

INSTITUT FÜR HYDROLOGIE
ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG

Fabian Ries

*Hochwasserabflussprozesse und
Hochwassermanagement in kleinen
Einzugsgebieten*



Referent: Prof. Dr. Markus Weiler
Koreferent: Dr. Jens Lange

Freiburg, März 2010

INSTITUT FÜR HYDROLOGIE
DER ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG

Fabian Ries

*Hochwasserabflussprozesse und
Hochwassermanagement in kleinen
Einzugsgebieten*

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler
Koreferent: Dr. Jens Lange

Diplomarbeit unter der Leitung von
Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg, März 2010

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei Prof. Dr. Markus Weiler für die Vergabe und Betreuung der Diplomarbeit sowie bei Dr. Jens Lange für die Übernahme des Koreferats bedanken.

Weiter möchte ich mich bei Jakob und Ben für ihre Unterstützung während der Feldarbeit sowie bei Andreas Steinbrich für die vielen hilfreichen Tipps zu Arc-GIS bedanken.

Mein Dank gilt auch Norbert Meier für die Erläuterungen zu den Hochwässern in Schmieheim, Hans Sigmund für den historischen Rundgang durch Herdern, Lutz-Peter Reuss und Heinz Haag von der Stadt Freiburg für die Informationen zur Hochwassersituation am Glasbach, Erik Henkel von der Badenova für die Kanalnetzkarten von Herdern und Hans-Peter Neff von Ernst & Co für die Darlegungen zum Hochwasserschutz im Ehrenbächle.

Ein großes Dankeschön möchte ich an Maria, Jakob, Manu, Bastian und Flo für die gute Arbeitsatmosphäre und die hilfreichen Korrekturvorschläge sowie an alle meine Kommilitonen für die schöne Studienzeit richten.

Zuletzt gilt mein besonderer Dank meiner Familie und Rocio die mich zu jeder Zeit unterstützten und mir ermutigend zur Seite standen.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vii
Abkürzungsverzeichnis	ix
Zusammenfassung	xi
Summary	xiii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Abflussprozesse und Hochwasserentstehung	3
2.2 Methoden zur Bestimmung dominanter Abflussbildung	9
2.3 Hochwasserrisikomanagement in kleinen Einzugsgebieten	12
2.4 Zusammenfassung	17
3 Ziele der Arbeit	19
4 Untersuchungsgebiete	21
4.1 Ehrenbächle	21
4.2 Glasbach	25
4.3 Schmieheim	28
5 Methoden	31
5.1 Bestimmung der dominanten Abflussprozesse	31
5.2 Kriterien für die Prozessbeurteilungs-Schemata	32
5.3 Berechnungsversuche	39
5.4 Regionalisierung der dominanten Abflussprozesse	41
5.5 Bearbeitung der LIDAR-Daten	41
5.6 Hochwasserstatistik in unbemessenen Einzugsgebieten	42
5.7 Evaluierung von Hochwasserschutzmaßnahmen	43

6	Niederschlag-Abfluss-Modellierung	45
6.1	Niederschlagsmenge und -intensität	45
6.2	Infiltration und Effektivniederschlag	48
6.3	Oberflächenabfluss	52
6.4	Gerinneabfluss	53
6.5	Zeitflächen und Abflussganglinie	55
6.6	Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse	55
7	Daten	57
7.1	Niederschlag	57
7.2	Abfluss	58
7.3	GIS-Daten, Boden- und Landnutzungsdaten	59
8	Ergebnisse	61
8.1	Messung von Niederschlag und Wasserstand	61
8.2	Ergebnisse der Feldarbeit	63
8.2.1	Beobachtungen in den Einzugsgebieten	63
8.2.2	Bodenprofile	64
8.2.3	Beregnungsversuche	66
8.3	Dominante Abflussprozesse	69
8.4	Fließwege und Abflusskonzentration	72
8.4.1	Fließgeschwindigkeit von Oberflächenabfluss	72
8.4.2	Einfluss von Waldwegen auf die Fließwege	72
8.4.3	Abflusskonzentration	75
8.5	Niederschlag-Abfluss-Modellierung	77
8.5.1	Bemessene Ereignisse	77
8.5.2	Rekonstruktion unbemessener Ereignisse	80
8.5.3	Bemessungsabflüsse	82
8.6	Sensitivitätsanalyse	84
8.7	Hochwassermanagement	87
9	Diskussion	91
9.1	Dominante Abflussprozesse	91
9.2	Fließwege und Abflusskonzentration	93
9.3	Niederschlag-Abfluss-Modellierung	94
9.4	Sensitivitätsanalyse	96
9.5	Hochwasserrisiko und Hochwasserschutz	97
10	Ausblick	101
	Literaturverzeichnis	103
	Appendices	115
A	Einzugsgebietskarten	119
B	Bodenansprachen	126
C	Beregnungsversuche	153
D	Eindrücke aus den Untersuchungsgebieten	154

Abbildungsverzeichnis

2.1	Abflussprozesse an einem Hang nach <i>Scherrer</i> (1997)	4
2.2	Hydrologische Prozesse und ihre charakteristische Raum- und Zeit- skala	8
2.3	Abflusshöhe und Zeitverzögerung der Abflussspitze	8
2.4	Konzeptionelles Modell der hydrologischen Wirkung von Forst- straßen	13
4.1	Geographische Lage der Untersuchungsgebiete	22
5.1	Vorgehensweise bei der Beurteilung von dominanten Abflussprozesse	33
5.2	Aufbau eines Beregnungsversuches	40
6.1	Schematischer Aufbau des Niederschlag-Abfluss-Modells	46
6.2	Intensitätsverteilung der Euler-Modellregen	47
6.3	Intensitätsverteilung der Modellregengruppe des BLfW	47
8.1	Niederschlag und Wasserstand für die Messperiode von August bis Dezember 2009	62
8.2	Ergebnisse der Beregnungsversuche in den Untersuchungsgebieten	67
8.3	Fließmuster an vier Beregnungsstandorten	68
8.4	Flächenanteile der dominanten Abflussprozesse in den Untersu- chungsgebieten	69
8.5	Fließwege ohne und mit verändertem DGM	73
8.6	Fließzeiten bis zum Gebietsauslass für das Glasbach-Einzugsgebiet und den Anderen Bach	74
8.7	Berechnete Isochronen und Abflussganglinien als Reaktion auf einen Niederschlag der Jährlichkeit 100 und der Dauerstufe 60 Minuten für den Glasbach	75
8.8	Berechnete Isochronen und Abflussganglinien als Reaktion auf einen Niederschlag der Jährlichkeit 100 und der Dauerstufe 60 Minuten für den Anderen Bach	75

8.9	Isochronen für die Gesamtfläche der Untersuchungsgebiete	76
8.10	Isochronen für die hortonischen Abflussprozesse	76
8.11	Berechnete und modellierte Ganglinie sowie beitragende Abflussprozesse für das Konvektivereignis im Einzugsgebiet des Dorfbachs in Schmieheim vom 10. August 2009	78
8.12	Berechnete und modellierte Ganglinie sowie beitragende Abflussprozesse für das Konvektivereignis im Einzugsgebiet des Anderen Baches in Schmieheim vom 10. August 2009	79
8.13	Berechnete und modellierte Ganglinie sowie beitragende Abflussprozesse für das Konvektivereignis im Glasbach-Einzugsgebiet vom 28. August 2009	80
8.14	Niederschlagsradar für das Ereignis vom 1. September 2008 in der Ortenau	81
8.15	Modellierte Ganglinie für das Konvektivereignis in Schmieheim am 1. September 2008	82
8.16	Modellierte Scheitelabflüsse der Untersuchungsgebiete	83
8.17	Anteil der Abflussprozessflächen am Scheitelabfluss	84
8.18	Sensitivitätsanalyse des Grenzwerte von Gerinneabfluss	85
8.19	Sensitivitätsanalyse der Fließgeschwindigkeit des Gewässers	85
8.20	Sensitivitätsanalyse der Oberflächenrauigkeit	86
8.21	Mögliche Standorte für zentrale Hochwasserrückhalteräume	89
9.1	Beispiel einer Vorrichtung zum Rückhalt von Schwemmgut	99
10.1	Historisches Hochwasserereignis am Glasbach vom 20. Juli 1911	102

Tabellenverzeichnis

5.1	Übersicht der in den PBS von <i>Scherrer</i> (2006) relevanten Kriterien	34
5.2	Manning's n-Werte und Strickler Werte für natürliche und künstliche Gerinne	44
6.1	Horton Parameter für unterschiedliche Bodenarten	49
6.2	Green und Ampt Parameter für unterschiedliche Bodenarten . . .	51
6.3	Manning's n-Werte für Oberflächenabfluss in Abhängigkeit der Landnutzung	53
6.4	Grenzwerte für Gerinneabfluss und Fließgeschwindigkeiten im Gerinne	54
7.1	KOSTRA Niederschlagsstatistik für das Glasbach Einzugsgebiet .	58
7.2	Datengrundlage für die Regionalisierung der dominanten Abflussprozesse und die Niederschlag-Abfluss-Modellierung	60
8.1	Berechnete mittlere Fließgeschwindigkeiten für Oberflächenabfluss	73
8.2	Verwendete Parameter für des Horton-Infiltrationsmodell	77
8.3	Übersicht zu Hochwasserereignissen in den Untersuchungsgebieten	87

Abkürzungsverzeichnis

BK	Bodenkundliche Karte
BLfW	Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft
DP	Deep Percolation
DRP	Dominant Runoff Processes
DWD	Deutscher Wetterdienst
G01...	Standortbezeichnung der Bodenprofile und Beregnungsversuche - E = Ehrenbächle, G = Glasbach, S = Schmieheim
HOF	Hortonian Overland Flow
HOST	Hydrology Of Soil Types
HRB	Hochwasserrückhaltebecken
KOSTRA	Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs Auswertungen
LIDAR	Light detection and ranging
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
MGN	Maximierte Gebietsniederschläge
PBS	Prozessbeurteilungs-Schema
SOF	Saturation excess overland flow
SSF	Subsurface Stormflow
TK	Topographische Karte
WaReLa	Water Retention by Landuse

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden vier kleine Einzugsgebiete im westlichen Schwarzwald auf dominante Abflussprozesse, bestehende Hochwasserrisiken und die Möglichkeiten zu deren Risikominimierung untersucht.

Hierfür wurden unterschiedliche Standorte in den Untersuchungsgebieten basierend auf Bodencharakteristiken unter Verwendung von Prozessbeurteilungs-Schemata auf dominante Abflussbildung untersucht. Berechnungsversuche mit Brilliant Blue FCF gefärbtem Wasser, zeigten deutliche Unterschiede hinsichtlich der Infiltrationsmechanismen einzelner Standorte und konnten dazu beitragen identifizierte Abflussprozesse zu verifizieren. Durch Feldbegehungen wurde das Drainagenetz von Waldwegen aufgenommen und eine allgemeine Charakterisierung des Gebietes hinsichtlich der Abflussbildung durchgeführt.

Ein einfaches, unkalibriertes Niederschlag-Abfluss-Modell wurde aufgestellt um gemessene und beobachtete Abflussereignisse zu rekonstruieren. Die Modellparameter basieren auf den durchgeführten Feldmessungen, digitalen topographischen Daten (LIDAR) und Werten aus der Literatur. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte eine große Bedeutung der berechneten Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses auf die modellierten Scheitelabflüsse auf. Die Fließgeschwindigkeit im Gerinne und der Grenzwert der Einzugsgebietsfläche für Gerinneabfluss, zeigte dagegen einen geringen Einfluss auf die Abflussspitze. Die Modellierung gemessener Abflüsse ergab ein geteiltes Bild. Während der Scheitelabfluss kleinerer Konvektivereignisse teilweise deutlich überschätzt wurden, konnte für ein Ereignis im Glasbach-Einzugsgebiet gute Resultate erzielt werden. Die Modellierung des Hochwasserereignisses in Schmieheim von 1. September 2008 zeigten für die Scheitelabflüsse plausible Werte. Die Resultate ließen sich jedoch aufgrund fehlender Abflussdaten nicht genau validieren.

Abschließend erfolgte eine Bewertung unterschiedlicher Maßnahmen zum Hochwasserschutz und zur Risikominderung. Dabei stellte sich heraus dass an einigen Gewässerabschnitten aufgrund reduzierter hydraulischer Leistungsfähigkeit, bereits ein 20-jährliches Hochwasserereignis nicht mehr abgeführt werden kann. Aus Beobach-

tungen vergangener Hochwasserereignisse wird berichtet, dass mitunter nicht die Abflusshöhe, sondern mitgeführtes Schwemmmaterial welches die hydraulische Leistungsfähigkeit heruntersetzt, zur Einschätzung eines Abflussereignisses als Hochwasser führte. Das Einbringen von Rechen innerhalb der tief eingeschnittenen Bachbetten im ländlichen Einzugsgebietsteil könnte durch Zurückhalten von Schwemmgut eine effektive Reduktion des Schadenrisikos bewirken. In zwei Einzugsgebieten konnten mögliche Standorte für Hochwasserrückhaltebecken identifiziert werden. Die durchgeführten Modellierungen stellen jedoch keine ausreichende Grundlage dar, um den Nutzen solcher Maßnahmen abschließend bewerten zu können.

Schlagwörter: *Dominante Abflussprozesse, kleine Einzugsgebiete, GIS-basierte Niederschlags-Abfluss-Modellierung, Hochwasserrisikomanagement*

Summary

The purpose of this thesis was the investigation of dominant runoff processes, flood risk and flood mitigation in four small catchments in the western Black Forest. A simple GIS-based rainfall-runoff model contributed to the analysis and reconstruction of individual observed flood events and the expected catchment response on design rainfall. Finally different options for flood risk mitigation were assessed.

Therefore a measurement campaign has been carried out in order to delineate dominant runoff processes in the investigated areas, mainly based on soil properties and decision schemes. Sprinkler experiments with the dye tracer Brilliant Blue FCF revealed distinct infiltration mechanisms and contributed to the verification of identified runoff processes. During several field surveys the natural and artificial drainage networks were mapped and a general characterisation of runoff production could be realized.

A simple rainfall-runoff model has been developed to reconstruct measured and observed runoff events. Model parameters are based on topographic data (LIDAR), literature or were collected in the field. A sensitivity analysis indicated the importance of overland flow velocity on the modelled peak runoff rate. The estimated channel flow velocity and the channel initiation threshold showed minor effects. The modelled results gave a diverse view. Peak runoff rates from small convective events were partly overestimated while a major event for which runoff could be calculated by water level measurements, showed good agreements. The reconstruction of a flood event in Schmieheim of the 1st of September 2008 gave reasonable results, although a detailed validation could not be realized because of lack runoff data or reliable observations.

Modelling of design precipitation indicated that some channel segments were not able to discharge an event with a 20 years recurrence period, due to reduced hydraulic conduction. Observations from past floods showed that in many occasions water quantity is not the single flood causing reason because the hydraulic radius is further reduced by floating debris. The installation of grates inside the deep channel

beds in the rural areas could lead to retention of floating debris and an effective risk mitigation. In two catchments possible locations for flood detention basins could be identified. However, the realized modelling in the present study does not yet provide a firm basis to assess the use of such a procedure.

Keywords: *Dominant runoff processes, small catchments, GIS-based rainfall-runoff modelling, flood risk management*

1 Einleitung

In kleinen Einzugsgebieten von der Größe weniger km^2 kommt es bei extremen Niederschlagsereignissen immer wieder zu Hochwässern mit großem Schadenspotential (*Mendel, 2005*). Abflussprozesse werden von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst und führen daher zu einem sehr individuellen Bild der Hochwasserentstehung (*Scherrer, 2007*). Intensive Forschungsbemühungen haben im Laufe der Zeit zu einem erweiterten und verbesserten Verständnis der Abflussbildungsprozesse geführt. Hiermit geht jedoch auch Anspruch, diese quantitativ zu erfassen und hinsichtlich ihrer Dominanz und ihres räumlichen und zeitlichen Auftretens zu bewerten einher.

Beregnungsversuche an Hängen (*Bunza & Schauer, 1989; Scherrer, 1997; Markart et al., 2004*) zeigten die Schlüsselrolle verschiedener Schnittstellen wie Vegetation und Bodenoberfläche für die Abflussbildung auf und führten zur Entwicklung von Geländeanleitungen und Bestimmungsschlüssel zur Identifikation und Quantifizierung hochwasserrelevanter Abflussprozesse auf der Einzugsgebietsskala. Auf diese Weise wird dazu beigetragen werden, Erkenntnisse aus der hydrologischen Prozessforschung auf Basis von im Feld messbaren Parametern in die angewandte Praxis zu überführen.

Für Einzugsgebiete von wenigen km^2 finden sich in der Regel keine gemessenen Abflüsse und auch das Fehlen anderer hydrologisch relevanter Parameter erschwert die Anwendung konventioneller Niederschlag-Abfluss-Modelle. Hinzu kommt, dass kleinräumige Niederschlagsereignisse, welche auch von einem dichten Messnetz an Niederschlagsstationen nur unzureichend erfasst werden, für die Hochwasserentstehung in diesen Einzugsgebieten von größerer Bedeutung sind.

Um Hochwasserrisiken und die Wirkung zentraler und dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen besser abschätzen zu können, ist jedoch gerade in kleinen Einzugsgebieten eine Kenntnis der zu erwartenden Abflüsse auf Niederschlagsereignisse hoher Jährlichkeit entscheidend.

2 Grundlagen

2.1 Abflussprozesse und Hochwasserentstehung

Welche Niederschlagsmenge und -intensität in einem Einzugsgebiet zu einer Hochwassersituation führt entscheidet sich an wenigen Schnittstellen. Der Vorgang der Infiltration ist für den Abflussprozess und den weiteren Weg des Wassers im Einzugsgebiet maßgebend. Ist die Menge an Wasser, die in den Boden infiltrieren kann gering, werden oberflächliche Abflussprozesse initiiert. Infiltriert das meiste Niederschlagswasser hingegen, wird es je nach Speicherkapazität, Bodenstruktur, bodenphysikalischen Parametern und der Geologie über längere Zeit gespeichert, perkoliert ins Grundwasser oder kann als schneller unterirdischer Abfluss (Subsurface Storm-flow) zum Ereignisabfluss beitragen. Im folgenden werden die wichtigsten Abflussprozesse in Anlehnung an *Naef et al.* (2000) und *Schmocker-Fackel* (2004) genannt. Abbildung 2.1 gibt einen schematischen Überblick der Abflussprozesse, die an einem Hang auftreten können.

Oberflächenabfluss (Surface Runoff)

Oberflächenabfluss wird von *Emmett* (1978) als "...flow of water over the land surface toward a stream channel..." definiert. Zu seiner Fließcharakteristik schreiben *Moore & Foster* (1990): "...overland flow can occur over large parts of the landscape...The flow may be laminar or fully turbulent, and it can exist as broad sheet flow or as flow in microchannels such as rills and ephemeral gullies...". Seine Entstehung wird allgemein zwei verschiedenen Mechanismen zugesprochen.

a) Hortonian overland flow (HOF) entsteht wenn die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate des Bodens übersteigt und nicht alles Niederschlagswasser infiltrieren kann. Vertikale Makroporen erhöhen die Infiltrationsrate (*Beven & Germann*, 1982) und reduzieren die Neigung von Böden zur Bildung von Oberflächenabfluss. HOF lässt sich weiter unterscheiden zwischen unmittelbar entstehendem Oberflächenabfluss (versiegelte Flächen) und verzögertem Horton'schen Oberflächenabfluss

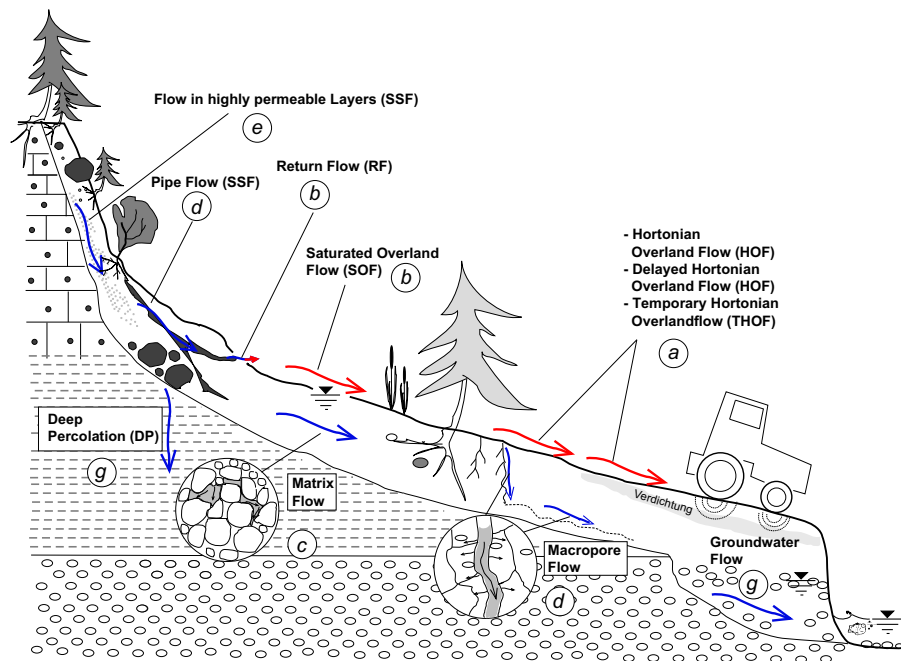


Abbildung 2.1: Abflussprozesse an einem Hang nach Scherrer (1997).

wenn die Infiltrationsrate mit zunehmender Bodenfeuchte abnimmt (Bergsma, 1983). Häufig beobachtet wurde das Phänomen, dass auf potentiell gut durchlässigen Böden Oberflächenabfluss entsteht, wenn die Oberfläche eine hydrophobe Eigenschaft aufweist. Dies kann aufgrund spezieller Humusformen, nach Bränden oder durch hydrophob wirkende Pflanzen geschehen (Doerr et al., 2000). Lässt die hydrophobe Wirkung nach einiger Zeit nach so spricht man von Temporary Hortonian Overland Flow (THOF).

b) Saturation Excess Overland Flow (SOF) wird als Abflussprozess wirksam, wenn sich die Speicherkapazität eines Bodens erschöpft hat und die gesättigte Zone bis an die Geländeoberfläche ansteigt. Fällt Niederschlag auf diese gesättigten Flächen, fließt er unmittelbar oberflächlich ab (Kirkby & Chorley, 1967). Tritt bereits infiltriertes Wasser wieder aus, so wird es als Return Flow (Dunne & Black, 1970) bezeichnet und kann ebenfalls zur Bildung von Sättigungsflächen und als Folge zu SOF beitragen.

Fließprozesse im Boden (Subsurface runoff)

c) Matrixfluss (Matrix flow) ist die Wasserbewegung durch die Mikro- und Mesoporen der Bodenmatrix unter gesättigten oder ungesättigten Bedingungen. Die Fließgeschwindigkeit des Matrixflusses hängt von der Textur des Bodens der Poren-

größe sowie vom Potentialgradienten ab, liegt aber meist im Bereich von nur einigen mm oder cm/h und ist deswegen für den Ereignisabfluss in kleinen Einzugsgebieten von untergeordneter Bedeutung.

d) Macropore flow ist der Wasserfluss durch Makroporen, der nur noch geringfügig von Kapillarkräften beeinflusst. Die große Querschnittsfläche der Makroporen ermöglichen einen schnellen vertikalen oder horizontalen Wassertransport. Makroporen entstehen unter anderem durch die Aktivität von Bodentieren, Absterben von Wurzelkanälen und durch Austrocknung entstandener Risse und Klüfte (*Beven & Germann, 1982; Bouma & Dekker, 1978*). Bereits in Makroporen mit einem Durchmesser unter 10 mm treten Fließgeschwindigkeiten von bis zu 2 cm/s auf (*Mosley, 1982*). Obwohl Makroporen nach *Chen & Wagenet (1992)* nur zwischen 0,2 und 5 % des Bodenvolumens ausmachen, können sie bedeutend zur Abflussspitze in Vorflutern beitragen (*Wilson et al., 1990*) und andere Arten von Subsurface Stormflow (SSF) initiieren *Weiler et al. (2005)*. Makroporen können aber auch hochwassermindernd wirken indem sie die Infiltration vergrößern (*Naef et al., 2000*) und als Bypass Flow selbst gering durchlässige Horizonte umgehen und so HOF und SOF reduzieren. Große Makroporen die untereinander in Verbindung stehen und teilweise durch Erosion vergrößert sind werden als ‘soil pipes’ (*Jones, 1971*) bezeichnet und können einen Hang besonders effektiv entwässern (*Weiler et al., 2005*).

e) Der Fluss in hochdurchlässigen Schichten (flow in highly permeable layers) ist eine weitere Form des Subsurface Stormflow und beschreibt den schnellen lateralen Wassertransport innerhalb gut durchlässiger Schichten (periglazialer Hangschutt, Übergang zwischen Boden und Grundgestein, etc.). Durch die turbulente Wasserbewegung in diesem Bereich kann Feinmaterial ausgewaschen und die Leitfähigkeit zusätzlich erhöht werden (*Weiler et al., 2005*).

f) Grundwasserabfluss (Groundwater flow) kann unter Umständen für den Ereignisabfluss von Bedeutung sein. Im Zusammenhang mit Grundwasser und Ereignisabfluss werden häufig zwei Phänomene genannt. Mit “Groundwater Ridging” (*Ragan, 1968; Sklash & Farvolden, 1979*) wird die Situation umschrieben bei der der Kapillarsaum des Grundwassers in der Talaue aufgrund eines Niederschlagsereignisses stark ansteigt, in großen Bereichen gesättigte Bedingungen schafft und durch den großen Potentialgradienten zum Vorfluter den Abfluss größerer Mengen an Grundwasser ermöglicht. Aufgrund der speziellen Bildungsvoraussetzungen scheint Groundwater Ridging in steilen, tief eingeschnittenen Oberfläufen keine entscheidende Rolle zu spielen (*Bonell, 1993*). Bei entsprechenden topographischen Gegebenheiten (konvexen Hänge) und der häufig mit der Tiefe abnehmenden hydraulischen Leitfähigkeit

können sich bei Niederschlagsereignissen hangparallele gesättigter Bereiche (hängende Grundwasserleiter) ausbilden bzw. anwachsen (*Uhlenbrook & Leibundgut, 1997*). Diese können zu einem Effekt führen der “Piston flow” oder “Translatory Flow” (*Hewlett & Hibbert, 1967*) genannt wird und durch Druckübertragung zu einem verstärkten Austritt von “altem” Grundwasser führt.

g) Tiefensickerung (Deep Percolation) ist dann der dominierende Prozess, wenn der geologische Untergrund im Einzugsgebiet aus gut durchlässigem Material wie verkarstetem Gestein, alluvialen Sedimenten oder stark geklüftetem Festgestein besteht. In diesen Fällen perkoliert das Niederschlagswasser bis zum Erreichen des Grundwasserspiegels und trägt zum Basisabfluss oder stark verzögert und in geringem Maß zum Ereignisabfluss bei.

Seit Beginn der hydrologischen Wissenschaften haben sich die Kenntnisse zu Abflussprozessen und Hochwasserentstehung von einfachen Ansätzen zu einer grundsätzlich komplexen und differenzierten Vorstellung gewandelt. *Horton (1933)* konnte durch Infiltrationsversuche im semi-ariden Südwesten der USA nachweisen, dass die Aufnahme von Niederschlagswasser des Bodens (Infiltrationsrate) mit der Zeit exponentiell abnimmt. Der Infiltrationsüberschuss muss folglich bei gegebenem Gefälle lateral auf der Oberfläche abfließen (Infiltration Excess Overland Flow). Gleichwohl sich flächenhaft bildender Oberflächenabfluss wie ihn *Horton* annahm in humiden, insbesondere bewaldeten Gebieten, selten beobachtet wurde (*Bonell, 1993; Pearce et al., 1986; Tanaka, 1992*), basiert ein Großteil der frühen Arbeiten zur Abflussbildung und Hochwasserentstehung auf diesem Konzept. Als wichtiger Grund dafür wird seine Kompatibilität mit dem Konzept der Einheitsganglinie nach *Sherman (1932)* genannt (*Merz & Bronstert, 2005*). Auf der Grundlage von *Hortons* Beobachtungen erstellte *Betson (1964)* das “Partial Area Concept”. Er ging davon aus, dass sich *Horton*’scher Oberflächenabfluss nicht einheitlich über die gesamte Fläche sondern nur in bestimmten Teilen des Einzugsgebiets (verdichtete Böden, anstehendes Gestein, etc.) bildet und so zum Ereignisabfluss beiträgt. Solche Flächen konnten in Untersuchungen in humiden Gebieten jedoch meist nicht in ausreichender Größe gefunden werden um für den Ereignisabfluss allein verantwortlich zu sein (*Hursh, 1936*). In diesen Regionen ging man davon aus dass der gesamte Niederschlag während eines Ereignisses infiltrieren kann, im Hang lateral abfließt und als Subsurface Stormflow unmittelbar (*Hursh & Brater, 1941*) oder in Folge von Bodenaufsättigung und Return Flow *Dunne & Black (1970)* als Saturation Excess Overland Flow zum Ereignisabfluss beiträgt. Die Lage solcher Sättigungsflächen sind insbesondere von der Topographie und den hydraulischen Eigenschaften des Bodens abhängig. Aus

der Vorstellung des Sättigungsoberflächenabflusses entwickelte sich das "Variable Sources Area Concept" (*Hewlett & Hibbert, 1967*), welches besagt, dass die Bereiche die Ereignisabfluss liefern (Sättigungsflächen) in Raum und Zeit variabel sind und sich während eines Ereignisses und zwischen zwei Ereignissen in ihrer Ausdehnung stark verändern können. *Hewlett & Hibbert (1967)* stellten außerdem fest, dass ein Großteil des Ereigniswassers "altes" Vorereigniswasser sein kann, welches über Druckübertragung durch "neue" Wasser verdrängt wird und ausfließt.

Dass der Wasserfluss im Boden nicht nur als Matrixfluss stattfindet sondern insbesondere Bereiche hoher Durchlässigkeit und Makroporen eine große Rolle für den Subsurface Stormflow spielen, zeigten unter Anderem *Jones (1971)* und *Beven & Germann (1982)*. Besonders in humiden Gebieten mit mächtigen, gut durchlässigen Böden und großem Gefälle kann Subsurface Stormflow einen Hauptbeitrag zum Ereignisabfluss liefern (*Anderson & Burt, 1990*). Die Modellierung der Abflussbildung auf der Hangskala (*Smith & Hebbert, 1983; Zuidema, 1985*) und Plotskala (*Leh et al., 2008*), Tracerversuche (*Pilgrim & Huff, 1978*) sowie die Erkenntnisse aus Beregnungsversuchen (*Markart & Kohl, 1995; Scherrer, 1997*) zeigten die Variabilität der Abflussprozesse innerhalb benachbarter Plots und im gesamten Einzugsgebietes auf. Dabei können grundsätzlich alle beschriebenen Abflussprozesse während eines Niederschlagsereignisses im Einzugsgebiet parallel ablaufen.

Das Auftreten und die Bedeutung von hydrologischen Prozessen ist neben den physiographischen Gegebenheiten im Einzugsgebiet vor allem von der betrachteten räumlichen und zeitlichen Skala abhängig (Abbildung 2.2 und 2.3).

Bereits bei dem hochwasserauslösenden Niederschlagsinput ist die charakteristische zeitliche und räumliche Skala von großer Bedeutung. Für kleine Einzugsgebiete sind meist kleinräumige konvektive Niederschläge mit hohen Intensitäten für die Hochwasserentstehung relevant (*Kleeberg & Rother 1996 in Bronstert et al. 2001*). Auch die Abflussprozesse selbst zeigen eine Skalenabhängigkeit, die für die Hochwasserbildung von großer Bedeutung ist. Mit steigender Einzugsgebietsgröße erhöht sich die Reaktionszeit der Abflussprozesse (Abbildung 2.3), während ihre Abflussspende sinkt (*Jones, 1997*). Zusätzlich nimmt die räumliche und zeitliche Variabilität des Niederschlages und die Heterogenität der physiographischen Faktoren zu, sodass sich einzelne Abflussspitzen stromabwärts nicht aufaddieren.

Sind in kleinen Einzugsgebieten zunächst noch flächenhafte Gebietsmerkmale in ihrer Wirkung auf die Höhe der Abflussspitze dominant, nimmt die Bedeutung des Wellenablaufes und die Aufenthaltszeit des Wassers im Gerinne mit zunehmender

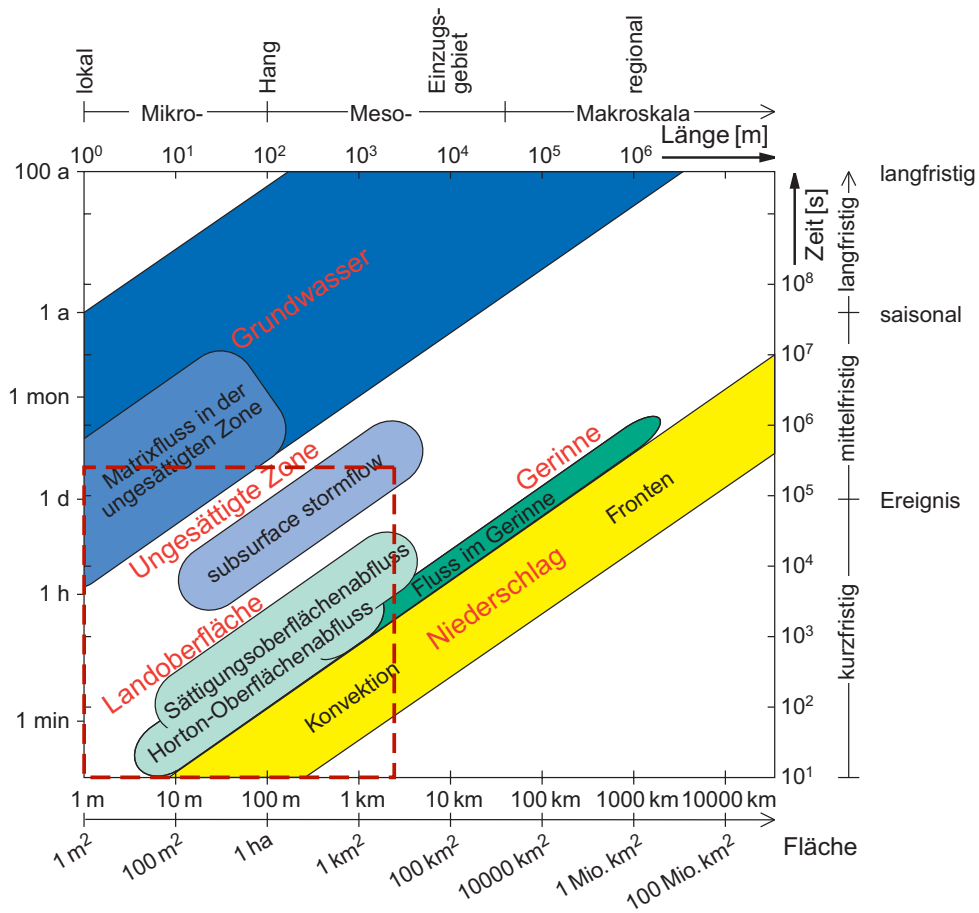


Abbildung 2.2: Hydrologische Prozesse und ihre charakteristische Raum- und Zeitskala verändert nach Bronstert et al. (2001).

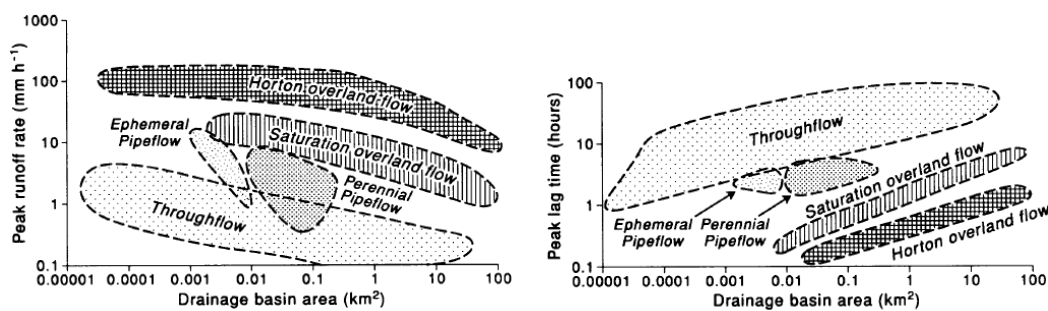


Abbildung 2.3: Abflusshöhe und Zeitverzögerung der Abflussspitze unterschiedlicher hydrologischer Prozesse nach Jones (1997).

Einzugsgebietsgröße zu (Bronstert et al., 2001). Die Längenskala von Abflussprozessen liegt im Bereich der sie auslösenden Niederschlagsereignisse, ihre zeitliche Skala

ist jedoch aufgrund der speziellen Entstehungsbedingung (abhängig von den dominanten Abflussprozessen) verschoben (*Blöschl et al.*, 1995). So ist die Entstehung von Sättigungsflächen abhängig von der Vorfeuchte und der Aufnahmefähigkeit der Böden für Niederschlagswasser und kommt meist verzögert zum Tragen. Horton'scher Oberflächenabflusses dagegen entsteht unmittelbar, sein Einfluss auf die Hochwasserwelle ist aber abhängig von der Fließlänge bis zum Gerinne, der Oberflächenrauigkeit, dem Muldenrückhalt und zahlreicher weiterer Faktoren. Die Abbildung 2.2 zeigt, dass in kleinen Einzugsgebieten eine Dominanz der schnellen Abflussprozesse zu erwarten ist und der Einfluss von Grundwasser und Matrixfluss demgegenüber in den Hintergrund tritt. Detaillierte Informationen zur Skalenfrage in der Hydrologie findet sich in *Blöschl & Sivapalan* (1995) und *Bronstert et al.* (2001).

2.2 Methoden zur Bestimmung dominanter Abflussbildung

Kenntnisse der räumlichen Lage unterschiedlicher Abflussprozesse in einem Einzugsgebiet lassen Rückschlüsse auf ihre Bildungsbedingungen und die Wirkung von Landnutzungsänderungen und dezentralem Hochwasserschutz auf die Hochwassergefährdung zu. Die räumliche Verteilung von dominanten Abflussprozessen ist neben der Frage nach ihren quantitativen Anteilen schon seit einiger Zeit Gegenstand intensiver wissenschaftlicher Forschung und führte zur Entwicklung unterschiedlicher Ansätze.

Erste Studien beschäftigten sich vor allem mit der Identifizierung der räumlichen Verteilung der beitragenden Areale aus Sättigungsflächenabfluss. *Dunne et al.* (1975) nutzten unterschiedliche morphologische, pedologische und vegetative Parameter um die Ausdehnung und räumliche Variabilität von Sättigungsflächen und den daraus generierten Abfluss während eines Niederschlagsereignisses zu ermitteln. Das Modell TOPMODEL (*Beven & Kirkby*, 1979) basiert maßgeblich auf dem Konzept der variabel beitragenden Sättigungsflächen, welche mit Hilfe des Sättigungsdefizits und dem topographischen Index für jeden modellierten Zeitschritt berechnet werden. In vergleichenden Untersuchungen konnte die Ausdehnung von Sättigungsflächen mit Hilfe des topographischen Indices in einigen Fällen nur unzureichend wiedergegeben werden (vgl. *Ambroise et al.*, 1996; *Beven*, 1997). *Güntner et al.* (2004) untersuchten unterschiedliche Geländeindizes auf ihre Eignung zur Bestimmung der räumlichen Verteilung von Sättigungsflächen. Obwohl der Topographische Index noch die beste

Abbildungskraft lieferte, sehen *Güntner et al.* (2004) Beschränkungen was mit den derzeit verfügbaren Ansätzen erreicht werden kann.

Auf der Basis von 150 Beregnungsversuchen untersuchten *Bunza & Schauer* (1989) den Einfluss von Vegetation, Böden, Geologie und Landnutzung auf den Oberflächenabfluss. *Markart et al.* (2004) erstellten aus ähnlichen Versuchen eine Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes bei Starkregen. Da sich Pflanzenvergesellschaftungen als sensitive Zeiger für Abflussprozesse herausgestellt haben (vgl. auch *Bunza & Schauer*, 1989), wird der Standort bei diesem Ansatz zunächst einer Vegetationseinheit zugeordnet. Diesen Einheiten wird im Anschluss eine Abflussbeiwertklasse unter Beachtung der Bodeneigenschaften, Landnutzung und Pflanzenindikatoren zugeordnet. Andere Abflusskomponenten als Oberflächenabfluss gehen nur indirekt in die Abschätzung mit ein und offen bleibt außerdem, ob eine Übertragung dieses Schemas auf Regionen außerhalb des alpinen Raumes, für welchen diese Methode entwickelt wurde, möglich ist.

Ein weiterer Ansatz, dominante Abflussprozesse für ein Einzugsgebiet auszuweisen, liegt in der Aufteilung des Gebietes in geomorphologische und naturräumliche Einheiten im Sinne einer Hydrological Response Unit (HRU), Gebiete also mit ähnlichem hydrologischem Reaktionsverhalten. Beispiele hierfür finden sich in *Flügel* (1995); *Uhlenbrook* (1999); *McGlynn & McDonnell* (2003). So konnte *Uhlenbrook* (1999) unter Anwendung tracerhydrologischer Untersuchungen einzelne Fließsysteme unterscheiden und diese in ihrem Auftreten bestimmten naturräumlichen Einheiten zuordnen. Die Zuordnen bedarf jedoch aufwendiger Untersuchungen und die Möglichkeit der Übertragung der gewonnenen Informationen auf andere Einzugsgebiete ist sehr beschränkt (*Schmocker-Fackel*, 2004).

Der Rolle des Bodens auf die Abflussbildung wird häufig eine herausragende Bedeutung zugesprochen (*Löhmansröben*, 2000). Bodenkarten liefern zwar teilweise sehr detaillierte Informationen über räumliche Verteilung von Bodentypen, jedoch lassen sich daraus nicht direkt Rückschlüsse auf die Art der Abflussbildung ziehen. Ein Versuch Bodentypen nach hydrologischen Gesichtspunkten zu beurteilen stellt die HOST-Klassifizierung (Hydrology Of Soil Types) des Institute of Hydrology in Großbritannien dar (*Boorman et al.*, 1995). Die Böden werden zunächst abhängig von der Lage des Grundwassers und vorhandener stauender Schichten in drei Bereiche aufgeteilt. Daraus lassen sich schließlich je nach Zugehörigkeit zu einem von 11 Fließmodellen 29 HOST-Klassen bilden. Die große Skala der veröffentlichten HOST-Karten (1:250 000) schränkt Verwendung für kleine Einzugsgebiete ein. Zudem kritisiert *Schmocker-Fackel* (2004) dass die HOST-Klassifikation vor allem

das hydrologische Langzeitverhalten von Böden wiedergeben, nicht jedoch die während extremer Ereignisse kurzzeitig auftretenden Prozesse wie präferentielles Fließen im Untergrund oder Oberflächenabfluss aufgrund von Hydromorphie und Bodenverdichtung.

Auf der Basis von Beregnungsversuchen von *Faeh* (1997) und *Scherrer* (1997) an verschiedenen Standorten in der Schweiz erstellte das Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft (IHW) der ETH-Zürich Prozessbeurteilungs-Schemata (PBS), welche anhand von Schlüsselkriterien eine Einschätzung des dominanten Abflussprozesses an einem Standort ermöglichen (*Naef et al.*, 2000). Inzwischen gibt es für unterschiedliche Landnutzungsarten und Niederschlagsintensitäten PBS (*Naef & Scherrer*, 2003; *Scherrer*, 2006), welche durch die Einschätzung lateraler Fließwegen und Stauschichten im Unterschied zur Methode von *Markart et al.* (2004) auch die Beurteilung von SSF als dominanten Abflussprozess ermöglichen. Die Berücksichtigung von Makroporosität, Verschlammungsneigung und Hydrophobizität erlauben einerseits eine detaillierte, realitätsnahe Prozessbeurteilung, andererseits erhöhen sich so die möglichen Freiheitsgrade und die Ansprüche an den Anwender. Im Rahmen des INTERREG-Projektes WaReLa (Water Retention by Landuse) wurden PBS nach dem Vorbild aus der Schweiz entwickelt welche eine Beurteilung der DRP ausschließlich unter Zuhilfenahme der forstlichen Standortkartierung ermöglicht (*Schüler*, 2005). Die forstliche Standortkarten beinhalten eine Vielzahl an Informationen zu Bodenart, Stratigraphie und hydromorphen Merkmalen, welche für große Bereiche des deutschen Staatswaldes in Form digitaler Karten im Maßstab 1:10 000 vorliegen. Ein zusätzliches Schema ermöglicht die differenzierte Herleitung von Abflussprozessen auf Waldwegen.

Vorgehensweisen wie die von *Markart et al.* (2004) und *Scherrer* (2006) sind in der erforderlichen Feldarbeit aufwendig und für Einzugsgebiete auf der Meso- und Makroskale nur schwierig umzusetzen. Zudem gibt es insbesondere bei der Regionalisierung Defizite und eine Reproduzierbarkeit ist nicht immer gewährleistet. GIS-basierte Methoden welche auf der Verschneidung unterschiedlicher hydrologisch relevanter Karten beruhen, könnten hier einen Ausweg darstellen. *Peschke et al.* (1999) entwickelten einen GIS-basierten Ansatz der Flächen gleicher Dominanz bestimmter Abflussprozesse ausweisen und so Hochwasserentstehungsgebiete identifizieren soll. Das Konzept wurde insbesondere in Sachsen großflächig angewandt. *Schmocker-Fackel et al.* (2007) entwickelten ein vereinfachtes PBS-Schema zur automatisierten Prozessbeurteilung per GIS und wendeten dieses an zwei kleinen Einzugsgebieten im Kanton Zürich an. Unter Verwendung einer sehr genauen Bodenkarte (1:5 000)

konnte für 67 % der Fläche der gleiche Abflussprozess ermittelt werden wie in der manuellen Kartierung und 24 % zeigten geringe Abweichungen. *Naef et al.* (2007) wendeten einen GIS-basierten Ansatz für den gesamten Kanton Zürich an und erhielten brauchbare Ergebnisse für die Hochwasserabschätzung.

