 3,15 3,09

Tabelle 41: Quotient aus maximaler Fließgeschwindigkeit der Welle und mittlerer Fließgeschwindigkeit von NaCl und Uranin

	maximale Fließgeschwindigkeit Welle / mittlere Fließgeschwindigkeit NaCl	maximale Fließgeschwindigkeit Welle / mittlere Fließgeschwindigkeit Uranin
		maximale Fließgesch mittlere Fließgesch
E bis 1	maxir Fließg mittle Fließg	maxir Fließg Fließg
E bis 2		maxir Bließg 3,23 3,62
		3,23 3,62 3,49 3,34

Die Ergebnisse in Tabelle 40 und 41 zeigen einen Faktor der teilweise deutlich größer ist als der Faktor 1,67, den die Gleichung 1.1 (S.1) angibt. Die zusätzlich untersuchten Quotienten in Tabelle 36 und 37 kommen dem Faktor 1,67 nahe. Hier sind jedoch, im Gegensatz zur Theorie, die Quotienten aus den jeweiligen intensiven bzw. maximalen Fließgeschwindigkeiten gebildet, die in DINGMAN (1984:252ff.) keine Erwähnung finden. Auch keine Erwähnung finden die Quotienten in Tabelle 38 und 39. Hier liegen die Quotienten bei den ersten beiden Messstationen im Bereich des Faktors 1,67, bei den Messstellen 3 und 4 jedoch darüber. Nach den in Kapitel 1.1 genannten Beispielen aus der Literatur ist von der mittleren Fließgeschwin-

digkeit des Wassers auszugehen, wonach sich ein Faktor > 3 für Zusammenhang zwischen maximaler bzw. intensiver Fließgeschwindigkeit der Welle und der mittleren Fließgeschwindigkeit des Wassers ergibt.

Dies führt zur Annahme, dass sich durch die Abweichung der Gerinnegeometrie von einem Rechteckprofil ein anderer Faktor ergibt. Weitere Aspekte zur Vergrößerung des Faktors ist der Rückgang des Wasserstands nach dem Schließen des Wehrs. Hier macht sich vermutlich eine bremsende Wirkung durch die geringere nachfließende Wassermenge bemerkbar. Eine Überprüfung des oben ermittelten Faktors ist durch Folgeversuche möglich, in deren Verlauf das Wehr bis zur vollständigen Passage der Welle geöffnet bleibt.

Ein weiterer Aspekt ist die Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit die mit Methoden erfolgt die streng genommen nur für stationäre Bedingungen gelten. Wenn der Quotient aus maximaler bzw. intensiver Wellengeschwindigkeit und der maximalen Fließgeschwindigkeit des Wassers herangezogen wird, kommt der ermittelte Faktor dem Faktor aus Gleichung 1.1 (S.1) relativ nahe. Der Quotient aus maximaler bzw. intensiver Wellengeschwindigkeit und der intensiven Fließgeschwindigkeit des Wassers zeigt zu heterogene Ergebnisse im Vergleich zwischen den einzelnen Messstationen um Aussagen machen zu können.

Da Messstelle 2 direkt am Pegel Zastlerbach eingerichtet wurde, konnte die P-Q-Beziehung des Pegels benutzt werden um den Abfluss zu ermitteln. Eine Berechnung des Abflusses über die Tracerdurchgangskurven ist aufgrund der instationären Verhältnisse, die Ziel des Versuchs waren, nicht möglich. Im Anhang ist eine Kopie des Pegelbogens (Abbildung 37) für diesen Tag zu finden.

Der Wasserstand an Messstelle 2 / Pegel Zastlerbach im Peak betrug 44 cm was einem Abfluss von 1,346 m³/s entspricht. Dies entspricht dem 3,2-fachen MQ für den Monat Juli und dem 2,1-fachen Jahres MQ bzw. dem 0,5-fachen MHQ für den Monat Juli und dem 0,2-fachen Jahres MHQ (LFU 1996). Der Abfluss betrug vor dem Versuch 0,412 m³/s und danach 0,373 m³/s, was auf den auslaufenden Ast einer Welle, verursacht durch ein Niederschlags-Ereignis der vorangegangen Nacht zurückzuführen ist.

Eine Normierung der Tracerdurchgangskurven auf die eingespeiste Menge brachte keine Erkenntnisse über Sorption oder Zerstörung durch Lichteinfluss. Aufgrund des instationären Abflusses konnten die Kurven nicht verglichen werden und keine Aussagen über Sorption oder Zerstörung durch Lichteinwirkung getroffen werden. Für Messstelle 2 war hingegen aufgrund der P-Q-Beziehung eine Berechnung des Tracerrückerhalts möglich. Für Uranin beträgt dieser 93,24 % und für Sulforhodamin B 53,05 %. Sulforhodamin B wird wohl hauptsächlich am aufgewirbelten Sediment aus dem Bachbett bzw. Staubecken adsorbiert und an dieses gebunden an der Messstelle vorbeigetragen und so der Messung entzogen.