2.3 Hochwasserrisikomanagement in kleinen Einzugsgebieten

Landnutzung und Hochwasser

Wie in den vorherigen Abschnitten dargelegt wurde, hat die Landnutzung einen entscheidenden Einfluss auf den Wasserhaushalt und die Hochwasserentstehung in einem Einzugsgebiet. Von allen Landnutzungsarten hat der Wald aufgrund zahlreicher Faktoren (siehe u. a. *Hewlett*, 1982) hinsichtlich des Wasserrückhalts und Hochwasserschutzes die günstigsten Eigenschaften *Peichl* (1998). Diese können jedoch durch forstwirtschaftliche Aktivitäten entscheidend beeinträchtigt werden. Neben der Verdichtung des Bodens durch forstwirtschaftliche Fahrzeuge (vgl. u. a. *Gardner & Chong*, 1990; *Schack-Kirchner & Hildebrand*, 2008) und der Förderung labiler Monokulturen, stellt insbesondere der Waldwegebau einen schweren Eingriff in das hydrologische Verhalten des Ökosystems Wald dar. Schon 1919 bemerkte *Engler* in seiner Studie über den “Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer”, dass der Abfluss von Wegen im Einzugsgebiet des Sperbelgrabens (Emmental) bei nur 3,8 % der Fläche zwischen 13 und 44 % des Spitzenabflusses ausmachten. Es folgten zahlreiche Studien die neben der Wirkung der Straßen auf den Spitzenabfluss (*Harr et al.*, 1975) auch einen positiven Zusammenhang zwischen forstlichem Straßenbau und verstärkter Erosion (*Reid & Dunne*, 1984), veränderter Gerinnemorphologie (*Beschta*, 1978) und erhöhte Gerinnenetzdichte (*Wemple et al.*, 1996) aufzeigten. Andere Studien ergaben eine sehr differenzierte Reaktion des Abflusses auf Abholzung und Straßenbau (vgl. *Wemple et al.*, 1996) und verdeutlichen, dass deren Wirkungen noch weitgehend unverstanden sind bzw. die Wirkung anderer Einzugsgebietsparameter unterschätzt wird. *Bronstert et al.* (2001) bemerkt, dass die hochwasserdämpfende Wirkung des Waldes häufig sehr undifferenziert gepriesen wurde. In einer Studie fanden *Beschta et al.* (2000) heraus, dass in kleinen Einzugsgebieten in Oregon ab einer Ereignisjährlichkeit von über fünf Jahren keine signifikante Erhöhung des Scheitelabflusses durch veränderte Bewaldung infolge von Kahlschlä-

ge erkennbar war. Sie widersprachen damit den Ergebnissen von *Jones & Grant* (1996) und *Thomas & Megahan* (1998) trotz gleicher Datengrundlage zu ein und demselben Untersuchungsgebiet. In der Theorie können Forststraßen die hydrologische Reaktion eines Einzugsgebietes laut *Wemple et al.* (1996) auf zweierlei Weise beeinflussen. Zum einen wird der abflusswirksame Niederschlag durch versiegelte Straßenflächen und das Auffangen von Oberflächenabfluss und oberflächennahem Interflow (intercepted subsurface flow *Megahan* 1972) erhöht und zum anderen wird die Entwässerung des Gebietes durch ein künstlich erweitertes Gerinnenetz effektiver (Abbildung 2.4).

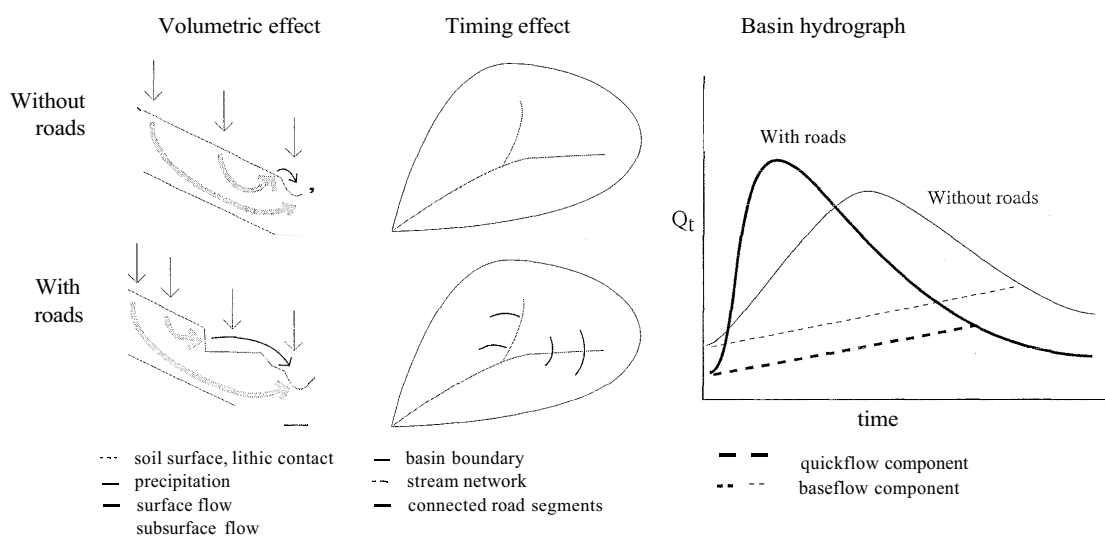


Abbildung 2.4: Konzeptionelles Modell der hydrologischen Wirkung von Forststraßen auf a) Erhöhung des effektiven Niederschlages (volumetric effect); b) Steigerung der Entwässerungseffizienz durch eine höhere Gerinnenetzdichte (timing effect). Aus *Wemple et al.* (1996).

Wemple et al. (1996) berichten, dass ein großer Anteil der Forststraßen des von ihnen untersuchten Gebietes hydraulisch an das Gewässernetz angeschlossen ist und so die Gewässernetzdichte um bis zu 50 % erhöht wird. In einer weiteren Studie fanden *Wemple & Jones* (2003) heraus, dass ein Großteil der Bedeutung von Straßen auf den Abfluss von der entwässernden Hanglänge, der Bodenmächtigkeit und der Einschnitttiefe durch die Straße in den Hang erklärt werden kann. Welche Bedeutung die Vorfeuchte und die Niederschlagsmenge auf den durch Straßen beigetragenen Anteil des Abflusses hat, zeigt eine Studie von *Woldie et al.* (2009). Bei trockenen Bedingungen belief sich dieser Anteil an der Abflussspitze in dem untersuchten Oberlauf auf bis zu 70 % wohingegen er bei großer Vorfeuchte einen Anteil von unter 6 % ausmachte. Obwohl der Einfluss der forstwirtschaftlichen Tätigkeit des Menschen auf das hydrologische System in den letzten Jahrzehnten zunehmende wissenschaftliche

Aufmerksamkeit erlangte, sind viele Fragen nach wie vor ungeklärt. *Thomas & Megahan* (1998) bemerken dazu: "Given the complex nature of the effects of forest cutting and roads on streamflow, it is not surprising that the literature provides mixed messages about peakflow responses...". Ohne die notwendige differenzierte Betrachtungsweise von hydrologischen Vorgänge in einem Einzugsgebiet zu vernachlässigen sollte dennoch verstärkt versucht werden Erkenntnisse zu konzeptionalisieren um primäre Steuergrößen zu finden, die eine Übertragung der Erkenntnisse auf andere Einzugsgebiete erlauben.

Nach Angaben des Umweltbundesamtes (*UBA*, 2004) liegt der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche an der Gesamtfläche in Deutschland im Jahr 2002 bei 12,5 % mit weiterhin steigender Tendenz. Dabei ist etwa die Hälfte dieser Fläche als versiegelt einzustufen. Nach *Harms* (1986) sind die potentiellen Auswirkungen dieser Flächen auf das Hochwassergeschehen eine Erhöhung der Scheitelabflüsse, Vergrößerung der Hochwasserfülle und zeitliche Vorverlagerung der Wellenscheitel. Auch wenn versiegelten Flächen prinzipiell eine hochwasserfördernde Wirkung zugesprochen wird (*Bronstert et al.*, 2001), hängt deren Effekt neben anderen Faktoren auch von der Niederschlagsintensität und -menge sowie der Lage im Einzugsgebiet ab. Mit zunehmender Jährlichkeit nimmt der Einfluss der Versiegelung ab, weil dann auch das Speichervermögen unversiegelter Bereiche überschritten werden kann (*BLfW*, 2004). Ob diese Aussage auch auf Starkniederschläge zutrifft wird nicht erwähnt.

Über 50 % der Fläche Deutschlands wird landwirtschaftlich genutzt. Die zunehmend mechanisierte und intensivisierte Landwirtschaft führt in weiten Teilen Deutschlands zu einer veränderten Lagerungsdichte und zu einem gestörten Wasserhaushalt. Insbesondere schluffreiche und tonarme Böden sind durch ihre geringe Aggregatstabilität anfällig für Bodenverdichtung und Oberflächenversiegelung durch Verschlämmung (*Fenner*, 1997). Linienhafte Landschaftsstrukturelemente und Drainagen fördern ein schnelles Abfließen von Niederschlagswasser. Extensivierte Landwirtschaft mit bodenkonservierenden Verfahren (Direktaussaat, Fruchtfolgen, Pflugrichtung senkrecht zum Gefälle) können zu einer höheren Infiltration und verbesserten Wasserrückhalt in der Landschaft beitragen. So berichten *Schmidt et al.* (2005) in einer Studie in sächsischen Lößgebieten von einer verbesserten Aggregatstabilität, einer dreimal so hohen Regenwurmdichte und einer zwei mal höheren Anzahl vertikaler Makroporen auf Flächen mit konservierender Bodenbearbeitung im Vergleich mit konventioneller (Pflug). Laut *Bronstert et al.* (2001) sind zahlreiche Wirkungen der Veränderung von Landnutzung auf den Hochwasserabfluss noch weitgehend unverstanden und eine Abschätzung der Wirkung von Zukunftsszenarien auf das

Hochwasserrisiko schwierig.

Hochwasserschutz in kleinen Einzugsgebieten

Die Frage nach der Abfluss- und Hochwasserentstehung ist mit der nach der Möglichkeiten zum Hochwasserschutz meist eng verknüpft. Nach Jahrzehnten des zentralisierten Hochwasserschutzes an den großen Flüssen entsteht mehr und mehr die Erkenntnis, dass dezentrale Maßnahmen teilweise kostengünstiger, effektiver und umweltverträglicher sein können und zusätzlich bereits bei den Oberliegern für einem gewissen Hochwasserschutz sorgen. Das dies notwendig ist, zeigt sich daran, dass beispielsweise in Baden-Württemberg 60 % der Schadensregulierungen der Versicherungen in Folge von Hochwasser außerhalb der großen Flusstäler anfallen (*LAWA*, 1995). Maßnahmen zum Hochwasserschutz werden in der Regel in zwei Kategorien aufgeteilt, den technischen Hochwasserschutz und den vorsorgenden Hochwasserschutz. Der technische Hochwasserschutz besteht aus meist punktuellen baulichen Maßnahmen wie Hochwasserdämmen, Hochwasserrückhaltebecken, Poldern und mobilen Schutzeinrichtungen ohne sich mit den hochwasserauslösenden Prozessen und Flächen zu befassen. Der dezentrale Hochwasserschutz versucht dagegen durch flächenhafte Maßnahmen wie Verbesserung des Speicherrückhalts durch die Landschaft (Landnutzungsänderung, Entsiegelung, Bodenschutz) und Wiederherstellung von Überflutungsgebieten (Gewässerretention) hochwasserbedingte Schäden vom Menschen fern zu halten. Welche Maßnahmen wo eingesetzt werden können, ist dabei von den naturräumlichen Gegebenheiten abhängig.

Für kleine Einzugsgebiete kann der dezentrale, integrierte Hochwasserschutz aus sehr unterschiedlichen Maßnahmen bestehen. Um der oft hochwasserfördernden Wirkung des Wegenetzes zu begegnen wird die breitflächige Wasserableitung aus den Wegflächen oder zumindest eine hohe Dichte ausreichend großer Drainagen empfohlen (*Peichl*, 1998). Nicht mehr benutzte oder eingetiefte Wege sollten zurückgebaut bzw. aufgefüllt werden (*Schüler*, 2003). Kleine Flutmulden entlang der Waldwege können zusätzlichen Retentionsraum bereitstellen und nebenbei auch eine positive ökologische Wirkung haben (*Mendel*, 2005; *Schüler*, 2007). Eine bodenschonende Holznutzung und Walderschließung sowie die Wiederaufforstung mit standortangepasster Vegetation stellt einen wichtigen Beitrag zur Stabilität der Waldflächen gegen Sturmwurf und Schädlingsbefall dar (*Peichl*, 1998). Eine Veränderung der Landnutzung kann sich dann hochwassermindernd auswirken wenn sie zu einem verlangsamtten Abflussprozess oder zu einer höheren Infiltrationskapazität führen (*Naef et al.*, 2002). Hochwasserschäden sind häufig nicht nur durch übertretende Bäche und

Flüsse bedingt sondern auch durch eine ungenügende oder ineffiziente Entwässerung von Siedlungsflächen. Eine dezentrale Versickerung in Mulden oder Rigolen (Regenwasserbewirtschaftung) kann hier einen wichtigen Beitrag zum Hochwasserschutz liefern und die häufig fallenden Grundwasserspiegel in Siedlungsgebieten anheben. Das Konzept der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung schreitet insbesondere in Neubaugebieten voran und ist in den Wasserhaushaltsgesetzen der Länder teilweise vorgeschrieben (Wintrich, 2009). Der “Aktionsplan Hochwasser” der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins IKSR (1998) zeigt, dass man sich selbst in großen Einzugsgebiete eine Abnahme der Hochwassergefährdung durch Entsiegelung der Landschaft erhofft.

Kleine dezentrale Hochwasserrückhaltebecken können als technische Maßnahmen den vorbeugenden Hochwasserschutz wirkungsvoll ergänzen. So konnte eine Untersuchung von Wegner (1992) an einem 55 km² Einzugsgebiet zeigen, dass bei Ereignissen mit geringer Jährlichkeit der Abflussscheitel um bis zu 100 % reduziert werden kann. Für Ereignisse mit der Jährlichkeit HQ₁₀₀ ist dagegen nur eine Reduktion um maximal 10 - 20 % möglich. Ley (2006) konnte für ein 8 km² großes Einzugsgebiet feststellen, dass naturnahe Kleinstrückhaltebecken mit einem Gesamtvolumen von 50 000 m³ in der Lage sind den Scheitelabfluss auch bei Ereignissen großer Jährlichkeit um über 40 % zu reduzieren. Dabei war die Scheitelminderung stark von den Einstaubedingungen (Drosselsteuerung) abhängig und beruhte fast ausschließlich auf der Wirkung von Rückhaltebecken über 9 000 m³.

Von großer Bedeutung in kleinen Einzugsgebieten für die Einstufung von Hochwasser als “Problem”, ist häufig dass verbaute Bachabschnitte in ihrer Abflusskapazität unterdimensioniert sind und selbst Abflüsse mit geringer Jährlichkeiten nicht abgeführt werden können. Hier können Renaturierungsmaßnahmen zum einen die Hochwassergefährdung entschärfen und zum anderen die ökologische Funktion und den Erholungswert des Gewässers für den Menschen verbessern.

Inzwischen wird dezentraler Hochwasserschutz in großem Umfang umgesetzt. Die Bayrische Landesregierung stellt im Rahmen des Programmes “Nachhaltiger Hochwasserschutz in Bayern - Aktionsprogramm 2020 für Donau- und Maingebiet” bis zum Jahr 2015 2,3 Mrd. Euro überwiegend für den vorbeugenden Hochwasserschutz zur Verfügung. Projekte wie das INTERREG Projekt WaReLa (Water Retention by Landuse) sollen auf multinationaler Ebene die Kenntnisse zum dezentralen Wasserrückhalt erweitern und zur Erstellung eines konkreten Maßnahmenkatalog führen (Schüler, 2007).

Bronstert et al. (2001) konnte aus seinen Modellversuchen einige allgemein gültigen kausale Zusammenhänge zwischen Niederschlagscharakteristika und dem Einfluss der Landoberfläche aufstellen, welche auch für kleine Einzugsgebiete relevant sind. Der Einfluss der Landoberfläche (Landnutzung, Versiegelung, etc.) auf die Hochwasserentstehung steigt mit zunehmender Niederschlagsintensität und nimmt mit zunehmendem Niederschlagsvolumen ab. Ist die Kapazität der Speicher überschritten, hat deren Speichereigenschaft keinen Einfluss mehr auf den Hochwasserverlauf. Dies wird auch durch *Wood et al.* (1990) bestätigt wonach der Hochwasserabfluss aus Oberflächenabfluss mit steigender Jährlichkeit zunehmend von der Niederschlagscharakteristik bestimmt wird und die Gebietseigenschaften in den Hintergrund treten. Dies macht deutlich dass der Einfluss des Menschen auf Hochwässer natürliche Grenzen gesetzt sind und es daher niemals einen hundertprozentigen Schutz vor Hochwasser und deren verursachten Schäden geben kann. Aus dieser Erkenntnis geht die Bedeutung der Aufklärung der Bevölkerung vor den natürlichen Gefahren des Wassers als Teil des Hochwasserschutzkonzeptes hervor. Weiterhin ist festzuhalten, dass die Verringerung der Schadensrisiken in hochwassergefährdeten Zonen mitunter den effektivsten Hochwasserschutz darstellen kann.

2.4 Zusammenfassung

Die Identifikation von dominanten Abflussprozessen und hochwasserrelevanten Kriterien in kleinen Einzugsgebieten beschäftigt die Forschung bereits seit längerem. In jüngster Zeit konnte insbesondere aufgrund verbesserter Verfügbarkeit unterschiedlicher hydrologisch relevanter Daten mit höherer räumlicher Auflösung sowie einem detaillierterem Prozessverständnis Fortschritte in der Abflussprozessforschung in kleinen Einzugsgebieten erzielt werden. Trotz einer Vielzahl von Prozessen die man heute mathematisch formulieren und modellieren kann bleibt die Wahl geeigneter Modellparameter ein konstantes Problem.

3 Ziele der Arbeit

Zahlreiche Studien (*Scherrer, 1997; Naef & Scherrer, 2003*) belegen wie unterschiedlich einzelne Flächen und Einzugsgebiete hinsichtlich ihrer dominanten Abflussbildungsprozesse und der entsprechenden Abflussreaktion auf Niederschlagsereignisse sein können. Im Gegensatz zu Einzugsgebieten größerer Skala finden sich in kleinen Einzugsgebieten aufgrund der geringen finanziellen Mittel und schlechten Datenlage selten konkrete Vorkehrungen zum Hochwasserschutz und zur Risikominimierung. Hinzu kommt noch, dass die schnellen Reaktionszeit auf Niederschlagsereignisse die Möglichkeiten der Hochwasservorsorge und -vorhersage stark einschränken. Fehlende Daten im Besonderen zu Niederschlags- und Abflussereignissen machen eine Hochwasserstatistik sowie eine Niederschlag-Abfluss-Modellierung mittels physikalischer oder konzeptioneller hydrologischer Modelle problematisch. Umso wichtiger ist es, anwendungsorientierte Methoden zu entwickeln, die eine Identifizierung der dominanten Abflussprozesse bei unterschiedlichen Niederschlagsereignissen erlauben. So können Gründe für eine bestehende Hochwasserproblematik aufgezeigt und Möglichkeiten des individuellen Hochwasserschutzes untersucht werden.

Daher wurden in dieser Arbeit vier kleine Einzugsgebiete im westlichen Schwarzwald auf dominante Abflussprozesse und die Möglichkeiten zur Hochwasserrisikominimierung untersucht. Folgenden Fragen wurde dabei nachgegangen:

1. Was sind die dominanten Abflussprozesse in den Untersuchungsgebieten und inwieweit unterscheiden sich diese?
2. Lassen sich beobachtete Abflussereignisse mit einem unkalibrierten Niederschlag-Abfluss-Modell abbilden?
3. Welche Faktoren haben den größten Einfluss auf die Modellunsicherheit und wie kann der Unsicherheitsbereich reduziert werden?
4. Was sind Ursachen für ein bestehendes Hochwasserrisiko und welche Möglichkeiten finden sich dieses zu reduzieren?

Die Beantwortung dieser Fragen könnte dabei helfen die Wirkung von Hochwasserschutzmaßnahmen besser zu quantifizieren und wirkungsvoller zu gestalten.

4 Untersuchungsgebiete

Die in dieser Arbeit untersuchten Einzugsgebiete liegen im Westrandbereich des mittleren und südlichen Schwarzwaldes und zeigen hinsichtlich ihres klimatischen Einflusses ähnliche Charakteristiken auf. Bei der Auswahl der Einzugsgebiete wurde auf unterschiedliche Landnutzung und geologischen Untergrund geachtet um hinsichtlich der Abflussbildung möglichst unterschiedliche Gebiete untersuchen zu können. Die Lage der in dieser Studie untersuchten Gebiete ist in der Abbildung 4.1 dargestellt. Einen guten Überblick über die hydrologischen, bodenkundlichen und klimatischen Verhältnisse der gesamten Region finden sich im Wasser- und Bodentlas Baden-Württemberg (*LUBW*, 2007b) und dem Klimaatlas Oberrhein Mitte-Süd – REKLIP (*Fiedler*, 1995). Ausführliche kartographische Darstellungen von Geologie, Pedographie, Topographie und Landnutzung sowie eine tabellarische Zusammenfassung der Gebietscharakteristika finden sich im Appendix A.

4.1 Ehrenbächle

Naturräumliche Lage und Morphologie

Das Einzugsgebiet des Ehrenbächle liegt an der Ostseite des Schönberges welcher mit 645 m ü. NN die höchste Erhebung der Vorbergzone ist und unmittelbar an das kristalline Grundgebirge des Schwarzwaldes angrenzt. Das Einzugsgebiet des Ehrenbächle nimmt bis zum Hochwasserrückhaltebecken (HRB) "Ehrenmatte" eine Fläche von 0,7 km² ein. Es erstreckt sich in einem schmalen Band in West-Ostrichtung vom Schönberggipfel bis zum HRB oberhalb der Gemeinde Merzhausen und weist dabei eine Höhendifferenz von 340 m auf. Sein mittleres Gefälle beträgt 12° wobei eine auffällige Steilstufe im oberen Drittel des Einzugsgebietes den Übergang vom Opalinuston zum kompakten und harten Hauptrogenstein bildet und das Gebiet morphologisch zweiteilt (*Genser*, 2006).

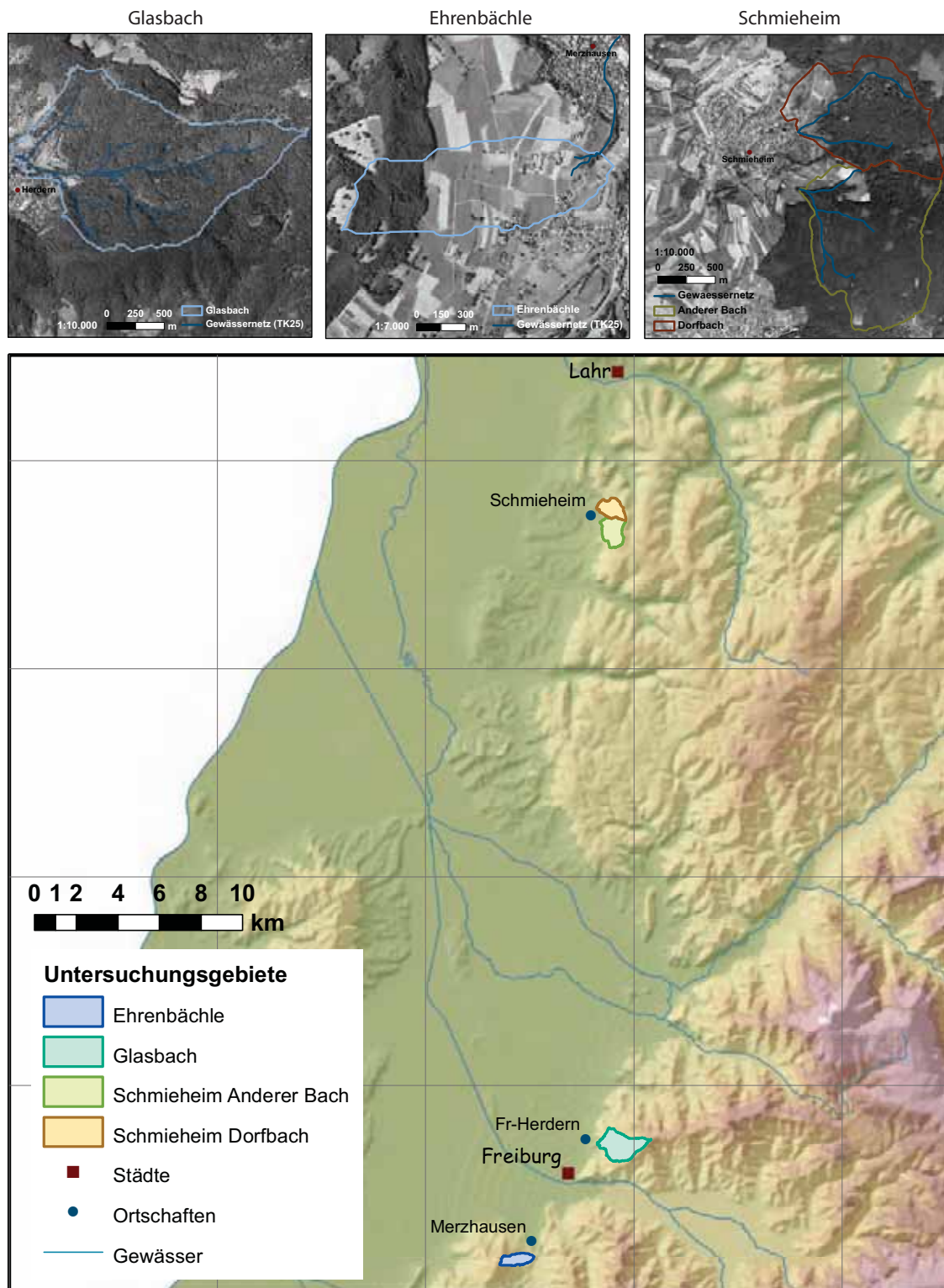


Abbildung 4.1: Geographische Lage der Untersuchungsgebiete (Kartengrundlage WaBoA, digitale Ausgabe 2007)

Klimatische Verhältnisse

Wie die gesamte Westseite des Schwarzwaldes wird auch der Schönberg klimatisch von der zyklonalen Westwindzone geprägt. Durch den nordsüdlich verlaufenden Oberrheingraben erfährt der geostrophische Westwind allerdings in großen Bereichen eine erhebliche Veränderung und wird zu einem Süd- bis Südwestwind kanalisiert (*Fiedler*, 1995). Die Windrichtung und der Windvektor kann aber kleinräumig stark variieren. Regionale Klimadaten werden für das Schönberggebiet nicht erfasst, weshalb auf Werte benachbarter Stationen zurückgegriffen werden muss. Die Region wird im Winter von zyklonalen, geringintensiven Frontalniederschlägen und im Sommer von konvektiven Starkniederschlägen durch heranziehende Kaltfronten dominiert. Für den unteren Teil des Einzugsgebietes kann ein mittlerer Jahresniederschlag von etwa 1000 mm angenommen werden mit einem Niederschlagsmaximum zwischen Mai und Juli. Für das etwas südlicher gelegene Dorf Wittnau gibt *Rudloff* (1965) einen mittleren Jahresniederschlag von 1025 mm an. Aufgrund von fehlenden Messungen kann keine Aussage darüber getroffen werden ob die Lage des Einzugsgebietes auf der Lee-Seite des Schönberges einen Einfluss auf die Höhenverteilung der Niederschläge hat. Zu erwarten ist jedoch eine orographisch bedingte Zunahme des Jahresniederschlages mit der Höhe die in vergleichbaren Gebieten zwischen 50 und 100 mm pro 100 m beträgt. Voll wirksam wird der Luv-Effekt aber erst bei Höhen ab 900 m ü. NN (*Weischert*, 1979).

Geologie

Die Geologie am Schönberg ist äußerst abwechslungsreich und komplex und auf der Ostseite im Bereich des Untersuchungsgebietes des Ehrenbächle dreigeteilt. Der untere Teil des Einzugsgebietes besteht noch aus dem kristallinen Grundgebirge des Schwarzwaldes, welcher hier als meist sehr tiefgründig verwitterter Paragneis ausgewiesen ist. Oberhalb daran schließen sich Gesteine aus der Epoche des Mittleren Jura an. Überwiegend Opalinuston, Hauptrogenstein und Ornatenton. Die Kuppe des Schönberges ist mit Konglomeraten aus dem Eozän und Unteroligozän bedeckt, welche hauptsächlich aus Hauptrogenstein bestehen (*Genser*, 2006; *LGRB*, 1996b). Hydrogeologisch wird der größte Teil des Einzugsgebietes als Grundwassergeringleiter beschrieben (*LUBW*, 2007b). Der mächtige Komplex des Hauptrogensteins im oberen Teil des Einzugsgebietes ist aufgrund der intensiven Tektonik von vielen Klüften und Verwerfungen durchsetzt und weist eine Anfälligkeit für Verkarstung auf (*Genser*, 2006). An der Oberfläche sichtbare Verkarstungsformen können allerdings nur an wenigen Stellen des Einzugsgebietes beobachtet werden. Eine geologische Störungszone durchläuft das Gebiet in Nordost-Südwest-Richtung mit einigen rechtwinklig

angeordneten kleineren Störungen insbesondere im Bereich des Haupttrogensteins.

Böden

Die Böden am Schönberg entwickelten sich überwiegend aus periglazialen Hangschuttdecken meist aus Löß oder Lößlehm (*Genser, 2006; Hädrich & Stahr, 1997*). So finden sich im oberen Teil des Einzugsgebietes flachgründige, skelettreiche Rendzinen. Im Bereich des eisenreichen Haupttrogensteins dominiert die Terra Fusca mit ihrem tonreichen T-Horizont und dem typischen Polyedergefüge als reliktscher Boden aus Warmzeiten des Pleistozän und Tertiär. Wegen der geringen Wasserspeicherkapazität und dem einseitigen Nährstoffangebot wird dieser Boden nicht landwirtschaftlich genutzt (*Hädrich & Stahr, 1997*). Bei nennenswerten Löß- und Lößlehmresten in den tiefer liegenden Lagen der Terra fusca, führten die Prozesse der Entkalkung, Verlehmung und Verbraunung zur Ausbildung eines Bv-Horizontes. Dieser Boden wird gemeinhin als Terra fusca-Braunerde bezeichnet. Im unteren Teil des Ehrenbächle finden sich tonreiche Parabraunerden aus Lößlehm und vereinzelt Pelosole und Pelosol-Braunerden. Diese Böden zeichnen sich durch ihre hohe Fähigkeit zu Quellung und Schrumpfung aus. Daher sind sie aus hydrologischer Sicht in ihrer Infiltrationsleistung und ihrem Wasserhaushalt starken witterungsbedingten Schwankungen unterworfen.

Landnutzung

Die Landnutzung im Ehrenbächle ist in den unteren zwei Dritteln der Fläche von intensiver Weidewirtschaft und etwas Ackerbau geprägt, und im oberen Drittel von einem forstwirtschaftlich genutzten, buchendominierten Mischwald bedeckt. Siedlungsflächen machen nur einen kleinen Teil des Einzugsgebietes aus führen aber zusammen mit dem relativ dichten Wegenetz dazu dass etwa 8 % des Gebietes komplett oder teilweise versiegelt sind.

Hydrologie

Das Ehrenbächle tritt, abgesehen von den Entwässerungsgräben welche teilweise entlang von Wege und Straßen zu finden sind, morphologisch erst 300 Höhenmeter unterhalb des Schönberges auf. Die natürliche Entwässerungsnetzdicke ist mit 0,5 km/km² äußerst gering ausgebildet, wird aber durch die Drainage- und Entwässerungsgräben auf 1,4 km/km² beinahe verdreifacht. Das Ehrenbächle führt auch in sehr trockenen Perioden meist noch Wasser und wird dann von drei Quellaustritten gespeist die nahe einer unterirdisch verlaufenden Abschiebung zu Tage treten. Oberhalb der Quellaustritte sind keine morphologischen natürlichen Gerinnemerkmale zu beobachten. Das Hochwasserrückhaltebecken "Ehrenmatte" wurde in den 70er Jahren erreicht und hat einen maximal wirksamen Stauraum von etwa 11.500

m^3 (Ernst & Co, pers. Mitteilung, Februar 2010).

4.2 Glasbach

Naturräumliche Lage und Morphologie

Das Einzugsgebiet des Glasbachs liegt an der Westflanke des Rosskopfes (737 m ü. NN) am Westrand des Schwarzwaldes. Der Glasbach durchfließt den Freiburger Stadtteil Herdern und mündet in den Nordarm des Gewerbekanals (Rossbach). Der hier untersuchte Teil des Einzugsgebietes, bis kurz oberhalb der Einmündung in den herdermer Dorfkern, bedeckt eine Fläche von 2,2 km² und ist zum größten Teil von Wald bedeckt. Vom Rosskopf bis nach Herdern (275 m ü. NN) legt er dabei eine Höhendifferenz von 462 m zurück. Das mittlere Gefälle des Einzugsgebietes ist mit 19° sehr steil. Die große Reliefenergie zur Freiburger Bucht, führte wie in großen Teilen der westlichen Schwarzwaldabdachung zu einer Bildung von tief in das Kristallineingeschnittener fluviatiler Erosionsformen, die im süddeutschen als Tobel oder Dobel bezeichnet werden und die Topographie entscheidend prägen. Die Hauptentwässerung des Gebietes verläuft in Ost-Westrichtung entlang des Bruderhausdobels, wobei insbesondere im unteren Bereich zahlreiche kleinere Seitentäler in den Glasbach münden. An diesen Stellen wird die Talsohle breiter und die steilen Hänge gehen stellenweise in einen schmalen Bereich mit Talböden geringer Neigung über.

Klimatische Verhältnisse

Klimatisch wird der Glasbach, wie bereits für das Ehrenbächle erläutert, von der zyklonalen Westwindzone beeinflusst. Der mittlere Jahresniederschlag im Stadtgebiet (DWD-Station Freiburg-Herdern, 1961 - 1990) beträgt 1001 mm mit einem Monatsmaximum von 120 mm im Juni (*Mühr*, 2010). Für die höheren Lagen des Einzugsgebietes existieren keine Messwerte. Die interpolierten Werte aus dem Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (*LUBW*, 2007b) geben hierfür eine Spanne von 1200 bis 1400 mm an. Für das gesamte Einzugsgebiet kann somit ein Jahresniederschlag zwischen 1100 und 1200 mm angenommen werden. Dem Höheneffekt ist im Winter bei überwiegend von Westen heranziehenden Fronten eine höhere Bedeutung zuzuordnen als im Sommer, wenn der Niederschlag vor allem aus Konvektiveignissen resultiert. Die mittlere Lufttemperatur im Stadtbereich liegt bei 10,8 °C. Es ist von einer Temperaturabnahme mit der Höhe von 0,4 - 0,7 °C (je nach vorliegender Luftmasse) pro 100 m auszugehen (*Parlow & Rosner*, 1997).

Geologie

Das Einzugsgebiet des Glasbachs liegt auf dem kristallinen Grundgebirge des Schwarzwaldes und wird als solches von Paragneis dominiert. Diese aus präkambrischen Sedimenten durch lokale Metamorphose entstandenen Gesteine zeichnen sich durch eine typische Schieferung aus und bestehen hauptsächlich aus Quarz, Feldspäten (Plagioklas, Orthoklas) und Glimmer (Biotit). In den höheren Lagen treten vereinzelt Amphibolite und Serpentine auf, die sich vor allem in ihrem Mineralgehalt deutlich vom Paragneis unterscheiden. Das Grundgebirge kann aufgrund seiner homogenen geologischen Beschaffenheit als hydrogeologische Einheit angesehen werden. Obwohl die hydraulische Durchlässigkeit im Gneis mit Werten zwischen 10^{-10} und 10^{-5} m/s eine beträchtliche Spanne abdeckt (Stober, 1995), wird er meist als Geringleiter klassifiziert und seine Durchlässigkeit als sehr schlecht beschrieben (LGRB, 1998b). Welche Bedeutung der Klüftung für die Leitfähigkeit in diesem Gebiet zukommt, lässt sich ohne intensive Untersuchungen nicht sagen. In Steinbrüchen die im Einzugsgebiet häufiger anzutreffen sind, lässt sich eine ausgeprägte Klüftung erkennen die jedoch keine Vorzugsrichtung (ungegliedert) zu besitzen scheint. Mehr noch als der Festgesteins-Grundwasserkörper können die periglazialen Hangschuttdecken ein Hauptumsatzraum für das eingetragene Niederschlagswasser sein (Uhlenbrook, 1999). Im Einzugsgebiet des Glasbachs sind diese insbesondere an den steilen Hängen verbreitet zu finden und liegen dort teilweise direkt auf der Geländeoberfläche auf. Die Hangschuttdecken gehen auf intensive physikalische Verwitterung im tropischen Klima des Pleistozän und der überprägenden Wirkung der glazialen und periglazialen Phasen im Holozän mit fluviatiler Erosion zurück (Stahr, 1979). Die Durchlässigkeiten der Hangschuttdecken können sehr variabel sein. Werte bis zu 10^{-2} m/s konnten mit Hilfe von Tracerversuchen ermittelt werden (Uhlenbrook, 1999), was Ihnen einen Beitrag zur Komponente des Ereignisabflusses ermöglicht. Sauer (1967) gibt für die Schuttdecken des Grundgebirgsschwarzwalds eine meist schlechte Leitfähigkeit aufgrund der geringen Mächtigkeit und der starken Reduktion des Porenraums durch den hohen Anteil bindiger Beimengungen an. Eine ausführliche Beschreibungen der Genese, des Aufbaus und der hydrogeologischen Bedeutung der Hangschuttdecken finden sich bei Stahr (1979), Hädrich & Stahr (1997) und Uhlenbrook (1999).

Böden

Im Gneisschwarzwald zeigt sich generell eine starke Abhängigkeit der holozänen Bodenbildung vom Ausmaß der Bildung, Verlagerung und Erhaltung von Frostschuttdecken (Hädrich & Stahr, 1997). In die submontanen Fußzone bis etwa 600 m ü. NN wurden in den Kaltphasen des Pleistozän größere Lößmengen eingeweht, die

anschließend zum größten Teil erodiert oder unter periglazialen Bedingungen mit dem Gneischutt vermischt wurden. Aus dem kristallinen Ausgangsmaterial und den Paragneisschutt führenden Fließerden bildeten sich vorwiegend Braunerden aus. Bei fehlendem Hangschutt, was insbesondere im Bereich der Sattelflächen gegeben ist, bildeten sich geringer mächtige Braunerden direkt auf dem anstehenden Paragneis bzw. Amphibolit aus. In den Talböden sind durch den Einfluss von Hang- und Stauwasser pseudovergleyte Parabraunerden auf lößlehmreichen Fließerden zu finden, deren Gründigkeit sich deutlich von den Böden am Hang unterscheiden kann.

Landnutzung

Oberhalb des Eintritts des Glasbachs in den besiedelten Bereich ist das Einzugsgebiet zu 100 % bewaldet. In den Höhenlagen oberhalb von 600 m dominieren Fichtenwälder, darunter Buchen-Mischwälder. Das Siedlungsgebiet (ca. 5 % des Einzugsgebietes) ist vergleichsweise locker bebaut, dürfte aber das Abflussgeschehen im unteren Teil des Einzugsgebietes erheblich beeinflussen (vgl. *Egger*, 2003; *Guwang*, 2004). Weinbauflächen und extensiv beweidete Wiesen machen mit 3,5 % einen geringen Teil der Gesamtfläche aus. Ein dichtes Netz aus Forstwegen und Straßen durchzieht das Gebiet und nimmt 4 % der bewaldeten Fläche ein.

Hydrologie

Das Gewässernetz des Glasbachs besitzt ein für den Schwarzwald typisches dendritisches Muster mit einer hohen Gewässernetzdichte von $3,2 \text{ km/km}^2$, was ein Indikator für Erosion als Folge von oberflächennahen Abflussprozessen ist. Der nach Norden exponierte Teil des Einzugsgebietes weist dabei eine um ein Drittel höhere Gewässernetzdichte auf als der nach Süden exponierte Teil und liefert einen Rückschluss auf die Bedeutung des Bodenwasserhaushaltes auf die Abflussbildung. Der Glasbach fällt auch im Sommer nur äußerst selten trocken (*Egger*, 2003), was auf eine gewisse Speichereigenschaft des Einzugsgebietes bzw. auf langsame Abflusskomponenten hinweist. Zahlreiche Querbauwerke wie Brücken oder verdolte Abschnitte unter Waldwegen und Straßen verringern den natürlichen Abflussquerschnitt zum Teil beträchtlich. Insbesondere bei sommerlichen Starkniederschlägen kommt es dort häufiger zu Ansammlungen von Schwemmgut und einem Übertritt des angestauten Gewässers was Schäden an Infrastruktur und dem Vollaufen von Kellern der Anlieger zur Folge haben kann. Zum Glasbach liegen keine längerfristigen hydrometrischen Messungen vor. Für kürzere Zeitabschnitte wurde der Glasbach im Rahmen von Diplomarbeiten (*Egger*, 2003; *Guwang*, 2004; *Adolph*, 2005; *Hugenschmidt*, 2005) untersucht, größere Abflussereignisse konnten dabei jedoch nicht bemessen werden. Aus Dorfchroniken und Medienberichten lässt sich nur ein ungenaues Bild der Ab-

flussereignisse am Glasbach erstellen. In einer Untersuchung zur Hochwasserrisikominimierung am Glasbach gibt des *Garten- und Tiefbauamt Freiburg* (2008) an, dass zahlreiche Bachabschnitte im Siedlungsgebiet ein 20-jährliches Hochwasserereignis nicht ohne Ausuferungen des Gewässers abführen könnten.

4.3 Schmieheim

Naturräumliche Lage und Morphologie

Die Ortschaft Schmieheim befindet sich am Westrand des Mittleren Schwarzwaldes an der Grenze zur Oberrheinischen Tiefebene etwa 10 km südlich von Lahr. Die hier untersuchten Einzugsgebiete Dorfbach und Anderer Bach haben eine Fläche von 0,96 km² bzw. 1,25 km² und sind im oberen Teil überwiegend von Wald bedeckt. Die Einzugsgebiete erstrecken sich vom 476 bis auf 200 m ü. NN an der Einmündung der Bäche in die Ortschaft. Das mittlere Gefälle ist mit 12° eher moderat. Im südlicher gelegenen Einzugsgebiet des Anderen Baches markiert eine Steilstufe den Übergang vom Mittleren- zum Oberen Buntsandstein und geht oberhalb in einen schwach geneigten Bergrücken über. Die Hauptgerinne sind tief eingeschnitten während kleinere Zuflüsse häufig unvermittelt und verhältnismäßig nahe an der Wasserscheide morphologisch in Erscheinung treten. Hierbei sind besonders die Quellaustritte an der Grenze zwischen dem Oberen- und Unteren Buntsandstein auffällig.

Klimatische Verhältnisse

Wie die anderen Einzugsgebiete liegt auch Schmieheim in der zyklonalen Westwindzone. In den Einzugsgebieten selbst gibt es keine Klimastationen. Für Lahr betrug der mittlere Jahresniederschlag für die Klimanormalperiode 1961-1990 863 mm mit einem Maximum von 100 mm im Mai und Juni (*Mühr*, 2010). Die weiteren klimatischen Parameter sind mit denen der anderen Untersuchungsgebiete vergleichbar.

Geologie

Der Aufbau des Untergrundes der Region von Schmieheim ist der Geologischen Übersichtskarte Maßstab 1:350 000 *LGRB* (1998b) entnommen. Die geologischen Verhältnisse in den Einzugsgebieten von Schmieheim werden von Buntsandstein aus dem Untertrias dominiert, der hier in Form kleinerer isolierter Schollen nach dem Einbruch des Oberrheingrabens erhalten geblieben ist und nach Westen einfällt (*LGRB*, 1998a). Sonst ist Buntsandstein im Schwarzwald hauptsächlich an der Ostabdachung verbreitet. In Schmieheim liegt in den Hochlagen und den niederen Bereichen der Einzugsgebiete Oberer Buntsandstein (Röt-Formation) vor, der

aus feinkörnigen Sandsteinen mit eingelagerten Ton-Schluffpartien besteht. Dieser wird als Grundwassergeringleiter eingestuft (*LGRB*, 1998b). Dazwischen wurde der Obere Buntsandstein an einer Steilstufe bis auf den darunter liegenden Mittleren Buntsandstein erodiert. In diesem Bereich können Hangschuttdecken auf dem anstehenden Gestein gefunden werden. Der Mittlere Buntsandstein besteht aus mittel- bis feinkörnigem Sandstein mit einzelnen grobkörnigen Lagen. Er wird aus diesem Grund als Kluftgrundwasserleiter eingestuft. In Teilen des Einzugsgebietes des Dorfbaches sowie auf der höchsten Erhebung des Einzugsgebietes des Anderen Baches findet sich eine geringmächtige Auflage von Muschelkalk aus dem Mittleren Trias. Holozäne Lößablagerungen bedecken den unteren Teil des Oberen Buntsandsteines im Einzugsgebiet des Dorfbaches bis auf eine Höhe von 250 m ü. NN.

Böden

Zur Beschreibung der Böden im Einzugsgebiet dient die Bodenkarte BK50 (*LGRB*, 1996a). Demnach dominieren im bewaldeten Einzugsgebiet Braunerden und geringmächtige podsolige Braunerden über dem Hangschutt des Oberen Buntsandsteines. Unterhalb von 300 m hat sich aus Lößablagerungen Parabraunerde gebildet. Auf landwirtschaftlich genutzten Flächen findet man gut durchwurzelbare Pararendzina teilweise im Übergang zum flachgründigeren Rigosol. Im direkten Gewässerumfeld des Anderen Baches gibt es Bereiche mit Kolluvium-Gley aus holozänen Abschwemmmassen.