4.2.2 Diskussion

Die Ergebnisse des Schwallwellenversuchs zeigen, dass es möglich ist eine künstliche Welle zu erzeugen, die bedingt das in Kapitel 1.1 beschriebene Verhalten zeigt. Das bedeutet eine Welle, die der mittleren Fließgeschwindigkeit des Wassers um einen bestimmten Betrag vorauseilt. An den vier Messstellen konnte mit zunehmender Entfernung von der Einspeisestelle eine Zunahme der Zeitdifferenz zwischen den charakteristischen Fließzeiten der Welle und den Tracerkonzentrationen beobachtet werden.

Weiterhin wird gezeigt, dass auf der relativ kurzen Messstrecke von 998 m dieser Effekt sehr deutlich auftritt. Dies bestätigt die Angaben von NOLAN & HILL (1989), über das Auftreten dieses Voreilens der Welle in einem EZG mit einer Fläche von 10,6 km² und demzufolge kurzen Gerinnestrecken. Dort handelte es sich jedoch um eine durch Niederschläge ausgelöste Welle, die im Zusammenhang mit natürlichen Tracern untersucht wurde. Im Gegensatz zu dem dort beobachteten Einklang mit Gleichung 1.1 (S.1) ergab sich bei dem Schwallwellenversuch, dass die kinematische Welle um einen Faktor > 3 schneller vorrückte als die Tracerwolken. Der Faktor änderte sich unwesentlich mit Zunahme der Fließstrecke. Es ist möglich, dass sich bei größeren Strecken eine Annäherung an den Faktor 1,67 aus Gleichung 1.1 (S.1) ergibt. Dies müsste in Folgeversuchen geklärt werden. Für die verschiedenen Fließabschnitte konnten aufgrund der ermittelten Werte neue Beziehungen aufgestellt werden, die mit weiteren Versuchen überprüft werden sollten. Andererseits weicht das Gerinneprofil des Zastlerbachs stark von dem eines regelmäßigen Rechteckprofils ab und ergibt auch aus diesem Grund einen von 1,67 abweichenden Faktor. Es ist auch möglich, dass wie in Kapitel 1.1 erwähnt die erste Änderung der Konzentration und des Wasserstandes für die Ermittlung der Fließgeschwindigkeiten benutzt werden sollten. Dies würde bedeuten den Quotienten aus den maximalen Fließgeschwindigkeiten der Welle und der Tracer zu bilden, was wie oben gezeigt wurde dem Faktor 1,67 sehr nahe kommt und den von GLOVER & JOHNSON (1974: 305) erwähnten Laborversuchen entsprechen würde. Die Zugabe der künstlichen Tracer hatte jedoch zum Ziel die mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers zu bestimmen, welche nach DING-MAN in einem Zusammenhang mit der Fließgeschwindigkeit der Welle steht. Die Methoden sind also nicht direkt vergleichbar. Die von GLOVER & JOHNSON (1974: 305) erwähnte Labormethode und die von ihnen angewandte Feldmethode ist für natürliche auftretende Ereignisse gedacht und kann einen Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen natürlicher Ereignisse darstellen.

Beim Vergleich der verschiedenen Fließgeschwindigkeiten fällt auf, dass die maximalen Fließgeschwindigkeiten der Tracer und der Welle mit zunehmendem Fließweg abnehmen. Die Tracer haben bis zur Messstelle 3 stark unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten und nähern sich bei Messstelle 4 mehr und mehr aneinander an. Interessant wäre hier die weitere Verfolgung der Tracer mit weiter bachabwärts gelegenen Messstellen gewesen.

Ein ähnliches Bild zeichnet sich bei den intensiven Fließgeschwindigkeiten ab. Die Fließgeschwindigkeiten der Tracer nehmen bis Messstelle 2 ab und nähern sich ab Messstelle 3 mehr

und mehr an. Anders jedoch die intensive Fließgeschwindigkeit der Welle, die sich auf annähernd gleichem Niveau bewegt.

Bei Betrachtung der mittleren Fließgeschwindigkeiten der Tracer ergibt sich ein anderer Eindruck. Die mittleren Fließgeschwindigkeiten sind bei Messstelle 1 schon relativ ähnlich und nähern sich ab Messstelle 2 immer mehr an. Insgesamt ist kaum ein Rückgang der mittleren Fließgeschwindigkeit zu beobachten.

Bei der Berechnung der maximalen, intensiven und mittleren Fließgeschwindigkeit der Tracer wurde sowohl die C_{max} / 0,5 C_{max} -Methode als auch das Dispersionsmodell FIELD verwendet. Der Vergleich der beiden Methoden zeigte fast übereinstimmende Werte der mittleren Fließgeschwindigkeiten. Die longitudinale Dispersivität zeigte Unterschiede in den Werten der beiden Methoden. Der Vergleich der longitudinalen Dispersivität ist hier jedoch aufgrund der instationären Verhältnisse auch nicht ohne weiteres möglich und hat deshalb auch keine große Aussagekraft. Der Vergleich der beiden Methoden, in Kapitel 4.1.4 unter stationären Bedingungen zeigt hier wesentlich bessere Übereinstimmungen. Bei der Auswertung des Schwallwellenversuchs ist dies jedoch nicht von größerer Bedeutung, da die longitudinale Dispersivität keine Anwendung findet. Da die Handhabung des Programms FIELD mit den Daten aus den Leitfähigkeitsmessungen nicht ohne größere Probleme vonstatten geht (Kapitel 3.1.1), wurde auf den Einsatz von FIELD weitgehend verzichtet.

Als weitere Überlegung muss nun die Übertragung auf das natürliche Abflussgeschehen angegangen werden. Die Frage, die sich hierbei zuerst stellt, ist die ob sich eine Welle dieser Art aufgrund von Niederschlags- oder Schneeschmelzereignissen natürlicherweise einstellt. Der durch die Welle erzeugte Abfluss liegt wie oben beschrieben im Bereich der natürlicherweise vorkommenden Abflussmengen. Konvektive und zyklonale Niederschläge verursachen nach HOEG (1998: 46 ff.) Abflussspitzen in dieser Größenordnung und darüber, allerdings mit längeren Wellendurchgängen und flacheren Anstiegen. Das Voreilen der Welle sollte auch hier nach dem Modell der kinematischen Welle stattfinden. In weiteren Versuchen müsste nun überprüft werden, um welchen Faktor die Welle der mittleren Fließgeschwindigkeit unter natürlichen Bedingungen voreilt. Das heißt, ob sich die oben ermittelten Faktoren unter natürlichen Verhältnissen nachweisen lassen oder ob es eine Annäherung an den Wert für Rechteckprofile gibt.

4.2.3 Fazit

Der Versuch hat gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, nach dem Modell der kinematischen Welle, künstlich eine Welle zu erzeugen, die der mittleren Fließgeschwindigkeit des Wassers voreilt. Besonders eindrucksvoll war hier die Deutlichkeit des Effekts auf die relativ kurze Fließstrecke von ca. 1 km. Der Versuch hat erste Aufschlüsse über das Verhalten einer Welle im Zastlerbach geliefert. Um zu überprüfen, wie ein Wellenablauf unter natürlichen Verhältnissen stattfindet, sind weitere Versuche notwendig. Gerade im Hinblick auf die Untersuchung von Abflussbildungsprozessen wäre es interessant zu sehen, wie groß die Bedeutung dieses Effekts im Zastler- oder Bruggaeinzugsgebiet ist. Das heißt, eine durch eine Welle hervorgerufene Dominanz von pre-event water im Abfluss. Die Prozesse, die zu einem Dominieren von pre-event water im Abfluss führen (Piston Flow oder Groundwater Ridging) würden demnach durch diesen Dritten ergänzt. Für eine Quantifizierung bzw. ein Nachweis unter welchen Bedingungen dieser Wellen induzierte Effekt auftritt sind noch weitere Forschungsarbeiten notwendig.

5 Schlussfolgerungen

Die Zielsetzung dieser Arbeit war, die Abflusskonzentration in den Hanggerinnen und Hauptvorflutern des Bruggaeinzugsgebiets mit tracerhydrologischen Methoden zu untersuchen. Für die Anwendung des Modells TAC (UHLENBROOK 1999) auf Basis von Tageswerten war es bisher nicht notwendig, die Abflusskonzentration in den Gerinnen zu berücksichtigen. Für die Weiterentwicklung auf Stundenwertbasis (ROSER 2001) wird die Einbeziehung von Fließgeschwindigkeiten jedoch notwendig.

Mit über 80 Markierversuchen wurden für ausgewählte Messabschnitte die minimalen, intensiven und mittleren Fließzeiten bestimmt und daraus die maximalen, intensiven und mittleren Fließgeschwindigkeiten berechnet. Die während drei Messkampagnen durchgeführten Markierversuche ermöglichen einen Überblick über die Fließgeschwindigkeitsverteilung im Einzugsgebiet der Brugga. Durch die Messungen während des sehr feuchten Frühjahrs und während der sommerlichen Trockenwetterperiode konnte eine Übersicht über den Variationsbereich der Fließgeschwindigkeiten in den einzelnen Gerinnen geschaffen werden. Die Bandbreite der möglichen Fließgeschwindigkeiten ist größer und kann durch weitere Arbeiten erfasst werden.