Landnutzung

Knapp 90 % des Einzugsgebietes des Anderen Baches sind mit Wald bedeckt der hier als buchendominierter Mischwald auftritt. Einzelne kleinere Flächen wurden mit Nadelbaum-Monokulturen bepflanzt. Größere Sturmwurfflächen finden sich insbesondere im südlichen Teil der Einzugsgebiete. Wiesen und Rebflächen bedecken 7 % der Fläche. Der Anteil an Siedlungsfläche ist vernachlässigbar klein. Ein dichtes Wegenetz beansprucht 2,5 % der Einzugsgebietsfläche des Anderen Baches. Das Verhältnis von Wald zu Wiese, Rebflächen und Kleingartenanlagen beträgt für das Einzugsgebiet des Dorfbaches etwa drei Viertel zu einem Viertel. Versiegelte und teilversiegelte Siedlungsflächen nehmen hier 2 % des Einzugsgebietes ein, Straßen und Waldwege 4 %.

Hydrologie

Die Gewässernetzdichte in Schmieheim beträgt, basierend auf der TK25 (*LVBW*, 2007) und eigenen Beobachtungen, 2,7 km/km² (Dorfbach) und 1,9 km/km² (Anderer Bach). Die meisten Gerinne führen nur als Reaktion auf Niederschlagsereignisse, Wasser was auf einen hohen Anteil schneller Abflusskomponenten hinweist. Im Um-

kehrschluss bedeutet dies eine geringe Durchlässigkeiten und Speichereigenschaften für das anstehenden Gesteins und des Bodens bzw. eine geringe Interaktion von Grundwasserkörper und Gewässer. Einzig der Dorfbach führt auch nach längeren Trockenperioden noch geringe Mengen an Abfluss. Die Gewässer in Schmieheim werden wie bereits für das Glasbach-Einzugsgebiet erwähnt, häufig von Querbauwerken unterbrochen und sind ab dem Eintritt in die Ortschaft komplett verdolt. Bei entsprechenden Niederschlagsereignissen reicht die Abflusskapazität der hart verbauten und verdolten Gewässerabschnitte für eine Abführung des Niederschlagswassers nicht mehr aus. Anwohner berichten über größere Mengen an Geschiebe und Geschwemmsel, welche die Rechen vor der Verdolung zusetzen und so zu einer Verschärfung des Problems führen. In den vergangenen Jahren entstanden immer wieder beträchtliche Schäden durch Hochwässer die inzwischen dazu geführt haben dass sich die Gemeinde intensiv mit der Problematik befasst und nach Lösungen sucht.

5 Methoden

5.1 Bestimmung der dominanten Abflussprozesse

Als Grundlage zur Bestimmung der dominanten Abflussprozesse in der vorliegenden Arbeit diente der „Bestimmungsschlüssel zur Identifikation hochwasserrelevanter Flächen“ (*Scherrer*, 2006). Wichtigstes Werkzeug waren hierbei Prozessbeurteilungsschemata (PBS), welche auf der Grundlage von umfangreichen Messungen von Abflussprozesse und Abflussreaktionen künstlich beregneter Flächen an Hangstandorten in der Schweiz entwickelt wurden (*Scherrer*, 1997; *Faeh*, 1997). Die PBS sind als Entscheidungsbäume aufgebaut, die anhand von Schlüsselkriterien an sogenannten Knoten oder key-points eine sukzessive Bestimmung eines Abflussprozess am Untersuchungsstandort ermöglichen sollen. Die Kriterien basieren in erster Linie auf Morphologie, Geologie, Vegetation, Bodeneigenschaften und Landnutzung.

Die meisten Kriterien sind qualitativer Natur auf der Basis anerkannter Praxis oder DIN-Normen und können weitgehend direkt im Feld bestimmt werden. Aus *Scherrer* (2006) können Entscheidungsbäume für die Landnutzungsarten Grünland (Wiese und Weide), Acker, Weinberge und Wald entnommen werden, wobei es für die ersten drei in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität unterschiedliche Prozessbeurteilungsschemata gibt. Es wird zwischen gering intensivem aber lang anhaltendem Niederschlag (<20 mm/h) und intensivem, kurzem Starkregen (>20 mm/h) unterschieden. Laut *Scherrer* (2006) ergeben sich die Unterschiede der PBS bei geringer und hoher Niederschlagsintensität hauptsächlich aus der unterschiedlichen Wirksamkeit der Makroporen. Der Übersichtlichkeit wegen gibt es für Grund- und Stauwasser beeinflusste Standorte einiger Landnutzungsarten eigene Schemata. Einige Kriterien (z. B. Hydrophobizität, Deckungsgrad oder Makroporosität) beziehen sich auf Eigenschaften die ereignisabhängig sind oder einer jahreszeitlichen Veränderung unterliegen. Bei deren Beurteilung ist einzuschätzen wie wahrscheinlich solche Zustände sind. Vor der eigentlichen Standortuntersuchung im Feld sollte eine ausführliche Vorerkundung des zu kartierenden Gebietes erfolgen um repräsentative

Flächen zu identifizieren, die dann später auf dominante Abflussprozesse untersucht werden können. Topographische Karten und digitale Höhenmodelle geben bereits im Voraus wichtige Hinweise auf die hydrologischen Gebietseigenschaften. So deutet beispielsweise eine hohe Gerinnenetzdichte auf einen bedeutenden Beitrag schneller Abflussprozesse hin und steile Hänge sind mit einer Voraussetzung für das Auftreten von Subsurface-Stormflow (SSF). Vernässungsstellen lassen sich im Feld unter anderem anhand des Auftretens Feuchte liebender Vegetation erkennen und gehen häufig auf das Ausstreichen gering durchlässiger Schichten oder abrupte Änderungen der Hangneigung zurück *Scherrer* (2006). Unterirdische Abflussprozesse wie SSF gelangen hier als Return Flow (RF) wieder an die Geländeoberfläche. Oberflächennahe Abflussprozesse lassen sich auch aufgrund der erosiven Kraft des Wassers erkennen. Hierbei können historische und rezente sowie flächen- und linienhafte Erosionsformen unterschieden werden. Gerinnemorphologische Kenngrößen wie Querschnitt, Fließspuren, Korngrößenzusammensetzung des Gerölls u. a. sind als Hinweise auf die Größe und Häufigkeit des Abflusses zu deuten und bieten eine integrierte Information über die Abflussprozesse im Einzugsgebiet. Die Bestimmung dominanter Abflussprozesse verlangt neben hydrologischem Sachverstand auch eine strukturierte und durchdachte Vorgehensweise. Die Abbildung 5.1 aus *Scherrer* (2006) liefert einen Vorschlag zur Vorgehensweise bei der Bestimmung der dominanten Abflussprozesse in einem Einzugsgebiet.

5.2 Kriterien für die Prozessbeurteilungs-Schemata

Die PBS sind modular aufgebaut und behandeln die Kriterien des Untergrundes am Standort in Form vier grob aufgeteilter Kompartimente nämlich Oberfläche, Oberboden, Unterboden/Geologie. Eine Übersicht zu allen relevanten Kriterien der PBS mit ihrer Bedeutung für die Abflussprozesse und ihrer Bestimmung sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Detaillierte Beschreibungen finden sich in *Naef et al.* (2000) und *Scherrer* (2006).

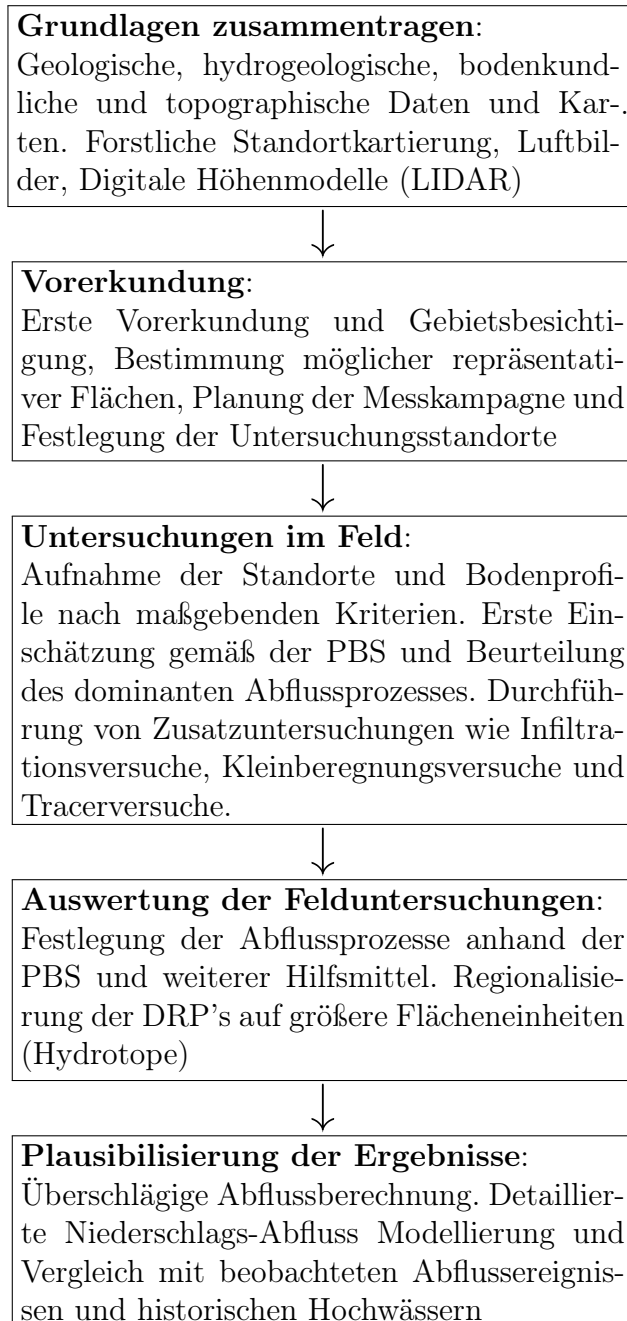


Abbildung 5.1: Vorgehensweise bei der Beurteilung von dominanten Abflussprozesse nach den PBS von *Scherrer* (2006).

Tabelle 5.1: Übersicht der in den PBS von Scherrer (2006) relevanten Kriterien.

Kriterium	Bedeutung	Beschreibung
Oberfläche		
Bedeckungsgrad	Schutz der Bodenoberfläche vor Regenschlag	Senkrechte Projektion des Pflanzenbestandes auf die Aufnahmefläche
Verschlämmungsgrad	Infiltrationshemmnis durch dichtes Kohrentgefüge ohne Makroporen und Neigung zu Oberflächenabfluss und Bodenerosion	Entmischung von Schluff- und Tonleichen und wenige mm mächtigen Schluffschicht
Hydrophobizität/hydrophobe Humusformen	Infiltrationshemmnis durch wasserabweisende Oberfläche und Neigung zu temporärem oder dauerhaftem Oberflächenabfluss und Bodenerosion	Water Drop Penetration Time (WDPT-Test) nach <i>Letey & Angle</i> (1969). Messung der Zeit bis zur Benetzung eines auf die Bodenoberfläche aufgetragenen Wassertropfens
Hangneigung	Fließgeschwindigkeit von Oberflächenabfluss und SSF, Voraussetzung zur Entstehung von SSF	Bestimmung im Feld mittels Neigungsmesser oder aus dem digitalen Geländemodell (DGM)
Oberflächenrauigkeit	Wasserrückhalt durch Mikrotopographie der Geländeoberfläche (Muldenrückhalt)	Abschätzung/Messung im Gelände
Oberboden		
Trockenrohdichte/geschätzte Packungsdichte	Einfluss auf Aktivität von bodenlebender Organismen, Porengrößenverteilung, Makroporosität Wurzeldichte und damit auf den Sekundärporenanteil der sich entscheidend auf die Wasserleitfähigkeit und Infiltrationsrate des Bodens auswirkt	Bestimmung anhand bodenkundlicher Feldmethoden (mechanischer Eindringwiderstand, Aggregatgröße, Zusammenhalt des Bodengefüges, Lagerungsart, Wurzelverteilung, Anzahl biogener Makroporen) oder volumetrisch im Labor über die Bodendichte
Matrixdurchlässigkeit	Einfluss auf Infiltrationsrate und Wasserleitfähigkeit des Bodens durch die Primärporen	Bestimmung der Korngrößenverteilung und Zuordnung hydraulischer Leitfähigkeiten

Makroporosität	Einfluss auf Infiltrationsrate, Umgehung von gering durchlässigen Schichten (Bypass Flow)	Stichprobenhafte Zählung der Makroporen in horizontalen Bodenschichten unterschiedlicher Tiefe vorzugsweise nach Beregnungsversuchen mit Brilliant Blue FCF (BB)
Verschlämmungsneigung	Infiltrationshemmis durch dichtes Kohärenzgefüge, Verschluss von Makroporen, Neigung zu Oberflächenabfluss und Bodenerosion	Entmischung von Schluff- und Tonfeilen und wenige mm mächtigen Schluffschicht
Unterboden		
Matrixdurchlässigkeit	s. o.	s. o.
Makroporosität	s. o.	s. o.
Gründigkeit	Maßgebend für Wasserspeicherkapazität, Sättigungsflächenabfluss (SOF) sowie Fließwege und Fließzeiten im Boden	Bestimmung mittels Pürckhauer-Bohrstab und aus Literaturwerten
Laterale Fließwege/Drainagen	Ausbildung von lateralem unterirdischem Abfluss, Gebietsentwässerung und Fließzeit bis zum Vorfluter	Sprünge in der Bodendichte, visuell sichtbare gut leitende Schichten im Untergrund, Auftreten von stauenden Schichten, Verwitterungsschichten, Drainagekarten sowie Befragung von Landwirten
Flurabstand zum Grundwasser	Ausbildung von SOF	Grundwassergleichenkarten, Vergleichungsmerkmale im Boden
Vergleichungsmerkmale/Grad und Lage der Vergleichungsmerkmale	Hinweis auf ständige oder temporäre Beeinflussung des Bodens durch Stauwasser	Visuell anhand von Vergleichungsmerkmalen
Geologie		
Durchlässigkeit der Geologie	Einfluss auf Tiefenversickerung	Hydrogeologische Karten

Im Folgenden soll auf einige wichtige Kriterien zur Beurteilung der dominanten Abflussprozesse näher eingegangen werden.

Hydrophobizität Wasserabweisende oder schwer zu benetzende Oberflächen sind ein in der Bodenkunde weitverbreitetes Phänomen und auf die hydrophobe Eigenschaft unpolarer Bestandteile des Bodens oder der Auflage zurück zu führen. Sie können bereits in sehr kleinen Mengen eine wasserabweisende Eigenschaft des Bodens hervorrufen (*Doerr et al.*, 2000). Wachse von Blättern und Nadeln, langkettige organischen Bestandteilen und wasserabweisenden Pflanzenoberflächen sind Hauptgründe für die hydrophobe Eigenschaft eines Bodens. Es wird zwischen persistenter und vorübergehender Hydrophobizität unterschieden. Ein weit verbreiteter - weil einfach anzuwendender Test - um Hydrophobizität zu bestimmen ist der „WDPD-Test“ (Water Drop Penetration Time). Hierbei wird die Zeit bis zur Benetzung eines auf die Bodenoberfläche aufgetragenen Wassertropfens gemessen. Laut *Scherrer* (2006), der die hydrophobe Klassifizierung der Böden von *Bisdorf et al.* (1993) verwendet, ist bei einer Benetzungszeit von mehr als 600 Sekunden bereits von persistenter Hydrophobizität auszugehen. Bei Starkniederschlägen können bereits Benetzungszeiten ab 60 Sekunden zu temporärem Hortonischem Oberflächenabfluss (THOF) führen.

Gründigkeit Die Mächtigkeit des effektiv durchwurzelbaren Bodens wird häufig als Gründigkeit bezeichnet. Eine physiologische Grenze der Durchwurzelung kann dabei sowohl das anstehende Gestein als auch ein verdichteter Bodenhorizont sein. Der Mächtigkeit des Bodens kommt insbesondere in Zusammenhang mit der Wasserspeicherung eine große Bedeutung für die Abflussbildungsprozesse zu. *Hopp & McDonnell* (2009) zeigten eine deutliche Abnahme der Reaktionszeit und des Spitzenabflusses aus SSF mit steigender Bodenmächtigkeit. Während die Bodenmächtigkeit für HOF keine direkte Bedeutung hat, ist sie für die Entstehung von SOF ein entscheidendes Kriterium. Die Bodenmächtigkeit wurde in der vorliegenden Arbeit mit einem ein Meter langen Pürckhauer-Bohrstock ermittelt. In der Praxis liegt seine maximal mögliche Eindringtiefe bei 80 – 90 cm. Wird die Eindringtiefe des Gerätes nicht pedologisch oder geologisch begrenzt, kann davon ausgegangen werden, dass die Gründigkeit noch größer ist. Größere Eindringtiefen ermöglicht eine Rammkernsondierung, ihr Transport und Einsatz stellt jedoch einen erheblichen Mehraufwand zum Einsatz des Pürckhauer dar.

Packungsdichte/Trockenrohdichte Die Verdichtung des Bodens kann im Gelände anhand qualitativer bodenkundlicher Feldmethoden oder quantitativ über die Trockenrohdichte mittels Stechzylinder bestimmt werden (*Ad-hoc-AG Boden*, 2005). In *Scherrer* (2006) wird die Bodenverdichtung in fünf Klassen von Pd 1 (sehr gering, $<1,2 \text{ g/cm}^3$ bis Pd 5 (sehr hoch, $>1,8 \text{ g/cm}^3$) eingeteilt. In den PBS gilt eine Matrix als verdichtet wenn die Packungsdichte der Klasse Pd4 oder Pd5 zugeordnet werden kann. Die Klasse Pd3 liegt im Übergangsbereich und erfordert eventuell weitere Untersuchungen.

Makroporosität Eine verlässliche Quantifizierung von Makroporen ist schwierig. Sie konnte anhand von stichprobenhaften Feldzählungen meist nur an den Standorten erfasst werden, an denen Beregnungsversuche mit Brilliant Blue durchgeführt wurden. Dabei wurden an horizontalen Bodenschnitten (ca. 30 x 30 cm) die Anzahl und Größe der Makroporen ermittelt. Mit einer weichen Bürste muss dazu die Bodenoberfläche vorsichtig von groben Bodenbestandteilen befreit werden ohne dabei Makroporen zu verschließen. An Wiesenstandorten mit kompakten Böden, hoher Regenwurmaktivität und geringem Skelett- und Grobwurzelanteil funktionierte dies überwiegend gut. Für die Landnutzungsart Wald wird in den PBS von einer ausreichenden Makroporosität ausgegangen. Aufgrund der exponentiellen Abhängigkeit zwischen Makroporendurchmesser und Wasserleitfähigkeit werden Makroporen über 5 mm mit dem Faktor fünf multipliziert. *Scherrer* (2006) definiert die Makroporosität als groß wenn Ihre Anzahl 70 pro m^2 überschreitet. Ist ihre Dichte geringer als 40 pro m^2 , muss von einer eingeschränkten Infiltrationsrate durch Makroporen ausgegangen werden.

Matrixdurchlässigkeit Die Matrixdurchlässigkeit ist von der Bodentextur, der Lagerungsdichte und dem Bodenwassergehalt abhängig. Die Bodenart/Textur wurde anhand von Fingerproben im Gelände und im Labor bestimmt. Hierbei wird die Korngrößenzusammensetzung des auf Normfeuchte gebrachten Feinbodens (Bestandteile $< 2\text{mm}$) anhand der Körnigkeit, Formbarkeit und Bindigkeit bestimmt (*Ad-hoc-AG Boden*, 2005). Experimentelle Auswertungen der gesättigten hydraulischen Wasserleitfähigkeit unterschiedlicher Bodenproben (*Rawls & Brakensiek*, 1989; *Ad-hoc-AG Boden*, 2005) stellen eine Möglichkeit dar um von der Bodenart auf eine Durchlässigkeitsklasse zu schließen. Die Durchlässigkeit variiert bei wassergesättigten Böden zwischen $< 1 \text{ cm/d}$ für verdichtete Tone und 375 cm/d für unverdichteten Sand (*Ad-hoc-AG Boden*, 2005).

Laterale Fließwege und Drainagen Laterales Fließen kann durch Dichteunterschiede an Bodenhorizonten oder einer gut durchlässigen Verwitterungsschicht über dem anstehenden Gestein hervorgerufen werden und zu schnellen lateralen Abflusskomponenten führen. Existieren laterale Fließwege wird in den PBS bei trockenen Böden ab einer Hangneigung von 10 % und bei nassen Böden (Grund- und Stauwasserbeeinflussung) von 5 % davon ausgegangen dass lateraler Fluss stattfinden kann. Laterale Fließwege lassen sich nur selten eindeutig im Gelände erkennen oder an Bodenaufschlüssen identifizieren. Unterirdische Auswaschungen und Absackungen des Bodens, Wasseraustritte aus Return-Flow und Quellhorizonte an Hanganschnitten können jedoch oft als Resultate lateraler Fließwege im Gelände erkannt werden (*Scherrer, 2006*). So kann einem Standort oder Hang zumindest das Potential zur Bildung lateralen Abflusses zugesprochen werden. Zusätzlich können die Fließmuster von mit BB markiertem Wasser in Beregnungsversuchen eine Aussage über laterales Fließen erlauben.

Vergleichungsmerkmale Ob ein Boden ganzjährig oder temporär unter Grund- bzw. Stauwassereinfluss steht, lässt sich visuell anhand von Vergleichungsmerkmalen (Reduktions- und Oxidationserscheinungen) feststellen (*Ad-hoc-AG Boden, 2005*). Hierfür wurden die mit dem Pürckhauer-Bohrstock gewonnenen Bodenproben auf oxidationsbedingte Eisen-, Mangan- und Reduktionsflecken untersucht. Der Grad ihrer Ausprägung ist ein Hinweis zur Beurteilung der Häufigkeit und Intensität der Vernässung.

Geologische Durchlässigkeit An der Schnittstelle zwischen Boden und dem anstehendem Gestein bestimmt die geologische Durchlässigkeit den weiteren Verlauf des Transportes von Niederschlagswasser im Untergrund. Geologische Übersichtskarten (*LGRB, 1998b*) oder Geologische Karten im Maßstab 1:25 000 oder 1:50 000 enthalten in ihren Erläuterungen häufig Werte zur geologischen Durchlässigkeit des Gesteins. Die Grenze zwischen Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter wird in Anlehnung an (*Ad-hoc-AG Hydrogeologie, 1997; Scherrer, 2006*) bei einem Wert von $1 \cdot 10^{-5}$ m/s festgelegt.

5.3 Beregnungsversuche

Neben den Untersuchungen am Standort auf die Entscheidungskriterien der PBS, können Kleinberegnungsversuche wichtige Zusatzinformationen zur Verifizierung der dominanten Abflussprozesse liefern. Kleinberegnungsanlagen kommen in der hydrologischen Prozessforschung häufig zum Einsatz (*Naef et al.*, 2000; *Weiler*, 2001). Mit ihnen lassen sich unter kontrollierten Bedingungen Niederschläge simulieren und Abflussbildungsprozesse, Erosion und Infiltrationsvorgänge untersuchen. Großberegnungsanlagen werden gegenüber kleineren oft bevorzugt, da mit ihrer Hilfe eine repräsentativere Fläche untersucht werden kann, Randeffekte geringer ausfallen und das Retentionsvermögen des Bodens und der Vegetation besser abgebildet wird (*Markart & Kohl*, 1995). In dieser Studie wurden die Beregnungsversuche auf kleiner Fläche realisiert, da sie mit relativ geringem Aufwand dennoch wertvolle Rückschlüsse auf Abflussprozesse ermöglichen. In den Monaten August und September 2009 wurden in den drei Untersuchungsgebieten insgesamt 10 Beregnungsversuche durchgeführt. Unter Verwendung zweier Rückenspritzen vom Typ SOLO 425 mit einem Füllvolumen von je 15 Litern wurde eine Fläche von einem halben Quadratmeter beregnet. Da mit jeder Spritze eine maximale Beregnungsintensität von 15 Litern in 15 Minuten erreicht werden kann, wurden zwei Spritzen hintereinander verwendet. Auf diese Art konnten Beregnungsintensitäten von 120 mm/h und Beregnungsmengen von 60 mm pro Quadratmeter erreicht werden. Dem Beregnungswasser wurde 4 g/l pulverförmiges Brilliant Blue FCF beigegeben um im Anschluss an die Beregnung und nach Aufgraben des Bodens, Infiltrationsmuster und Fließwege erkennen zu können. Die Beregnungsfläche hatte die Maße von 0,5 mal 1 Meter und wurde seitlich abgedichtet (in Abbildung 5.2 nicht zu sehen) um ein Ausfließen des Oberflächenabflusses aus dem Plot zu verhindern. Am unteren Ende der Beregnungsfläche wurde ein etwa 80 cm breiter Graben ausgehoben und in die Profilwand einige cm unterhalb der Bodenoberfläche eine Metallrinne mit einem leichten Gefälle eingebracht. Auf diese Weise konnte der Oberflächenabfluss aufgefangen und in ein Messgefäß geleitet werden (Abbildung 5.2).

Bei der Beregnung ist darauf zu achten, die Metallrinne und den Messbecher vor direktem Niederschlagseintrag aus der Rückenspritze zu schützen. Das Volumen des im Messbecher gesammelten Oberflächenabflusses wurde in der Regel alle 5 Minuten abgelesen und in ein Formblatt eingetragen. Im Anschluss an die Beregnung wurde der Boden horizontal und vertikal in unterschiedlichen Tiefen freigelegt, um Infiltrationsmuster und Makroporen zu identifizieren.



Abbildung 5.2: Aufbau eines Beregnungsversuches.

5.4 Regionalisierung der dominanten Abflussprozesse

Die PBS liefern Entscheidungshilfen für die Einschätzung der dominanten Abflussprozesse auf der Standortskala. Um diese Punktinformationen auf die Fläche zu übertragen, finden sich bis heute keine brauchbaren und universell einsetzbaren Methoden (*Blöschl*, 2001; *Scherrer*, 2006). Die Gründe dafür sind vielfältig und liegen zum Teil an nach wie vor unvollständigem Prozessverständnis, fehlender Verfügbarkeit räumlich hochaufgelöster Bodenparameter wie Makroporosität, Gründigkeit, hydraulische Leitfähigkeit sowie der Komplexität der Abflussbildung und ihrer gegenseitigen Beeinflussung. *Scherrer* (2006) schlägt vor Hangcatenen anzulegen auf deren Falllinie mehrere Standorte liegen für welche Abflussprozesse bestimmt werden. Anschließend muss die gegenseitige Beeinflussung der Abflussprozesse eingeschätzt werden und die so ermittelten Prozessareale auf vergleichbare Hangsituationen (Hangneigung, Bodeneigenschaften, Landnutzung, etc.) im Einzugsgebiet übertragen werden. Für die Regionalisierung gibt *Löhmansröben* (2000) an, dass großmaßstäbige Karten 1:5 000 bis maximal 1:25 000 der “Schlüssel zur Regionalisierung” sind. Auch forstliche Standortkarten (Maßstab 1:10 000) können für die Ausweisung von Abflussprozessflächen wichtige Informationen liefern (*Naef et al.*, 2000). In der vorliegenden Arbeit wurde versucht die Erkenntnisse der einzelnen Standorte unter Verwendung des Ansatzes der Hangcatenen auf die Fläche zu übertragen.

5.5 Bearbeitung der LIDAR-Daten

Digitale Höhenmodelle spielen eine bedeutende Rolle in der hydrologischen Charakterisierung und Modellierung von Einzugsgebieten. Waren die für Forschungszwecke zur Verfügung stehenden Höhenmodelle in der Vergangenheit noch sehr grob und ungenau, liefern die Höhenmodelle aus flugzeuggetragenen Laserscannern (LIDAR) inzwischen eine Auflösung von unter einem Meter Rasterweite bei einer Höhen Genauigkeit von wenigen Zentimetern bis Dezimetern (*Mandlbürger et al.*, 2009). Höhenmodelle aus LIDAR-Daten liegen für Baden-Württemberg flächendeckend im 1m-Raster vor. Aus der hohen Auflösung dieser Daten ergibt sich allerdings für die hydrologische Interpretation auch das Problem dass gewässerüberspannende Bauwerke (Brücken, verdolte Gewässerabschnitte) mit einzelnen Höheninformationen vorliegen und die darunter liegende Wasserführung nicht erkannt wird. Dies führt

bei der im GIS üblichen Entfernung von Senken im Einzugsgebiet dazu, dass Gewässerläufe deutlich von ihrem tatsächlichen Verlauf abweichen können. In SAGA oder ArcGis implementierte Methoden zur Eliminierung dieser “Hindernisse” ergaben keine zufrieden stellenden Ergebnisse, sodass diese Punkte identifiziert und im Höhenmodell manuell eingetieft wurden. Die LIDAR-Daten gaben die im Feld vorgefundenen Strukturen meist sehr gut wieder. Kleinräumige wasserleitende Strukturen wie straßenbegleitende Entwässerungsgräben wurden dagegen in der Regel nicht abgebildet. Um deren Einfluss auf das Abflussgeschehen zu beurteilen wurden diese um einen halben Meter, Dolen, welche das Wasser unter der Straße durchführen, um einen Meter eingetieft.

In der Literatur finden sich zahlreiche Studien welche auf die Bedeutung von Forstwegen auf den Abfluss hinweisen (siehe Kapitel 2.3). Um die Bedeutung von Waldwegen auf die Wasserführung bei Niederschlagsereignissen und den Hochwasserabfluss generell zu untersuchen, wurden diese am Beispiel des Glasbaches und des Anderen Baches im DGM geglättet. Dazu wurden die Höheninformationen in einem engen Bereich um die Waldwege mit einem Gaußschen Filter geglättet und der so veränderte Bereich wieder mit dem ursprünglichen LIDAR-Raster der restlichen Flächen kombiniert. Der Hochwasserabfluss der so entstandenen Höhenmodelle wurde anschließend mit den gleichen Eingangsparametern der unbehandelten Einzugsgebietes für ausgewählte Bemessungsniederschläge modelliert und mit den ursprünglichen Modellergebnissen verglichen.

5.6 Hochwasserstatistik in unbemessenen Einzugsgebieten

Bemessene Einzugsgebiete von der Größe weniger km^2 sind äußerst selten, die Notwendigkeit einer Abschätzung von Hochwasserkenngrößen dagegen um so wichtiger. In der Literatur finden sich zahlreiche Ansätze um Hochwässer bestimmter Jährlichkeit in unbemessenen Einzugsgebiet abzuschätzen. Meist handelt es sich dabei um empirische Beziehungen in die keine oder nur sehr wenige Gebietsparameter (u. a. Einzugsgebietsgröße) mit einfließen und die häufig nur für eine begrenzte Region oder mit einer großen Fehlerspannweite brauchbare Ergebnisse liefern (vgl. *Barben et al.*, 2002; *Vogt et al.*, 2002).

Liegen in einem zu untersuchenden Einzugsgebiet keine Abflussmessungen vor, ist

die Betrachtung historischer Ereignisse oft die einzige Möglichkeit die Größe von Abflussspitzen abzuschätzen um so eine Hochwasserstatistik aufzustellen oder zumindest einzelne Ereignisse besser bewerten zu können. Hinweise können insbesondere Gewässeranwohner und Mitarbeiter von zuständigen Behörden und Feuerwehren geben, aber auch Zeitungsberichte und Chroniken sind mögliche Bezugsquellen über Häufigkeit, Schäden, Größe und Verlauf von Hochwasser sowie deren auslösende Niederschläge. So gewonnene Informationen können mit Hilfe hydraulischer Berechnungen eine gute Möglichkeit zur Rekonstruktion des Abflusses liefern und den häufig großen Unsicherheitsbereich aus der hydrologischen Modellierung reduzieren (*Scherer*, 2007). Bei der Bewertung der Ereignisgröße ist jedoch auch zu beachten, dass Landnutzungsänderungen und bauliche Maßnahmen am Gewässer das Hochwasserrisiko von kleinen Einzugsgebieten deutlich verändern kann. Es gelten die selben Anforderungen bzw. Annahmen von Stationarität wie für Hochwasserstatistiken auf der Basis von Messwerten. Problematisch wird die Zuordnung von Jährlichkeiten auf Niederschläge, die historische Hochwässer auslösten, wenn letztere nicht gemessen wurden.

Für die untersuchten Einzugsgebiete wurde durch Befragung von Anwohnern, Feuerwehr und Behörden versucht einzelne Ereignisse zu rekonstruieren und ihre Abflussspitze zu ermitteln. Zudem kann die Zugrichtung und Zuggeschwindigkeit von Konvektiveignissen für den Hochwasserabfluss eines Einzugsgebietes von großer Bedeutung sein. Diese Parameter lassen sich meist nur schwer rekonstruieren.

5.7 Evaluierung von Hochwasserschutzmaßnahmen

Hochwasserschutz kann aus einer Vielzahl an Maßnahmen bestehen und beinhaltet nicht nur zentralen und dezentralen Wasserrückhalt im Einzugsgebiet sondern auch wasserbauliche Maßnahmen, welche zu einer Erhöhung der Fließzeit, dem Rückhalt von Schwemmgut, der Vergrößerung des wasserleitenden Querschnittes oder der Aktivierung zusätzlichen Speicherraumes beitragen. Auch indirekter Hochwasserschutz durch Informieren von Anwohnern der betreffenden Gewässer zur Möglichkeit der individuellen Vorsorge kann Schäden reduzieren oder gar ganz vermeiden.

Ein Teilaspekt dieser Arbeit ist es neuralgischen Punkte des Hochwasserrisikos in den Untersuchungsgebieten festzustellen und Möglichkeiten für einen angepassten Hochwasserschutz aufzuzeigen. Hierfür wurden Gewässerquerschnitte vermessen und ihre hydraulische Leistungsfähigkeit unter Zuhilfenahme einfacher Methoden bestimmt.

Mit Fließgleichungen wie der nach Manning-Strickler (Kapitel 6.3) lässt sich die hydraulische Leistungsfähigkeit von Gewässern und verdolten Abschnitten bei Annahme von stationärer Strömung aus dem Sohlgefälle und dem Leitungsquerschnitt (hydraulischer Radius) ermitteln. Dabei kommt der Schätzung der Rauigkeit des Gerinnes, ähnlich wie bei der Verwendung der Manning-Strickler-Formel zur Berechnung der Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses, eine wichtige Rolle zu. In der Literatur finden sich zahlreiche Werte für unterschiedliche Gerinnemorphologien und Sohlmaterialien. Eine Auswahl an Rauigkeitswerten für natürliche und künstliche Gerinne sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt. Neben der Bewertung der hydraulischen Leitfähigkeit der Gerinne konnte auch durch Ortsbegehungen und Analyse der LIDAR-Daten überprüft werden, wo Standorte für zentrale Hochwasserschutzanlagen vorhanden sind.

Tabelle 5.2: Manning's n-Werte und Strickler Werte für natürliche und künstliche Gerinne aus LfU (2003a,b) auf der Basis von Angaben unterschiedlicher Autoren.

Gerinnebeschaffenheit	Manning's n	k_{st} ^a
Natürliche Gewässer		
Regelmäßige Erdkanäle ohne Geschiebe und Sohlmaterial aus mittlerem Kies	0.025	40
Leicht verkrautete Erdkanäle und Sohlmaterial aus grobem Kies	0.029	35
Natürliche Flussbetten mit grobem Geröll und starker Geschiebeführung; Wildbäche	0.033	30
Gebirgsflüsse mit grobem Geröll	0.04	25
Gebirgsflüsse mit starker Geschiebeführung	< 0.05	< 20
Künstliche Gewässer		
Betonkanäle mit Glattverputz	0.012 - 0.011	85 - 95
Alter Beton oder ungleichmäßige Betonflächen	0.02 - 0.017	50 - 60
Gemauerte Kanäle aus sorgfältigem Bruchsteinmauerwerk	0.02 - 0.014	50 - 70

^a Die im deutschsprachigen Raum gebräuchlichen Strickler-Rauigkeitsbeiwerte sind reziproke Werte zu Manning's n.

6 Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Die Modellierung der Abflussreaktion der Einzugsgebiete erfolgte mittels eines rasterbasierten Niederschlag-Abfluss-Modells dem das Prinzip der Isochronen zu Grunde liegt. Der Aufbau des Modells ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Die einzelnen Modellierungsschritte werden im Folgenden erläutert.

6.1 Niederschlagsmenge und -intensität

Niederschlagsmengen können charakterisiert durch Dauerstufe und Jährlichkeit aus extremwertstatistischen Untersuchungen wie dem KOSTRA (*DWD*, 1997) gewonnen werden. Über die Verteilung der Niederschlagsintensität geben diese jedoch keine Auskunft. Blockniederschläge können in der Natur nur sehr selten beobachtet werden (*Althaus*, 1985), spiegeln die bei Konvektiveignissen oft sehr kurzen und hohen Intensitätsmaxima nicht wieder und eignen sich daher als Niederschlagsinput für die Modellierung nur sehr eingeschränkt. Unterschiedliche Verfahren wurden entwickelt um von einer Niederschlagshöhe und -dauer auf eine Intensitätsverteilung (Hyetograph) zu schließen. *Yen & Ven Te Chow* (1980) untersuchten Hyetographen von annähernd 10000 Ereignissen verschiedener Staaten in den USA und fanden für die Intensitätsverteilung der meisten Ereignisse eine annähernd identische Dreiecksform, die nur leicht von Niederschlagsdauer und geographischer Lage beeinflusst wurde. Für die Kanalnetzberechnung urbaner Einzugsgebiete wird für Starkniederschläge in Deutschland häufig eine Intensitätsverteilung nach dem Euler Typ II angenommen (*DWA*, 2006). Dabei tritt die größte Niederschlagsintensität bei etwa 30 % der Regendauer auf (*Althaus*, 1985). Bei der Berechnung ist darauf zu achten, dass die Niederschlagshöhe zu keinem Zeitabschnitt größer der Jährlichkeit n (aus dem KOSTRA-Atlas) ist. Ein 15-minütiges Intensitätsmaxima eines Niederschlages der Dauerstufe 1 Stunde und einer bestimmten Jährlichkeit darf folglich

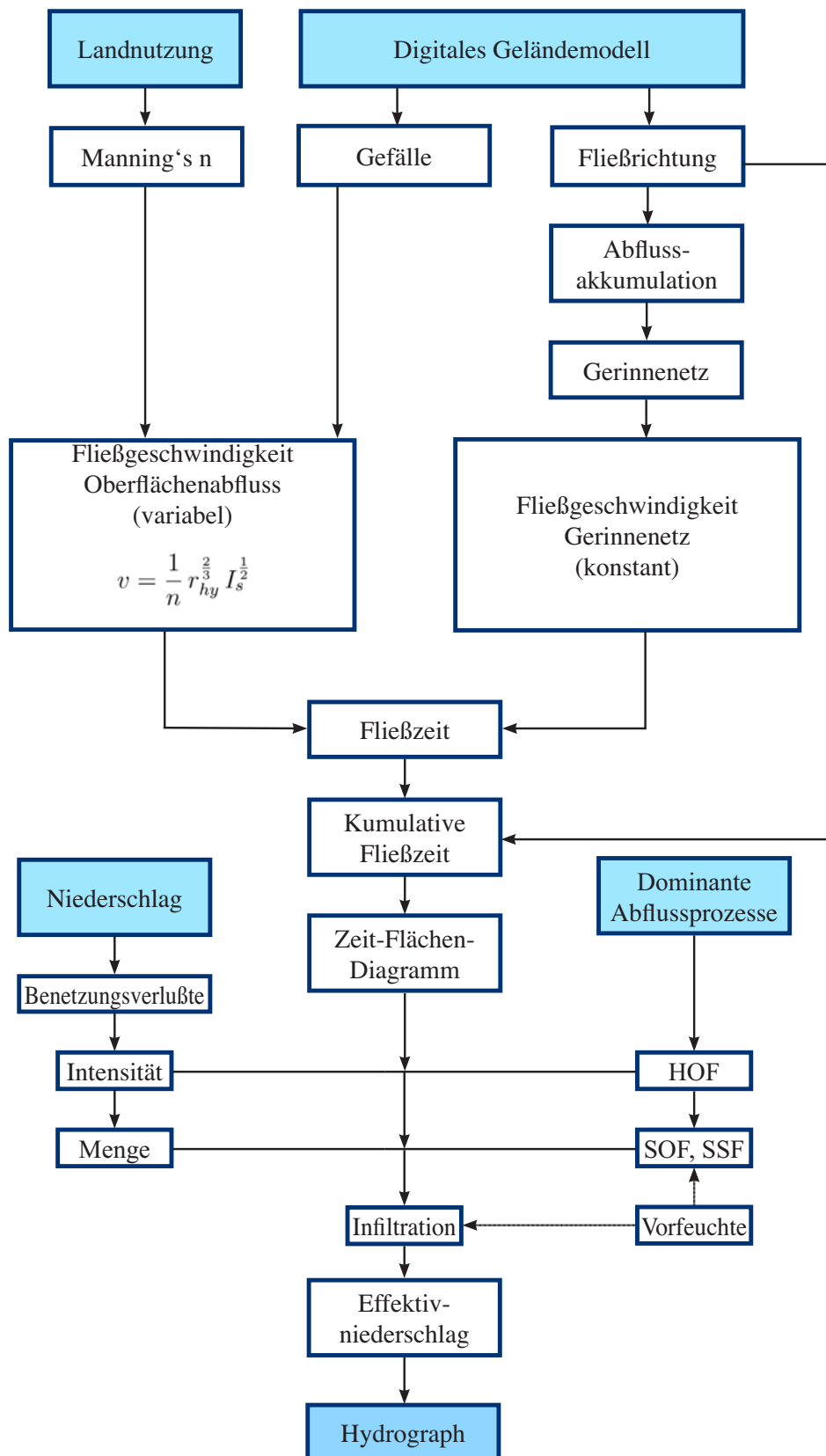


Abbildung 6.1: Schematischer Aufbau des Niederschlag-Abfluss-Modells.

in der Summe nicht über der Niederschlagsmenge eines Ereignisses der Dauerstufe 15 Minuten derselben Jährlichkeit liegen. Die Intensitätsverteilung für die Euler-Modellniederschläge ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

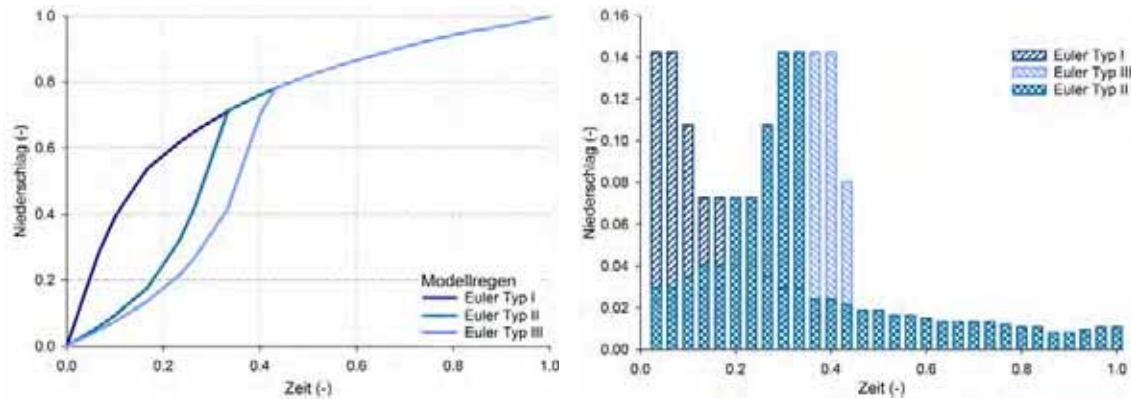


Abbildung 6.2: Intensitätsverteilung der Euler-Modellregen verändert nach *Althaus* (1985).

Eine weitere Niederschlags-Intensitätsverteilung gibt das Bayrische Landesamt für Wasserwirtschaft an (*BLfW*, 2001), welche auf der Grundlage der normierten Intensitätsverläufe der Modellregengruppe von *Otter & Königer* (1986) beruhen. Diese wiederum wurden auf der Basis von 12 Niederschlagsstationen in Bayern erstellt und zeigen im Gegensatz zur Intensitätsverteilung des Euler Typ II eine deutliche Abnahme der maximalen Intensität mit zunehmender Niederschlagsdauer (Abbildung 6.3).

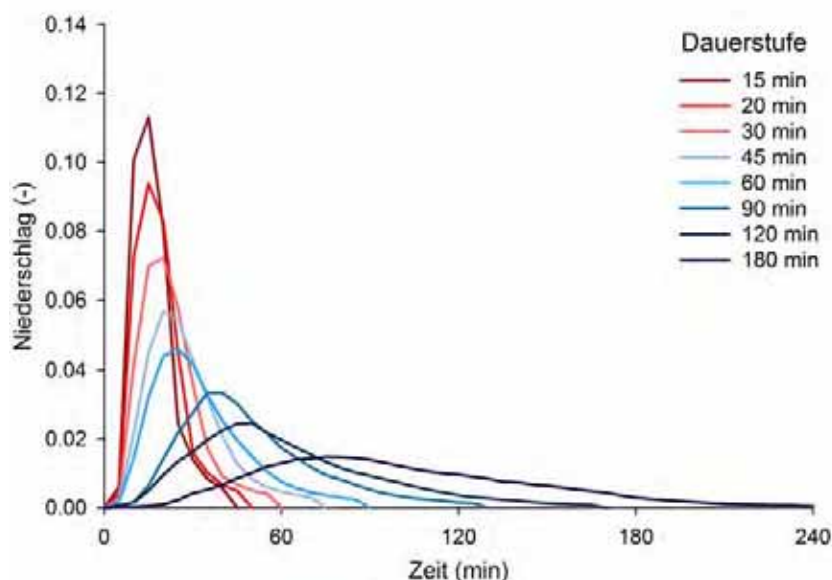


Abbildung 6.3: Intensitätsverteilung der Modellregengruppe nach *Otter & Königer* (1986) aus *BLfW* (2001).