Die Analyse auf Zusammenhang zwischen Gebietseigenschaften und Fließgeschwindigkeiten zeigt mitunter gute Korrelationen. Dennoch muss man sich den Grenzen dieser Aussagen bewusst sein. Aufgrund der Anzahl der durchgeführten Messungen lassen sich keine aussagekräftigen Statistiken erstellen. Die Ergebnisse der Regressionsanalysen sind heterogen.

Es wird deutlich, dass es in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht möglich war Daten für statistische Analysen zu erheben. Auch ist es nicht möglich allgemeingültige Aussagen über die Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeiten von Gebietsparametern zu erarbeiten. Um diese Aussagen treffen zu können, sind weitere umfangreiche Felderhebungen notwendig.

Als weitere Schritte kann Folgendes angegangen werden. Die bisher erhobenen Daten sind eine gute Ausgangsbasis für eine Vergrößerung der Datengrundlage und weitere Regressionsanalysen zur Überprüfung der Korrelation von Gebietseigenschaften mit den Fließgeschwindigkeiten. In Folgeuntersuchungen sollten nun gezielt einzelne Hanggerinne mit 10 bis 20
Markierversuchen untersucht werden um ein entsprechendes Spektrum der Abflussverhältnisse zu erhalten.

Als Alternative oder zusätzlich zu diesen Untersuchungen kann eine Auswertung mittels der in Kapitel 3.1.6 eingeführten Fließgeschwindigkeitsformeln erfolgen. Hierzu bedarf es, wie schon erwähnt, zusätzlicher Parametererhebungen im Gelände. Für beide Gleichungen ist das Gefälle bzw. die mittlere Hangneigung der Gerinnestrecke zu bestimmen. Hier kann an exemplarischen Bachabschnitten untersucht werden, ob es möglich ist, die im Gelände vermessenen Hangneigungen durch die in dieser Arbeit aus der DGK bzw. TK25 / TK50 bestimmten mittleren Hangneigungen zu ersetzen. Hierdurch würde das Vermessungs-Problem der unzugänglichen Gerinnestrecken gelöst. Für die Anwendung der Gleichung 3.11 (S.28) nach HODEL (1993) muss zusätzlich die Bezugswassermenge ermittelt werden. Dies kann nur durch eine längere Messreihe ermittelt werden bzw. durch Abflussmessungen bei Hochwasserabflüssen, die laut Definition (Kapitel 3.1.6) dem gerinnebildenden Abfluss sehr nahe kommen.

Für Gleichung 3.14 und 3.15 (S.29) nach RICKENMANN (1996) muss die Korngrößenverteilung bestimmt werden. Dies ist nur durch Feldaufnahmen möglich, die, wenn sie einen repräsentativen Anteil der Bäche im Einzugsgebiet erfassen wollen, sehr umfangreich werden. Insgesamt gesehen bedarf es für Fließgeschwindigkeitsberechnungen in Abhängigkeit vom Abfluss weiterer Feldarbeiten.

Durch diese weiteren Feldarbeiten können auch Unterschiede im bachbettbildenden Ausgangssubstrat, verursacht durch unterschiedliche Quartärgeologie, und deren Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit herausgearbeitet werden. Hierzu bedarf es weiterer Markierversuche, die im routinemäßigen Betrieb neben der wöchentlichen Betreuung und Wartung der Messstationen im Bruggaeinzugsgebiet durchgeführt werden könnten. Der Arbeitsaufwand kann mit etwa 1 Stunde pro Markierversuch veranschlagt werden.

Die ermittelten Fließgeschwindigkeiten können in vielerlei Hinsicht angewendet werden. Einerseits zur Überprüfung von Ergebnissen der Abflusskonzentrationsroutine des TAC-D-Modells (ROSER 2001), als Datensatz für bestehende Stofftransport-Modelle oder andererseits als Grundlage für weitere experimentelle Arbeiten wie den in Kapitel 1.2 erwähnten Versuch zur Untersuchung des Grundwasserzustroms in den St. Wilhelmer Talbach. Mit der Kenntnis der Fließgeschwindigkeitsbereiche ist es möglich Abschätzungen über die Dauer bis zur Einstellung einer konstanten Konzentration für eine definierte Strecke zu machen.

Wie bereits erwähnt, können die ermittelten Fließzeiten zur Abschätzung von Transportzeiten von Schadstoffwolken, die durch Verkehrsunfälle verursacht sind, verwendet werden. Für die oben genannte L 126 von Oberried zum Notschrei scheint dies besonders wichtig zu sein. Ein Beispiel soll die Relevanz verdeutlichen. Ein Verkehrsunfall im Bereich der Messstelle 4 am Buselbach könnte zu einer direkten Kontamination des Baches führen, der hier nur im Abstand von 1 bis 2 m neben der Strasse verläuft. Eine eingebrachte Schadstoffwolke hätte, zu Bedingungen wie während des Markierversuchs am 03.05.2001, innerhalb von 2 Stunden die Distanz von 3 km bis zur Konfluenz mit dem St. Wilhelmer Talbach überbrückt. Unter der Voraussetzung, dass der Schadstoff sich ähnlich verhält wie gelöstes Salz. Auch in diesem Fall ergeben weitere Untersuchungen Aufschlüsse darüber, wie eine Schadstoffwolke bei stark abweichendem Abfluss transportiert wird.

Es hat sich gezeigt, dass die Fließgeschwindigkeiten der Hauptvorflutern St. Wilhelmer Talbach und Buselbach in aller Regel schneller sind als die Fließgeschwindigkeiten der Hanggerinne, was sich vor allem während der Trockenwetter-Messkampagne zeigt. Insgesamt gesehen sind die Fließgeschwindigkeiten viel geringer als dies zu Beginne der Arbeit angenommen wurde. Auch bei höheren Abflüssen erreichten die intensiven Fließgeschwindigkeiten höchstens 0,5 m/s. Bei den Trockenwetter-Messungen waren die Fließgeschwindigkeiten insgesamt räumlich (Abbildung 29) homogener mit intensiven Fließgeschwindigkeiten von höchstens 0,21 m/s. Trotz dieser geringen Geschwindigkeiten leisten die Hanggerinne einen bedeutenden Beitrag zum schnellen Wassertransport von den Hochlagenquellen zu den Hauptvorflutern. Bei der Betrachtung der Abflusskonzentration darf nicht außer acht gelassen werden, dass die oben genannten intensiven Fließgeschwindigkeiten nur für den stationären Fall gelten. Im instationären Fall ist die Fließgeschwindigkeit zusätzlich nach der Theorie der kinematischen Welle zu betrachten. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit liegt hier um mindes-

tens das 1,33-fache höher (Gleichung 1.3, S.2), als die mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers. Mit dieser Problematik beschäftigt sich der zweite Teil dieser Arbeit.

Die Zielsetzung des Schwallwellenversuchs am Zastlerbach war, die Geschwindigkeit einer künstlichen Hochwasserwelle im Vergleich mit der Fließgeschwindigkeit des Wassers zu untersuchen. Gleichung 1.1 (S.1) gibt den Faktor an, um den eine Hochwasserwelle der mittleren Fließgeschwindigkeit des Wassers voreilt. Dieses Voreilen kann zu Auftreten von preevent water im Abfluss führen, obwohl aufgrund von Feldbeobachtungen und Modellrechnungen event-water dominieren sollte (s. Kapitel 1.1). Des weiteren soll die Durchführung dieses Versuchs auch Erkenntnisse über die modelltechnische Behandlung von Hochwasserwellen im erweiterten TAC-Modell liefern. Vor dem Versuch lagen für das Bruggabzw. Zastlereinzugsgebiet keine Erfahrungswerte vor, in welcher zeitlichen und räumlichen Größenordung der oben beschriebene voreilende Effekt auftritt. Die Frage war ob dieser Effekt wie NOLAN & HILL (1990) es beschreiben auch in kleinen Einzugsgebieten zu finden ist oder nach GLOVER & JOHNSON (1974) nur in Einzugsgebieten mit einer Fläche von mehr als 100 km² anzutreffen ist.

Die Durchführung und Auswertung des Schwallwellenversuchs am Zastlerbach hat gezeigt, dass es möglich ist, eine künstliche Welle zu erzeugen, die bedingt das Verhalten zeigt wie es in Kapitel 1.1 beschrieben wurde. Es konnte eine Welle erzeugt werden, welche der mittleren Fließgeschwindigkeit des Wassers vorauseilt.

Im Gegensatz zur in Kapitel 1.1 eingeführten theoretischen Beziehung zwischen der Geschwindigkeit der kinematischen Welle und der mittleren Fließgeschwindigkeit des Wassers konnte der Faktor 1,67, den Gleichung 1.1 (S.1) als Beziehung zwischen Fließgeschwindigkeit der Welle und der mittleren Fließgeschwindigkeit des Wassers angibt, nicht bestätigt werden.