Um der Interzeption und Muldenspeicherung Rechnung zu tragen, wurde je nach

Landnutzung zu Beginn des Niederschlagsereignisses ein Anfangsverlust zwischen 1 mm (Straßen) und 6 mm (Kronendach und Waldboden) angenommen und vom Niederschlag abgezogen.

Für langanhaltende Niederschläge wurden aufgrund nicht verfügbarer Daten zu Ereignissen hoher Jährlichkeit Blockniederschläge angenommen bzw. eine aus gemessenen Niederschlägen geringer Jährlichkeit generierte zeitliche Verteilung erstellt.

6.2 Infiltration und Effektivniederschlag

Eine der größten Herausforderungen der Niederschlag-Abfluss-Modellierung in kleinen Einzugsgebieten liegt darin aus einer Niederschlagsintensität und -menge den Anteil zu bestimmen der unmittelbar zum Abfluss kommt und den Verlauf und die Höhe der Abflussganglinie entscheidend prägt. Zahllose Verfahren sind in den letzten Jahrzehnten entwickelt worden, welche in Ihrer Anwendung alle mit der Problematik der Parameterbestimmung der extremen räumlichen und zeitlichen Variabilität der Infiltration konfrontiert sind. Häufig verwendete Infiltrationsmodelle sind das empirische Horton-Infiltrationsmodell und das physikalisch basierte Modelle von Green und Ampt. Beide Modelle wurden in dieser Arbeit verwendet und vergleichend gegenübergestellt.

Horton Infiltrationsmodell

Das Horton-Infiltrationsmodell ist eine empirische Beziehung für die Abnahme der Infiltration als Funktion der Zeit und wurde von *Horton* (1939) veröffentlicht. Horton beobachtete, dass die Infiltrationsrate f_0 zu Beginn der Infiltration exponentiell, beschrieben durch die Konstante k , auf eine konstante Rate f_c abfällt und ihr Verlauf somit durch die Gleichung 6.1 beschrieben werden kann.

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (6.1)$$

Die Zeitabhängigkeit der exponentiellen Abnahme der Infiltrationsrate in Hortons Modell gilt nur wenn die Niederschlagsrate größer oder gleich der Infiltrationsrate ist (*Bauer*, 1974), d. h. die Infiltration nicht durch das Niederschlagsdargebot limitiert ist. Um in ihrer Intensität zeitlich variierende Niederschlagsereignisse modellieren zu können, wurde in dieser Arbeit eine modifizierte Version der Horton-Infiltrationsgleichung angewandt. Diese wurde von *Bauer* (1974) entwickelt und be-

rechnet die aktuelle Infiltrationsrate in Abhängigkeit des Bodenwassergehalts bzw. des bereits infiltrierten Niederschlagswassers. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise kann *Bauer* (1974) entnommen werden. Aufgrund der bereits erwähnten hohen räumlichen Variabilität der Infiltration (vgl. u.a. *Berndtsson*, 1987; *Maidment & Koch*, 1993) sind spezifische Horton-Parameter für Einzugsgebiete, Landnutzung und Bodenart nur schwer auf andere Gegebenheiten zu übertragen. Daher finden sich in der Literatur eine große Bandbreite an Parameter für die Berechnung der Infiltration nach Horton. Als Parameter wurden in dieser Arbeit die Werte aus Tabelle 6.1 nach *Terstriep & Stall* (1974) verwendet. Bei größeren Abweichungen der Literaturwerte von den Ergebnissen der durchgeführten Berechnungsversuche, wurden diese modifiziert.

Tabelle 6.1: Horton Parameter für unterschiedliche Bodenarten nach *Terstriep & Stall* (1974) zitiert in *Akan & Houghtalen* (2003)

Bodenart	Anfangsinfiltrations- rate f_0 (mm/h)	Endinfiltrations- rate f_c (mm/h)	Rückgangs konstante k (1/h)
Ton	77,1	2,6	2,0
Sandig toniger Lehm	128,5	6,4	2,0
Schluff-Lehm, Lehm	205,6	12,9	2,0
Sand, sandiger Lehm, lehmiger Sand	257,0	25,7	2,0

Green und Ampt Infiltrationsmodell

Die Infiltrationsformel nach *Green & Ampt* (1911) ist eine der am weitesten verbreiteten physikalisch basierten Methoden zur Berechnung der Infiltration in Abhängigkeit von Bodencharakteristiken. Sie beruht auf dem Gesetz von Darcy und dem Prinzip des Massenerhalts unter der Annahme einer gleichmäßigen, scharf abgegrenzten Feuchtefront, welche sich Piston-flow-artig fortbewegt. Dabei wird von einem homogenen Boden, einer gleichmäßig verteilten Vorfeuchte über die gesamte Bodenmächtigkeit und die Vernachlässigbarkeit der Wasserbewegung durch Diffusion ausgegangen. Für die Anwendung der Green und Ampt Infiltrationsgleichung (Gleichung 6.2) werden die vier bodenphysikalischen Parameter gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K , Saugspannung Ψ_f , Effektive Porosität Θ_e und die Vorfeuchte n benötigt.

$$f(t) = K \left(\frac{|\Psi_f|(n - \Theta_e)}{F(t)} \right) + 1 \quad (6.2)$$

Die Vorfeuchte beeinflusst dabei die Saugspannung und damit die Infiltrationsgeschwindigkeit unmittelbar wie aus dem Term “ $|\Psi_f|(n - \Theta_e)$ ” der Gleichung 6.2 hervorgeht. Experimentell bestimmte Green und Ampt Parameter für unterschiedliche Bodenarten finden sich in *Rawls et al.* (1983) und sind in Tabelle 6.2 aufgelistet. Dabei ist zu beachten, dass bei der Bestimmung von Green und Ampt Parametern aus Bodenarten für die effektive Porosität, insbesondere aber für die Saugspannung große Unsicherheiten bestehen. *Rawls et al.* (1983) geben hierfür Standardabweichungen an, welche für die effektive Porosität bei maximal 30 % und für die Saugspannung bei bis zu 550 % um den Mittelwert liegen. Der Grund hierfür mag unter anderem darin zu finden sein, dass die Studie von *Rawls et al.* (1983) einen Großteil der vorkommenden Bodenarten und -Dichten beinhaltet. *Rawls et al.* (1983) stellten ebenfalls Regressionsgleichungen auf um die Green und Ampt Parameter aus dem prozentualen Anteil von Sand und Ton sowie der Gesamtporosität einer Bodenprobe zu bestimmen. Aufgrund der Sensitivität der Parameter (vgl. *James et al.*, 1992) bedarf es allerdings aufwendiger Laboruntersuchungen der Bodentextur um brauchbare Ergebnisse zu erhalten. Diese konnten im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit nicht durchgeführt werden. *Ad-hoc-AG Boden* (2005) gibt die Luftkapazität, die nutzbare Feldkapazität und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit für die Bodenarten in Abhängigkeit der Trockenrohdichte an. Dies ermöglicht die Bestimmung der effektiven hydraulischen Leitfähigkeit dieser im Feld aufgenommenen Größe.

Analog zur Infiltrationsformel nach Horton beschreibt auch die Formel nach Green und Ampt die Infiltrationsrate als eine implizite Funktion der Zeit (*Chu*, 1978). Während die ursprüngliche Gleichung nach Green und Ampt noch eine iterative Annäherung vorsah, sind in jüngerer Zeit verschiedene explizite numerische Lösungen entwickelt worden (vgl. *Salvucci & Entekhabi*, 1994; *Serrano*, 2003), welche ihre Anwendung in der Modellierung vereinfacht. Die in dieser Arbeit verwendete Berechnungsmethode der Green und Ampt Infiltration für variable Niederschlagsintensitäten wurden aus *Chu* (1978) entnommen und können im Detail dort nachgelesen werden.

Makroporeninfiltration

Wird die Infiltrationsrate der Bodenmatrix überschritten, kann potentieller Hortonischer Abfluss bei Vorhandensein von Makroporen in diese infiltrieren. Die Be-

Tabelle 6.2: Green und Ampt Parameter für unterschiedliche Bodenarten nach *Rawls et al.* (1983).^a

Bodenart (USDA)	Effektive Porosität Θ_e (-)	Saugspannung Ψ_f (mm)	Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit K (mm/h)
Sand	0,417 (0,354 - 0,480) ^b	49,5 (9,7 - 253,6)	117,8
Loamy Sand	0,401 (9,7 - 253,6)	61,3 (13,5 - 279,4)	29,9
Sandy Loam	0,412 (0,283 - 0,541)	110,1 (26,7 - 454,7)	10,9
Loam	0,434 (0,334 - 0,534)	88,9 (13,3 - 593,8)	3,4
Silt Loam	0,486 (0,334 - 0,534)	166,8 (29,2 - 953,9)	6,5
Sandy clay Loam	0,330 (0,394 - 0,578)	218,5 (44,2 - 1080,0)	1,5
Clay Loam	0,309 (0,279 - 0,501)	208,8 (47,9 - 911,0)	1,0
Silty clay Loam	0,432 (0,347 - 0,517)	273,0 (56,7 - 1315,0)	1,0
Sandy Clay	0,321 (0,201 - 0,435)	239,0 (40,8 - 1402,0)	0,6
Silty Clay	0,423 (0,334 - 0,512)	292,2 (61,3 - 1394,0)	0,5
Clay	0,385 (0,269 - 0,501)	316,3 (63,9 - 1565,0)	0,3

^a Die Datenbasis umspannt die physikalische Eigenschaften der meisten landwirtschaftlich genutzten Böden womit ein weiter Bereich des Gehaltes an Sand, Schluff, Ton und organischen Bestandteilen sowie eine große Variation der Bodendichte abgedeckt ist.

^b Werte in Klammern entsprechen einer Standardabweichung um den Mittelwert.

rechnung der Infiltration durch Makroporen wird in Anlehnung an (*Steinbrich & Weiler*, 2009), jedoch stark vereinfacht modelliert. Dabei wird für alle Makroporen ein Radius von 2,5 mm angenommen was einer leitenden Querschnittsfläche von 20 mm² entspricht. Die bei der Bodenansprache bestimmte Makroporendichte wird mit der Leitfähigkeit einer jeden Makropore (angenommene Fließgeschwindigkeit 6 m/h) multipliziert und ergibt die Makroporeninfiltrationsrate der Fläche. Diese entspricht bei einer Makroporendichte von 150 pro m² einer Infiltrationsrate von 16 mm/h. Es wird davon ausgegangen, dass sämtliches Wasser welches durch Makroporen auf-

genommen wird, in tieferen Bodenschichten an die Bodenmatrix abgegeben werden kann. Infiltration durch Makroporen währt nur so lange bis das Sättigungsdefizit des Bodens erreicht ist.

6.3 Oberflächenabfluss

Entsteht Oberflächenabfluss sind die Fließgeschwindigkeit und die Distanz zum Gewässer für seine Wirkung auf die Abflussganglinie von entscheidender Bedeutung. Die Fließgeschwindigkeit ist dabei in erster Linie von der Oberflächenrauigkeit, der Geometrie des Flusses, der Abflussmenge selbst und dem Gefälle abhängig. Die hydraulische Charakteristik von Oberflächenabfluss ist sehr komplex und wird stark von kleinskaligen Reliefeigenschaften bestimmt. Daher werden häufig vereinfachte Ansätze der allgemeinen Strömungsgleichung verwendet und Oberflächenabfluss als dünner, flacher Wasserfilm berechnet.

Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten von Oberflächenabfluss als instationäre, ungleichförmige Wasserbewegung können mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung und der dynamischen Grundgleichung beschrieben werden und sind in ihrem Zusammenhang als Saint-Venant-Gleichungen (full dynamic wave equation) bekannt. Für den Oberflächenabfluss finden häufig eindimensionale vereinfachte Formen dieser Gleichung Verwendung. Der Diffusionswellenansatz vernachlässigt dabei das Trägheitsglied und der kinematische Wellenansatz zusätzlich das Druckglied, sodass das Energieliniengefälle gleich dem Sohlengefälle ist und instationäre Fließvorgänge durch stationäre angenähert werden (*Lempert, 2000*).

Trotz dieser vereinfachten Annahme ist eine analytische Lösung der eindimensionalen kinematischen Welle nur für idealisierte Oberflächenformen und Niederschlagsmuster (gleichförmiger Effektivniederschlag) möglich (*Moore & Foster, 1990*). Für realistischere Situationen, bei sich verändernder Niederschlags- und Oberflächencharakteristik, wird sie gewöhnlich numerisch über die Methode der finiten Elemente oder finiten Differenzen gelöst. Damit wird zu jedem Zeitpunkt für jede Zelle die Fließgeschwindigkeit ermittelt, die von der Menge der in sie entwässernden Zellen und des räumlich verteilten Effektivniederschlages abhängig ist.

Ein frei zugängliches Tool zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses auf der Basis der kinematischen Welle ist derzeit nicht verfügbar. Daher wurde die Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses in dieser Arbeit mit Hilfe

der empirischen Fließgleichung nach Manning-Strickler (Gleichung 6.3) für jede Zelle unabhängig der Fließakkumulation berechnet.

$$v = \frac{1}{n} r_{hy}^{\frac{2}{3}} I_e^{\frac{1}{2}} \quad (6.3)$$

Unter der Annahme, dass die Wasserspiegelhöhe bei Schichtabfluss gegenüber der Wasserspiegelbreite (Zellbreite) sehr klein ist, kann der hydraulische Radius r_{hy} vereinfacht mit h angesetzt werden, wobei hier ein Wert von einem Millimeter angenommen wurde. Das Energieliniengefälle I_e wird dem lokalen Gefälle der Zelle gleichgesetzt und somit stationärer Abfluss angenommen. Die Rauigkeitswerte n für unterschiedliche Oberflächen bzw. Landnutzungen wurden der Literatur entnommen und sind in der Tabelle 6.3 aufgeführt.

Tabelle 6.3: Manning's n -Werte für Oberflächenabfluss in Abhängigkeit der Landnutzung nach verschiedenen Autoren.

Landnutzung	Manning's n^a	Literaturquelle
Asphalt (vollversiegelte Flächen)	0,010 - 0,013 (0,011)	<i>Engman</i> (1986)
Kies (Waldwege, teilversiegelte Flächen)	0,012 - 0,030 (0,021)	<i>Engman</i> (1986)
Wald	0,20 - 0,80 (0,5)	<i>USDA & SCS</i> (1986),
Wiese/Weide ^b	0,015 ^c - 0,32 (0,1)	<i>Engman</i> (1986)

^a Werte in Klammern wurden für die Modellierung verwendet (Basis-Szenario).

^b Werte wurden für Wiese/Weide wurden auch auf Obstwiesen und Rebflächen angewandt.

^c Dieser Wert entspricht Grasflächen in extrem schlechten Konditionen.

Um zu verhindern, dass kleinere Bereiche mit geringem lokalem Gefälle und geringer Fließgeschwindigkeit den Abfluss ihres kompletten Einzugsgebietes um Stunden verzögern, wurde für Zellen mit einer "Flow Accumulation" über 1000 Zellen die minimale Fließgeschwindigkeit auf 0.05 m/s begrenzt. Allen anderen Zellen wurde eine minimale Fließgeschwindigkeit von 0.005 m/s zugeordnet.

6.4 Gerinneabfluss

Gerinneähnlicher Abfluss kommt dann zustande wenn Wasser zunehmend konzentriert abfließt. Grundsätzlich bieten hochaufgelöste LIDAR-Daten die Möglichkeit

Grenzwerte der Fließakkumulation für Gerinneabfluss anhand gut sichtbarer topographischer Geländeformen abzuleiten. Es ist jedoch fraglich ob die historisch durch Wasser entstandenen und morphologisch sichtbaren Erosionsformen rezent noch als Leitbahnen dienen oder ob sich Fließwege durch Straßenbau, Drainagen und anderen anthropogenen Eingriffen so stark verändert haben, dass die alten morphologischen Formen das rezente Abflussgeschehen nicht ausreichend wiedergeben. In diesen Fällen wäre ein Abgleich mit den im DGM sichtbaren Informationen nicht mehr gegeben, d. h. man müsste im Feld an kleinskaligeren rezenten Erosionsformen (beispielsweise an Entwässerungsdolen) nach Übereinstimmungen suchen. Der Gerinneabfluss wurde in dieser Studie über einen Grenzwert der Flow Accumulation festgelegt welcher visuell anhand der TK25, LIDAR-Daten und Feldbeobachtungen definiert wurde. Bei den in der TK25 verzeichneten Gerinnen handelt es sich meist um perennierende Gewässer, welche ganzjährig oder über die meiste Zeit des Jahres Wasser führen. Gerinneformen oder Entwässerungsgräben welche nur bei größeren Abflussereignissen aktiviert werden, sind darin nicht abgebildet. Aufgrund fehlender Datengrundlage wurde für die Fließgeschwindigkeit des Gerinneabflusses ein konstanter Wert angenommen, unabhängig von der Ereignisgröße und dem lokalen Sohlgefälle. In Tabelle 6.4 sind die gewählten Fließgeschwindigkeiten, sowie der Grenzwert ab dem Gerinneabfluss angenommen wurde, aufgeführt. Die Drainagen und die Straßenentwässerung im zentralen Teil des Einzugsgebietes des Ehrenbächle (siehe Karte in Appendix A) wurde für die Einschätzung des Grenzwertes für Gerinneabfluss miteinbezogen.

Tabelle 6.4: Grenzwerte für Gerinneabfluss und Fließgeschwindigkeiten im Gerinne.

Einzugsgebiet	Grenzwert für Gerinneabfluss (m^2)	Fließgeschwindigkeit im Gerinne (m/s)
Ehrenbächle	50 000	1,0
Glasbach	30 000	1,0 ^a
Schmieheim (Anderer Bach)	100 000	1,0
Schmieheim (Dorfbach)	70 000	1,0

^a Für die Regenwasserkanäle aus dem Siedlungsteil des Glasbaches wurde auf der Grundlage von Daten der Badenova eine Fließgeschwindigkeit von 1,5 m/s (Wintererstraße) respektive 3 m/s (Jägerhäusleweg) angenommen.

6.5 Zeitflächen und Abflussganglinie

Aus der Fließgeschwindigkeit der einzelnen Zellen in Fließrichtung (siehe Kapitel 6.3 und 6.4) und der zurückzulegenden Distanz bis zum Gebietsauslass kann für das Einzugsgebiet eine Fließzeitverteilung erstellt werden. Diese wurden im GIS für die einzelnen dominanten Abflussprozessflächen generiert und für die weitere Modellierung verwendet. Der Abfluss $Q(t)$ berechnet sich dann für jede Abflussprozessfläche nach Gleichung 6.4 durch Faltung des Integrals der Abflussreaktion (Effektivniederschlag I zum Zeitpunkt t und der jeweiligen Einheitganglinie $U(t)$) einer jeden Zeitfläche A über die Gesamtzeit t .

$$Q(t) = \int_A \int_0^t I(t) U(t) dt dA \quad (6.4)$$

6.6 Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse

Sensitivitätsanalyse

In der hydrologischen Modellierung zeigt sich meist, dass ein Modell auf einige Eingangsparameter besonders sensitiv reagiert. Das Ziel der Sensitivitätsanalyse ist es daher zu ermitteln welche Auswirkungen eine Veränderung der Eingangsparameter auf die Modellergebnisse hat. In dieser Studie wurde eine Sensitivitätsanalyse mit dem Grenzwert für Gerinneabfluss, Fließgeschwindigkeit im Gerinne und der Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabfluss (Veränderung der Rauigkeit) durchgeführt. Für diese Parameter kann ein Einfluss auf die Fließzeit und die Berechnung der Zeitflächen (Isochronen) vermutet werden. Dabei wurde jeweils der zu untersuchende Parameter verändert, während die Anderen konstant auf einem "Basis-Szenario" (siehe Tabelle 6.3 und 6.4) gehalten wurden. Unter Verwendung der so erhaltenen Zeitflächen konnte die Wirkung der Parameter auf die Abflussganglinie am Beispiel des Glasbaches anhand des gemessenen Ereignisses vom 25.08.2009 und einem hypothetischen 100-jährlichen Ereignis der Dauerstufe eine Stunde und der Niederschlagsverteilung nach Euler Typ II untersucht werden.

Unsicherheitsanalyse

Bei der Niederschlag-Abfluss-Modellierung kommt der Frage nach den Unsicherheiten der Modellergebnisse eine große Bedeutung zu. Zum einen muss hier untersucht

werden ob das verwendete Modellkonzept in der Lage ist die dominanten Prozesse des Systems wiederzugeben und zum anderen welche Auswirkung die Wahl der Eingangsparameter auf die Modellergebnisse hat. Für das hier verwendete Modell wurden drei wichtige Bereiche identifiziert, welche die Modellresultate mit einem größeren Maß an Unsicherheit belasten.

1. Fließzeitenverteilung (Annahme der konstanten Fließgeschwindigkeit unabhängig vom Ereignis selbst, Repräsentativität der Rauigkeitswerte unterschiedlicher Landnutzungsarten, Fließgeschwindigkeit im Gerinne)
2. Infiltrationsmodellierung
3. Intensitätsverteilung des Niederschlagsinputs

Eine Variation der Parameter zur Berechnung der Fließzeitenverteilung erfolgt durch die Sensitivitätsanalyse. Daraus ergeben sich wichtige Hinweise für den Unsicherheitsbereich der Abflussmodellierung in diesem Modellabschnitt. Für die verbleibende Unsicherheitsanalyse wurde in dieser Arbeit insbesondere die Auswirkung unterschiedlicher Niederschlagsverteilungen (siehe Kapitel 6.1) auf den Scheitelabfluss und die Ganglinie untersucht.

Auch wenn die Berechnungen der Infiltration und des Effektivniederschlages unter anderem aus Mangel an einzugsgebietsspezifischer Daten zu größeren Unsicherheiten in der Modellierung des Abflusses führen, konnten diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher untersucht werden.

7 Daten

Die Verfügbarkeit von räumlich hoch aufgelösten und qualitativ hochwertigen Daten ist insbesondere für die unkalibrierte, rasterbasierte Niederschlag-Abfluss-Modellierung in kleinen Einzugsgebieten entscheidend.

7.1 Niederschlag

Aufgrund der größeren Bedeutung von Konvektiveignissen für die Hochwasserentstehung in kleinen Einzugsgebieten, welche durch Niederschlagsstationen des DWD oder der Hochwasservorhersagezentrale Karlsruhe nur unzureichend abgedeckt werden, wurden in den untersuchten Einzugsgebieten zuvor kalibrierte Niederschlagswippen (Typ: Rainnew 111 und Datalogger Rainlog RS 232 Port der Firma Rainwise Inc., Maine/USA) aufgestellt.

Zur Berechnung von Bemessungsniederschlägen wurden Daten aus dem KOSTRA-Atlas (DWD, 1997) entnommen, welcher Niederschlagsmengen für die Dauerstufen von 5 Minuten bis 72 Stunden und Wiederkehrzeiten von 2 bis 100 Jahren enthält. Die Kostra-Niederschlagswerte können für Einzugsgebiete kleiner 10 km^2 direkt auf die Fläche übertragen werden. Für größere Flächen muss ein Reduktionsfaktor angewandt werden (vgl. *Lorenz & Skoda*, 2000; *Symphor*, 2006). In Tabelle 7.1 ist die KOSTRA-Niederschlagsstatistik für das Einzugsgebiet des Glasbaches aufgeführt. Niederschlagswerte für die Dauerstufen 12 h, 24 h, 48 h und 72 h wurden einer Graphik aus *Egger* (2003) entnommen und können daher kleinere Abweichungen zu der Originalquelle enthalten.

Die maximierten Gebietsniederschläge (MGN) liegen in den untersuchten Einzugsgebieten für alle Dauerstufen mindestens um den Faktor vier über einem 100-jährlichen Niederschlagsereignis (*Schmidt*, 1997). Da Ihnen keine Jährlichkeit zugeordnet werden kann, ihr Wert eher der physikalisch maximal möglichen Niederschlagsmenge entspricht und diese kaum direkt als Bemessungsgröße für Fragestellungen des Hoch-

Tabelle 7.1: KOSTRA Niederschlagsstatistik für das Glasbach Einzugsgebiet nach DWD (1997) aufgeführt in Egger (2003).

Dauerstufe	Jährlichkeit					
	2	5	10	20	50	100
5 min	11,3	14,5	17,0	19,5	22,7	25,2
10 min	14,2	18,5	21,8	25,1	29,4	32,6
15 min	16,3	21,4	25,2	29,1	34,2	38,0
30 min	20,7	27,4	32,5	37,5	44,2	49,3
60 min	26,2	35,1	41,8	48,4	57,3	64,0
2 h	30,7	39,9	46,8	53,7	62,6	69,8
3 h	33,8	43,2	50,2	57,3	66,6	73,6
12 h	47	57	64	72	82	90
24 h	58	69	79	87	100	110
48 h	69	86	98	110	126	137
72 h	77	95	108	122	140	153

wasserschutzes herangezogen werden können, sind sie im folgenden nicht im Detail aufgelistet. Gemessene Niederschläge zeigen jedoch immer wieder, dass diese Werte erreicht oder gar übertroffen werden können (*Schmidt*, 1997). Zudem sei noch zu erwähnen dass insbesondere für die MGN mit einer Dauerstufe von einer Stunde die Region des Schwarzwaldes und des Oberrheins zu den Gebieten mit den höchsten Werten in Deutschland gehört.

Als Intensitätsverteilung der Niederschläge wurden für die Bemessungsereignisse der Dauerstufen bis 3 Stunden jeweils ein Modellregen Euler Typ II, ein Modellregen der normierten Niederschlagsverteilung nach *BLfW* (2001) und ein Blockregen angenommen (vgl. Kapitel 6.1).

7.2 Abfluss

Für die Untersuchungsgebiete lagen keine über längere Zeiträume kontinuierlich gemessenen Abflüsse vor. Durchgeführte Diplomarbeiten im Glasbach-Einzugsgebiet konnten keine “bedeutenden” Hochwasserabflüsse registrieren *Egger* (2003); *Guwang* (2004); *Adolph* (2005); *Hugenschmidt* (2005). In den Untersuchungsgebieten wurden daher an geeigneten Stellen kalibrierte Pegel (Typ: Capacitive Waterlevel Recorder der Firma Odyssey Data Recording Systems, Christchurch/New Zealand) installiert welche den Wasserstand bei Veränderung über 5 Millimeter registrieren und im

integrierten Datalogger in Zeitintervallen von 2 Minuten speichern.

7.3 GIS-Daten, Boden- und Landnutzungsdaten

Für die Bestimmung und Regionalisierung der dominanten Abflussprozesse und die Modellierung der Abflussreaktionen wurde auf eine Reihe an Daten zurückgegriffen welche in Tabelle 7.2 aufgeführt sind.

Tabelle 7.2: Datengrundlage für die Regionalisierung der dominanten Abflussprozesse und die Niederschlag-Abfluss-Modellierung.

Datensatz	Auflösung	Quelle	Verwendung
LIDAR	1*1 Meter-Raster	Landesvermessungsamt Württemberg (LVA)	Baden- Gefälle und Gewässernetz
TK25	1:25 000	Landesvermessungsamt Württemberg (LVA)	Baden- Gewässernetz
BK50	1:50 000	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB)	Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität, Orientierung bei der Regionalisierung der DRP's
Forstliche Standortskartierung	1:10 000	Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)	Orientierung bei der Regionalisierung der DRP's
Felduntersuchungen	-	Eigene Messungen	Bodenart, DRP's, Bodendichte, Infiltrationsraten, Entwässerungsstrukturen, Makroporosität, etc.
Hydrogeologische Karte	1:200 000	WaBoA / Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB)	Durchlässigkeit des geologischen Untergrundes
Versiegelungsgrad der Oberfläche	1*1 Meter-Raster	Amthliches Liegenschaftskataster (ALK) / Amthliches Topographisches Kartographisches Informationssystem (ATKIS)	Versiegelungsgrad
N-Radar (RADOLAN)	1*1 km-Raster, Stundenwerte	Deutscher Wetterdienst (DWD)	Ereignis 01.09.2008 Schneeheim vom
Niederschlags-Stationsdaten	5-Minuten-Summen	Deutscher Wetterdienst (DWD)	Ereignis 01.09.2008 Schneeheim vom
KOSTRA	ca. 8,45*8,45 km-Raster	Deutscher Wetterdienst (DWD)	Bemessungsniederschläge

8 Ergebnisse

8.1 Messung von Niederschlag und Wasserstand

Für die Monate August bis Dezember 2009 wurden in allen Einzugsgebieten Niederschlag und Wasserstände im Gerinne gemessen (siehe Kapitel 7.1 und 7.2). Für einzelne Ereignisse wurde unter Verwendung des gemessenen Wasserstandes, Rauigkeitswerten nach Manning-Strickler aus der Literatur und dem im Gelände gemessenen Sohlgefälle ein Abflusswert berechnet. Aufgrund der trockenen Witterungsverhältnisse in den Sommermonaten August und September und der kurzen Messperiode konnte bis auf ein Konvektiveignis am Glasbach vom 26. August 2009 in keinem der Untersuchungsgebiete nennenswerte Niederschlagsereignisse registriert werden. Auch wenn sich die Einzugsgebiete in der Menge des Tagesniederschlages sehr ähneln (Abbildung 8.1), zeigte eine Analyse der Niederschlagsintensität insbesondere der Konvektiveignisse, Unterschiede zwischen den Einzugsgebieten.

Für das Ereignis am Glasbach vom 25.08.2009 betrug die Maximalintensität des Niederschlages kurzzeitig 140 mm/h und über 100 mm/h über einen Zeitraum von 5 Minuten. Das gleiche Ereignis erreichte am Ehrenbächle einen Wert von maximal 60 mm/h über den selben Zeitraum. In Schmieheim erbrachten Konvektiveignisse vergleichsweise geringe Mengen und blieben in ihrer Intensität unter 50 mm/h. Die höchsten registrierten Tagessummen lagen bei 35 mm. Hierbei wurden Intensitäten über 30 mm/h nur für sehr kurze Zeitabschnitte von 2 Minuten überschritten. Der Gesamtniederschlag in der Messperiode betrug zwischen 230 und 280 mm. Im August und September wurde mit einer Monatssumme von maximal 42 mm etwa die Hälfte des üblichen Monatsmittel gemessen.

Der registrierte Wasserstand zeigte dem Niederschlag entsprechend über den größten Zeitraum hinweg geringe Reaktionen. Erwähnenswert ist vor allem das Ereignis vom 25.08.2009 im Glasbach-Einzugsgebiet, bei dem der Wasserstand mit einer Verzögerung zum Intensitätsmaximum des Niederschlages (01:05 Uhr) von 17 Minuten knapp 50 cm anstieg (vgl. Kapitel 8.5.1). Anstiege des Wasserstandes auf maximal

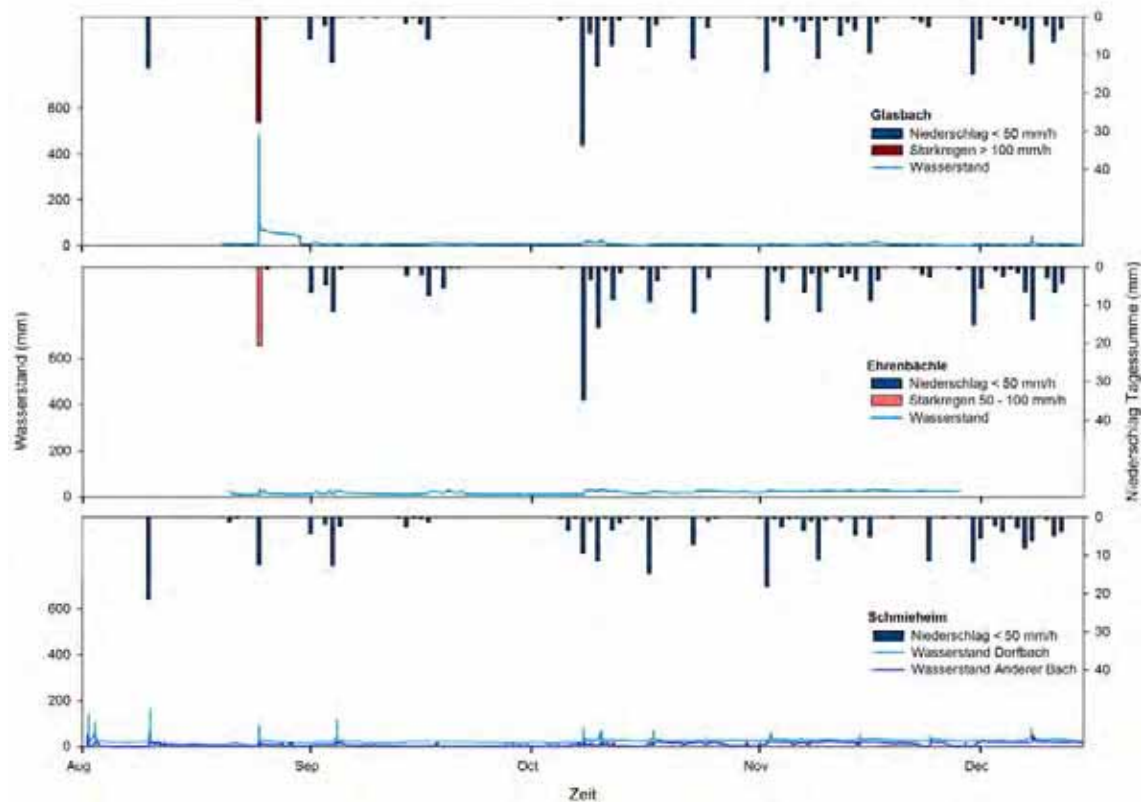


Abbildung 8.1: Niederschlag und Wasserstand für die Messperiode von August bis Dezember 2009.

15 cm konnten am Dorfbach in Schmieheim als Reaktion auf ein Konvektiveignis am 10.08.2009 registriert werden, wobei der benachbart gelegene Andere Bach kaum eine Reaktion zeigte. Geringe Wasserstandsschwankungen von wenigen Millimetern bis Zentimetern finden sich bei allen Einzugsgebieten als Reaktion auf kleinere Konvektiveignisse und länger anhaltende advektive Niederschläge (vgl. Abbildung 8.1 08.10. - 10.10.2009). Die geringsten Reaktionen auf Niederschläge ergaben sich beim Einzugsgebiet des Ehrenbächle. Weder das Konvektiveignis vom 25.08.2009 noch der Landregen vom 08.10.2009 konnte den Wasserstand um mehr als 2 cm anheben. Eine Auswahl einzelner Ereignisse wird in Kapitel 8.5 ausführlich besprochen.

8.2 Ergebnisse der Feldarbeit

8.2.1 Beobachtungen in den Einzugsgebieten

Neben den Bodenansprachen und Beregnungsversuchen konnten auch durch Beobachtungen bei der Feldbegehung und Informationen von Anwohnern, wichtige Hinweise auf hydrologisch relevante Prozesse in den Einzugsgebieten gewonnen werden.

Ehrenbächle

Das Ehrenbächle ist ein stark anthropogen geprägtes Einzugsgebiet. Wie bereits in Kapitel 4 dargelegt, wird es zum größten Teil intensiv landwirtschaftlich genutzt. Drainagen in den Weideflächen gibt es nach Aussage der örtlichen Landwirte keine. Dagegen konnte an einigen Stellen wegbegleitende Entwässerungsgräben erkannt werden, welche eine Ableitung von Oberflächenabfluss aus den Wiesen und Siedlungsflächen ermöglichen. Oberflächenabfluss kann nach Aussage von Landwirten und Anwohnern insbesondere nach länger anhaltendem Niederschlag oder feuchter Witterung häufiger beobachtet werden, welcher dann "flächig die Schönbergwiesen herunterläuft". Das Hochwasserrückhaltebecken in der Ehrenmatte staut sich nach Aussagen des Dammmeisters 3-4 mal im Jahr ein, was meist bei Starkregenereignissen im Frühsommer der Fall ist (Ochs, E., pers. Mitteilung, 3. März 2010). Hochwasserschäden bei den Unterliegern sind aus den letzten 30 Jahren nicht bekannt. Sättigungsflächen konnten während der Feldbegehung in den Sommermonaten nicht beobachtet werden.

Glasbach

Der bewaldete Teil des Glasbach-Einzugsgebietes weist ein dichtes Netz aus Forstwirtschaftswegen auf, welche durch Gräben entwässert werden. Drainagen leiten das Niederschlagswasser im Abstand von etwa 50 bis 100 Meter seitlich ab. Teilweise münden diese direkt in den Glasbach oder in unmittelbarer Nähe zu diesem in den Wald. Erosionsspuren an den Ausleitungen sind ein Indiz für die Bedeutung dieser Gräben und Drainagen für das Fließsystem. Kleinere unbefestigte Waldwege haben in unregelmäßigem Abstand oberflächliche Einkerbungen für die Ableitung des Niederschlagswassers. Aufgrund des überwiegend steilen Gefälles konnten Sättigungsflächen nur an einigen muldenartigen Stellen und mit geringer räumlicher Ausdehnung identifiziert werden. Das Siedlungsgebiet im unteren Teil des Einzugsgebietes wird durch ein teilweise mehr als 100 Jahre altes Netz aus Regen-, Misch-,

und Schmutzwasserkanalisation entwässert. Den Entwässerungsplänen der Badenova ist zu entnehmen, dass ein Großteil der nördlich der Stadtstraße gelegenen Häuser und Straßen an eine Regenkanalisation angeschlossen ist und im Niederschlagsfall innerhalb kurzer Zeit in den Glasbach entwässert.

Schmieheim

Vergleichbar mit dem Glasbach findet sich auch im bewaldeten Gebieten von Schmieheim ein dichtes Wegenetz. Niederschlagswasser wird teilweise über mehrere hundert Meter am Waldweg entlang geführt bevor es durch einen Auslass abgeleitet wird. Diese finden sich etwa alle 200 Meter. Ein in der TK25 verzeichneter Zufluss zum Anderen Bach "entsteht" an einem Punkt an dem zwei wegbegleitende Gräben zusammenlaufen (siehe Appendix A). Im Waldgebiet liegen die Wege mitunter tiefer als das umgebende Gelände und bieten kaum Möglichkeiten um diese mit annehmbarem Aufwand zu entwässern. Bei der Feldbegehung konnte beobachtet werden, dass die Straßendrainagen teilweise mit Laub und Erde verstopft waren. Zahlreiche hangparallele Erosionsspuren (ehemalige Schleifwege) im Wald können als Leitbahnen für Niederschlagswasser dienen und das Gebiet schnell entwässern. Straßen und Waldwege mit hohem Gefälle laufen oft geradlinig auf die Ortschaft Schmieheim zu. Sättigungsflächen wurden nur vereinzelt und mit geringer Ausdehnung beobachtet. Entlang von Wegen konnten jedoch trotz trockener Witterung über Wochen feuchte Stellen identifiziert werden.

8.2.2 Bodenprofile

Im Verlauf der Feldarbeit konnte in den drei Einzugsgebieten an 26 im Vorfeld ausgewählten Stellen, Bodenprofile gegraben und eine detaillierte Untersuchung der in den PBS angesprochenen Entscheidungskriterien (siehe Kapitel 5.2) durchgeführt werden. Die Lage der untersuchten Bodenprofile und der Beregnungsversuche sind in den Einzugsgebietskarten in Appendix A aufgeführt. Detaillierte Ergebnisse der Bodenansprachen finden sich in Appendix B.

Ehrenbächle

Im Einzugsgebiet des Ehrenbächle wurden dominante Abflussprozesse und Bodeneigenschaften an 5 Bodenprofile untersucht. Mit dem Pürckhauer-Bohrstab ergab sich meist eine große Bodenmächtigkeit von über 90 cm. Lediglich im bewaldeten Teil unterhalb des Schönberggipfels mit hohem Gefälle wurden geringmächtigere Bö-

den mit sehr hohem Skelettanteil vorgefunden, welche in der BK50 als Terra-Fusca ausgewiesen sind. Bodenprofile auf den Wiesenstandorten ergaben einen hohen Tonanteil von bis zu 50 % ab einer Tiefe von 20-30 cm. Auffallend war auch das polyedrische Gefüge des Unterbodens, welches durch den hohen Tonanteil hervorgerufen wird. Im Unterboden konnte eine deutliche Zunahme der Trockenrohdichte auf bis zu $1,65 \text{ g/cm}^3$ gemessen werden. Die biogene Makroporendichte ist dennoch als sehr hoch einzustufen und wird durch zahlreiche Trockenrisse noch erhöht. Hydrophobe Eigenschaften des Bodens konnten an keiner Stelle des Einzugsgebietes trotz hoher Trockenheit festgestellt werden. Generell ist die Speicherkapazität der Böden als groß einzuschätzen, wird jedoch durch den hohen Feuchteanteil, den diese Böden über lange Zeiträume speichern können, begrenzt (nutzbare Feldkapazität ist gering).

Glasbach

Im Glasbach-Einzugsgebiet wurden 12 Bodenprofile nach den Kriterien der PBS untersucht. Die ermittelte Mächtigkeit lag meist um Werten zwischen 0,5 und 1 Meter. An einigen Stellen in der Nähe des Glasbaches starkem Gefälle konnten nur Mächtigkeiten von 30 bis 40 cm festgestellt werden. Die Eindringtiefe des Pürckhauer-Bohrstabes war hier aufgrund des hohen Skelettgehaltes oder geologischer Begrenzung limitiert. Die Bodenart wurde an einem Großteil der Untersuchungsstandorte als schluffiger Lehm und Lehm eingeordnet, womit eine geringe Durchlässigkeit der Matrix angenommen werden kann. Hydrophobe Eigenschaften der Auflage wurden bei trockener Witterung während der Felduntersuchungen mit dem WDPT-Test an einigen Stellen festgestellt werden. Die Gesamtdurchlässigkeit ist dennoch als groß einzustufen, da die für Waldböden meist typische hohe Makroporendichte aufgefunden wurde. Auf der Wiese unterhalb des Panoramahotels (siehe Standort G13 im Appendix A) wurden Böden mit sehr hohen Trockenrohdichten von $1,4 \text{ g/cm}^3$ im Oberboden respektive $1,8 \text{ g/cm}^3$ festgestellt und als stark verdichtet eingestuft.

Schmieheim

In Schmieheim konnten in den beiden Einzugsgebieten 9 Bodenprofile auf dominante Abflussprozesse untersucht werden. Die Böden in den Einzugsgebieten der Schmieheimer Bäche sind laut BK50 in der Regel tiefgründig und gut durchlässig mit einer hohen Speicherkapazität. Im Bereich der Steilstufe konnte sich über dem Oberen Buntsandstein nur geringer mächtige Böden entwickeln. Dies konnte durch die Felduntersuchungen grundsätzlich bestätigt werden. An einigen Profilen

ließ sich die Gründigkeit aufgrund des hohen Skelettanteils ($> 50\%$) nicht ermitteln. Vergleichungsmerkmale als Anzeichen für Grund- oder Stauwasser Beeinflussung konnten nicht identifiziert werden. Auffallend war die oft festgestellte hohe Trockenrohdichte der Böden von über $1,5\text{ g/cm}^3$. Die Bestimmung der Textur ergaben an einigen Stellen hohe Tongehalte. Die Matrixdurchlässigkeit ist für die meisten Profile im Oberboden als gut und im Unterboden als gering einzustufen. An einigen Profilen wurden hydrophobe Eigenschaften festgestellt. Die Makroporosität wurde im bewaldeten Gebiet als hoch eingestuft.

8.2.3 Beregnungsversuche

Die Ergebnisse der in den Untersuchungsgebieten durchgeführten Beregnungsversuche sind in Abbildung 8.2 dargestellt. Die Beregnungsdauer betrug zwischen 28 und 32 Minuten, sodass von einer annähernd konstanten Beregnungsintensität von 120 mm/h ausgegangen werden kann. Der Anteil des aufgefangenen Oberflächenabflusses an der Beregnungsmenge (30 l) betrug nach Ende der Beregnung im Mittel 28% , wobei eine große Variation zwischen 1% und 76% festgestellt werden konnte. Dabei entfiel auf die Landnutzungsart Wald im Mittel ein Abflussanteil von 22% und auf Wiese/Weide 38% . Eine kontinuierliche Zunahme des Oberflächenabflusses fanden sich bei drei Beregnungsversuchen (G13, S05, S09). Zwei Beregnungsversuche (S01, E01) zeigten nach fünf Minuten Beregnungsdauer eine deutliche Abnahme des Oberflächenabflusses. Die restlichen fünf Beregnungsversuche lieferten einen geringen aber gleichbleibenden Abflussanteil bis zum Ende der Beregnungsdauer. In den meisten Fällen setzte Oberflächenabfluss bereits nach weniger als einer Minute ein. Ein Nachlaufen des Oberflächenabflusses über die Beregnungszeit hinaus konnte an einigen Standorten beobachtet werden und hielt maximal fünf Minuten an.

Nach dem Aufgraben der Beregnungsplots konnten Infiltrationsmuster erkannt werden, welche sich deutlich voneinander unterschieden. Auf Waldböden fand sich in den meisten Fällen eine sehr heterogene Verteilung der Brilliant-Blue Färbung und deutliche Anzeichen von präferentieller Infiltration entlang von Makroporen, Rissen oder Wurzelgängen. Teilweise war gut zu erkennen wie Beregnungswasser zunächst an wenigen Punkten infiltrierte und in einer Tiefe von $10 - 15\text{ cm}$ wieder verstärkt an die Matrix abgegeben wurde (vgl. Abbildung 8.3 a). Eine Ausnahme stellt der Beregnungsversuch an Standort S09 dar. Dort wurde mit 75% der größte Abflussanteil auf aller Beregnungsversuche auf Waldstandorten festgestellt. An diesem Standort wurden eine ausgeprägte Hydrophobizität sowie verdichtete Böden festgestellt.

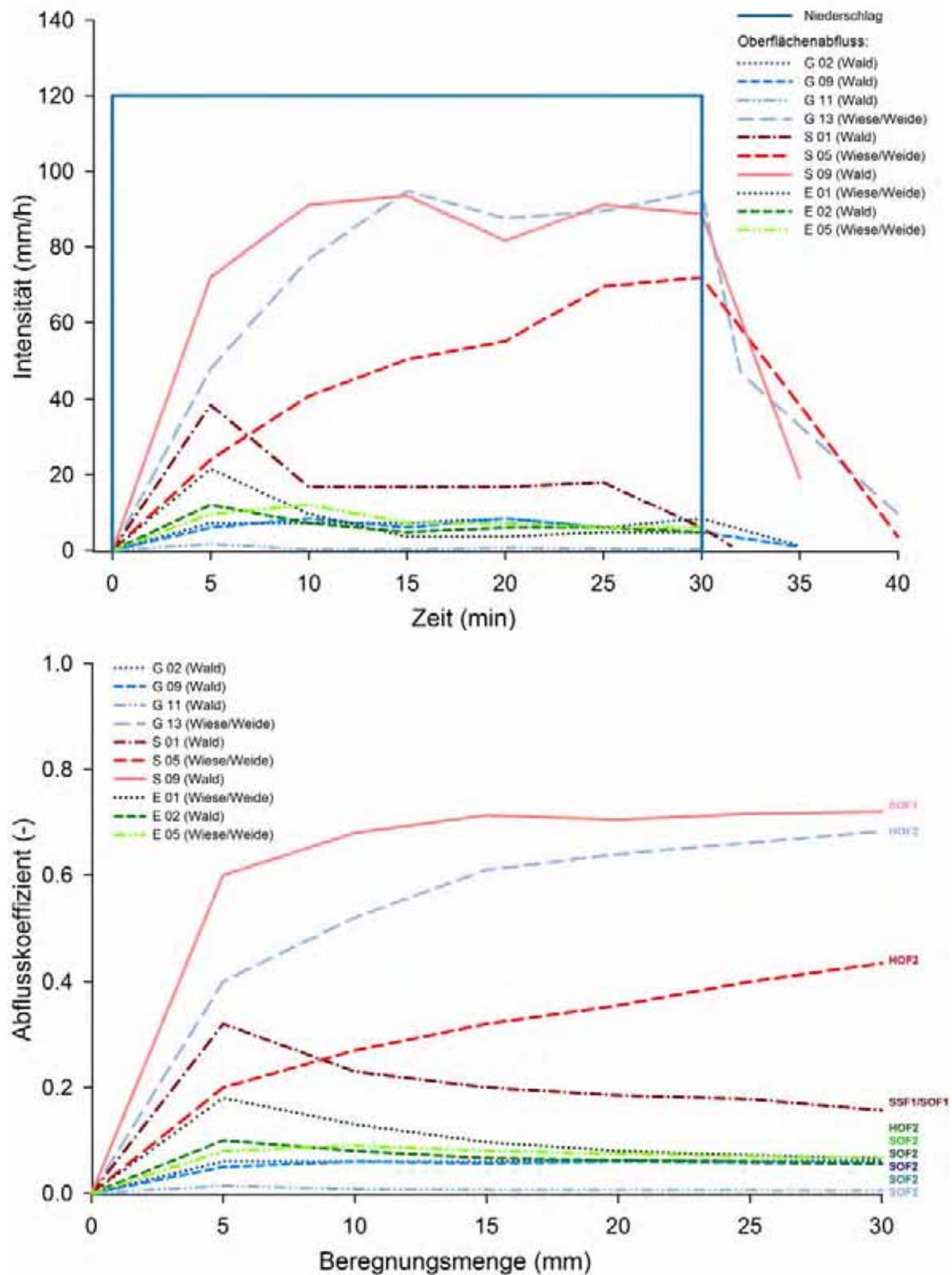


Abbildung 8.2: Ergebnisse der Beregnungsversuche in den Untersuchungsgebieten G (Glasbach), S (Schmieheim) und E (Ehrenbächle).

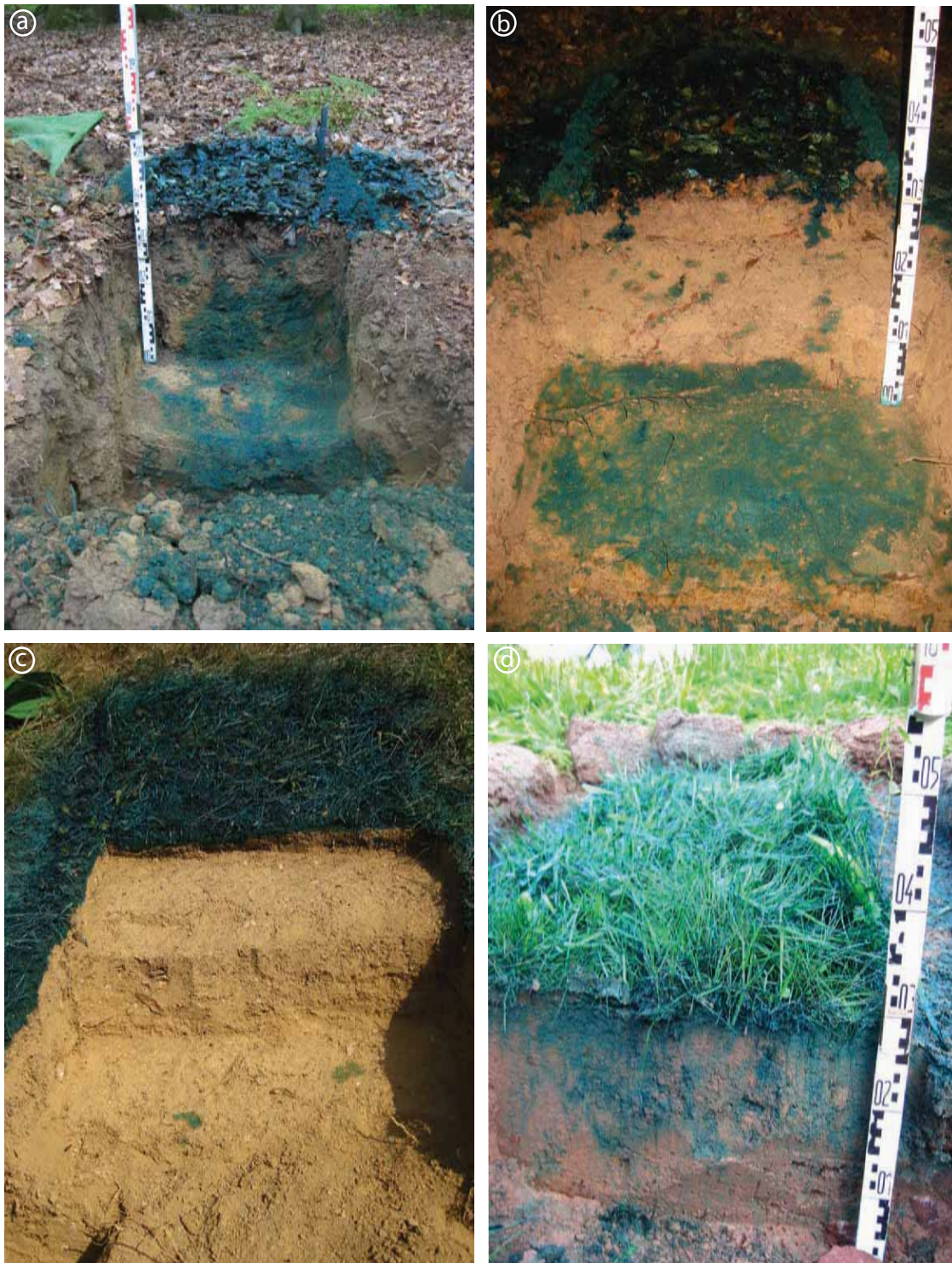


Abbildung 8.3: Fließmuster an vier Beregnungsstandorten G09, S01 (Wald); G13, S05 (Wiese/Weide). Zur Lage der Standorte siehe Appendix A.

8.3 Dominante Abflussprozesse

Die Beurteilung der dominanten Abflussprozesse für die Standorte mit Hilfe der PBS war in der Regel ohne größere Probleme möglich. Die Regionalisierung der punktuell bestimmten dominanten Abflussprozesse gestaltete sich dagegen als schwierig. Eine allgemeine Charakterisierung der Einzugsgebiete hinsichtlich der dominanten Abflussprozesse konnte dennoch durchgeführt werden. Die Abbildung 8.4 gibt einen Überblick über die relativen Anteile der in den Untersuchungsgebieten bestimmten dominanten Abflussprozesse. Die räumliche Verteilung der DRP's sind in den Einzugsgebietskarten in Appendix A dargestellt.

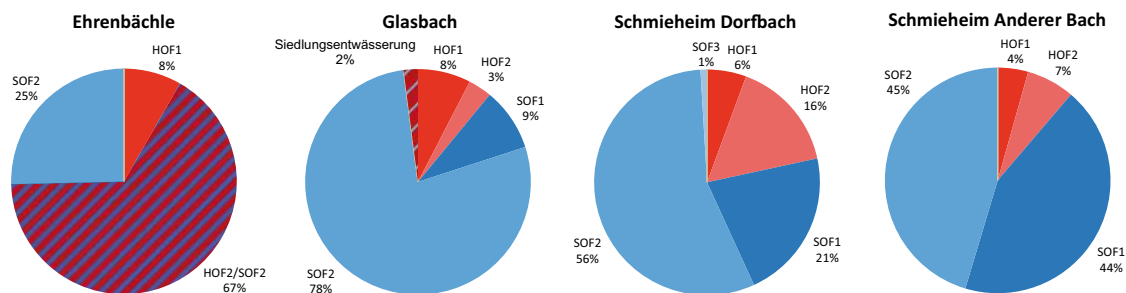


Abbildung 8.4: Flächenanteile der dominanten Abflussprozesse in den Untersuchungsgebieten.

Ehrenbächle

Im Ehrenbächle wurden auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen unter Verwendung der PBS an den Bodenprofilen ausschließlich der Prozess HOF2 identifiziert. Dieser konnte durch die Beregnungsversuche nicht bestätigt werden. Die hohe Regenwurmdichte kombiniert mit den zahlreichen Trockenrissen des tonreichen Bodens ergab eine durchweg hohe Infiltrationsrate. Nach 30 Minuten Beregnung mit 120 mm/h lag der Anteil von Oberflächenabfluss an allen Versuchsstandorten bei unter 10 %. Es konnte beobachtet werden, dass Beregnungswasser meist entlang des polyedrischen Gefüges infiltrierte und in geringen Mengen lateral an der Profilwand austrat. In Anbetracht der Ergebnisse der Beregnungsversuche erfolgte die Einstufung der Wiesen-Standorte im Ehrenbächle als SOF2. Auf Siedlungs- und Hofflächen konnte schneller hortonischer Abfluss (HOF1) angenommen werden. Die Beregnungsversuche im Wald ergaben hohe Infiltrationsrate und bestätigten dort die Klassifizierung von SOF2 aus den Bodenprofilen.

Glasbach

Die Standortuntersuchungen im bewaldeten Teil des Einzugsgebietes des Glasbaches anhand der PBS ergaben ein sehr einheitliches Bild und für alle Profile die Bewertung als verzögerter Sättigungsflächenabfluss (SOF2). Die teilweise festgestellte Hydrophobizität der Auflage könnte zwar temporären hortonischen Oberflächenabfluss (THOF) ermöglichen, ließ sich jedoch in den durchgeführten Beregnungsversuchen nicht bestätigen. Diese ergaben Abflussanteile von maximal 10 %. Die Fließspuren des Farbtracers Brilliant Blue FCF zeigten, dass zunächst oberflächlich abfließendes Beregnungswassers nach kurzer Fließstrecke entlang präferentieller Fließwege (Wurzeln oder Regenwurmgänge) infiltrierte und in tieferen Schichten an die Matrix abgegeben wurde. Laterale Fließwege (SSF) konnten aufgrund des hohen Gefälles und der aus anderen Untersuchungen bekannten guten Durchlässigkeit der periglazialen Hangschuttdecken (vgl. Kapitel 4.2) vermutet, nicht jedoch beobachtet werden. In einem Bereich um das Gewässer wurde aufgrund des vermuteten Einflusses von Hangabzugswasser und damit hoher Vorfeuchte, von SOF1 als dominantem Abflussprozess ausgegangen. Ob dies nur für das unmittelbare Umfeld des Gewässers zutrifft oder für den gesamten in der forstlichen Standortkartierung als von Grundwasser beeinflussten Bereich, konnte nicht ermittelt werden. Entlang von Wegen und im Bereich der tief eingeschnittenen "Schluchten" des Glasbaches zwischen dem Krottenweiher und der Wintererstraße finden sich an den steilen Flanken häufig humusfreie, unbewachsene und kompaktierte Böden. Das PBS sieht bei solchen Bedingungen HOF2 als dominanten Abflussprozess vor. Beregnungsversuche und Profilanalysen waren aufgrund des hohen Gefälles ($> 40^\circ$) nicht ohne weiteres möglich und eine Aussage zur räumlichen Ausdehnung dieser Standorte kann nur mit aufwändiger Feldarbeit getroffen werden.

Die Ergebnisse der Bodenuntersuchungen auf den Wiesen nahe des Stadtteils Herdern ergaben die Bewertung als verzögerter hortonischer Oberflächenabfluss (HOF2). Dies konnte durch einen Beregnungsversuch bestätigt werden, bei dem über 70 % des beregneten Wassers oberflächlich abflossen. Vorhandene Makroporen waren nicht eingefärbt und hatten während der Beregnung folglich keine wasserleitende Funktion. Die Färbung des aufgegrabenen Beregnungsplots zeigte, dass nur geringe Wassermengen in die obersten 2 Zentimeter infiltrieren konnte (vgl. Abbildung 8.3 c). Der WDPT-Test ergab auch hier eine leichte Hydrophobizität. Aufgrund der Kriterien der PBS und des Beregnungsversuches wurden diese Standorte als HOF2-Prozessflächen klassifiziert.

Für das Einzugsgebiet des Glasbaches lagen wie für alle anderen Untersuchungs-

gebiete auch Daten des Versiegelungsgrades des Amtlichen Liegenschaftskatasters (ALK) vor. Für den besiedelten Teil des Einzugsgebietes ergibt sich daraus eine hoher Versiegelungsgrad von über 60 % und führte zur Bewertung des dominanten Abflussprozesses als HOF1. Siedlungsteile für welche aufgrund der Karten des Kanalnetztes der BadenoVA angenommen werden musste, dass diese in die Misch- und Schmutzwasserkanalisation entwässern, wurden bei der Berechnung der Abflusses außen vorgelassen.

Schmieheim

Aufgrund der Prozessbeurteilungen an den Bodenprofilen ergab sich für die bewaldeten Flächen der Einzugsgebiete in Schmieheim Sättigungsflächenabfluss als dominanten Abflusstyp mit unterschiedlicher Ausprägung. Im Bereich tiefgründiger Böden mit hoher Durchlässigkeit ist verzögerter oder stark verzögerter Sättigungsflächenabfluss (SOF2, SOF3) zu erwarten. Ein breiter Streifen welcher sich quer durch beide Einzugsgebiete erstreckt, wurde aufgrund der geringeren Mächtigkeit und niedrigeren Wasserspeicherkapazität als SOF1 ausgewiesen. Derselbe Prozess wurde für den Kolluvium-Gley im Bereich um den Anderen Bach angenommen, da von einer höheren Vorfeuchte aufgrund von Hangabzugswasser ausgegangen werden musste. Der Beregnungsversuch am Standort S01 ergab hohe Infiltrationsraten und einen vernachlässigbaren Anteil an Oberflächenabfluss. Große Mengen des Beregnungswassers flossen nach kurzer Zeit lateral aus der Profilwand und füllten den ausgehobenen Graben. An den Färbungsmustern des aufgegrabenen Beregnungsplots waren zahlreiche eingefärbte Makroporen und eine scharfe Grenze zu erkennen an der das Wasser nicht tiefer in den Boden infiltrieren konnte (siehe Abbildung in Appendix C). Die Untersuchung der Trockenrohdichte ergab einen starken Anstieg der Dichte in 20 cm Tiefe.

Nicht eingeordnet werden kann ein Beregnungsversuch am Standort S09 (siehe Appendix A und B) welcher sehr hohe Abflussbeiwerte von über 70 % lieferte. Der Oberflächenabfluss setzte mit nur kurzer Verzögerung ein und blieb während der gesamten Beregnung konstant hoch. Die Färbungen des Profils zeigten, dass nur eine geringe Menge an Wasser infiltrieren konnte. In der Profilansprache wurde Hydrophobizität der Humusauflage und eine hohe Trockenrohdichte mit Werten um $1,6 \text{ g/cm}^3$ festgestellt, was in der Leitfähigkeit der Bodenmatrix zu einer erheblichen Reduktion führt. Die Makroporosität konnte wegen des hohen Skelettanteils nicht eindeutig bestimmt werden. Unter Berücksichtigung der Hydrophobizität und der Bodendichte muss der Standort laut PBS als HOF2 eingestuft werden. Um den Ab-

flussprozess auf eine größere Fläche zu übertragen, fehlten allerdings Anhaltspunkte für welche Flächen dies gelten sollte, da HOF2 als DRP für andere Bodenprofile auf dem gleichen Bodentyp (Podsolige Braunerde) nahezu ausgeschlossen werden kann.

Ein Beregnungsversuch auf einem Wiesenstandort im nördlichen Teil des Einzugsgebietes des Anderen Baches zeigte eine kontinuierliche Zunahme des Oberflächenabflusses mit fortschreitender Beregnungsdauer. Insgesamt flossen 40 % der Beregnungsmenge oberflächlich ab. Die Färbung des Bodens ergab eine relativ gleichmäßige Infiltration über die Matrix. Auf diesem Standort ist verzögerter hortonischer Oberflächenabfluss (HOF2) als dominanten Abflussprozess anzunehmen.

8.4 Fließwege und Abflusskonzentration

8.4.1 Fließgeschwindigkeit von Oberflächenabfluss

Für Oberflächenabfluss berechnete Fließgeschwindigkeiten nach Manning-Strickler sind in Tabelle 8.1 am Beispiel des Glasbaches aufgeführt. Die Werte der anderen Einzugsgebiete liegen in einem vergleichbaren Bereich. Modell 1 basiert auf den niedrigsten Angaben der Oberflächenrauigkeit aus der Literatur und Modell 3 markiert die obere Grenze. Für Modell 2 wurden in der Literatur empfohlene bzw. mittlere Werte der Rauigkeit verwendet. Die höchsten Fließgeschwindigkeiten ergaben sich dabei für voll- und teilversiegelte Flächen bzw. für die Landnutzung Wiese/Weide bei hohem Gefälle.

8.4.2 Einfluss von Waldwegen auf die Fließwege

Wie in Kapitel 5.5 beschrieben, wurde ein 1 Meter breiter Bereich entlang der Waldwege sowie die im Feld karierten Drainagen im DGM eingetieft um der vermuteten Wasserführung der Gräben entlang der Waldwege Rechnung zu tragen. Welche Bedeutung dies auf die Fließwege hat, zeigt der Vergleich der Fließakkumulation im Glasbach-Einzugsgebiet vor und nach der Eintiefung der Entwässerungs- und Drainagegräben in das DGM (Abbildung 8.5). Darin ist zu erkennen, dass Fließwege im unbehandelten DGM teilweise auf Waldwegen zusammengeführt werden und auf diesen entlang fließen. Nach kurzer Zeit werden sie jedoch meist wieder in den Wald abgeleitet. Die Fließwege des veränderten DGMs zeigen dagegen eine erhöhte Akkumulation entlang der Waldwege und werden erst an Stellen, an denen eine Drainage

Tabelle 8.1: Berechnete mittlere Fließgeschwindigkeiten für Oberflächenabfluss unter Annahme unterschiedlicher Rauigkeitswerte für das Glasbach-Einzugsgebiet.

Landnutzung	Modell 1 (m/s)	Modell 2 (m/s)	Modell 3 (m/s)
Vollversiegelte Flächen	0,27 (0 - 0,75) ^a	0,18 (0 - 0,68)	0,14 (0 - 0,58)
Teilversiegelte Flächen und Waldwege	0,11 (0 - 0,66)	0,065 (0 - 0,58)	0,05 (0 - 0,26)
Wiese/Weide	0,29 (0 - 0,55)	0,04 (0 - 0,31)	0,014 (0 - 0,22)
Wald	0,022 (0 - 0,044)	0,008 (0 - 0,018)	0,006 (0 - 0,011)

^a Werte in Klammern entsprechen der berechneten minimalen bzw. maximalen Fließgeschwindigkeit.

den Graben entwässert, in den Wald oder direkt in das Gewässer geleitet.

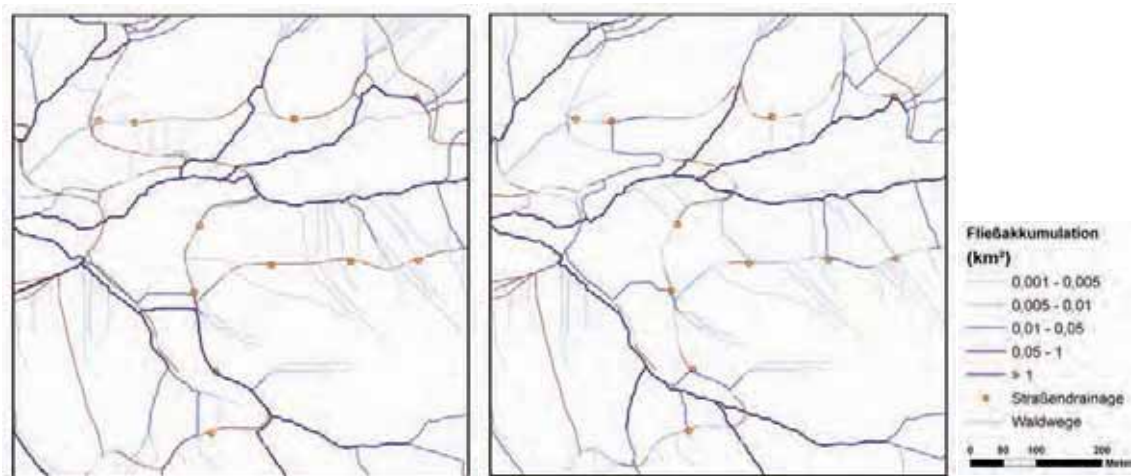


Abbildung 8.5: Fließwege ohne (links) und mit verändertem DGM (rechts) für den zentralen Teil des Glasbach-Einzugsgebietes.

Den Effekt auf die Fließzeiten veranschaulicht die Abbildung 8.6 am Beispiel des Anderen Baches und des Glasbaches. Für die Berechnung der Fließwege aus dem eingetieften DGM (linke Abbildungen) ist zu erkennen, dass Flächen welche zu einem Waldweg hin entwässern bzw. nahe zu diesem liegen, kurze Fließzeiten bis zum Gebietsauslass besitzen. Fließwege, die große Distanzen über Waldboden zurücklegen, benötigen für diese Strecke unter der hier getroffenen Annahme der höheren Oberflächenrauigkeit auf der Bodenoberfläche im Wald, eine vergleichsweise lange Zeit. Die mittlere Fließzeit bis zum Gebietsauslass liegt für das eingetiefte DGM für

den Glasbach mit 2,1 Stunden, 30 % unter der des geglätteten Höhenmodells. Für den Anderen Bach verringert sich die mittlere Fließzeit um 38 % auf 3 Stunden.

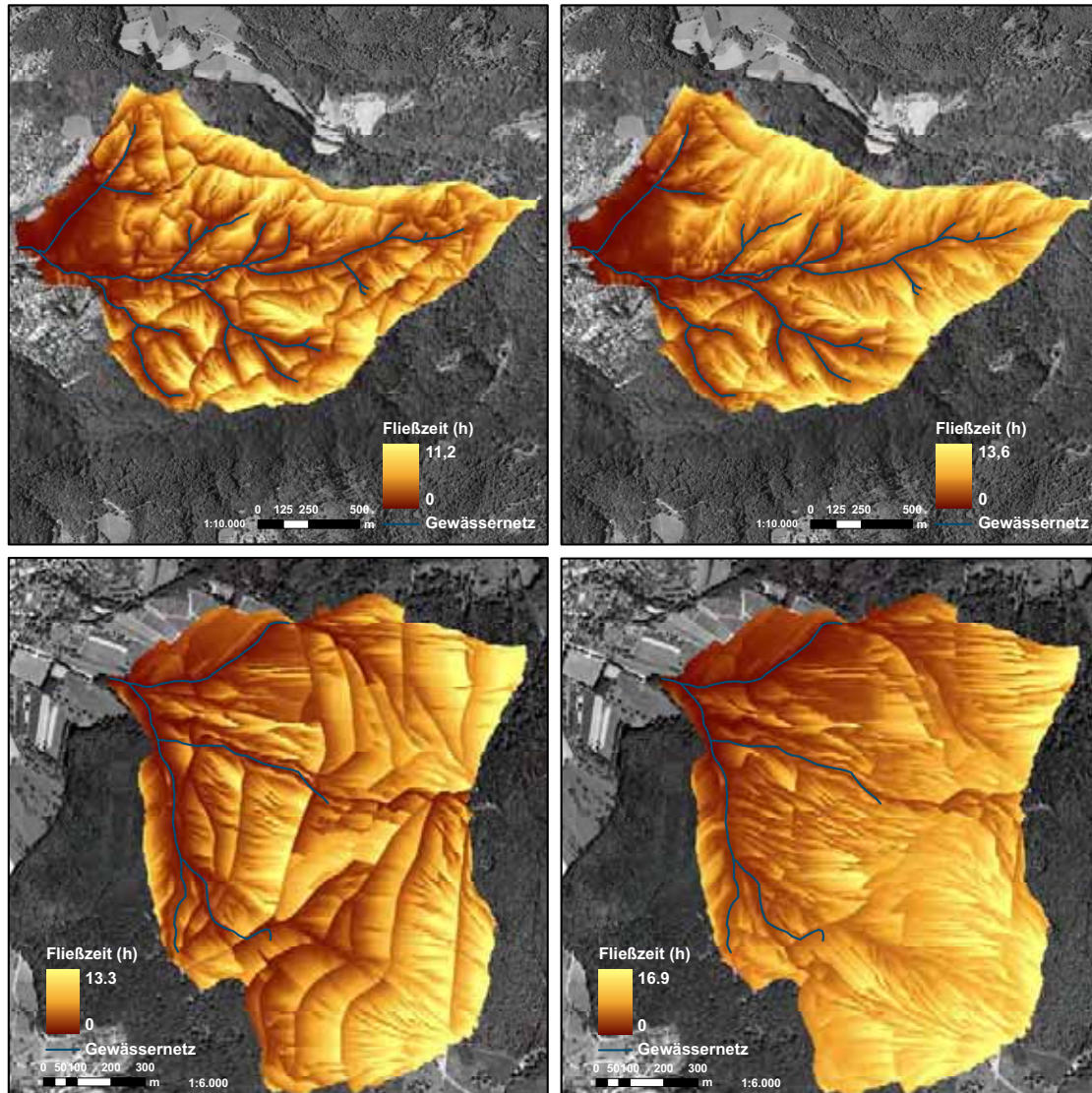


Abbildung 8.6: Fließzeiten bis zum Gebietsauslass für das Glasbach-Einzugsgebiet (oben) und den Anderen Bach (unten) unter Annahme einer mittleren Oberflächenrauigkeit. Gegenübergestellt sind Fließzeiten des eingetieften DGM (links) und eines geglätteten DGM (rechts) bei welchem die Waldwege ihrer wasserführenden Wirkung beraubt sind.

Die aus der Fließzeit resultierenden Isochronen sowie die modellierte Ganglinien als Reaktion auf einen Niederschlag der Jährlichkeit 100 und der Dauerstufe 60 min unter Annahme einer Niederschlagsverteilung nach Euler Typ II, sind in Abbildung 8.7 und 8.8 dargestellt. Dabei zeigt die modellierte Ganglinie des eingetieften Höhenmodells einen um 70 % höheren Abflussscheitel bei gleichzeitiger Verkürzung der Dauer bis zur Abflussspitze. Das Glasbach-Einzugsgebiet zeigt für ein solches Ereignis ein

Anstieg des Abflusses am Scheitel um 12 %.

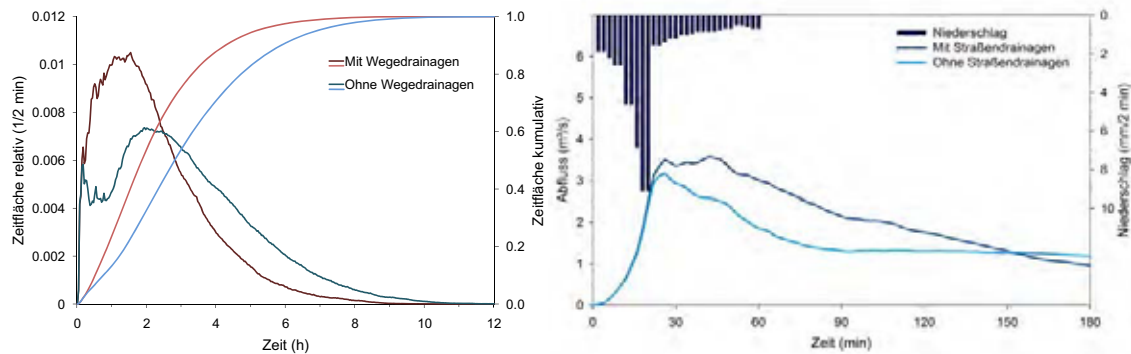


Abbildung 8.7: Berechnete Isochronen und Abflussganglinien als Reaktion auf einen Niederschlag der Jährlichkeit 100 und der Dauerstufe 60 Minuten unter Annahme einer Niederschlagsverteilung des Euler Typ II für das Einzugsgebiet des Glasbaches. Dargestellt ist die Fließzeitenverteilung und die Abflussganglinie unter Verwendung des eingetieften und des geglätteten DGM's unter Verwendung identischer Modellparameter.

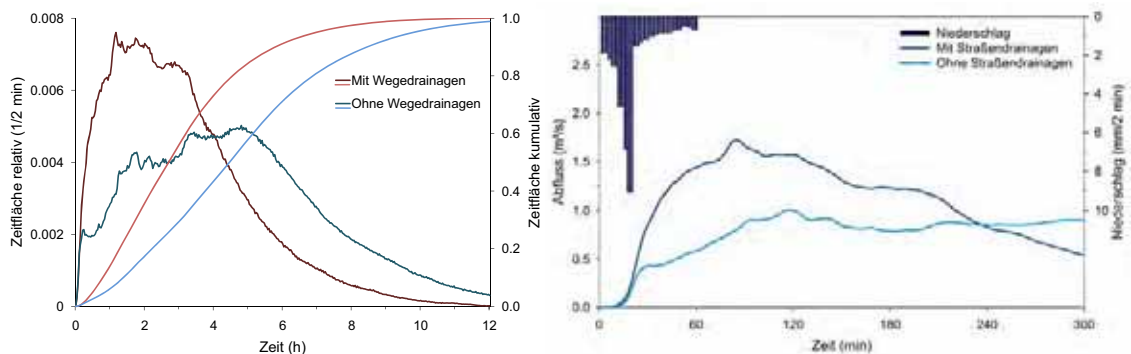


Abbildung 8.8: Berechnete Isochronen und Abflussganglinien als Reaktion auf einen Niederschlag der Jährlichkeit 100 und der Dauerstufe 60 Minuten unter Annahme einer Niederschlagsverteilung des Euler Typ II für das Einzugsgebiet des Anden Baches. Dargestellt ist die Fließzeitenverteilung und die Abflussganglinie unter Verwendung des eingetieften und des geglätteten DGM's unter Verwendung identischer Modellparameter.

8.4.3 Abflusskonzentration

Die Ergebnisse der Berechnung der Isochronen für die Untersuchungsgebiete unter Annahme einer mittleren Rauigkeit der Oberfläche und Fließgeschwindigkeit im Gerinne, sind in Abbildung 8.9 dargestellt. Ehrenbächle und Glasbach zeigen darin die höchsten relativen Zeitflächen (Anteil des Einzugsgebietes welche in einem 2-Minuten Intervall entwässert). Ebenso ist erkennbar wie der relative Anteil der

zum Abfluss potentiell beitragenden Flächen in allen Einzugsgebieten innerhalb der ersten Stunde sprunghaft ansteigt und dann langsam abfällt. Da im Fall von Konvektiveignissen, insbesondere von Flächen hortonischer Abflussprozesse, ein großer Abflussanteil zu erwarten ist, lässt die Betrachtung der Zeitflächen dieser Prozesse (Abbildung 8.10) mehr Rückschlüsse auf den Zeitpunkt und die Höhe des Scheitelabflusses zu.

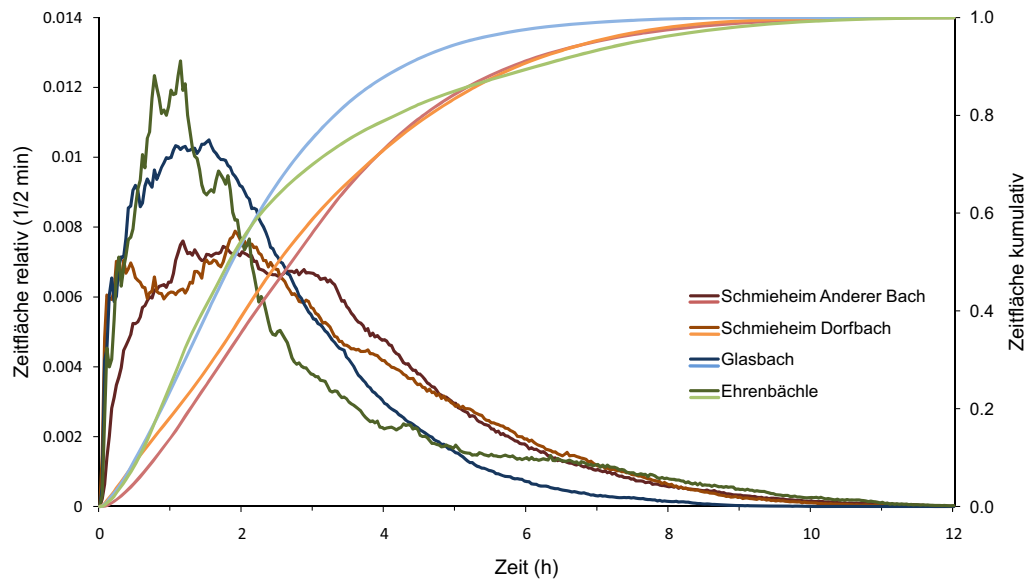


Abbildung 8.9: Isochronen für die Gesamtfläche der Untersuchungsgebiete unter Annahme einer mittleren Oberflächenrauigkeit.

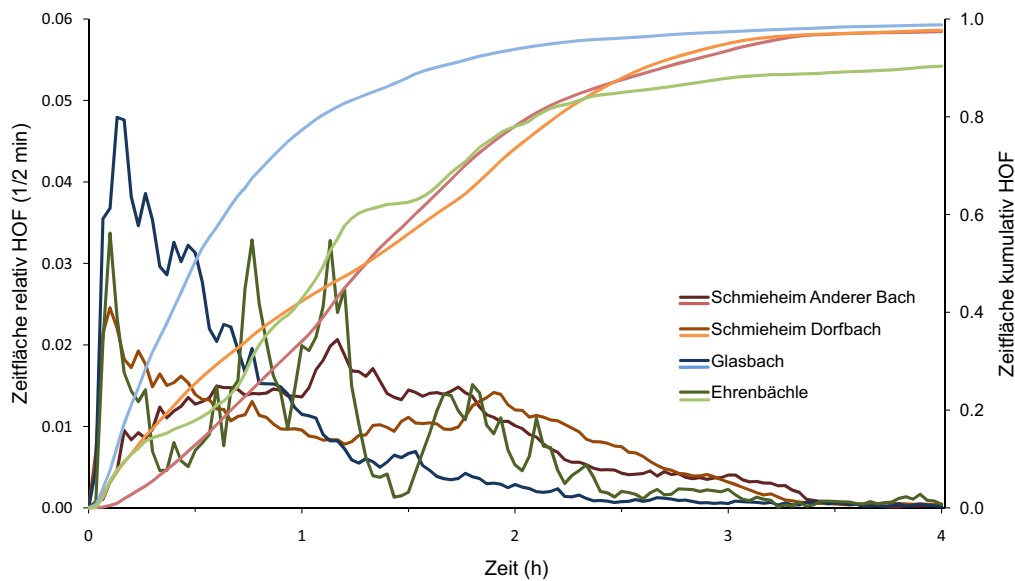


Abbildung 8.10: Isochronen für die hortonischen Abflussprozesse (HOF1, HOF2) der Untersuchungsgebiete unter Annahme einer mittleren Oberflächenrauigkeit.

8.5 Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Die Niederschlag-Abfluss-Modellierung erfolgte unter Verwendung des Horton-Infiltrationsmodells (Kapitel 6.2). Die dabei verwendeten Infiltrationsparameter für die dominanten Abflussprozessflächen der Untersuchungsgebiete sind in Tabelle 8.2 dargestellt. Als Grundlage der Parameterwahl wurden die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungsversuche und Profilsprachen sowie Literaturwerte verwendet.

Tabelle 8.2: Verwendete Parameter für des Horton-Infiltrationsmodell.

DRP	Ehrenbächle			Glasbach			Schmieheim		
	f_0 (mm/h)	f_c (mm/h)	k (1/h)	f_0 (mm/h)	f_c (mm/h)	k (1/h)	f_0 (mm/h)	f_c (mm/h)	k (1/h)
HOF1 ^a	150	2	2,0	25 ^b	5,4	2,0	50 ^c	6,4	2,0
HOF2	150	2	2,0	25 ^b	5,4	2,0	50 ^c	6,4	2,0
SOF1	128,5	10	2,0	205,6	6,5	2,0	128,5	6,4	2,0
SOF2	128,5	10	2,0	205,6	4,1	2,0	128,5	6,4	2,0
SOF3	-	-	-	-	-	-	128,5	6,4	2,0

^a Hortonische Abflussprozesse auf teilversiegelten Flächen.

^b Parameter aus Berechnungsversuch G13.

^c Parameter aus Berechnungsversuch S05.

Die Berechnung der Infiltration mit Green und Ampt ergab für die gemessenen Ereignisse auch unter Verwendung der aus der Literatur entnommenen kompletten Parameterspanne zu geringe Infiltrationsraten und hohe Abflussbeiwerte welche mit den gemessenen Wasserständen, berechneten Abflüssen und den historischen Beobachtungen nur schlechte Übereinstimmungen brachte. Das Niederschlag-Abfluss-Modell wurde an einer Reihe bemessener und beobachteter Ereignisse in den Untersuchungsgebieten angewandt.

8.5.1 Bemessene Ereignisse

Schmieheim Ereignis vom 10.08.2009

Am 10. August 2009 fielen während eines kleineren Konvektivereignisses 14 mm Niederschlag über einem Zeitraum von etwa einer Stunde. Als Reaktion stieg der Pegel des Dorfbaches um 14 cm was je nach angenommener Rauigkeit einem Abfluss von etwa 100 l/s entspricht. Die Modellierung des Ereignisses ergab für den Scheitelabfluss 110 l/s und damit eine gute Übereinstimmung (Abbildung 8.11). Die Dauer der Abflussreaktion auf das Ereignis wird dagegen stark überschätzt und das

modellierte Abflussvolumen übertrifft das des berechneten Abfluss bei weitem. Als beitragende Abflussprozesse sind hier hortonischer Abfluss aus den Siedlungsflächen in der näheren Umgebung des Pegelstelle zu erwarten.

Für den Anderen Bach ergibt sich aus der Modellierung des selben Ereignisses ein Spitzenabfluss von 80 l/s und ausschließlich HOF1 von vollversiegelten Flächen als beitragender Abflussprozess. Dies konnte durch den am Pegel registrierten Wasserstand nicht bestätigt werden, der einem Abfluss von wenigen mm respektive l/s entspricht (Abbildung 8.12).

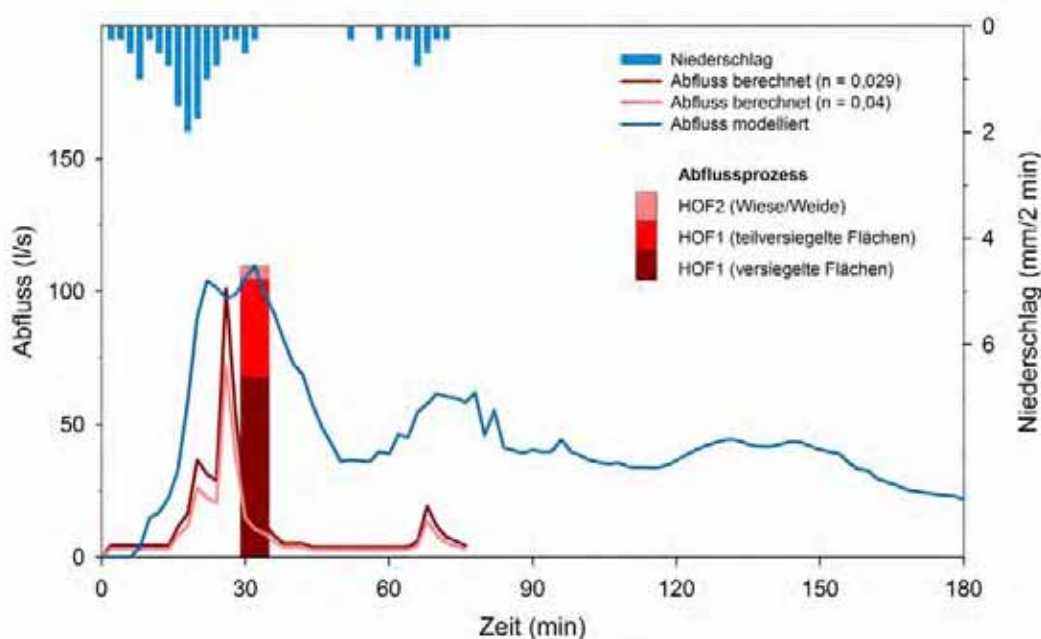


Abbildung 8.11: Berechnete und modellierte Ganglinie sowie beitragende Abflussprozesse für das Konvektive Ereignis im Einzugsgebiet des Dorfbaches in Schmieheim vom 10. August 2009.

Glasbach Ereignis vom 25.08.2009

In der Nacht vom 24. auf den 25. August konnte im Glasbach-Einzugsgebiet ein Konvektive Ereignis registriert werden bei dem innerhalb von einer halben Stunde 29 mm Niederschlag fielen. Die maximale Intensität betrug für einen Zeitraum von 4 Minuten 140 mm/h. Die Niederschlagsmenge für eine Dauerstufe von 30 Minuten lässt laut KOSTRA-Atlas auf eine Jährlichkeit zwischen 5 und 10 schließen. Als Folge des Ereignisses konnte mit einer zeitlichen Verzögerung von 17 Minuten zum Intensitätsmaximum des Niederschlages, ein Anstieg des Wasserstandes am Pegel oberhalb der Stadtstraße von etwa 50 cm registriert werden. Der nach Manning-Strickler berechnete Abfluss betrug bei einem Sohlgefälle von 0,02 und einer Gewässerbreite von 2

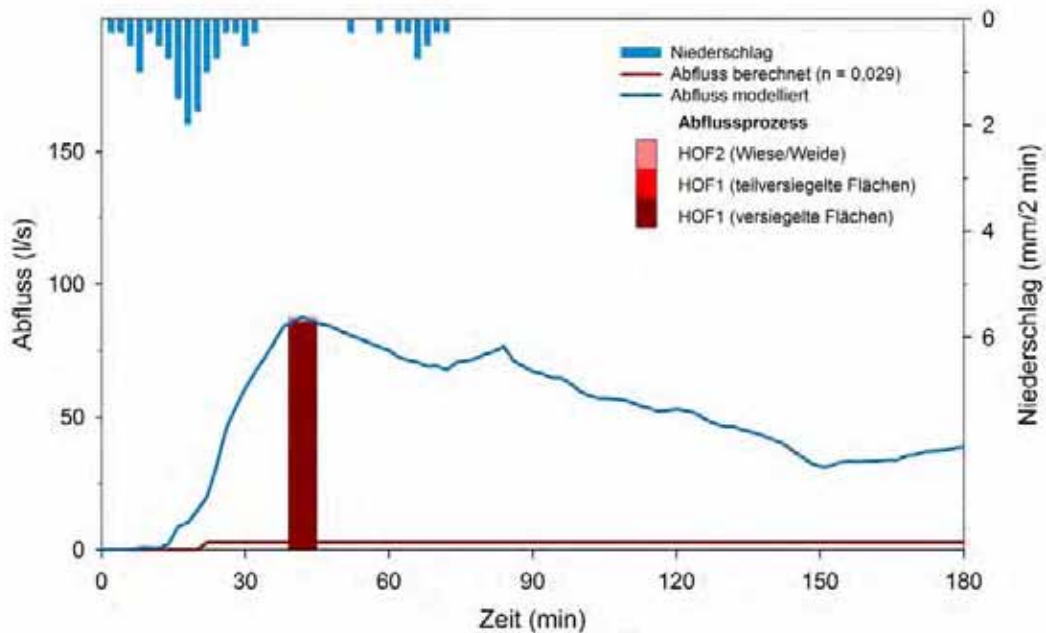


Abbildung 8.12: Berechnete und modellierte Ganglinie sowie beitragende Abflussprozesse für das Konvektiveignis im Einzugsgebiet des Anderen Baches in Schmieheim vom 10. August 2009.

Metern je nach Annahme der Rauigkeit (Manning's n zwischen 0,029 und 0,04) am Scheitel zwischen 1,4 bis 1,9 m^3/s (Abbildung 8.13). Das Abflussvolumen berechnet sich auf 4 700 m^3 , was einem Abflussbeiwert von 0,08 entspricht.

Die Ergebnisse der Modellierung ergaben für die Höhe des Scheitelabflusses und die Form der Abflussganglinie eine insgesamt gute Übereinstimmungen im Vergleich mit dem aus dem Wasserstand berechneten Abfluss (vgl. Abbildung 8.13).