Es ergab sich ein Faktor > 3 als Beziehung zwischen der maximalen bzw. intensiven Fließgeschwindigkeit der Welle und der mittleren Fließgeschwindigkeit des Wassers. Die Diskrepanz zwischen dem aus Laborversuchen für Rechteckgerinne ermittelten Faktor und dem experimentell festgestellten Faktor kann einerseits in der abweichenden Gerinnegeometrie des Zastlerbachs liegen; andererseits kann das Abfallen des Wasserstands unter den Ausgangswasserstand, durch das Schließen des Wehrs verursacht, für eine Verzögerung der Tracerwolken verantwortlich sein und dadurch einen Faktor > 3 verursachen. Es ist auch möglich, dass wie in Kapitel 1.1 erwähnt die erste Änderung der Konzentration und des Wasserstandes für die Ermittlung der Fließgeschwindigkeiten benutzt werden sollten. Dies würde bedeuten den Quotienten aus den maximalen Fließgeschwindigkeiten der Welle und der Tracer zu bilden, was wie oben gezeigt wurde dem Faktor 1,67 sehr nahe kommt und den von GLOVER & JOHNSON (1974: 305) erwähnten Laborversuchen entsprechen würde. Die Zugabe der künstlichen Tracer hatte jedoch zum Ziel die mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers zu bestimmen, welche nach DINGMAN (1984) in einem Zusammenhang mit der Fließgeschwindigkeit der Welle steht. Die Methoden sind also nicht direkt vergleichbar. Die von GLOVER & JOHNSON (1974: 305) erwähnte Labormethode und die von ihnen angewandte Feldmethode ist für natürliche auftretende Ereignisse gedacht und kann einen Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen natürlicher Ereignisse darstellen.

Als weitere Überlegung muss nun die Übertragung auf das natürliche Abflussgeschehen angegangen werden. Die Frage, die sich hierbei zuerst stellt ist die, ob sich eine Welle dieser Art aufgrund von Niederschlags- oder Schneeschmelzereignissen natürlicherweise einstellt. Der durch die Welle erzeugte Abfluss liegt wie oben beschrieben im Bereich der natürlicherweise vorkommenden Abflussmengen. Konvektive und zyklonale Niederschläge verursachen nach HOEG (1998: 46 ff.) Abflussspitzen in dieser Größenordnung und darüber, allerdings mit längeren Wellendurchgängen und flacheren Anstiegen. Das Voreilen der Welle sollte auch hier nach dem Modell der kinematischen Welle stattfinden. In weiteren Versuchen müsste nun überprüft werden, um welchen Faktor die Welle der mittleren Fließgeschwindigkeit unter natürlichen Bedingungen voreilt. Das heißt, ob sich die oben ermittelten Faktoren unter natürlichen Verhältnissen nachweisen lassen oder ob es eine Annäherung an den Wert für Rechteckprofile gibt.

Der Versuch hat erste Aufschlüsse über das Verhalten einer Welle im Zastlerbach geliefert. Um zu überprüfen, wie ein Wellenablauf unter natürlichen Verhältnissen stattfindet, sind weitere Versuche notwendig. Gerade im Hinblick auf die Untersuchung von Abflussbildungsprozessen wäre es interessant zu sehen, wie groß die Bedeutung dieses Effekts im Zastler- oder Bruggaeinzugsgebiet ist. Das heißt, eine durch eine Welle hervorgerufene Dominanz von preevent water im Abfluss. Die Prozesse, die zu einem Dominieren von pre-event water im Abfluss führen (Piston Flow oder Groundwater Ridging) würden demnach durch diesen Dritten ergänzt. Für eine Quantifizierung bzw. ein Nachweis unter welchen Bedingungen dieser Wellen induzierte Effekt auftritt sind noch weitere Forschungsarbeiten notwendig.

Auch für die Modellierung von Hochwasserwellen nach der Theorie der kinematischen Welle wurden erste Erkenntnisse geschaffen, mit welchen Geschwindigkeiten sich eine Änderung des Wasserstands entlang eines Gerinnes fortpflanzt. Auch hier sind weitere Untersuchungen vor allem während natürlich induzierter Wellenabläufe notwendig.

6 Literatur

- ABERLE, J. (2000): Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fließwiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluß. Dissertation, Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 207, Karlsruhe.
- BEHRENS, H. (1988): Quantitative Bestimmung von Uranin, Eosin und Pyranin in Gemischen mittels Fluoreszenzmessung bei definierten pH-Werten. Steir. Beitr. Hydrogeol. 39, Graz, 117-129.
- BEHRENS, H. (1999): Fluoreszenztracer; Eigenschaften, Anwendbarkeit und Nachweistechnik, In: DVWK: Markierung von Grundwasser und oberirdischen Gewässern Planung, Durchführung und Auswertung. 13. Fortbildungslehrgang Grundwasser, DVWK, Bonn, 12 14.
- DINGMAN S.L. (1984): Fluvial Hydrology. W.H. Freeman and Company, New York, 383 S.
- DITTRICH, A. (1998): Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fliessgewässer.

 Habilitationsschrift, Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 198, Karlsruhe.
- GÄßLER, G. (1995): Entwicklung eines Meßsets zur Abflussganglinien-Separation, Diplomarbeit, Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
 Freiburg i. Br., 82 S. (unveröffentlicht)
- GLOVER, B.J. & JOHNSON, P. (1974): Variations in the natural chemical concentration of river water during flood flows, and the lag effect. Journal of Hydrology, 22, 303 316.
- HEIDEL, S.G. (1966): The progressive lag of sediment concentration with flood waves. Trans. Am. Geophys. Union, 37, 56 66.