Der Zeitpunkt des Scheitelmaximums trifft im Vergleich mit dem gemessenen Abfluss 10 Minuten früher ein. Der langsame Abfall der gemessenen Ganglinie im letzten Drittel kann auf eine etwa 10 cm mächtigen Aufschotterung des Bachbettes durch das Abflussereignis zurückgeführt werden. Das modellierte Abflussvolumen liegt mit 5 300 m^3 leicht über dem berechneten Wert. Zum Abflussscheitel trugen ausschließlich hortonische Abflusskomponenten aus dem unteren Teil des Einzugsgebietes bei. HOF1 von versiegelten und teilversiegelten Flächen machen zusammen über 75 % des Abflusses aus. Der Rest stammt von leicht verzögertem hortonischen Abfluss der Wiesen im Einzugsgebiet.

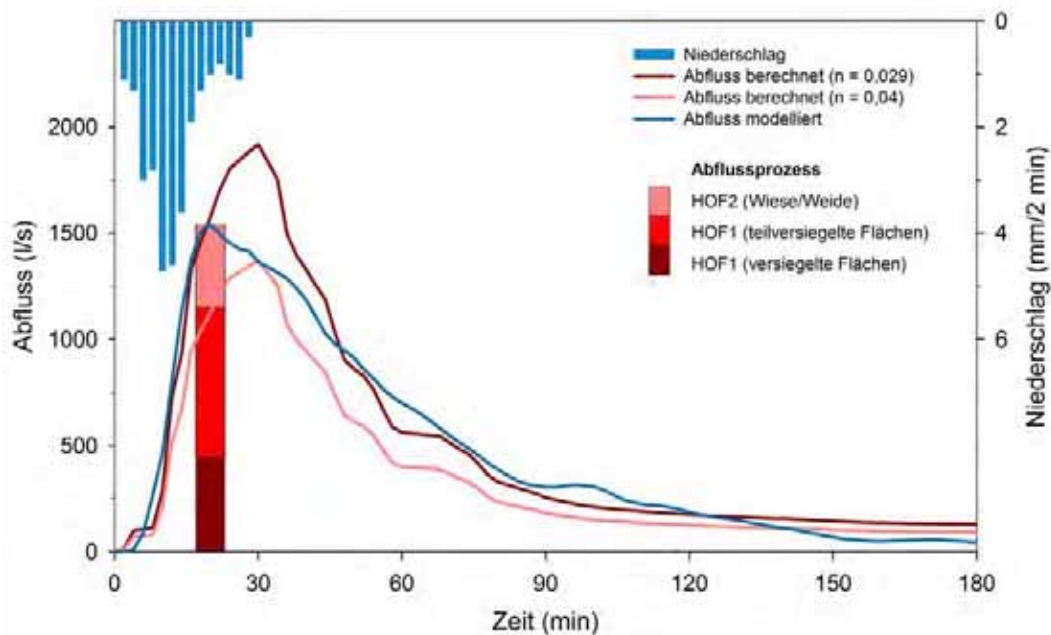


Abbildung 8.13: Berechnete und modellierte Ganglinie sowie beitragende Abflussprozesse für das Konvektive Ereignis im Glasbach-Einzugsgebiet vom 28. August 2009.

8.5.2 Rekonstruktion unbemessener Ereignisse

Aufgrund mangelnder räumlich und zeitlich hoch aufgelöster Niederschläge hochwasserauslösender Ereignisse, wurde eine Rekonstruktion unbemessener, beobachteter Ereignisse nur in einem Fall durchgeführt.

Schmieheim Ereignis vom 01.09.2008

Kurz nach Mitternacht des 1. September ereignete sich in der Ortenau ein Konvektivniederschlag mit hohen Intensitäten und großer Niederschlagsmenge. Im gesamten Gebiet kam es in mehreren kleinen Ortschaften zu Überschwemmungen mit größeren Schäden, unter anderem auch in Schmieheim (*Badische Zeitung*, 2008). Im 10 km entfernten Lahr verzeichnete eine Station des Deutschen Wetterdienstes (DWD) eine Niederschlagsmenge von 46 mm in einem Zeitraum von 70 min und einem kurzzeitigen Intensitätsmaximum von 170 mm/h. Eine private Wetterstation in Ettenheimmünster (etwa 4 km von Schmieheim) berichtet von 60 mm in einer Stunde und 27 mm in 10 Minuten (*Ohnemus*, 2008) was einer Intensität von 160 mm/h entspricht und in der Größenordnung eines 50 bis 100-jährlichen Ereignisses liegt. Die an der Station in Lahr angeeichten Radardaten (Stundenauflösung) deuten eine Zugbewegung der Gewitterzelle aus Süden Richtung Schmieheim an (Abbildung 8.14).

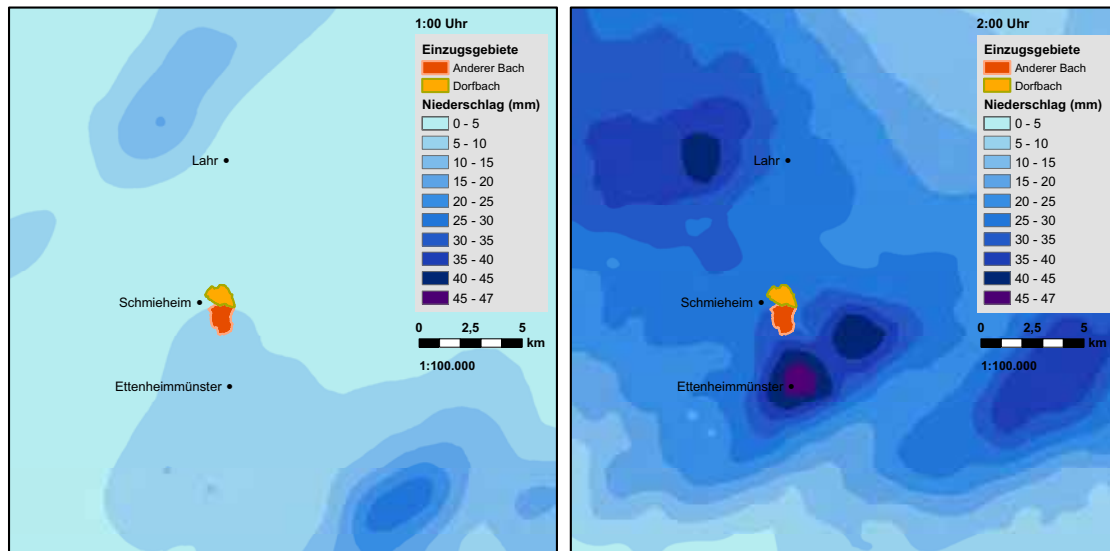


Abbildung 8.14: Niederschlagsradar für das Ereignis vom 1. September 2008 in der Ortenau um 1:00 Uhr (links) und um 2:00 Uhr (rechts).

Unter Annahme der Niederschlagswerte von Ettenheimmünster ergibt sich aus der modellierten Abflussganglinie des Anderen Baches ein Scheitelabfluss von $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ und für den Dorfbaches von $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$.¹ Die Modellierung ergaben dabei den größten Abflussanteil aus hortonischen Abflusskomponenten (70 % Anderer Bach; 85 % Dorfbach). Für den Dorfbach sind aus Photographien am Rand einer Böschung Fließspuren zu erkennen, welche je nach zugrunde gelegtem Rauigkeitswert nach Manning-Strickler (Manning's n zwischen 0,017 und 0,025) auf einen Abfluss zwischen $0,8$ und $1,5 \text{ m}^3$ schließen lässt. Dem liegt die Annahme zu Grunde, dass der Einlauf zur Dole welche den Anderen Bach unter der Ortschaft durchleitet durch Geschiebe verstopft war. Ein Mitarbeiter der Feuerwehr von Schmieheim berichtet von intensivem Transport von Geschiebe und Geschwemmsel welches das komplette Bachbett vom Waldrand bis zum Einlauf der Verdolung, auf einer Strecke von etwa 200 Metern, fast komplett auffüllte.² Am Dorfbach ließen sich Wasserstände und Abfluss aus Beobachtungen nicht rekonstruieren. Auch an dieser Stelle kam es teilweise zu einem Verschluss der Doleneinläufe und zu größeren Wasserbewegungen durch die Ortschaft.

¹ Unter Annahme einer hohen Fließgeschwindigkeit (geringe Rauigkeit) wird der Scheitelabfluss auf $2,2$ respektive $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$ berechnet.

² Dies entspricht einem Geschiebevolumen von etwa 150 m^3 .

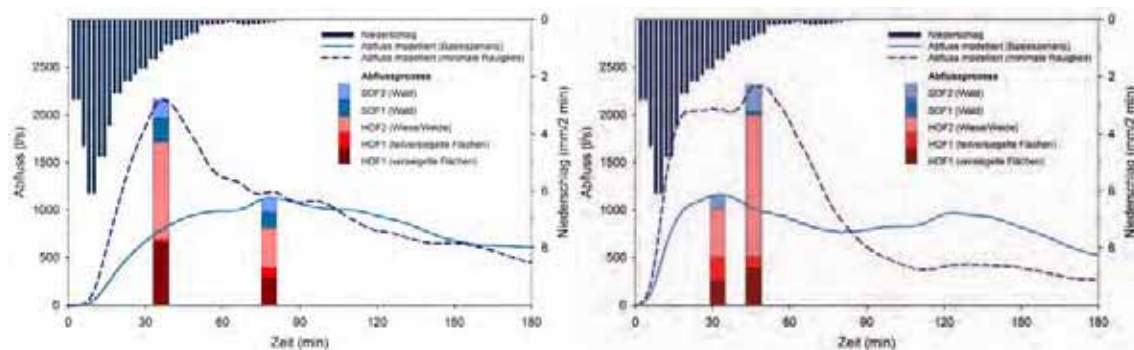


Abbildung 8.15: Modellierte Ganglinie für das Konvektive Ereignis in Schmieheim am 1. September 2008 für den Anderen Bach (links) und den Dorfbach (rechts). Dargestellt sind modellierte Ganglinien unter Annahme einer geringen und einer mittleren Oberflächenrauigkeit sowie der Anteil dominanter Abflussprozesse am Scheitel.

8.5.3 Bemessungsabflüsse

Auf der Grundlage der Zeitflächen, Niederschlagsmengen aus dem KOSTRA und Annahmen zur Niederschlagsverteilung (siehe Kapitel 6.1) wurden für die Untersuchungsgebiete Scheitelabflüsse verschiedener Jährlichkeiten und Dauerstufen berechnet. Die Berechnungen mit den jeweiligen aus der Literatur entnommenen mittleren, minimalen und maximalen Rauigkeitswerten der Bodenoberfläche (Tabelle 6.3 führten insbesondere für seltene Niederschlagsereignisse zu großen Variationen in den Scheitelabflüssen (Abbildung 8.16). Je nach verwendetem Modell betrugen diese für Ereignisse gleicher Jährlichkeit und Niederschlagsverteilung bis zu 100 %.

Die Annahme unterschiedlicher Niederschlagsverteilungen (vgl. Kapitel 6.1) ergab für die Modellierung eines Ereignisses der Dauerstufe 60 Minuten unter Verwendung des gleichen Modells, Unterschiede in der Abflussspitze von bis zu 90 %. Aus der Modellierung geht zudem hervor, dass bei Konvektivniederschlägen in allen Einzugsgebieten ein Großteil des Abflusses von Prozessflächen generiert wird, welche im Feld als hortonische Abflusskomponenten kartiert wurden (Abbildung 8.17). Im Glasbach-Einzugsgebiet sind dies insbesondere Siedlungsflächen, welche aufgrund ihrer Lage (vgl. Karten im Appendix A) auf kurze und intensive Niederschläge schnell reagieren und einen hohen Anteil zum Scheitelabfluss beitragen.

Die Modellierung eines Landregens mit der Dauerstufe 12 und 24 Stunden und erbrachte unter der Annahme von Blockniederschlag geringere Abflussspitzen als für Konvektive Ereignisse der selben Jährlichkeit. Die Modellierung eines 24-stündigen 100-jährlichen Niederschlages aus mit gemessenen Niederschlägen generierten zeitlichen Verteilung ergab für das Einzugsgebiet des Glasbaches einen Scheitelabfluss

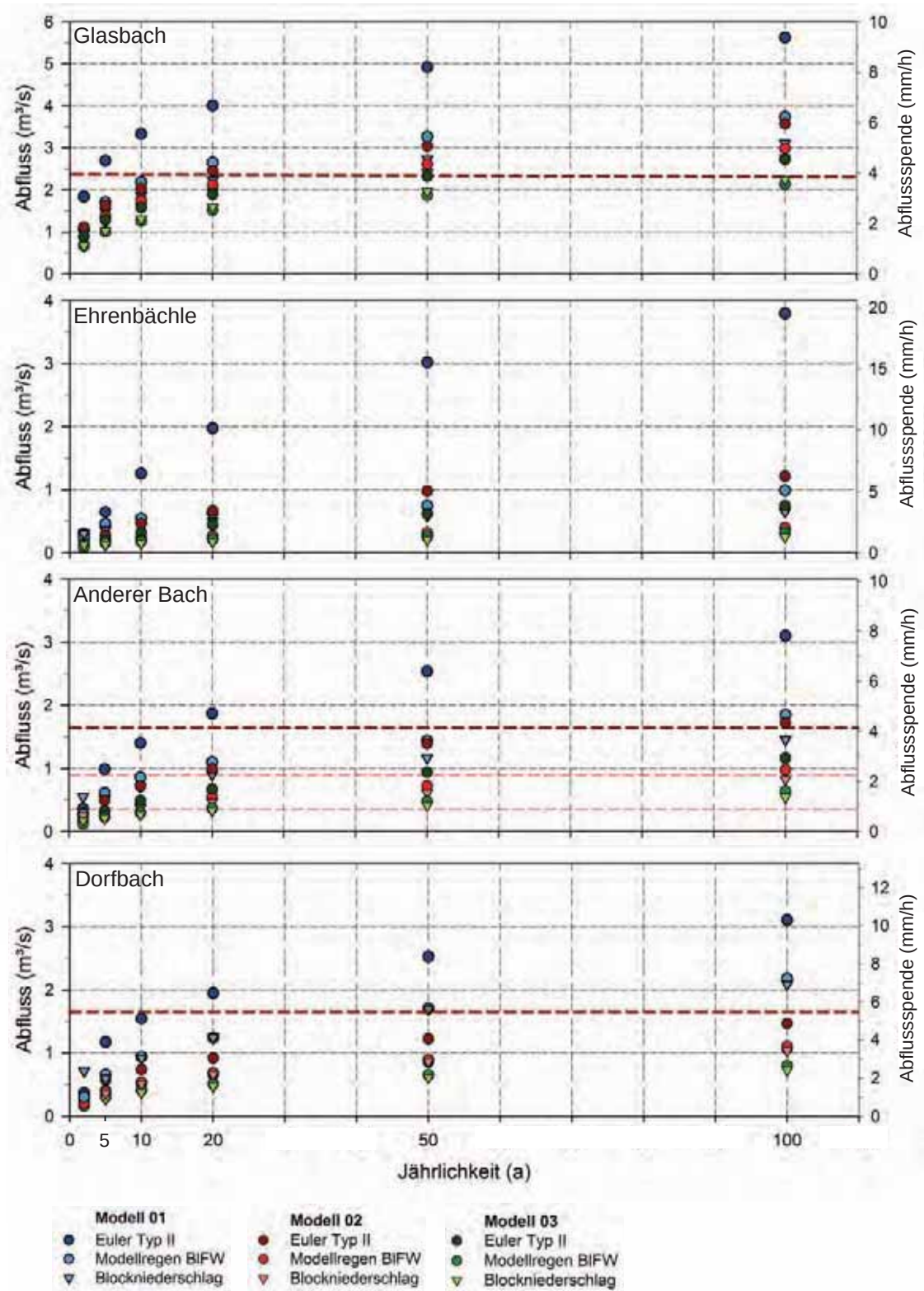


Abbildung 8.16: Modellerte Scheitelabflüsse der Untersuchungsgebiete für ein Ereignis der Dauerstufe 60 Minuten unterschiedlicher Jährlichkeiten, Niederschlagsverteilungen und Oberflächenrauigkeiten. Rote Linien markieren berechnete hydraulische Leistungsfähigkeiten einer Schwachstelle im Gewässerquerschnitt bzw. in verdolten Abschnitten.

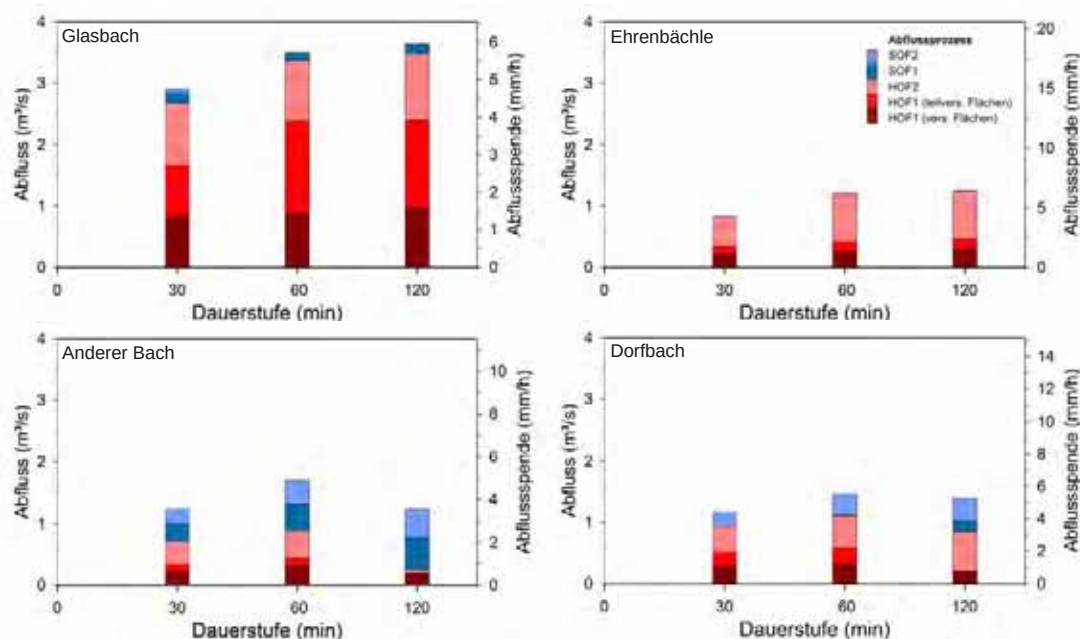


Abbildung 8.17: Anteil der Abflussprozessflächen am Scheitelabfluss der Untersuchungsgebiete für ein 100-jährliches Ereignis der Dauerstufe 30, 60 und 120 Minuten unter Verwendung eines Modells mittlerer Fließzeiten (Modell 2).

von über $6 \text{ m}^3/\text{s}$ (Modell 1) respektive $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Modell 2). Durch die große Niederschlagsmenge und die angenommene hohe Vorfeuchte, wurde das gesamte Einzugsgebiet aufgesättigt und führte zum Abfließen des gesamten Niederschlages. Die Modellkonzeption sieht keine Unterschiede der topographischen Lage von Teilflächen hinsichtlich ihrer Vorfeuchte vor und Abzug von infiltriertem Wasser wird nicht abgebildet.

8.6 Sensitivitätsanalyse

Grenzwert für Gerinneabfluss

Die Reaktion der Abflussganglinie auf eine Veränderung des Grenzwertes für die Definition als Gerinneabfluss wurden untersucht, indem der Grenzwert von $0,03 \text{ km}^2$ (Basis-Szenario) auf $0,01$ bzw. $0,1 \text{ km}^2$ verändert wurden. Der Effekt auf die modellierten Ereignisse am Glasbach ist in Abbildung 8.18 dargestellt. Die Modellierung ergab für diesen Parameter keine bedeutenden Auswirkungen auf den Verlauf der Abflussganglinie und den Scheitelabfluss. Ein niedrigerer Grenzwert bewirkt eine Verkürzung der Fließzeiten von Oberflächenabfluss und eine Beschleunigung der Entwässerung insbesondere der Randbereiche des Einzugsgebietes. Als Reaktion dar-

auf erhöhte sich der Scheitelabfluss für ein 100-jährliches Ereignis um 5 %, für das Ereignis vom 25. August 2009 um 17 %. Der Zeitpunkt der Abflussspitze veränderte sich nur geringfügig. Der Abflussscheitel wird in seiner Form gestreckt und das Abfließen des Niederschlagswassers aus dem Einzugsgebiet beschleunigt. Eine Herabsetzung des Grenzwertes dagegen hatte für das Einzugsgebiet des Glasbaches keine signifikanten Auswirkungen auf die Ganglinie.

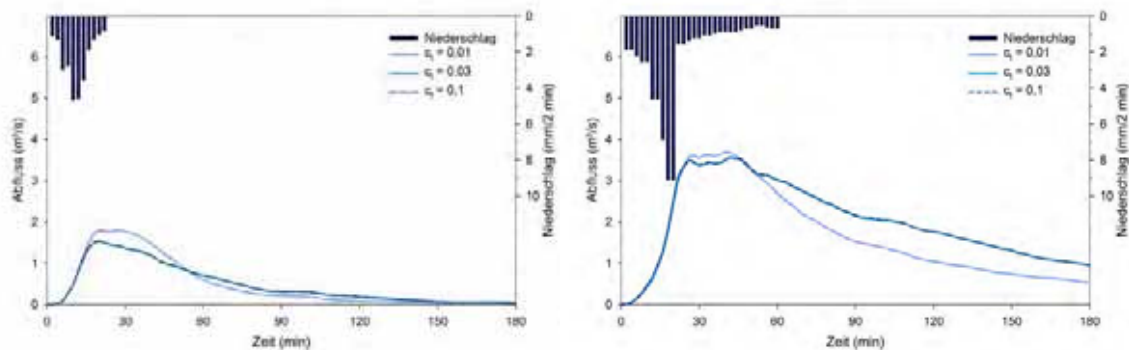


Abbildung 8.18: Sensitivitätsanalyse des Grenzwertes von Gerinneabfluss für das Glasbach-Einzugsgebiet. Ereignis vom 25. August 2009 (links) und Niederschlag der Dauerstufe 60 min und der Jährlichkeit 100 unter Annahme einer Intensitätsverteilung nach Euler Typ II (rechts).

Fließgeschwindigkeit im Gerinne

Die Fließgeschwindigkeit im Gerinne wurde für die Sensitivitätsanalyse vom Basiswert 1 m/s auf 0,5 bzw. 1,5 m/s verändert. Auf die Form der Abflussganglinie bringt dies für beide Ereignissen kaum Veränderungen und führt in der Abflussspitze zu Variationen von unter 10 % (Abbildung 8.19).

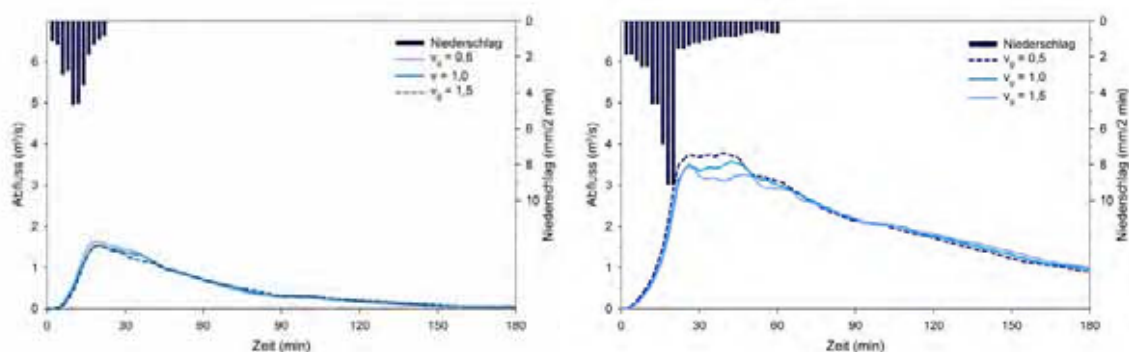


Abbildung 8.19: Sensitivitätsanalyse der Fließgeschwindigkeit des Gewässers für das Glasbach-Einzugsgebiet. Ereignis vom 25. August 2009 (links) und Niederschlag der Dauerstufe 60 min und der Jährlichkeit 100 unter Annahme einer Intensitätsverteilung nach Euler Typ II (rechts).

Oberflächenrauigkeit

Unter Verwendung der vollen Bandbreite der in der Literatur angegebenen Rauigkeiten für Oberflächen unterschiedlicher Landnutzungen (vgl. Tabelle 6.3) ergeben sich die stärksten Veränderungen des Abflussscheitels (Abbildung 8.20). Bei Annahme einer geringen Rauigkeit stieg die Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses an und vergrößerte die zum Abfluss beitragende Fläche eines bestimmten Zeitpunktes. Für den Scheitelabfluss ergaben sich daraus um bis zu 40 % höhere Werte für beide modellierten Ereignisse bei unverändertem Zeitpunkt der Scheitelmaxima. Die höchsten Rauigkeiten und damit niedrigsten Geschwindigkeiten des Oberflächenabflusses ergaben eine Reduktion am Scheitel von 22 % für das gemessene bzw. 32 % für das hypothetische 100-jährliche Ereignis.

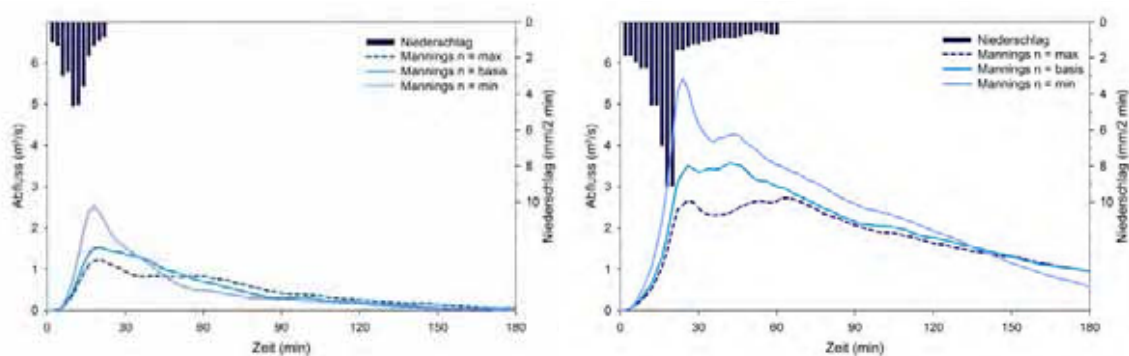


Abbildung 8.20: Sensitivitätsanalyse der Oberflächenrauigkeit (Manning's n) für das Glasbach-Einzugsgebiet. Ereignis vom 25. August 2009 (links) und Niederschlag der Dauerstufe 60 min und der Jährlichkeit 100 unter Annahme einer Intensitätsverteilung nach Euler Typ II (rechts).

8.7 Hochwassermanagement

In den Untersuchungsgebieten kam es in der vergangenen Zeit immer wieder zu Schäden durch Hochwässer. Tabelle 8.3 gibt einen Überblick zur jüngeren Hochwassergeschichte in den Untersuchungsgebieten, für welchen jedoch keine Vollständigkeit angenommen werden kann. Laut Berichten von Augenzeugen ist für diese Hochwasserereignisse häufig eine Verklausung an Gewässerengstellen ursächlich und nicht die Abflusshöhe selbst.

Tabelle 8.3: Übersicht zu Hochwasserereignissen in den Untersuchungsgebieten.

Einzugsgebiet & Datum	Ursache	Schäden
Glasbach		
20. Juli 1911 ^a	Hochwasser infolge von Starkregen	Überschwemmungen in Herdern an der Ecke Sandstraße/Hauptstraße
19. Mai 1994 ^b	Hochwasser infolge von Dauerregen (80 mm in 12 Stunden)	Überschwemmungen in der an der Ecke Stadtstraße/Hauptstraße (Verklausung) und an der Ecke Lärchenstraße/Hauptstraße
August 1994 ^c	Hochwasser infolge von Starkregen	Überschwemmungen in der Hauptstraße
29.05.2008 ^d	Hochwasser infolge von Starkregen	Überschwemmungen u. a. an der Ecke Lärchenstraße/Hauptstraße
Ehrenbächle^e		
Schmieheim		
1. Sep. 2008 ^f	Konvektivereignis mit bis zu 60 mm in einer Stunde	Überschwemmungen im Unterdorf (Anderer Bach) sowie im Winkel (Dorfbach)

^a *Schleer* (1957).

^b *Badische Zeitung* (1994).

^c Sigmund, H., Ortschronist, pers. Mitteilung, März 2010.

^d Haag, H., Garten- und Tiefbauamt Freiburg, pers. Mitteilung, Oktober 2009

^e Für das Ehrenbächle sind aus den letzten Jahren keine schadensbringenden Hochwässer bekannt.

^f Meier, N., Feuerwehr Schmieheim, pers. Mitteilung, Januar 2010.

In den Untersuchungsgebieten wurden an verschiedenen Stellen Abflussquerschnitte ermittelt und Rauigkeiten nach Manning-Strickler abgeschätzt, um so die hydraulische Leistungsfähigkeit der Gewässerabschnitte zu bestimmen und Schwachstellen zu ermitteln. Da das genaue Gefälle in der Regel nicht bekannt, der Rauigkeitswert geschätzt werden musste und zudem im Fall von Hochwasser an einigen Stellen von einem turbulenten Fluss ausgegangen werden musste, können diese Werte nur als grobe Richtlinie gelten. Stellen an denen die Gewässer in einem verdolten Bereich verlaufen wurden meist als hydraulische Schwachstellen identifiziert werden. Die in der Regel davor angebrachten Rechen werden bei Hochwasser häufig mit einer großen Menge an mitgeführtem Geschiebe und und Geschwemmsel zugesetzt. Für den Dorfbach wurde die Leitfähigkeit der Verdolung ($\varnothing$ ca. 80 cm) auf $1,5 \text{ m}^3$ berechnet. Im offenen Gerinne konnten keine Schwachstellen der Leistungsfähigkeit festgestellt werden. Im Bereich des Wasserpumpwerks am Anderen Bach beträgt der Durchmesser der Dole 40 cm, was einer hydraulischen Leitfähigkeit von $0,3 \text{ m}^3$ entspricht. Hier kommt es regelmäßig zu einem Übertritt des Gewässers auf die Straße. Der darauf folgende Einlauf zur Dole, welcher den Anderen Bach durch die Ortschaft leitet, hat einen Durchmesser von 80 cm. Das entspricht je nach zugrunde gelegtem Gefälle und Rauigkeit einer Leitfähigkeit von $1,5$ bis $1,9 \text{ m}^3$. Am Glasbach finden sich Schwachstellen der Leistungsfähigkeit ausschließlich im Siedlungsgebiet. An zahlreichen Durchläufen des Gewässers unter Straßen und Einfahrten wird der hydraulische Querschnitt erheblich verengt und führte an diesen Stellen bei vergangenen Hochwasserereignissen immer wieder zu einem Übertritt des Baches.

Von den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Einzugsgebieten gibt es derzeit nur im Ehrenbächle ein bestehendes Hochwasserrückhaltebecken. In den anderen Einzugsgebieten finden sich aufgrund der topographischen Gegebenheiten nur wenige Stellen welche für den zentralen Hochwasserrückhalt geeignet sind. Das tief eingeschnittene Bachbett des Glasbaches vor dem Eintritt in den locker besiedelten Teil von Herden könnte ein Standort für einen solchen Retentionsraum darstellen. Vor einem Durchlassbauwerk welches den Glasbach unter der Wintererstraße durchführt, fällt die Böschung mehrere Meter steil ab. Bei einem Freibord³ von einem Meter könnte an dieser Stelle ein Volumen von etwa 1600 m^3 als Retentionsraum zur Verfügung stehen (Abbildung 8.21).

In Schmieheim konnten unter der gegebenen naturräumlichen Situation nur am Anderen Bach Möglichkeiten zum zentralen Wasserrückhalt gefunden werden. In zwei Bereichen in denen das Gewässer im natürlichen, tief eingeschnittenen Bachbett ver-

³ Vertikaler Abstand zwischen Dammkrone und dem höchsten Stauziel.

läuft und verdolte Abschnitte passiert, wäre die Schaffung von Retentionsräumen mit einem Volumen von 1200 respektive 750 m³ bei einem Freibord von einem Meter durch technische Maßnahmen möglich (Abbildung 8.21).

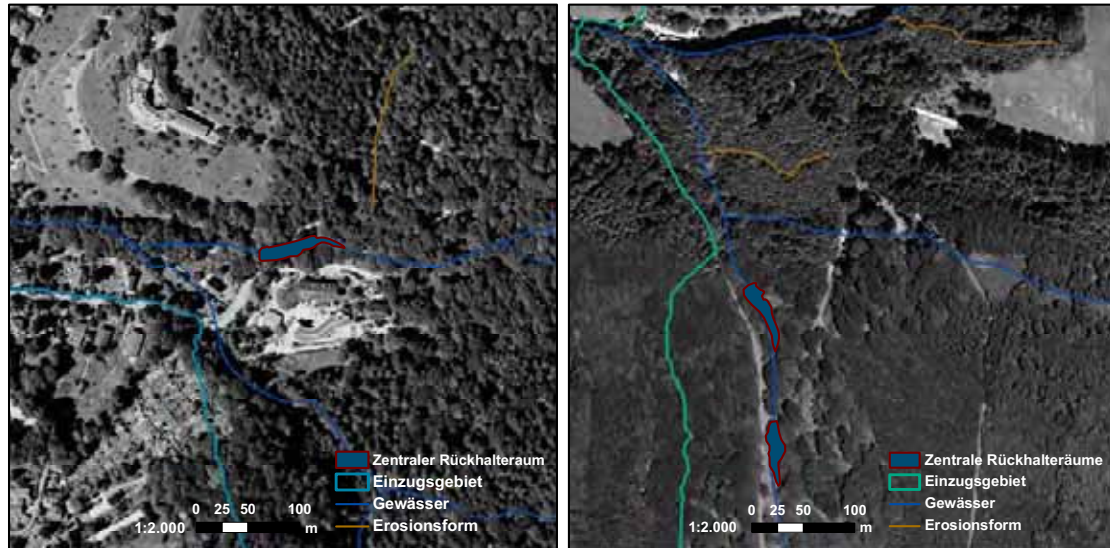


Abbildung 8.21: Mögliche Standorte für zentrale Hochwasserrückhalteräume in den Einzugsgebieten Glasbach (links) und Anderer Bach (rechts).

9 Diskussion

9.1 Dominante Abflussprozesse

Dem Konzept der Prozess-Beurteilungs-Schemata (PBS) nach *Naef et al.* (2000) und *Scherrer* (2006) folgend, wurden in der vorliegenden Arbeit vier kleine Einzugsgebieten an 26 Standorten mittels Bodenansprachen und Beregnungsversuchen auf dominante Abflussprozesse untersucht. Die Kriterien der PBS konnten direkt im Feld bestimmt werden, was mit verhältnismäßig geringem Aufwand verbunden ist. Andererseits war eine personenunabhängige Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nicht in jedem Fall gegeben, da die Kriterien eher auf qualitativen Merkmalen beruhen. Die durchgeführten Beregnungsversuche ergaben Hinweise auf eine große Variabilität hinsichtlich der Abflussreaktion der einzelnen Flächen (vgl. Abbildung 8.2). Die aus den Bodenansprachen hervorgegangenen dominanten Abflussprozesse am Standort wurden dabei zum größten Teil bestätigt. Für bewaldete Gebiete wurde der dominante Abflussprozess in allen Fällen als SOF mit unterschiedlicher Ausprägung identifiziert. Aus dem Beregnungsversuch des Waldstandortes S09 in Schmieheim ergab sich ein unklares Bild. Die hier gemessenen hohen Anteile von Oberflächenabfluss könnten durch hydrophobe Oberflächeneigenschaften oder auch die Nähe des Standortes zu einem Waldweg begründet werden. Hydrophobe Merkmale wurden auch an anderen Standorten im Wald festgestellt, ließen sich aber hinsichtlich ihrer Wirkung auf den dominanten Abflussprozess nur schwer einschätzen. Aufgrund der geringen Raten von Oberflächenabfluss und der sichtbar gemachten Infiltrationsmuster durch BB FCF kann davon ausgegangen werden, dass Makroporen einen Großteil des lokal entstandenen Oberflächenabflusses auf Waldstandorten aufnehmen konnten. Aus den Beobachtungen während der Versuchsdurchführung kann geschlossen werden, dass der an diesen Standorten aufgefangene Oberflächenabfluss vor allem aus dem Bereich in unmittelbarer Nähe zur Auffangrinne stammt, welcher aufgrund der geringen Fließstrecke nicht mehr über Makroporen infiltrieren konnte.

Wiesen-Standorte unterschieden sich hinsichtlich ihres Infiltrationsverhaltens meist

deutlich von den Standorten im Wald. Im Einzugsgebieten des Glasbaches und in Schmieheim konnten große Mengen an oberflächlich abfließendem Wasser registriert werden, welche in Einvernehmen mit den Prozessidentifikationen aus dem PBS standen. Durch die hohen Beregnungsmengen kam es zu einer schnellen Aufsättigung der obersten Bodenschicht. Die geringere Dichte an Makroporen bzw. Bereiche höherer Durchlässigkeit konnte den entstandenen Oberflächenabfluss nicht aufnehmen, wodurch ein Großteil bis zur Auffangrinne gelangte. Die Fließmuster des gefärbten Beregnungswassers zeigten auf diesen Versuchsflächen eine gleichmäßigere Infiltration im Vergleich zu den Standorten im Wald. Die Beregnungsversuche auf Wiesen-Standorten im Ehrenbächle-Einzugsgebiet zeigten einige Limitationen der in den PBS enthaltenen Entscheidungskriterien auf. Trotz verdichteter Matrix und der zu vermutenden geringen Matrixleitfähigkeit, konnte an diesen Standorten ein Großteil des Beregnungswassers über die zahlreichen Trockenrisse und Makroporen infiltrieren. Dies ist bei der Identifikation der dominanten Abflussprozesse über die PBS in diesem Maß nicht berücksichtigt. Durch ein Quellen der Tonminerale ist bei hoher Vorfeuchte eine deutliche Reduktion der Durchlässigkeit und verzögerter Hortonischer Abfluss zu erwarten. Ein Versuch unter diesen Bedingungen wurde nicht durchgeführt.

Kleinberegnungsanlagen bieten die Möglichkeit Infiltrations- und Abflussprozesse auf kleinem Raum und mit geringem Aufwand zu messen. Über die Abflussreaktion der Beregnungsfläche bei unterschiedlichen Ausgangsbedingungen (z. B. Vorfeuchte) liefern sie jedoch keine Informationen und der durch die kleine Fläche zu vermutende Einfluss von Randeffekten ist schwierig zu Quantifizieren. Die daraus hervorgehenden Fragen sind vielfältig.

1. In wie weit kann der bei einem Starkregenereignis lokal entstehender Oberflächenabfluss an anderer Stelle mit Bereichen höherer Durchlässigkeiten des Untergrundes bei größeren Fließdistanzen wieder infiltrieren?
2. Wie verändert sich das Infiltrationsverhalten des Bodens als Reaktion auf die kurzzeitige hohen Niederschlagsintensitäten mit großer kinetischer Energie eines natürlichen Konvektivereignisses?
3. In wie weit beeinflussen Randeffekte (lateral verlagter Abfluss und Infiltration) die Messergebnisse der Beregnungsversuche am Standort?

Schwierigkeiten ergaben sich dabei die am Standort bestimmten DRPs auf eine größere Flächen zu übertragen. Bei der Anzahl der Beregnungsversuche und Bodenansprachen musste aus zeitlichen Gründen starke Einschränkungen vorgenommen

werden und führte nicht zu einer repräsentativen Menge bemessener Flächen aller Landnutzungs- und Bodeneinheiten. Das von *Naef et al.* (2000) und *Scherrer* (2006) vorgeschlagene Prinzip der Hangcatena konnte nicht umgesetzt werden da zwischen den durchgeführten Untersuchungen meist keine Gesetzmäßigkeiten mit der Standortposition am Hang erkannt wurden. Den am Standort identifizierten dominanten Abflussprozessen wurden Landnutzungs- bzw. Bodeneinheiten zugeordnet. Genauere Bodenkarten als 1:50 000 und eine höhere Dichte der Messpunkte hätte womöglich zu besseren Ergebnissen geführt. Eine stärkere Konzentration der Untersuchungen auf Standorte vermuteten hohen Abflussbeitrages (Bereich um die Gewässer und Waldwege) wäre sicherlich sinnvoll gewesen und ist bei weiteren Untersuchungen zu empfehlen.

Der Einfluss von Abflussprozessen im Boden in Bereichen höher durchlässiger Schichten, durch Makroporen oder “Soil pipes” auf den Hochwasserabfluss, konnte durch die Felduntersuchungen nicht eingeschätzt werden. Insbesondere für Ereignisse großer Niederschlagsmenge bei der es zu einer temporären Ausdehnung von gesättigten Bereichen kommt, könnte einen größeren Anteil dieser Abflusskomponenten am Gesamtabfluss begünstigen.

9.2 Fließwege und Abflusskonzentration

Das Eintiefen der Waldwege in das digitale Höhenmodell hatte auf die modellierten Fließwege und Abflusskonzentration einen großen Einfluss. Durch den Verlauf des Wegenetzes erhöht sich die Fließlänge zunächst, durch die geringere Oberflächenrauigkeit welche den Straßengräben im Vergleich zum Waldboden zugeordnet wurde, gelangt Niederschlagswasser bedingt durch höhere Fließgeschwindigkeiten dennoch schneller zum Gebietsauslass und könnte so zu einer Erhöhung des Abflussscheitels beitragen (vgl. Abbildungen 8.5 bis 8.8). Die berechneten mittleren Fließzeiten bis zum Gebietsauslass liegen unter Berücksichtigung der wasserführenden Eigenschaften von Waldwegen um bis zu 40 % höher. Die Abflussmodellierung ergab daraus eine Erhöhung des Abflussscheitels um bis 70 %.

An zahlreichen Straßendrainagen können beträchtliche Erosionsspuren beobachtet werden, welche ausschließlich durch Abflussereignisse der letzten Jahrzehnte verursacht worden sein können und die vermutete hohe Bedeutung der Abflussbildung und Wasserführung der Waldstraßen bestätigen. Der auf Straßen gesammelte Abfluss gelangt in vielen Bereichen, an denen sich Waldwege und Gerinne schneiden, direkt

ins Gewässer und trägt unmittelbar zur Gebietsreaktion bei. An anderen Stellen führen Drainageleitungen unter der Straße durch in den Wald und könnten je nach Abflussmenge zu einer Überschreitung der Infiltrationskapazität des Waldbodens führen und ebenfalls bis zum Gerinne gelangen. Bei Untersuchungen zur räumlichen Verteilung von Sättigungsflächen kann mitunter eine positive Korrelation zu Straßendrainagen festgestellt werden (Rothmund, V., persönliche Mitteilung, März 2010). Welche Bedeutung die auf diese Weise induzierten Sättigungsflächen auf den Hochwasserabfluss in kleinen Einzugsgebieten hat, ist bislang nicht untersucht.

Dass Waldwege auf vielfältige Weise auf das Abflussgeschehen kleiner Einzugsgebiete wirken, kann aufgrund der Feldbeobachtungen, Kartierungen und nicht zuletzt Modellierungen als sehr wahrscheinlich angenommen werden. Eine Quantifizierung des Beitrages des auf Waldwegen gebildeten oder von Wegen interzeptierten Oberflächenabflusses konnte in dieser Arbeit jedoch nicht erfolgen und bedarf weiterer Untersuchungen. Eine Messung des Abflusses von einiger Wegdrainagen mit klar definierbarem Einzugsgebiet, könnte dabei helfen Beiträge von Waldwegen und dem Wegeumfeld besser zu quantifizieren. Der in *Harr et al.* (1975) angegebene und in vielen Untersuchungen zur Wirkung der Waldwege auf den Scheitelabfluss wiedergegebene Grenzwert von 12 % Flächenanteil der Wege am Einzugsgebiet, ab der sich diese deutlich auf die Höhe des maximalen Abflussscheitels auswirken, wird in keinem der Untersuchungsgebiete erreicht.¹

9.3 Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Ein rasterbasiertes Niederschlags-Abfluss-Modell wurde aufgestellt, welches die Infiltration und den Effektivniederschlag auf der Grundlage des Horton-Infiltrationsmodells bestimmt und Fließzeiten bis zum Gebietsauslass mittels geschätzten Rauigkeitswerten der Bodenoberfläche und Fließgeschwindigkeiten im Gewässer berechnet. Für die modellierten bemessenen Ereignisse ergibt sich in Bezug auf die gemessenen Wasserstände ein geteiltes Bild. Für den Glasbach konnte für das Ereignis vom 25.08.2009 der Verlauf der Ganglinie und die Höhe des aus den Wasserständen berechneten Abflussscheitels gut wiedergegeben werden. Die bemessenen Abflussereignisse in Schmieheim jedoch werden durch das Modell weit überschätzt. Das hier verwendete Modell berechnet den generierten Abfluss aus dem lokalen Infiltrationsüberschuss, der nur noch abhängig von der Fließzeit zum Gebietsauslass, zum

¹ Der Flächenanteil von Waldwegen an der Einzugsgebietsfläche liegt in den Untersuchungsgebieten zwischen 3 und 5 %.

Abfluss kommt. Eine Retention und Infiltration auf der dabei durchflossenen Strecke wird nicht berücksichtigt. Da die einzelnen Abflussprozessflächen aber teilweise nicht unmittelbar an das Gewässer angrenzen, könnte insbesondere bei Ereignissen geringerer Abflussmenge eine Re-Infiltration stattfinden. Dies ist gerade bei nicht zusammenhängenden hortonischen Abflussprozess-Flächen wie sie im Wegenetz des Anderen Baches gefunden werden und bei kleineren Abflussereignissen mit größeren Unterschieden in der Abflussreaktion von Teilflächen zu erwarten. Darüber hinaus muss angenommen werden, dass in dem im Sommer trocken liegenden Bachbett des Anderen Baches weitere Infiltration statt finden kann. Um solche Bedingungen nachzubilden zu können ist ein komplexeres Modell notwendig, welches eine Retention und Infiltration im Verlauf der Abflusskonzentration zulässt. Das Glasbach-Einzugsgebiet ist dagegen im tiefer gelegenen Bereich zum größten Teil zusammenhängend versiegelt, teilweise an die Regenwasserkanalisation angeschlossen und Re-Infiltration nach der Abflussbildung nur im begrenzten Ausmaß möglich.

Eine weitere Limitierung ist die Festlegung einer konstanten Fließgeschwindigkeit von Oberflächen- und Gerinneabfluss über das gesamte Ereignis unabhängig von der jeweiligen Niederschlagsintensität- und menge und dem Einzugsgebietszustand. Die Berechnung einer ereignisabhängigen Fließgeschwindigkeit von Oberflächenabfluss mit dem kinematischen Wellenansatz in Kombination mit einem Abflussrouting nach Muskingum-Cunge, wie es beispielsweise von *Johnson & Miller (1997)* angewandt wurde, könnte die hier bestehenden Unsicherheit reduzieren.

Da das Modell aufgrund von fehlenden Abflussmessungen nicht kalibriert und die Ergebnisse nur anhand weniger beobachteter Ereignisse und Wasserstandsmessungen in erster Linie qualitativ verifiziert werden konnten, sind Aussagen über die Verlässlichkeit der in vorliegenden Arbeit durchgeführten Modellerierungen nur schwer zu treffen. Die Modellergebnisse lieferten trotz der Simplizität des Modells plausible Werte für Bemessungsereignisse und beobachtete Hochwässer.

Aufgrund der großen räumlichen Variabilität und der schlechten Übertragbarkeit gemessener Infiltrationsraten auf andere Gebiete, werden die Infiltrationsparameter für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung häufig anhand gemessener Abflüsse kalibriert (*Pitt et al., 1999*). Dadurch lässt sich aber die Frage nach der Parameterwahl dieser wichtigen Größe in unbemessenen Einzugsgebieten nicht lösen. Die Parametrisierung des Infiltrationsmodells nach Horton erfolgte daher auf Basis von Schätzungen auf der Grundlage von Literaturwerten. Die durchgeführten Beregnungsversuche lassen einige Rückschlüsse auf das Infiltrationsverhalten der Versuchsstandorte zu. Infiltrationsversuche hätten möglicherweise eine weitere Eingrenzung der Parame-

terbereiche für die Berechnung der Infiltrationsrate ermöglicht. Bei der Betrachtung der Zeitpunkte beobachteter, historischer Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet des Glasbaches fällt auf, dass diese gehäuft im Frühsommer (Mai, Juni) auftraten. Dies könnte ein Hinweis auf die Bedeutung der Vorfeuchte auf die Infiltration und die Abflussbildung auch bei Konvektivereignissen sein.

Der Versuch die Infiltration mit dem Modell nach Green und Ampt zu bestimmen, brachte in der vorliegenden Arbeit keine zufrieden stellenden Ergebnisse. Die darin zugrunde gelegten Annahmen der gleichmäßigen Sättigungsfront und der alleinigen Infiltration über die Bodenmatrix scheint die in den Untersuchungsgebieten dominierenden Infiltrationsprozesse nicht wieder zu geben. Nur unter der Annahme unrealistisch hoher Werte der Saugspannung könnten die in den Beregnungsversuchen beobachteten Infiltrationsraten getroffen werden. Diese zeigten auch, dass Matrixinfiltration nur in wenigen Fällen der entscheidende Infiltrationsvorgang war. Eine realitätsnahe Abbildung der Makroporeninfiltration könnten bei der Anwendung dieser Methoden zu bessere Resultaten führen.

Unter der Annahme unterschiedlicher Intensitätsverteilung von Starkregenereignissen ergaben sich große Unterschiede zwischen den modellierten Abflüssen. Bei Blockregen wurden für Bemessungsereignisse die niedrigsten Abflussscheitel berechnet. Eine Annahme der Niederschlags-Verteilung nach Euler mit kurzen hohen Intensitätsmaxima ergab die höchsten Abflussspitzen, da insbesondere bei Ereignissen hoher Jährlichkeit die angenommenen Infiltrationsraten der meisten Böden in den Einzugsgebieten überschritten wurde. Die Wahl einer Verteilung der Niederschlagsintensität hat folglich einen großen Einfluss auf die Höhe der Bemessungshochwässer. Intensitätsverläufe und Intensitätsspitzen vergleichbar mit der Annahme nach Euler oder der Modellregengruppe des BIFW können bei natürlichen Ereignissen häufiger beobachtet werden und eignen sich daher besser für die Modellierung von seltenen Hochwässern als Blockniederschläge.

9.4 Sensitivitätsanalyse

Der Effekt der Variation einzelner Parameter auf die Isochronen, die Abflussganglinie und den Scheitelabfluss muss als gebietsspezifisch betrachtet werden und kann bei Einzugsgebieten unterschiedlicher Größe, Landnutzung, dominanter Abflussprozesse und Morphologie variieren (*Liu et al.*, 2003). Die in der vorliegenden Studie am Glasbach durchgeführte Sensitivitätsanalyse der für die Berechnung der Isochronen

verwendeten Parameter, ergab eine hohe Empfindlichkeit im Bezug auf die Parametrisierung der Oberflächenrauigkeiten. Der gewählte Grenzwert für Gerinneabfluss und die Fließgeschwindigkeit im Gerinne zeigten dagegen einen geringen Einfluss auf die Höhe und den Verlauf der modellierten Abflussganglinie. Mit zunehmender Einzugsgebietsgröße dürfte sich die Sensitivität der Abflussmodellierung auf die Oberflächenrauigkeit verringern und die der Fließgeschwindigkeit im Gerinne an Bedeutung gewinnen (vgl. *Liu et al.*, 2003). In der Literatur findet sich eine große Bandbreite von Werten für Oberflächenrauigkeit in Abhängigkeit der Landnutzung (*Engman*, 1986; *Hessel et al.*, 2003; *Vieux*, 2004). Die von *Engman* (1986) empfohlenen Rauigkeitswerte führten zu realistischen Werten der berechneten Fließgeschwindigkeit von Oberflächenabfluss und brachten die besten Modellergebnisse. Eine experimentelle Überprüfung der Geschwindigkeit von Oberflächenabfluss, insbesondere entlang von Waldwegen, wäre dennoch wünschenswert.

9.5 Hochwasserrisiko und Hochwasserschutz

Für den zentralen und dezentralen Hochwasserschutz ist die Kenntnis der Herkunftsräume von hochwasserrelevantem Abfluss von größerer Bedeutung. Die Kartierung von Flächen dominanter Abflussprozesse kann eine Möglichkeit sein solche Herkunftsräume auszuweisen und Szenarien zu entwickeln ob eine Veränderung der Nutzung und Bewirtschaftung eine Reduktion des Hochwasserrisikos bewirken kann. Bei einem Großteil der Untersuchungsflächen handelt es sich um Natur- und Kulturlandschaften welche mit vertretbarem Aufwand keine flächenhafte Erhöhung der Infiltrationsleistung ermöglichen.

Für den Glasbach wurde im Zuge des Generalentwässerungsplans ein “Maßnahmenkatalog zur Hochwasserrisikominimierung” erstellt, welcher Einschränkungen der Leistungsfähigkeit des Gewässers und Möglichkeiten zur Minderung des Hochwasserrisikos untersuchen sollte *Garten- und Tiefbauamt Freiburg* (2008). Die Hälfte der Bachquerschnitte im Siedlungsteil des Glasbaches reicht nach deren Berechnungen nicht aus um ein 20-jähriges Hochwasser (je nach Standort zwischen 2,0 und 3,6 m³) schadlos abzuführen. Die dabei zugrunde gelegten, modellierten Jährlichkeiten des Abflusses liegen im oberen Bereich der Modellergebnisse dieser Arbeit, beinhalten aber zusätzliche Einläufe von Direkteinleitern und Außengebieten im unteren, urbanen Teil des Einzugsgebietes.

Auch die in der vorliegenden Untersuchung modellierten Abflüsse, übersteigen die

hydraulische Leitfähigkeit von Gewässerengstellen in den Untersuchungsgebieten teilweise bereits ab einem 20-jährlichen Niederschlagsereignis. In Gesprächen mit Anwohnern und Verantwortlichen zeigten sich jedoch auch deutlich, dass eine Risikoeinschätzung aufgrund der Jährlichkeit und der zu erwartenden Scheitelabflüsse in den Einzugsgebieten allein, die hochwasserauslösenden Gründe nicht abbildet. Verklausungen an Gewässerengstellen oder Rechen, welche oft unmittelbar vor den verdolten Abschnitten angebracht sind, führen bei Hochwasser häufig zu einer Reduktion des leitenden Querschnittes und in der Folge zu einem Übertritt des Gewässers aus seinem Bachbett. Palisadenrechen (Abbildung 9.1) welche in regelmäßigen Abständen in das Bachbett eingebracht werden, könnten eine effektive Reduktion des Schadensrisikos bewirken. Dabei müsste jedoch beachtet werden dass der natürliche Geschiebetransport gewährleistet ist und es zu keinem übermäßigen Aufstau durch die Palisadenrechen kommt.

Eine letzte Möglichkeit stellt die Einrichtung zentraler Retentionsräume dar. Der Bau dieser verlangt auch bei geringen Stauvolumina die Einhaltung der DIN 19700 für Hochwasserrückhaltebecken, unterliegen einer wasserrechtlichen Genehmigungspflicht (*LUBW*, 2007a) und sind je nach technischem Aufwand sehr kostenintensiv. Für das Glasbach-Einzugsgebiet wäre zudem weiter zu überprüfen welche Anteile des Scheitelabflusses tatsächlich aus dem bewaldeten Einzugsgebiet kommen um die Wirkung eines Retentionsraumes in diesem Einzugsgebietsteil besser quantifizieren zu können. Eine Untersuchung des *Garten- und Tiefbauamt Freiburg* (2008) sieht insbesondere die Waldgebiete im ländlichen Teil des Glasbach-Einzugsgebietes als Herkunftsraum von Hochwässern. Anwohner berichten von einer großen Menge an Schwemmgut und Geschiebe im Hochwasserfall, was die Vermutung aufkommen lässt dass ein größerer Teil des Abflusses aus dem bewaldeten Einzugsgebietsteil stammt. Die hier durchgeführte Modellierung ergab einen geringen Abflussbeitrag aus diesem Gebiet und der Bau eines Rückhaltebeckens an besagtem Standort hätte kaum Einfluss auf die Abflussspitze. Abfluss- oder Wasserstandsmessungen im Bachbett vor Eintritt des Gewässers in den Siedlungsraum könnten hier weitere Erkenntnisse bringen.



Abbildung 9.1: Beispiel einer Vorrichtung zum Rückhalt von Schwemmgut am Ehrenbächle.

10 Ausblick

In kleinen Einzugsgebieten kann eine Vielzahl an Abflussprozessen in zeitlich variabler Ausprägung zum Hochwasserabfluss beitragen. Landnutzung und Versiegelungsgrad können dabei einen großen Einfluss auf die Abflussbildung bei Strakregenereignissen haben, ebenso wie das Vorhandensein linienhafter, wasserleitender Strukturen (Waldwege, flächenhafte Erschließungsformen, Entwässerungsgräben). Gegenstand dieser Arbeit war es ausgewählte kleine Einzugsgebiete auf dominante Abflussprozesse und Hochwasserrisiko zu untersuchen. Es zeigte sich dass die Identifikation von dominanten Abflussprozessen anhand von Entscheidungsbäumen ein brauchbares Werkzeug zur Charakterisierung hochwasserrelevanter Flächen darstellt. Kleineregnungsversuche sind dabei gute Möglichkeit, Infiltration und Abflussbildung auf kleiner Skala zu untersuchen. Die Übertragung der auf der Standortskala durchgeführten Messungen auf Einzugsgebietsebene ist dagegen mit größeren Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden. Zudem lassen sich einzelne Prozesse insbesondere in ihrem zeitlichen Auftreten nur schwer bestimmen.

Für die Modellierung des Abflussgeschehens in unbemessenen Einzugsgebieten stellt die Wahl repräsentativer Parameter zur Abbildung des natürlichen Systems eine große Herausforderung dar. Hier können weitere Untersuchungen einen wichtigen Beitrag für die Parametrisierung unkalibrierter Niederschlags-Abfluss-Modelle liefern. Insbesondere aber ist eine Synthese der Ergebnisse zahlreicher durchgeführter Untersuchungen notwendig um Abflussbildung quantitativ besser beschreiben zu können. Dabei müssen alle Skalenbereiche berücksichtigt werden welche für die Abflussbildung relevant sind. Eine Reduktion der Modellparameter bei gleichzeitiger Verringerung ihrer Unsicherheitsbereiche wäre dabei ein Ziel das in der Forschung angestrebt werden sollte.

Auch wenn Hochwässer und die damit verbundenen Gefahren als natürlich angesehen werden müssen ist eine Verschärfung des Hochwasserrisikos durch den Eingriff des Menschen häufig gegeben. Veränderte Fließquerschnitte und verdolte Gewässerabschnitte welche die hydraulische Leistungsfähigkeit reduzieren, können das Hoch-

wasserrisiko beträchtlich erhöhen. Letztendlich muss sich der Mensch in seinem Handeln besser an die von der Natur gegebenen Rahmenbedingungen anpassen. Durch technische Lösungen allein ist eine Risikominimierung nicht möglich und nicht erstrebenswert.



Abbildung 10.1: Historisches Hochwasserereignis am Glasbach vom 20. Juli 1911. Die Aufnahme zeigt den Übertritt des Glasbaches an der Ecke Sandstraße/Hauptstraße als Folge eines Starkregenereignisses (Foto zur Verfügung gestellt von H. Sigmund).

Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-AG Boden (2005). Bodenkundliche Kartieranleitung. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover, 5. Auflage.
- Ad-hoc-AG Hydrogeologie (1997). Hydrogeologische Kartieranleitung. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover, 1. Auflage.
- Adolph, G. (2005). Abflussdynamik und natürliche Tracer zur Beschreibung der Gebietsreaktion. Diplomarbeit, Institut für Hydrologie - Universität Freiburg.
- Akan, A. & Houghtalen, R. (2003). Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality: Engineering applications and computer modeling. John Wiley & Sons, 1. Auflage.
- Althaus, J. (1985). Vergleich von Modellregen, Band 57, Mitteilungen. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover.
- Ambroise, B., Beven, K., & Freer, J. (1996). Toward a generalization of the TOPMODEL concepts: Topographic indices of hydrological similarity. *Water Resources Research*, 32 (7): 2135–2145.
- Anderson, M. G. & Burt, T. P. (1990). Subsurface runoff. In M. G. Anderson & T. P. Burt (Herausgeber), *Process studies in hillslope hydrology*, Seiten 365–400. John Wiley & Sons.
- Badische Zeitung (1994). Eine ganze Schaafherde droht in den Fluten zu versinken. Ausgabe vom 20. Mai 1994.
- Badische Zeitung (2008). Gravierend hier, glimpflich dort. Ausgabe vom 3. September 2008.
- Barben, M., Forster, F., Hegg, C., & Weingartner, R. (2002). Länderbericht Schweiz. In M. Barben, H. Hodel, H. Kleeberg, M. Spreafico, & R. Weingartner (Herausgeber), *Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen-Erfahrungen aus den Rheinanliegerstaaten*, Band 19, Seiten 11–73. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR).
- Bauer, S. (1974). A modified Horton equation during intermittent rainfall. *Hydrological Sciences Bulletin*, 19 (2/6): 219–229.

- Bergsma, E. (1983). Rainfall erosion surveys for conservation planning. *ITC journal*, 2: 166–174.
- Berndtsson, R. (1987). Application of infiltration equations to a catchment with large spatial variability in infiltration. *Hydrological Sciences Journal*, 32 (3): 399–413.
- Beschta, R. L. (1978). Long-term patterns of sediment production following road construction and logging in the Oregon Coast Range. *Water Resources Research*, 14 (6): 1011–1015.
- Beschta, R. L., Pyles, M. R., Skaugset, A. E., & Surfleet, C. G. (2000). Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA. *Journal of Hydrology*, 233 (1-4): 102–120.
- Betson, R. (1964). What is watershed runoff? *Journal of Geophysical Research*, 69 (8): 1541–1552.
- Beven, K. (1997). TOPMODEL: A critique. *Hydrological Processes*, 11 (9): 1069–1085.
- Beven, K. & Germann, P. (1982). Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18 (5): 1311–1325.
- Beven, K. & Kirkby, M. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24 (1): 43–69.
- Bisdorf, E. B. A., Dekker, L. W., & Schoute, J. F. T. (1993). Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma*, 56 (1-4): 105–118.
- BLfW (2001). Bemessung von Misch- und Regenwasserkanälen - Modellregengruppe für die hydraulische Berechnung von Entwässerungsanlagen. Merkblatt 4.3/3, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft.
- BLfW (2004). SpektrumWasser 1 - Hochwasser: Naturereignis und Gefahr. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2. Auflage.
- Blöschl, G. (2001). Scaling in hydrology. *Hydrological Processes*, 15 (4): 709–711.
- Blöschl, G., Grayson, R., & Sivapalan, M. (1995). On the representative elementary area (REA) concept and its utility for distributed rainfall-runoff modelling. *Hydrological Processes*, 9 (3-4): 313–330.
- Blöschl, G. & Sivapalan, M. (1995). Scale issues in hydrological modelling: A review. *Hydrological Processes*, 9 (3-4): 252–290.
- Bonell, M. (1993). Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *Journal of Hydrology*, 150 (2-4): 217–275.

- Boorman, D., Hollis, J., & Lilly, A. (1995). Hydrology of soil types: A hydrologically based classification of the soils of the United Kingdom, Band 126. Institute of Hydrology.
- Bouma, J. & Dekker, L. (1978). A case study on infiltration into dry clay soil. I. Morphological observations. *Geoderma*, 20 (1): 27–40.
- Bronstert, A., Fritsch, U., & Katzenmaier, D. (2001). Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten unter Berücksichtigung der aktuellen Bodenbearbeitung, des Zustandes der Vegetationsdecke und möglicher Klimaänderungen. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.
- Bunza, G. & Schauer, T. (1989). Der Einfluss von Vegetation, Geologie und Nutzung auf den Oberflächenabfluss bei künstlichen Starkregen in Wildbachgebieten der Bayerischen Alpen. Informationsbericht des Bayrischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, 2 (89): 127–150.
- Chen, C. & Wagenet, R. (1992). Simulation of water and chemicals in macropore soils Part 1: Representation of the equivalent macropore influence and its effect on soilwater flow. *Journal of Hydrology*, 130 (1-4): 105–126.
- Chu, S. (1978). Infiltration during an unsteady rain. *Water Resources Research*, 14 (3): 461–466.
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., & Walsh, R. P. D. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51 (1-4): 33–65.
- Dunne, T. & Black, R. (1970). An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resources Research*, 6 (2): 478–490.
- Dunne, T., Moore, T., & Taylor, C. (1975). Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions. *Hydrological Sciences Bulletin*, 20 (3): 305–327.
- DWA (2006). Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. Arbeitsblatt DWA-A 118. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- DWD (1997). Starkniederschlagshöhen für Deutschland (KOSTRA). Selbstverlag des DWD, Offenbach.
- Egger, U. (2003). Erstellung eines Entwicklungskonzepts für ein städtisches Fließgewässer am Beispiel des Glasbachs in Freiburg-Herders. Diplomarbeit, Institut für Hydrologie - Universität Freiburg.
- Emmett, W. (1978). Overland flow. In M. Kirkby (Herausgeber), *Hillslope Hydrology*, Seiten 145–176. John Wiley & Sons, New York.

- Engler, A. (1919). Untersuchungen über den Einfluß des Waldes auf den Stand der Gewässer, Band 12, Mitteilungen der Schweizerischen Zentralanstalt für das forstliche Versuchswesen. Schweizerische Zentralanstalt für das forstliche Versuchswesen, Zürich.
- Engman, E. (1986). Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112 (1): 39–53.
- Faeh, A. O. (1997). Understanding the processes of discharge formation under extreme precipitation - A study based on the numerical simulation of hillslope experiments, Band 150. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich.
- Fenner, S. (1997). Langjährige Verdichtungswirkung durch unterschiedliche Achslasten auf einem Löß-Ackerstandort. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 160 (2): 157–164.
- Fiedler, F. H. (1995). REKLIP Klima Atlas Oberrhein Mitte-Süd. Vdf-Hochschulverlag, Offenbach.
- Flügel, W. (1995). Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the river Bröl, Germany. *Hydrological Processes*, 9 (3): 423–436.
- Gardner, B. & Chong, S. (1990). Hydrologic responses of compacted forest soils. *Journal of Hydrology*, 112 (3-4): 327–334.
- Garten- und Tiefbauamt Freiburg (2008). Glasbach - Maßnahmenkatalog zur Hochwasserrisikominimierung. Unveröffentlicht.
- Genser, H. (2006). Geologie des Schönbergs. In H. Körner (Herausgeber), *Der Schönberg - Natur- und Kulturgeschichte eines Schwarzwald-Vorberges*, Seiten 15–54. Lavori-Verlag, Freiburg, 1. Auflage.
- Green, W. & Ampt, G. (1911). Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences*, 4 (1): 1–24.
- Güntner, A., Seibert, J., & Uhlenbrook, S. (2004). Modeling spatial patterns of saturated areas: An evaluation of different terrain indices. *Water Resources Research*, 40.
- Guwang, B. (2004). Hydrologische Prozesse im Stadtgebiet von Freiburg und deren adäquate Modellierung. Diplomarbeit, Institut für Hydrologie - Universität Freiburg.
- Hädrich, F. & Stahr, K. (1997). Die Böden in der Umgebung von Freiburg im Breisgau. In R. Mäkel & B. Metz (Herausgeber), *Schwarzwald und Oberrheintiefland - Eine Einführung in das Exkursionsgebiet rund um Freiburg im Breisgau*, Seiten 129–195. Institut für Physische Geographie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

- Harms, R. (1986). Auswirkungen der Urbanisierung auf den Hochwasserabfluß kleiner Einzugsgebiete, Band 75, Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Hannover. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau.
- Harr, R. D., Harper, W. C., Krygier, J. T., & Hsieh, F. S. (1975). Changes in storm hydrographs after road building and clear-cutting in the Oregon Coast Range. *Water Resources Research*, 11 (3): 436–444.
- Hessel, R., Jetten, V., & Guanghui, Z. (2003). Estimating Manning's n for steep slopes. *Catena*, 54 (1-2): 77–91.
- Hewlett, J. (1982). Principles of forest hydrology. University of Georgia Press, Athens.
- Hewlett, J. & Hibbert, A. (1967). Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. *Forest Hydrology*, Seiten 275–290.
- Hopp, L. & McDonnell, J. J. (2009). Connectivity at the hillslope scale: Identifying interactions between storm size, bedrock permeability, slope angle and soil depth. *Journal of Hydrology*, 376 (3-4): 378–391.
- Horton, R. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, 14: 446–460.
- Horton, R. (1939). Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. *Trans. Am. Geophys. Union*, 20: 693–711.
- Hugenschmidt, C. (2005). Kontinuierliche Tracer zur hydrologischen Prozessforschung in bewaldeten Einzugsgebieten. Diplomarbeit, Institut für Hydrologie - Universität Freiburg.
- Hursh, C. R. (1936). Storm water and absorption. *Trans. Am. Geophys. Union*, 17: 301–302.
- Hursh, C. R. & Brater, E. F. (1941). Separating storm-hydrographs from small drainage-areas into surface-and subsurface-flow. *Trans. Am. Geophys. Union*, 22: 863–871.
- IKSR (1998). Aktionsplan Hochwasser. Internationale Kommission zum Schutze des Rheins, Rotterdam.
- James, W., Warinner, J., & Reedy, M. (1992). Application of the Green-Ampt infiltration equation to watershed modeling. *Water Resources Bulletin*, 28 (3): 623–635.
- Johnson, D. L. & Miller, A. C. (1997). A spatially distributed hydrologic model utilizing raster data structures. *Computers & Geosciences*, 23 (3): 267–272.
- Jones, J. (1971). Soil piping and stream channel initiation. *Water Resources Research*, 7: 602–610.

- Jones, J. (1997). Pipeflow contributing areas and runoff response. *Hydrological Processes*, 11 (1): 35–41.
- Jones, J. A. A. & Grant, G. E. (1996). Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Research*, 32 (4): 959–974.
- Kirkby, M. & Chorley, R. (1967). Throughflow, overland flow and erosion. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol*, 12 (3): 5–21.
- Kleeberg, H.-B. & Rother, K.-H. (1996). Hochwasserflächenmanagement in Flusseinzugsgebieten. *Wasser & Boden*, 48 (2): 24–32.
- LAWA (1995). Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz - Hochwasser: Ursachen und Konsequenzen. Hochwasser-Ursachen und Konsequenzen, LAWA-Arbeitskreis "Hochwasser". Länderarbeitsgemeinschaft Wasser.
- Leh, M., Chaubey, I., Murdoch, J., Brahana, J., & Haggard, B. (2008). Delineating runoff processes and critical runoff source areas in a pasture hillslope of the Ozark Highlands. *Hydrological Processes*, 22 (21): 4190–4204.
- Lempert, M. (2000). Ein GIS gekoppeltes rasterbasiertes Modell zur Berechnung des Wasserhaushalts kleiner Einzugsgebiete, Band 110, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt.
- Letey, J. & Angle, C. (1969). Measurement of contact angle, water drop penetration time, and critical surface tension. In *Water-repellent soils: proceedings of the Symposium on Water-Repellent Soils held at the University of California, Riverside, May 6-10, 1968*, Seiten 43–47. University of California.
- Ley, R. (2006). Der Einfluss kleiner naturnaher Retentionsmaßnahmen in der Fläche auf den Hochwasserabfluss - Kleinrückhaltebecken. Diplomarbeit, Fachbereich VI Geographie/Geowissenschaften der Universität Trier.
- LfU (2003a). Hydraulik naturnaher Fließgewässer, Band 1. Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- LfU (2003b). Hydraulik naturnaher Fließgewässer, Band 2. Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- LGRB (1996a). BK50 - Blatt L 7710/L 7712 Lahr/Schwarzwald 1:50 000. Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg.
- LGRB (1996b). Geologische Karte von Freiburg und Umgebung 1:50 000. Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg.
- LGRB (1998a). Geologische Schulkarte von Baden-Württemberg 1:1 000 000 - Erläuterungen. Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg.

- LGRB (1998b). Geowissenschaftliche Übersichtskarte von Baden-Württemberg 1:350 000 - CD-ROM. Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg.
- Liu, Y. B., Gebremeskel, S., Smedt, F. D., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2003). A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. *Journal of Hydrology*, 283 (1-4): 91–106.
- Löhmannsröben, R. (2000). Die Bedeutung des Bodens im Zusammenhang mit der hydrologischen Regionalisierung. In D. Gutknecht (Herausgeber), *Niederschlag-Abfluss Modellierung - Simulation und Prognose*, Band 164, Wiener Mitteilungen, Seiten 201–213. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der Technischen Universität Wien, Wien.
- Lorenz, P. & Skoda, G. (2000). Bemessungsniederschläge auf der Fläche für kurzer Dauerstufe ($D < 12$ Stunden) mit inadäquaten Daten. In D. Gutknecht (Herausgeber), *Niederschlag-Abfluss Modellierung - Simulation und Prognose*, Band 164, Wiener Mitteilungen, Seiten 179–199. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der Technischen Universität Wien.
- LUBW (2007a). Arbeitshilfe für DIN 19700 für Hochwasserrückhaltebecken. Referat 41 – Fließgewässer, Integrierter Gewässerschutz. Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.
- LUBW (2007b). Wasser und Bodenatlas Baden-Württemberg (WaBoA). Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.
- LVBW (2007). TK25 - Blatt 7713 Schuttertal 1:25 000. Landesvermessungsamt Baden-Württemberg.
- Maidment, D. & Koch, M. (1993). *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New York, 6. Auflage.
- Mandlbürger, G., Hauer, C., Höfle, B., Habersack, H., & Pfeifer, N. (2009). Optimisation of LiDAR derived terrain models for river flow modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13: 1453–1466.
- Markart, G. & Kohl, B. (1995). Starkregensimulation und bodenphysikalische Kennwerte als Grundlage der Abschätzung von Abfluss- und Infiltrationseigenschaften alpiner Boden-/Vegetationseinheiten, Band 89, Berichte der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft.
- Markart, G., Kohl, B., Sotier, B., Schauer, T., Bunza, G., & Stern, R. (2004). Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeitrages auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektivem Starkregen (Version 1.0), Band 3, Schriftenreihe des Bundesamtes und Forschungszentrums für Wald. Bundesamt und Forschungszentrum für Wald, Wien.

- McGlynn, B. L. & McDonnell, J. J. (2003). Role of discrete landscape units in controlling catchment dissolved organic carbon dynamics. *Water Resources Research*, 39 (4).
- Megahan, W. (1972). Subsurface flow interception by a logging road in mountains of central Idaho. In *National Symposium on Watersheds in Transition 1972*, Seiten 350–356. Colorado State University.
- Mendel, H. G. (2005). Hochwasser in bewaldeten Einzugsgebieten - Eine Bestandsaufnahme. In *Dezentraler Hochwasserschutz in kleinen bewaldeten Einzugsgebieten*, Band 20, Schriftenreihe der Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg, Seiten 3–50. Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg.
- Merz, B. & Bronstert, A. (2005). Infiltrationsüberschuss. In A. Bronstert (Herausgeber), *Abflussbildung - Prozessbeschreibung und Fallbeispiele*, Band 13.05, Schriftenreihe der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften und des Hauptausschusses Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Seiten 11–15. Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften.
- Moore, I. & Foster, G. (1990). Hydraulics and overland flow. In M. G. Anderson & T. P. Burt (Herausgeber), *Process studies in hillslope hydrology*, Seiten 215–254. John Wiley and Sons, Chinchester, New York.
- Mosley, M. P. (1982). Subsurface flow velocities through selected forest soils, South Island, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 55 (1-4): 65–92.
- Mühr, B. (2010). Klimadiagramme weltweit. <http://www.klimadiagramme.de>. Online: Zugriffen im Februar 2010.
- Naef, F., Margareth, M., Schmocker-Fackel, P., & Scherrer, S. (2007). Entwicklung und Anwendung eines Regelwerkes zur automatischen Erstellung von Abflussprozesskarten in einem GIS. *Mitteilungen FAWV*, 64 (7): 175–182.
- Naef, F., Scherrer, F., Weiler, M., Fackel, P., & Thoma, C. (2000). Die Beurteilung von Einzugsgebieten und ihrer Teilflächen nach der Abflussbereitschaft unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Nutzung - aufgezeigt an drei Einzugsgebieten in Rheinland-Pfalz. *Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft an der ETH Zürich*.
- Naef, F. & Scherrer, S. (2003). Grundlagen zu den Abflussbildungsprozessen. In M. Spreafico, R. Weingartner, M. Barben, & A. Ryser (Herausgeber), *Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten*, Band 4, Berichte des BWG - Serie Wasser, Seiten 16–24. Bundesamt für Wasser und Geologie.
- Naef, F., Scherrer, S., & Weiler, M. (2002). A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. *Journal of Hydrology*, 267 (1-2): 74–79.
- Ohnemus, P. (2008). Ettenheim-Wetter. <http://www.ettenheim-wetter.de/wetterrekorde.htm>. Online: Zugriffen im März 2010.

- Otter, J. & Königer, W. (1986). Bemessungsregen für Kanalnetze, Regenüberläufe und Regenbecken. *Gas-Wasser-Abwasser*, 66 (3): 124–128.
- Parlow, E. & Rosner, H.-J. (1997). Das Klima des Oberrheingrabens. In R. Mäckel & B. Metz (Herausgeber), *Schwarzwald und Oberrheintiefland - Eine Einführung in das Exkursionsgebiet um Freiburg im Breisgau*, Seiten 111–124. Institut für Physische Geographie an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2. Auflage.
- Pearce, A., Stewart, M., & Sklash, M. (1986). Storm runoff generation in humid headwater catchments: 1. Where does the water come from. *Water Resources Research*, 22 (8).
- Peichl, B. (1998). Hochwasser, Erosion und Waldstraßenbau. *Allgemeine Forstzeitschrift/Der Wald*, 53 (19): 992–994.
- Peschke, G., Etzenberg, C., Topfer, J., Zimmermann, S., & Muller, G. (1999). Runoff generation regionalization: Analysis and a possible approach to a solution. In B. Diekkruger, M. Kirkby, & U. Schröder (Herausgeber), *Regionalization in Hydrology*, Band 254, IAHS Red Book Series, Seiten 147–156. International Association of Hydrological Sciences.
- Pilgrim, D. & Huff, D. (1978). A field evaluation of subsurface and surface runoff, I. Tracer studies. *Journal of Hydrology*, 38 (3/4).
- Pitt, R., Lantrip, J., Harrison, R., Henry, C., & Hue, D. (1999). Infiltration through Disturbed Urban Soils and Compost-Amended Soil Effects on Runoff Quality and Quantity, Band 600. Environmental Protection Agency.
- Ragan, R. (1968). An experimental investigation of partial area contributions. In *Proc. Gen. Assembly*, Berne, IAHS, Band 76, IAHS Publications, Seiten 241–251.
- Rawls, W., Brakensiek, D., & Miller, N. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109 (1): 62–70.
- Rawls, W. J. & Brakensiek, D. L. (1989). Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In H. J. Morel-Seytoux (Herausgeber), *Unsaturated Flow and Hydrologic Modeling*, Seiten 275–300. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Reid, L. M. & Dunne, T. (1984). Sediment production from forest road surfaces. *Water Resources Research*, 20 (11): 1753–1761.
- Rudloff, H. v. (1965). Klima. In *Freiburg im Breisgau - Stadt- und Landkreis. Amtliche Kreisbeschreibung*, Band 1, Seiten 61–84. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg.
- Salvucci, G. & Entekhabi, D. (1994). Explicit expressions for Green-Ampt (delta function diffusivity) infiltration rate and cumulative storage. *Water Resources Research*, 30 (9): 2661–2662.

- Sauer, K. (1967). Beiträge zur Hydrogeologie der näheren Umgebung von Freiburg im Breisgau. Mitteilungen des badischen Landesverbandes für Naturkunde und Naturschutz, 9 (3): 611–637.
- Schack-Kirchner, H. & Hildebrand, E. E. (2008). Wie lässt sich das "Verformungsexperiment" mit unseren Waldböden stoppen. Freiburger Forstliche Forschung, 79: 1–9.
- Scherrer, S. (1997). Abflussbildung bei Starkniederschlägen. Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge, Band 147. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich.
- Scherrer, S. (2006). Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz.
- Scherrer, S. (2007). Hochwasserabschätzung als Synthese von Statistik, Historie und Abflussprozessen. In D. Gutknecht (Herausgeber), Extreme Abflussereignisse: Dokumentation-Bedeutung-Bestimmungsmethoden, Band 206, Wiener Mitteilungen, Seiten 195–208. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der Technischen Universität Wien.
- Schleer, J. (1957). Im Wandel der Zeit - 500 Jahre Herdern bei Freiburg. Verlag Otto Kehr.
- Schmidt, T. (1997). Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland, Band 29, DVWK Mitteilungen. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau.
- Schmidt, W., Zimmerling, B., Titzsche, O., & Zacharias, S. (2005). Möglichkeiten der Hochwasserminderung in der Landwirtschaft. In K. Röttcher, H.-B. Kleeberg, & G. Koehler (Herausgeber), Dezentraler Hochwasserschutz, Band 19.07, Seiten 61–72. Forum für Hydrologie und Wasserwirtschaft.
- Schmocker-Fackel, P. (2004). A method to delineate runoff processes in a catchment and its implications for runoff simulations. Dissertation, ETH Zürich.
- Schmocker-Fackel, P., Naef, F., & Scherrer, S. (2007). Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. Hydrology and Earth System Sciences, 11 (2): 891–906.
- Schüler, G. (2003). Hochwasservorsorge in Waldgebieten Südwestdeutschlands. Freiburger Forstliche Forschung, 49: 177–193.
- Schüler, G. (2005). Herleitung von abflussrelevanten Flächen zur Steuerung von Wasserrückhaltemaßnahmen im Wald. Freiburger Forstliche Forschung, 62: 143–158.

- Schüler, G. (2007). Das INTERREG IIIB NWE Projekt WaReLa - Verminderung der Hochwassergefahr durch Landnutzung. In G. Schüler, I. Gellweiler, & S. Seeling (Herausgeber), *Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen*, Band 64/07, Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Seiten 3–6. Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz.
- Serrano, S. (2003). Improved decomposition solution to Green and Ampt equation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8 (3): 158–160.
- Sherman, L. (1932). Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Engineering News Record*, 108: 501–505.
- Sklash, M. & Farvolden, R. (1979). The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology*, 43: 45–65.
- Smith, R. & Hebbert, R. (1983). Mathematical simulation of interdependent surface and subsurface hydrologic processes. *Water Resources Research*, 19 (4): 987–1001.
- Stahr, K. (1979). Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für Bodenbildung und Standorteigenschaften im Südschwarzwald, Band 9, *Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen*. Institut für Bodenkunde an der Universität Freiburg.
- Steinbrich, A. & Weiler, M. (2009). Ausweisung der für die Hochwasserentstehung wichtigen Abflussbildungsprozesse für Baden-Württemberg. 2. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung.
- Stober, I. (1995). *Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges*. Enke-Verlag, Stuttgart, 1. Auflage.
- Symphier, K.-J. (2006). Praxisbeispiel der Anwendung von KOSTRA. In H. B. Kleeberg (Herausgeber), *Niederschlag - Input für hydrologische Berechnungen*, Band 14.06, Seiten 97–102. *Forum für Hydrologie und Wasserwirtschaft*.
- Tanaka, T. (1992). Storm runoff processes in a small forested drainage basin. *Environmental Geology*, 19 (3):179–191.
- Terstriep, M. & Stall, J. (1974). Illinois urban drainage area simulator, ILLUDAS. *Illinois State Water Survey Bulletin*, 58: 94.
- Thomas, R. B. & Megahan, W. F. (1998). Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, Western Cascades, Oregon: A second opinion. *Water Resources Research*, 34 (12): 3393–3403.
- UBA (2004). *Hintergrundpapier: Flächenverbrauch, ein Umweltproblem mit wirtschaftlichen Folgen*.
- Uhlenbrook, S. (1999). Untersuchung und Modellierung der Abflussbildung in einem Mesoskaligen Einzugsgebiet, Band 10, *Freiburger Schriften zur Hydrologie*. Institut für Hydrologie an der Universität Freiburg.

- Uhlenbrook, S. & Leibundgut, C. (1997). Abflussbildung bei Hochwasser in verschiedenen Raumskalen. *Wasser & Boden*, 49 (9): 13–22.
- USDA & SCS (1986). Urban hydrology for small watersheds. US Department of Agriculture, technical release, 55.
- Vieux, B. (2004). Distributed hydrologic modeling using GIS. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2. Auflage.
- Vogt, S., Forster, F., & Hegg, C. (2002). A multi-method approach for flood estimation in small torrential catchments. In *Internationales Symposium Interpraevent Matsumoto/Japan*, Band 1, Seiten 377–389.
- Wegner, H. (1992). Dezentraler Hochwasserschutz. *Wasser & Boden*, 1: 6–10.
- Weiler, M. (2001). Mechanisms controlling macropore flow during infiltration - Dye tracer experiments and simulations. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Weiler, M., McDonnell, J., Tromp-van Meerveld, I., & Uchida, T. (2005). Subsurface stormflow. In M. G. Anderson & J. J. McDonnell (Herausgeber), *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, Band 3, Seiten 1719–1732. John Wiley & Sons, Chinchester.
- Weischert, W. (1979). Naturraum und Klima. In H. W. Zöttl (Herausgeber), *Exkursionsführer zur Jahrestagung der DBG 1979*, Band 28, Mitteilung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Seiten 3–21. Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft.
- Wemple, B., Jones, J., & Grants, G. (1996). Channel network extension by logging roads in two basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Bulletin*, 32 (6): 1195–1207.
- Wemple, B. C. & Jones, J. A. (2003). Runoff production on forest roads in a steep, mountain catchment. *Water Resources Research*, 39.
- Wilson, G. V., Jardine, P. M., Luxmoore, R. J., & Jones, J. R. (1990). Hydrology of a forested hillslope during storm events. *Geoderma*, 46 (1-3): 119–138.
- Wintrich, S. (2009). Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten als Beitrag zum Hochwasserschutz – Untersuchungen zur Effizienz eines Retentionssystems am Beispiel des Neubaugebietes Trier-Petrisberg. Dissertation, Fachbereich VI Geographie/Geowissenschaften der Universität Trier.
- Woldie, D. W., Sidle, R. C., & Gomi, T. (2009). Impact of road-generated storm runoff on a small catchment response. *Hydrological Processes*, 23: 3631–3638.
- Wood, E. F., Sivapalan, M., & Beven, K. (1990). Similarity and scale in catchment storm response. *Reviews of Geophysics*, 28 (1): 1–18.
- Yen, B. & Ven Te Chow, F. (1980). Design Hyetographs for Small Drainage Structures. *Journal of the Hydraulics Division*, 106 (6): 1055–1076.

- Zuidema, P. (1985). Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen: Eine Untersuchung mit Hilfe numerischer Modelle unter Verwendung plausibler Bodenkennwerte, Band 79, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich.