- HODEL, H. (1993): Untersuchung zur Geomorphologie, der Rauheit, des Strömungswiederstandes und des Fliessvorganges in Bergbächen, Dissertation ETH Zürich, Zürich. 290 S.
- HOEG, S. (1998): Abflußkomponenten am Zastlerbach. Diplomarbeit, Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg i. Br., 96 S. (unveröffentlicht)
- HÜTTNER, R. & WIMMENAUER W. (1967): Geologische Karte von Baden-Württemberg. Erläuterungen zu Blatt 8013 Freiburg. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart. 159 S.
- Käss, W. (1992): Geohydrologische Markierungstechnik. Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 9. Gebrüder Borntraeger, Berlin & Stuttgart, 519 S.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ (LfU) BADEN-WÜRTTEMBERG (1996): Beschreibung zum Pegel Zastler (Pegel-Nr 385) am Zastlerbach. Abteilung Wasser, Sachgebiet 43.1: Quantitative Gewässerkunde, Karlsruhe.
- LEIBUNDGUT, CH. (1998): Skriptum zur Vorlesung und Übungen zur Tracerhydrologie II, Sommersemester 1998, Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg i. Br.
- LEIBUNDGUT, CH. (1999): Oberirdische Gewässer, In: DVWK: Markierung von Grundwasser und oberirdischen Gewässern Planung, Durchführung und Auswertung.

 13. Fortbildungslehrgang Grundwasser, DVWK, Bonn, 47 60.
- LIEHL, E. (1988): Oberflächenformen und Landschaftsgeschichte. In: Breisgau-Hochschwarzwald, Schillinger Verlag, Freiburg i. Br.
- LINDENLAUB, M. (1998): Abflußkomponenten und Herkunftsräume im Einzugsgebiet der Brugga. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Hydrologie, Freiburg i. Br., 121 S.

- MALOSZEWSKI, P. & ZUBER A. (1982): Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers 1. Models and their applicability. Journal of Hydrology, 57, 207 231
- MALOSZEWSKI, P. (1990): Mathematische Modelle. GSF Jahresbericht 1990, GSF Neuherberg bei München, 7 19
- MALOSZEWSKI, P. (1991): Bemerkungen über die Interpretation von Markierungsversuchen im Grundwasser. GSF Jahresbericht 1991, Institut für Hydrologie, GSF Neuherberg bei München, 1 18
- NOLAN, K.M. & HILL, B.R. (1990): Storm-Runoff generation in the Permanente Creek drainage basin, West Central California An example of flood-wave effects on runoff composition. Journal of Hydrology, 113, 343 367
- RICKENMANN, R. (1996): Fließgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen. Wasser, Energie, Luft. 88. Jahrgang, Heft 11 / 12, Baden, Schweiz, 298 304
- ROSER, S. (2001): Flächendetaillierte Weiterentwicklung des prozessorientierten Einzugsgebietsmodells TAC und Visualisierung der Modellergebnisse in einem dynamischen GIS. Diplomarbeit, Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg i. Br., 106 S. (unveröffentlicht)
- SCHLITTGEN, R. (1993): Einführung in die Statistik: Analyse und Modellierung von Daten.

 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, R. Oldenburg Verlag GmbH, München
- SOMET (1996): Prosens-Sensorsystem-Produktkatalog, Freiburg i. Br.
- STAHR, I. (1979): Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für Bodenbildung und Standortseigenschaften im Südschwarzwald. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, 9, Freiburg i. Br.

- TRENKLE, H. & RUDLOFF, H. v. (1989): Das Klima im Schwarzwald. In: SICK, W.D. & LIEHL, E. (Ed.): Der Schwarzwald, Beiträge zur Landeskunde. Konkordia Verlag, Bühl. 59 100
- UHLENBROOK, S. (1999): Untersuchung und Modellierung der Abflußbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. Dissertation, Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 10, Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg i. Br.
- WALLNER, E. M. (1989): Zastler Eine Holzhauergemeinde im Schwarzwald. Alemannisches Institut Freiburg im Breisgau. Verlag Poppen & Ortmann, Freiburg i. Br., 255 S
- WEISE O. R. (1983): Das Periglazial Geomorphologie und Klima in gletscherfreien, kalten Regionen. Gebrüder Borntraeger, Berlin & Stuttgart, 199 S.

Anhang

Tabelle 42: Gewässerkundliche Hauptwerte für den Pegel Zastler am Zastlerbach

Pegel : ZASTLER Pegelnummer : 385

Gebietskennzahl: 2338.830 Gewässer : ZASTLERBACH

Vorgängerpegel : keine

Abflußjahre : 1955 - 1994 Anzahl Jahre : 40 Ausfalljahre : keine

		H a u Abfl	ptwer uß in m³/	t e s		
Monat	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR
Jahr NQ MNQ	1971 0.09 0.25	1962 0.11 0.31	1963 0.11 0.32	1963 0.09 0.32	1963 0.09 0.36	1960 0.22 0.58
MQ	0.57	0.73	0.69	0.69	0.74	1.01
мнQ НQ Jahr	2.54 13.26 1972	3.08 11.63 1991	2.66 11.51 1955	2.60 24.37 1990	2.23 5.92 1962	2.60 17.28 1983
Monat	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	ОКТ
Jahr NQ MNQ	1993 0.20 0.53	1976 0.12 0.32	1964 0.11 0.23	1991 0.08 0.21	1959 0.06 0.19	1971 0.07 0.19
MQ	0.95	0.60	0.42	0.39	0.34	0.41
MHQ HQ Jahr	2.73 11.97 1994	2.07 7.61 1981	2.39 15.50 1978	2.02 7.71 1969	1.54 7.05 1968	1.60 5.61 1981
	Wi	nter	Som	mer	Ja	hr
Datum NQ MNQ		1963 .09 .19		1959 .06 .14		1959 .06 .13
MQ	0	.74	0	.52	0	.63
MHQ HQ Datum	_	.96 .37 1990		.33 .50 1978		.86 .37 1990

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Abteilung Wasser, Sg. 43.1 : Quantitative Gewässerkunde Karlsruhe, den 19.01.1996

Tabelle 43: Wasserstands-Abflussbeziehung für den Pegel Zastler am Zastlerbach

Pegel : ZASTLER Gewässer : ZASTLERBACH Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Meßnetz-Zentrale-Wasser Pegelnr.: 385 Abflußkurven-Tabelle, Stand: 01.04.1998 Pegel= 385 Kurve=X _____ | cm | 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 | 0.000 0.020 0.039 0.060 0.083 0.107 10 0.300 0.336 0.373 0.412 0.452 0.750 0.807 0.867 0.928 0.991 1.425 1.507 1.593 1.682 1.776 20 30 40 50 1.873 1.975 2.081 2.192 2.308 2.430 2.557 2.690 2.828 2.971 60 | 3.120 3.273 3.431 3.594 3.761 3.933 4.108 4.288 4.472 4.659 5.247 7.487 5.449 7.744 5.863 8.280 6.525 9.146 6.078 8.561 6.757 9.446 70 4.850 5.048 5.653 6.299 6.995 7.238 8.008 80 8.851 9.750 10.36 90 10.68 10.06 10.99 12.30 11.31 11.63 11.97 12.65 100 13.00 13.36 13.73 14.11 14.50 14.89 15.30 15.71 19.31 19.80 20.29 20.78 24.37 24.89 25.42 25.94 17.45 17.90 18.37 18.84 22.30 22.81 23.32 23.84 110 17.00 18.84 21.28 120 21.79 26.47 130 | 27.00

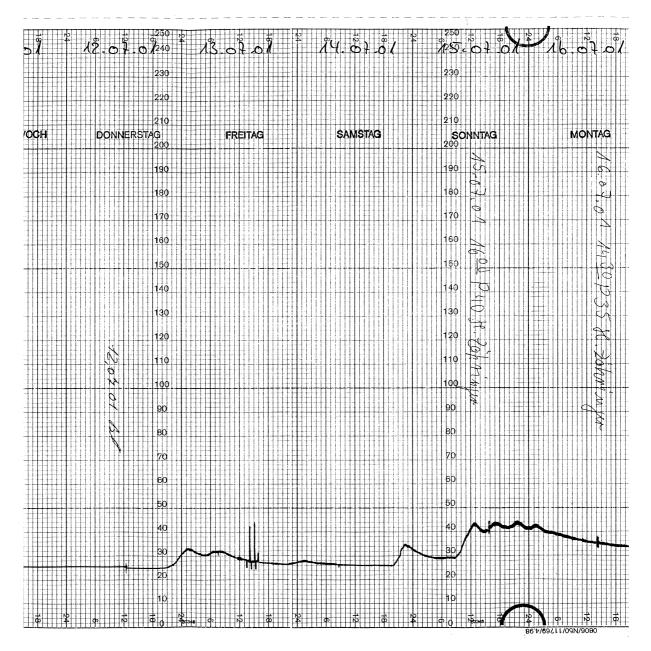


Abbildung 37: Pegelbogen des Zastlerbachs für den 12. - 16.07.2001. Der Schwallwellenversuch ist an den zwei Peaks am 13.07.2001 gut zu erkennen.

g und nur unter Verwendung der angegebe
Unterschrift