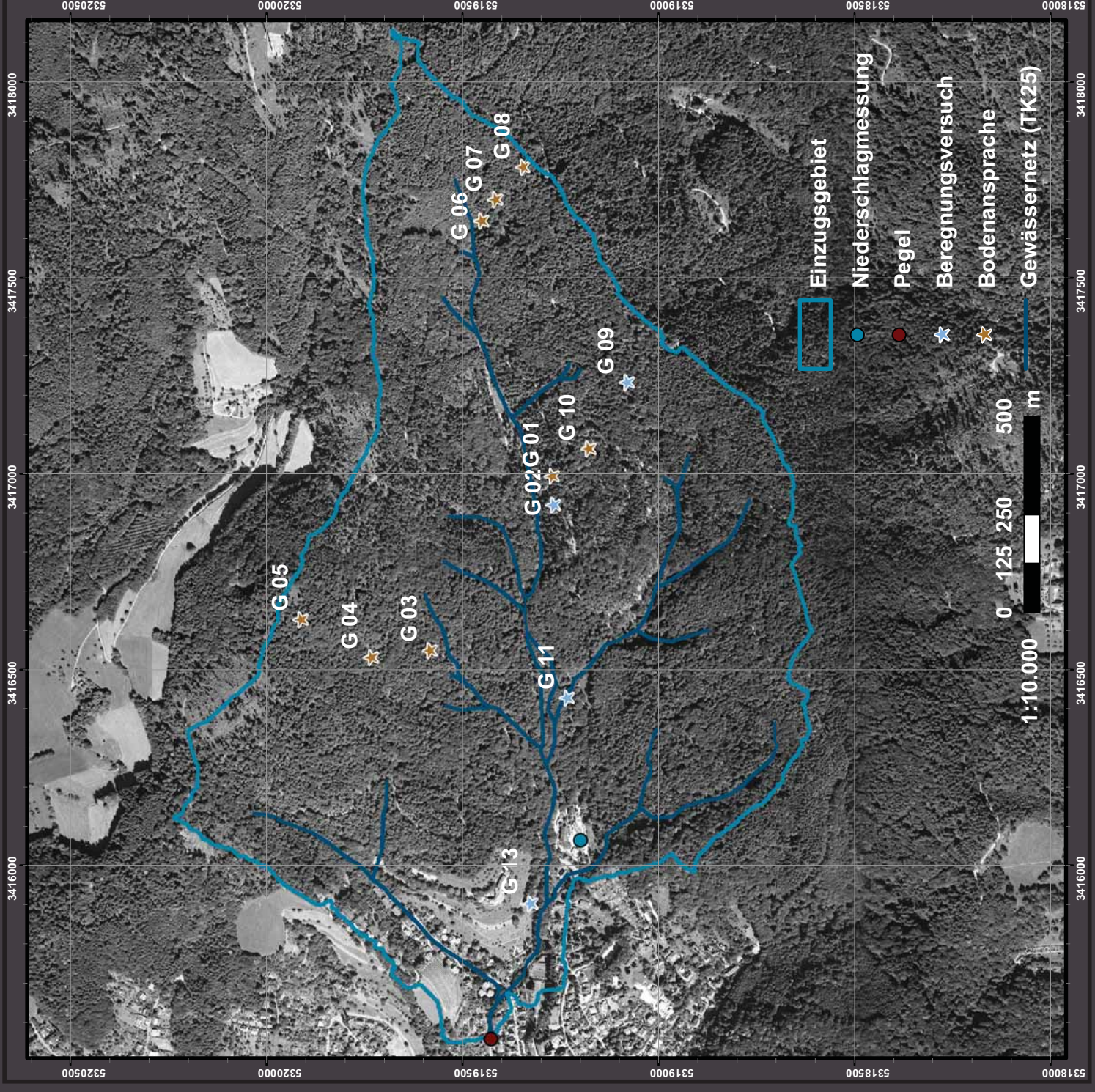
Appendices

A Einzugsgebietskarten

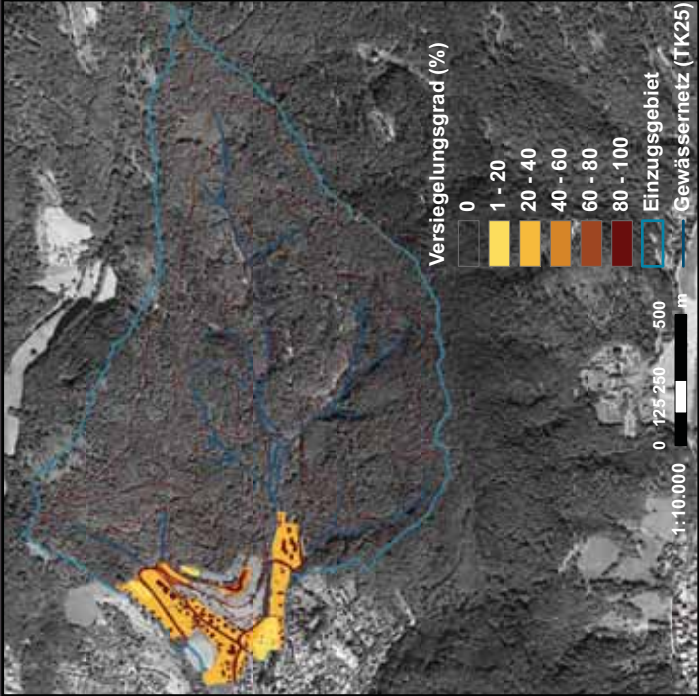
Tabelle A.1: Charakteristiken der Einzugsgebiete

Charakteristik	Glasbach	Ehrenbächle	Dorfbach	Anderer Bach
Einzugsgebietsfläche	2,2 km ²	0,7 km ²	0,95 km ²	1,25 km ²
Topographie	275 - 737 m ü. NN	300 - 645 m ü. NN	225 - 420 m ü. NN	220 - 476 m ü. NN
Mittlere Höhe	451 m ü. NN	418 m ü. NN	322 m ü. NN	358 m ü. NN
Geologie	Ungegliederte Paragneise, vereinzelt Amphibolite und Serpentinite, verbreitet periglaziale Hangschuttdecken	Paragneis, Mittlerer Jura (Opalinuston, Hauptrogenstein), Konglomerate des Eozän und Oligozän	Oberer und Mittlerer Buntsandstein, Muschelkalk, Holozäne Lösablagerungen	Oberer und Mittlerer Buntsandstein, Hangschuttdecken
Dominante Bodenarten	Braunerde, Parabraunerde, Kolluvium-Gley	Parabraunerde, Lessivierte Parabraunerde, Pelosol-Braunerde, Terra Fusca-Braunerde, Terra Fusca	Parabraunerde, Podsol-Braunerde, Braunerden, Pararendzina	Parabraunerde, Podsol-Braunerde, Braunerden, Kolluvium-Gley, Pararendzina
Gewässernetzdichte (TK25)	3,2 km/km ²	0,5 km/km ²	2,4 km/km ²	1,9 km/km ²
Mittleres Gefälle	19°	12°	12°	12°
Formfaktor nach Horton	0,43	0,21	0,35	0,42
Landnutzung:				
Wald	87,5 %	24 %	69 %	90 %
Wiese und Weide	3,5 %	68 %	14 % (mit Obstbau und Kleingärten)	3 % (mit Obstbau)
Ackerflächen	0 %	0 %	9 % (Weinbau)	3,5 % (Weinbau)
Siedlung und Straßen	9 %	8 %	8 %	3,5 %
Wegenetzdichte	11 km/km ²	8,8 km/km ²	11 km/km ²	10,5 km/km ²

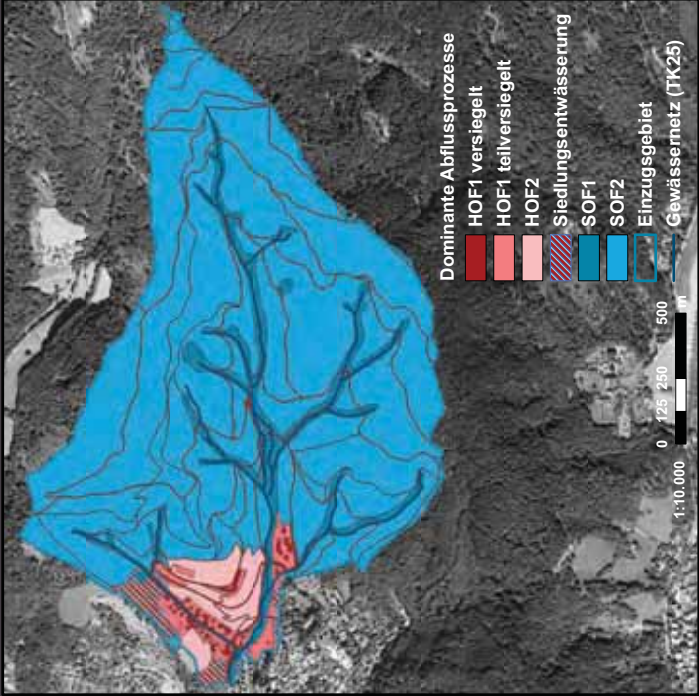
Glasbach



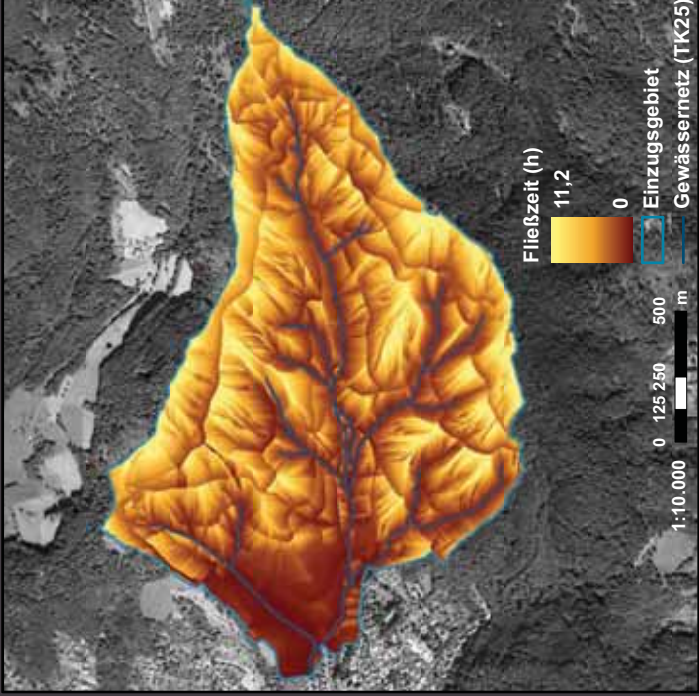
Verriegelung



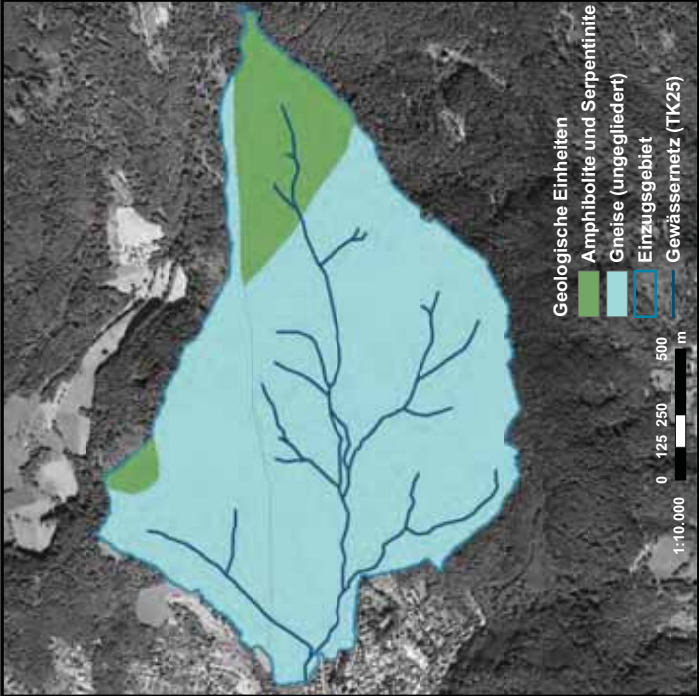
Dominante Abflussprozesse



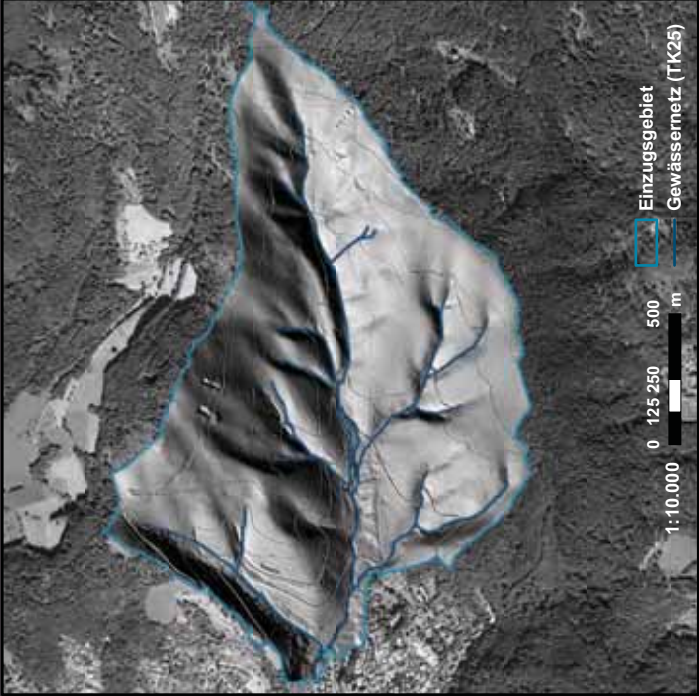
Fließzeit (Modell 2)



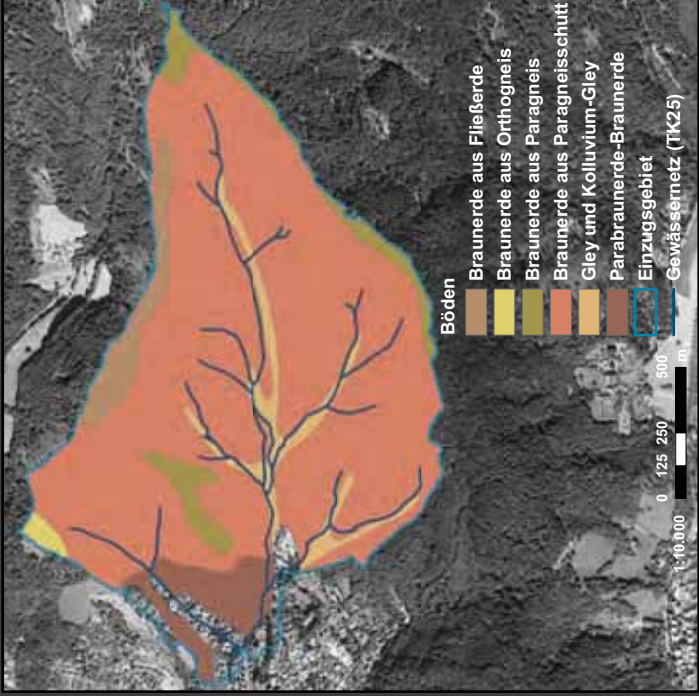
Geologie

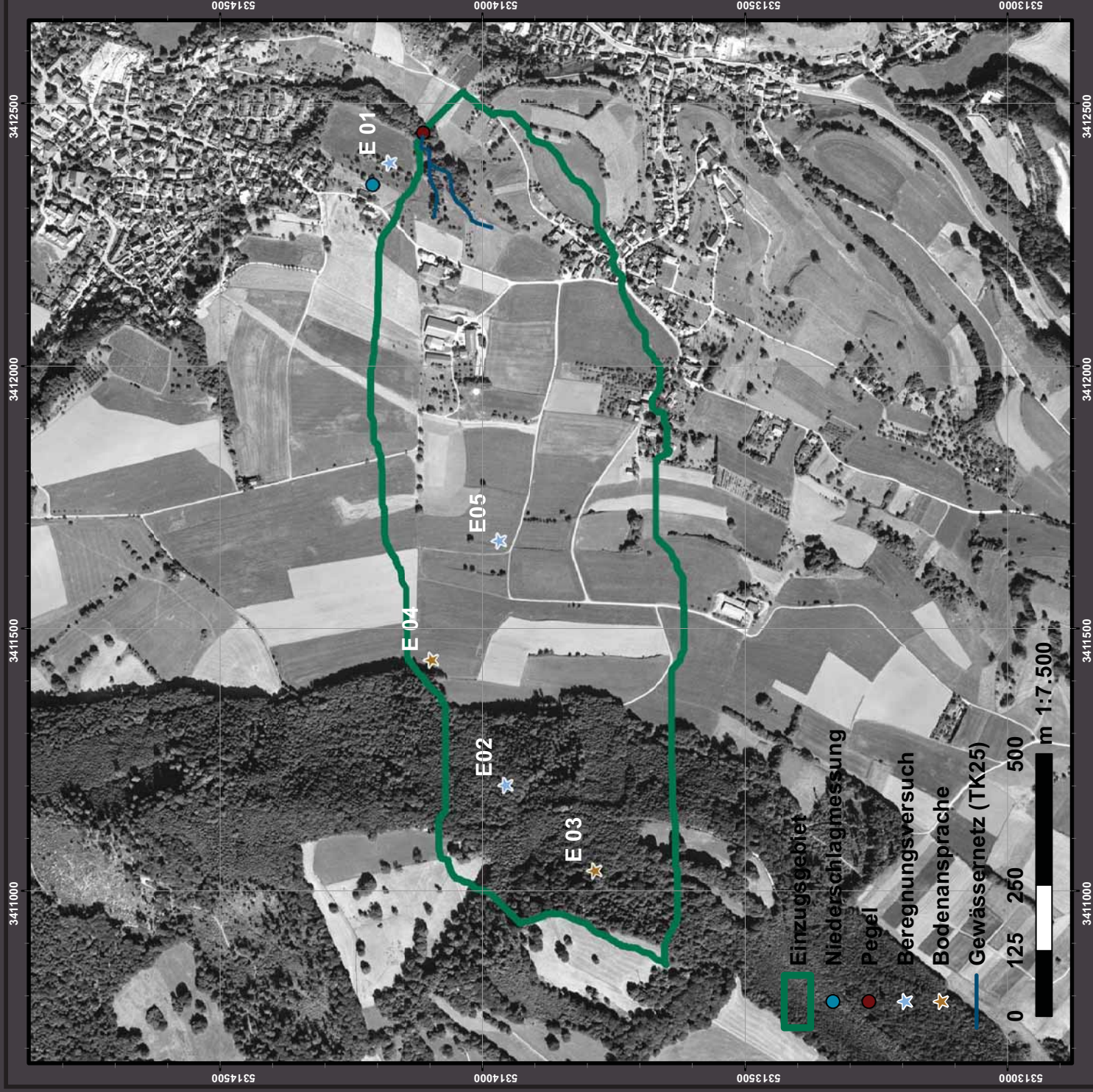


Lidar

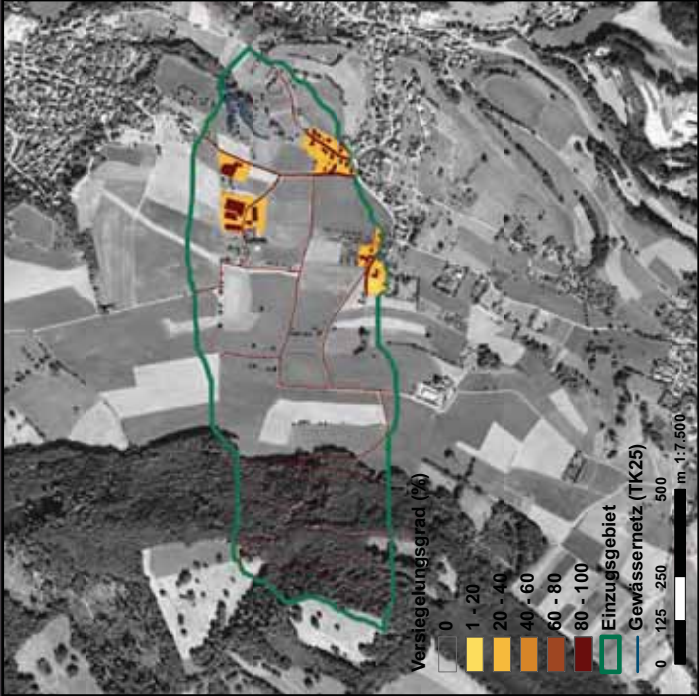


Böden

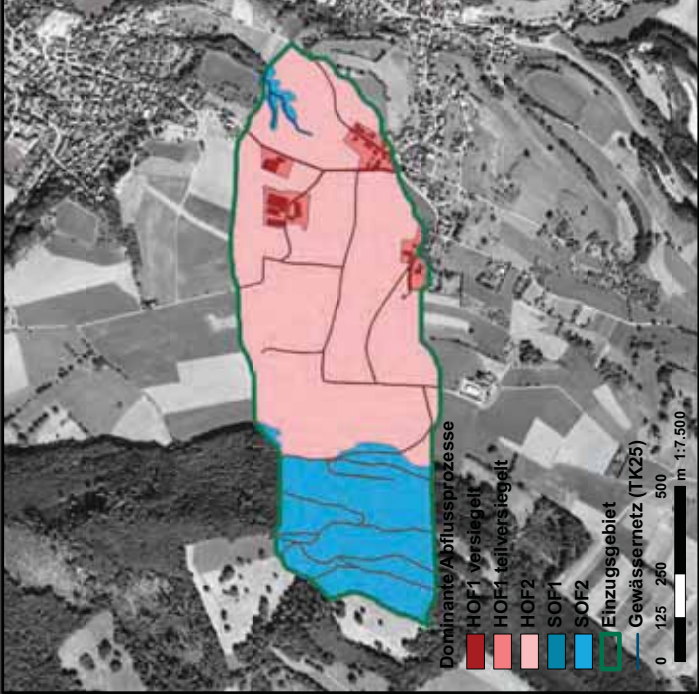




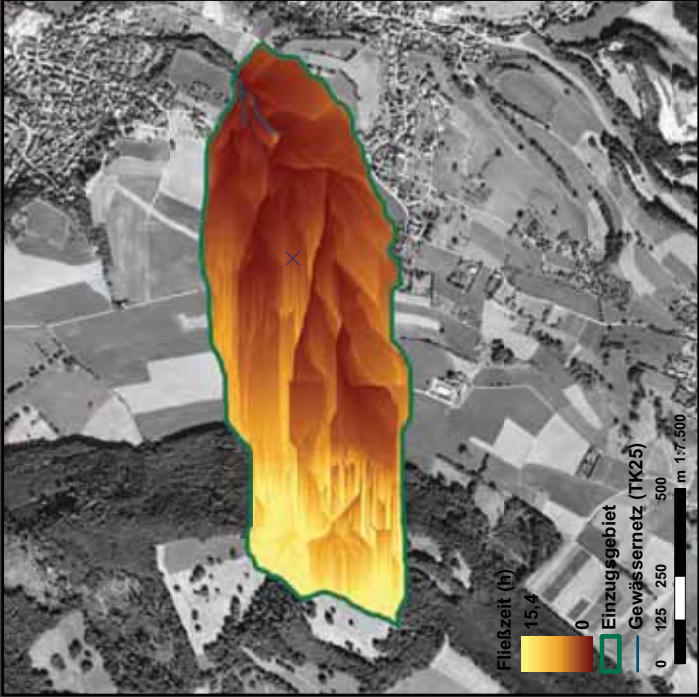
Versiegelung



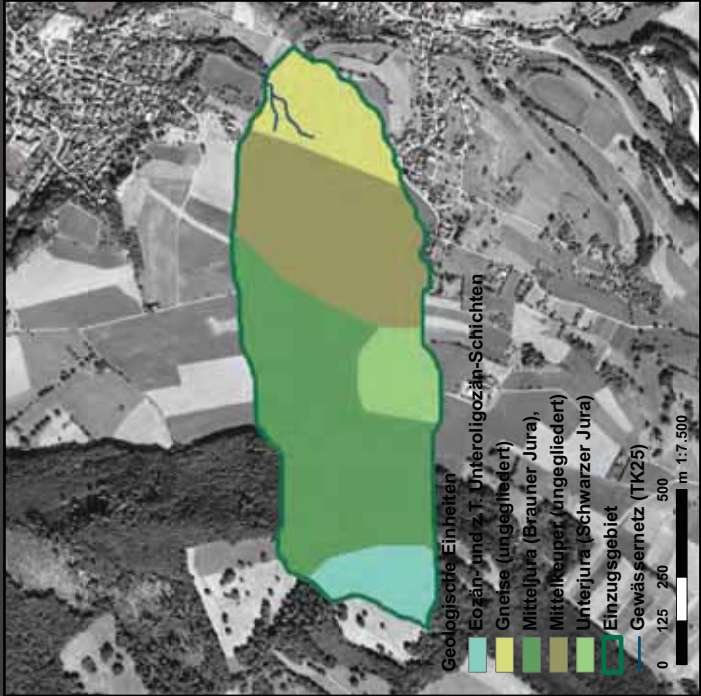
Dominante Abflussprozesse



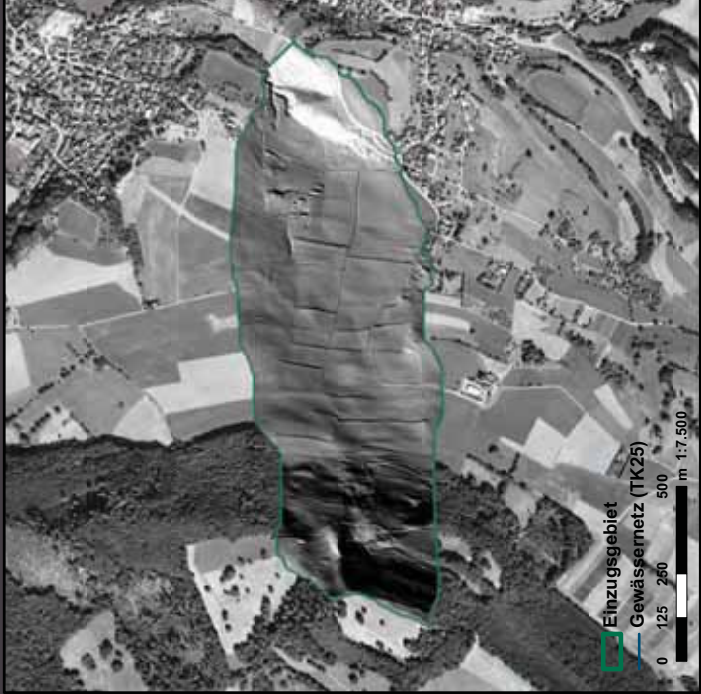
Fließzeit (Modell 2)



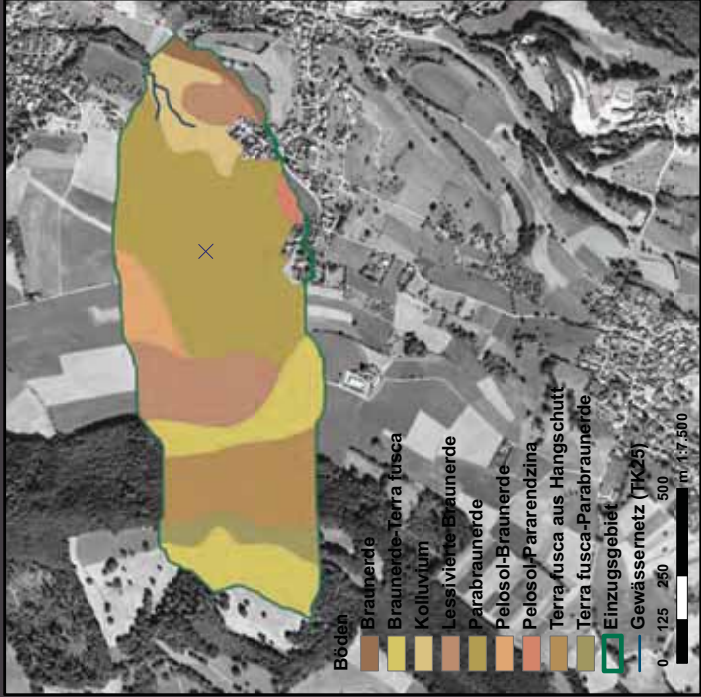
Geologie



Lidar



Böden

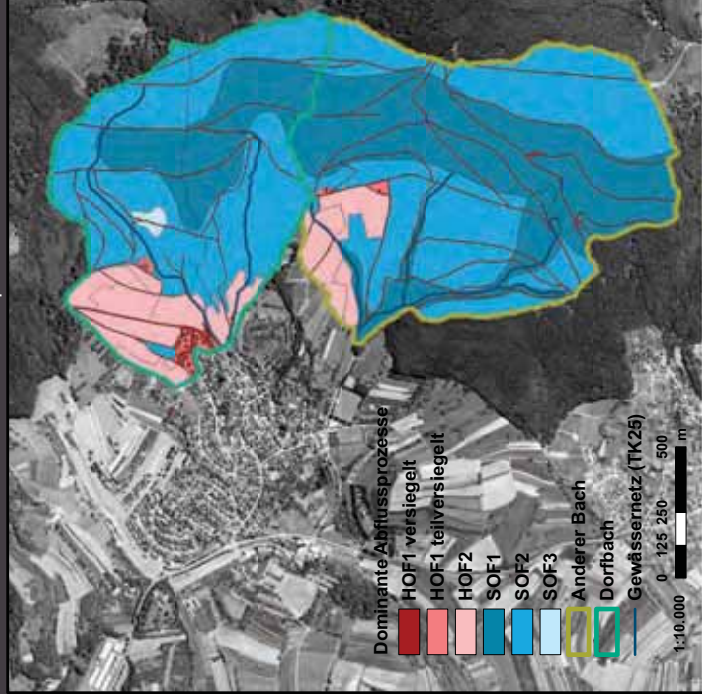




Versiegelung



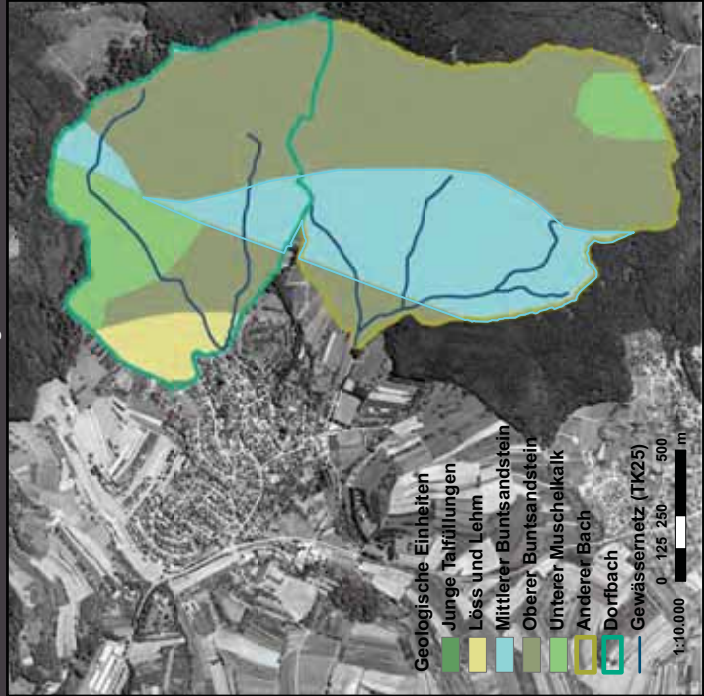
Dominante Abflussprozesse



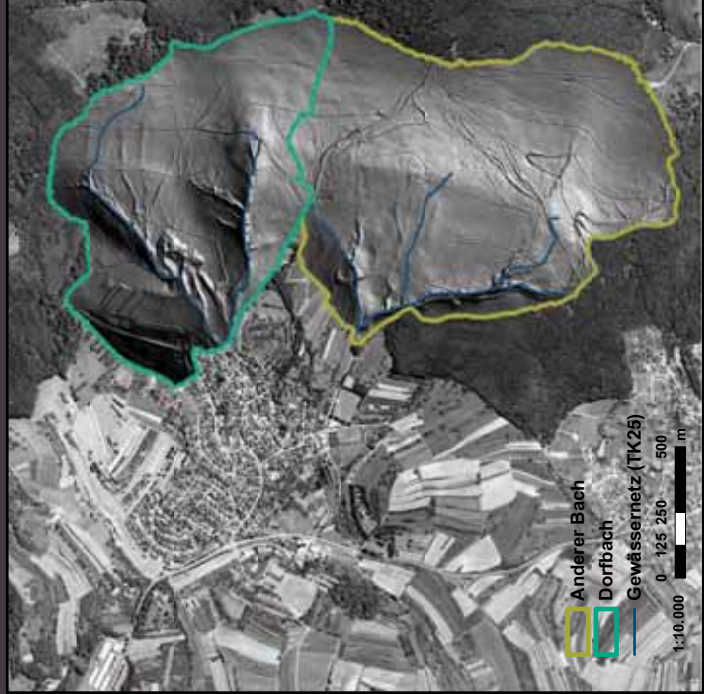
Fließzeit (Modell 2)



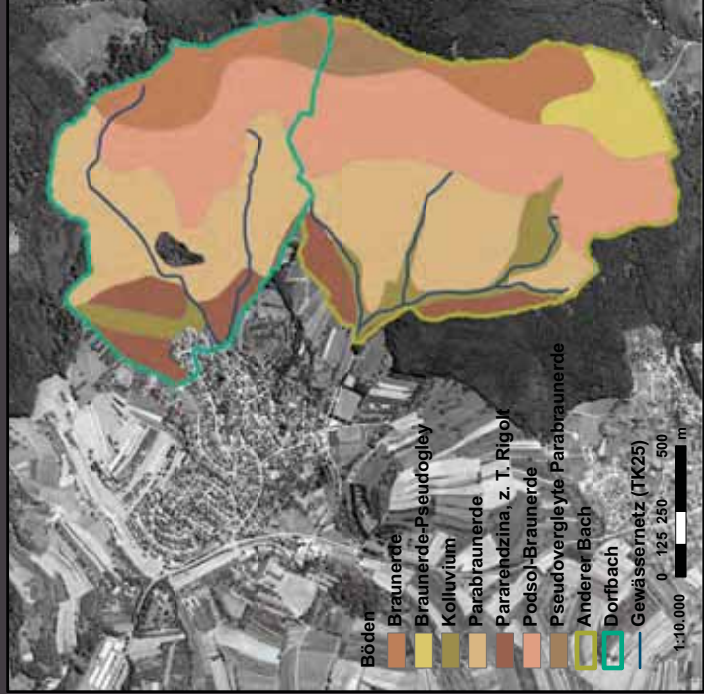
Geologie



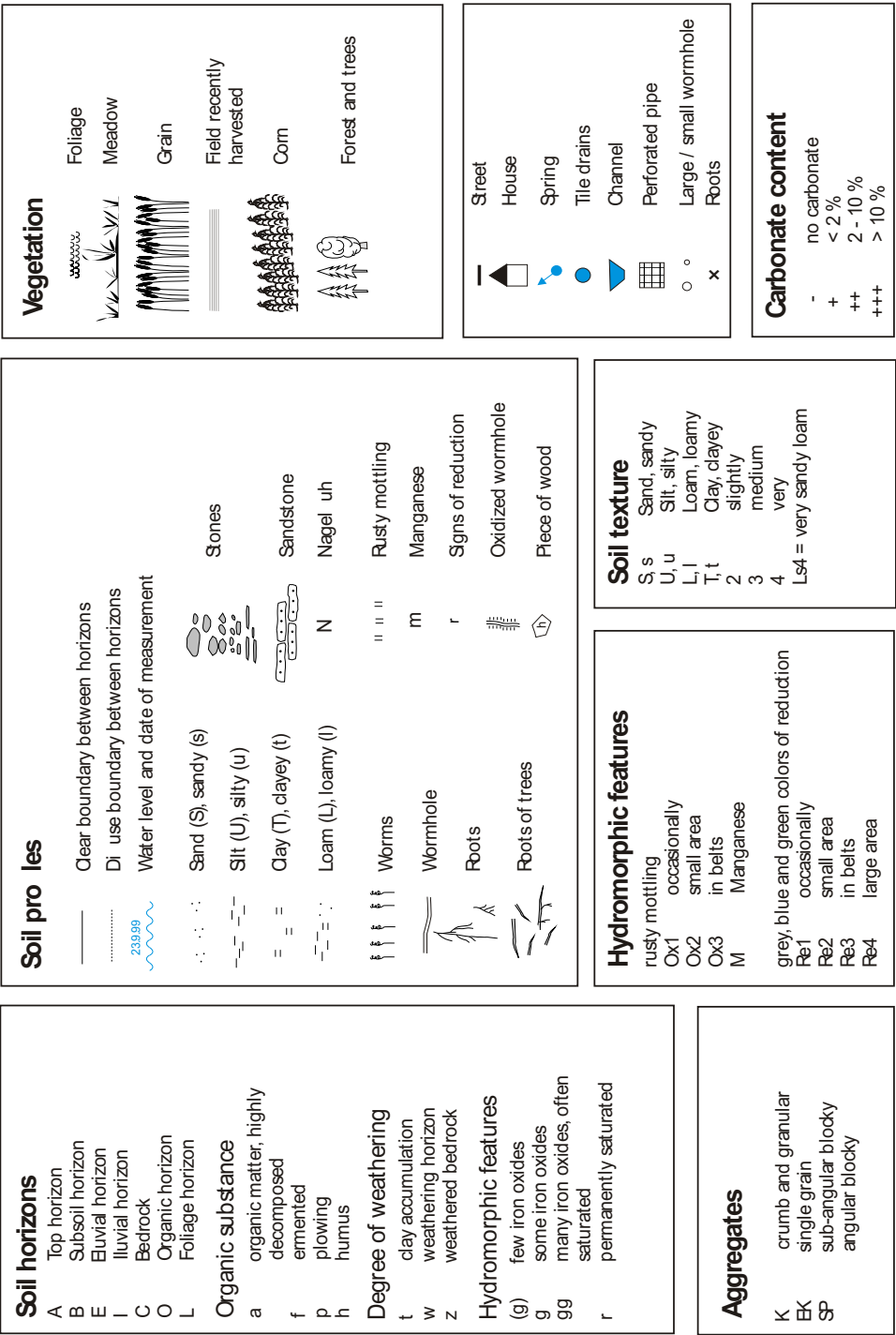
Lidar



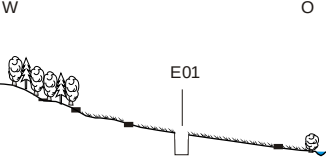
Böden



B Bodenansprachen

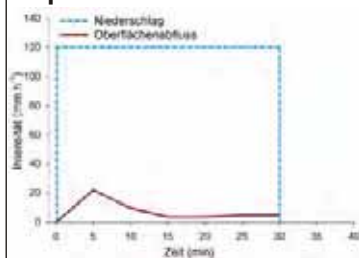


Bodenpro I E01: Parabraunerde aus Lösslehm (BK50)

Standortbeschreibung W O  Einzugsgebiet: Ehrenbächle Lage: Koordinaten: 3411666 / 5313971 Höhe: 399 m ü. NN Landnutzung: Wiese/Weide Relief: Mittelhang Gefälle: 9° Exposition: O Gründigkeit: -95 BK50: Parabraunerde aus Lösslehm	Bodenoberfläche Vegetation: Gräser Bedeckungsgrad: 80% Hydrophobizität: WDPT (0 sec.) keine Oberfläche nicht verdichtet Oberflächenrauigkeit: ± 5cm intensive Weidewirtschaft Laterale Fließwege nicht beobachtet	Makroporosität Horizontaler Querschnitt ca. 30 x 30 cm Tiefe: Mp/m total / d > 5 mm 10 cm 60 / 20 sehr groß 30 cm 20 / 16 groß Geologie Mitteljura (ungegliedert)
---	---	---

Bodeneigenschaften

[m]	Profil	Farbe	Bodenfarbe	Horizontale Korngröße / cm	Elektrode	Durchwurzelung	dromorphe mermale	Beschreibung
0	Ah	dun el braun	5	5	/cm	5	m el	
0.2	(Al)	braun	u	5	5	/cm	sehr schwach	ol eder ef e
0.4								
0.6	B	braun	u					sehr hoher onan e l
0.8								
1.0	(C)							

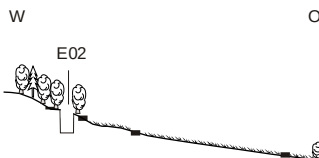
**Experimente****Prozessevaluation**

- Hohe Intensität: HOF2
- Geringe Intensität: HOF2

Abbildung B.2: Bodenansprache des Standortes E01 im Ehrenbächle-Einzugsgebiet. nach einer veränderten Vorlage von *Schmocker-Fackel* (2004).

Bodenpro I E02: Braunerde-Terra fusca aus Hangschutt (BK50)

Standortbeschreibung



W O

E02

Einzugsgebiet: Ehrenbächle
 Lage: chönberg
 Koordinaten: 3411201 / 5313957
 Höhe: 513 m ü. NN
 Landnutzung: Mischwald
 Relief: Mittelhang/Oberhang
 Gefälle: 20°
 Exposition: O
 Gründigkeit: -90
 BK50: Terra-fusca aus Hangschutt

Bodenoberäche

Vegetation: Gräser
 Bedeckungsgrad: 80% (Kronendach)
 Hydrophobizität: WDPT (0 sec.) keine
 Oberäche nicht verdichtet
 Oberächenrauigkeit: ± 5cm

Makroporosität

Horizontaler Querschnitt ca. 30 x 30 cm

Tiefe: **Mp/m total / d > 5 mm**

10 cm 20 / 12 groß

Laterale Fließwege

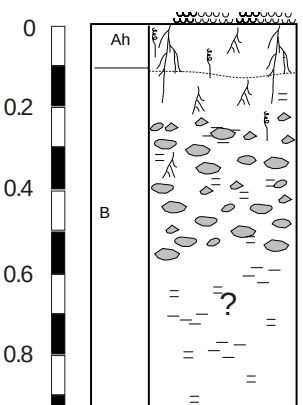
nicht beobachtet

Geologie

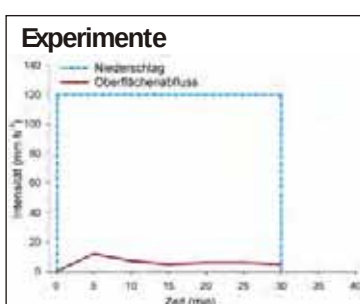
Mitteljura (ungegliedert)

Bodeneigenschaften

[m] Pro I



arbe	Boden e ur	roc enrohd che / ac un sd che	ele	Durch ur elun	dromorphe mer male	Beschre bun
dun el braun	u	5 /cm		s ar		
hellbraun		5 /cm	5	m el		sehr hoher ele an el aus al sen
hellbraun b s o er	u	5				unehmender on ehal
hellbraun b s o er	u	5				



Prozessevaluation

- Hohe Intensität: OF2
- Geringe Intensität: OF2

Abbildung B.3: Bodenansprache des Standortes E02 im Ehrenbächle-Einzugsgebiet.

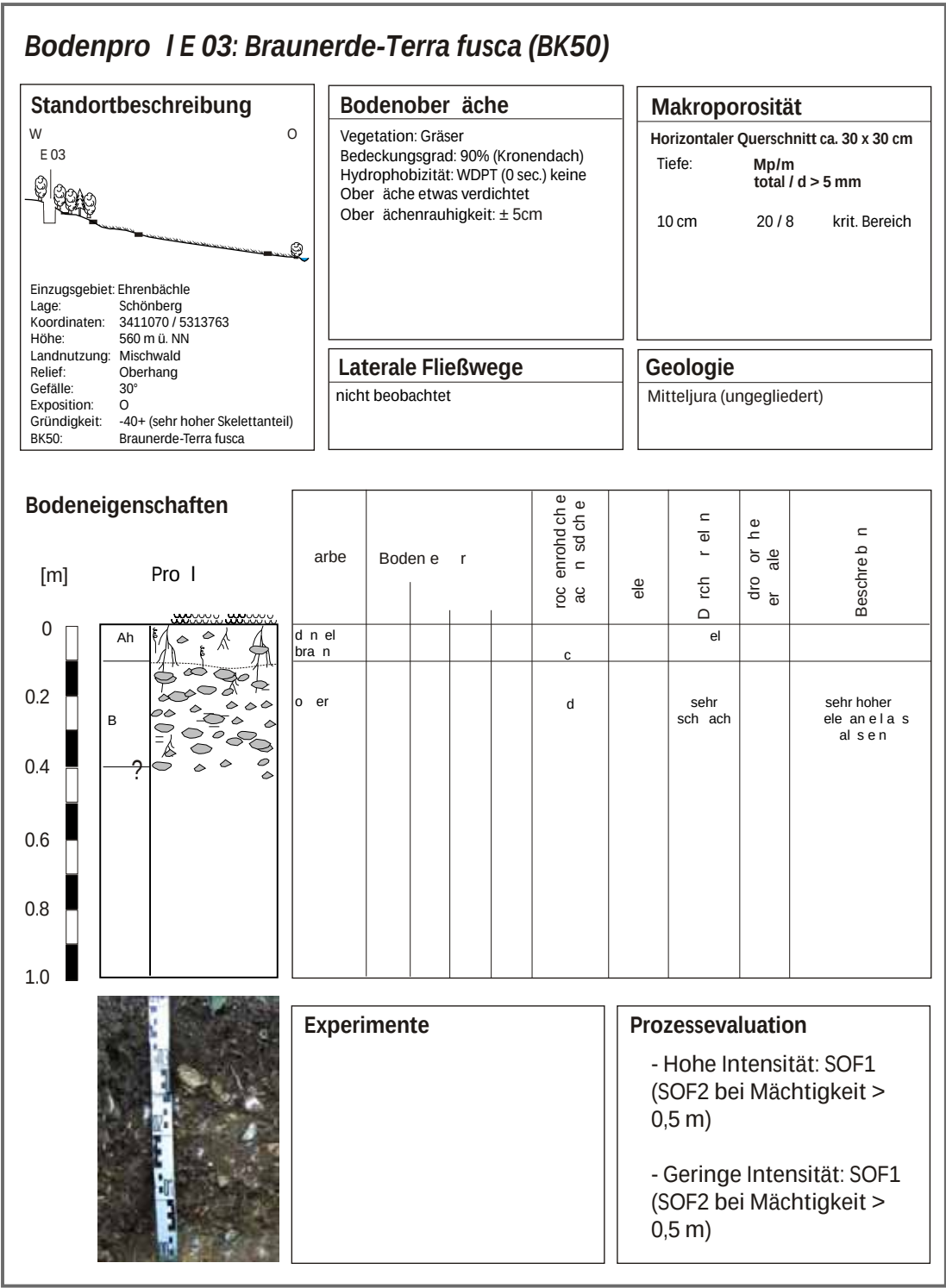
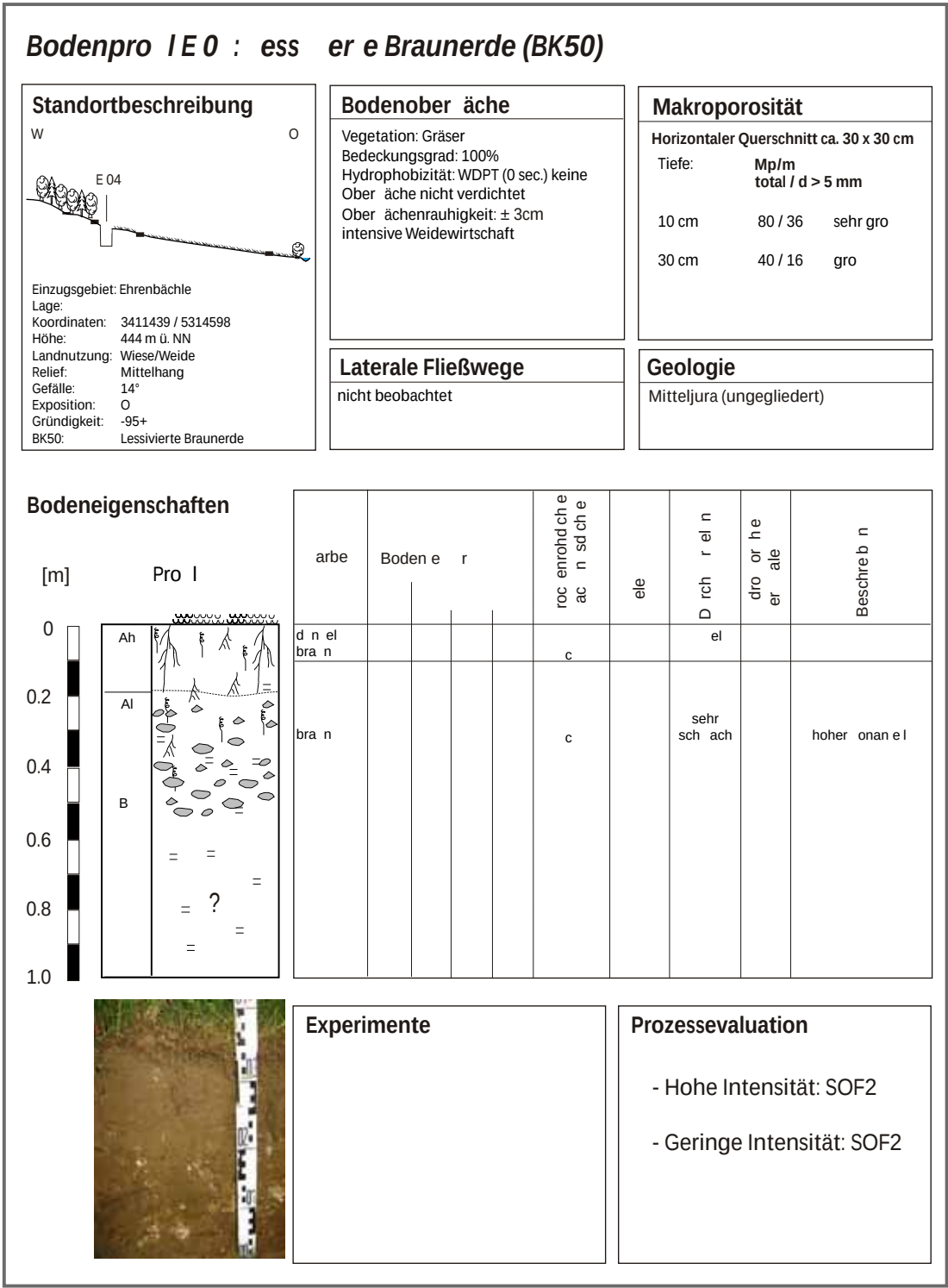


Abbildung B.4: Bodenansprache des Standortes E03 im Ehrenbächle-Einzugsgebiet.



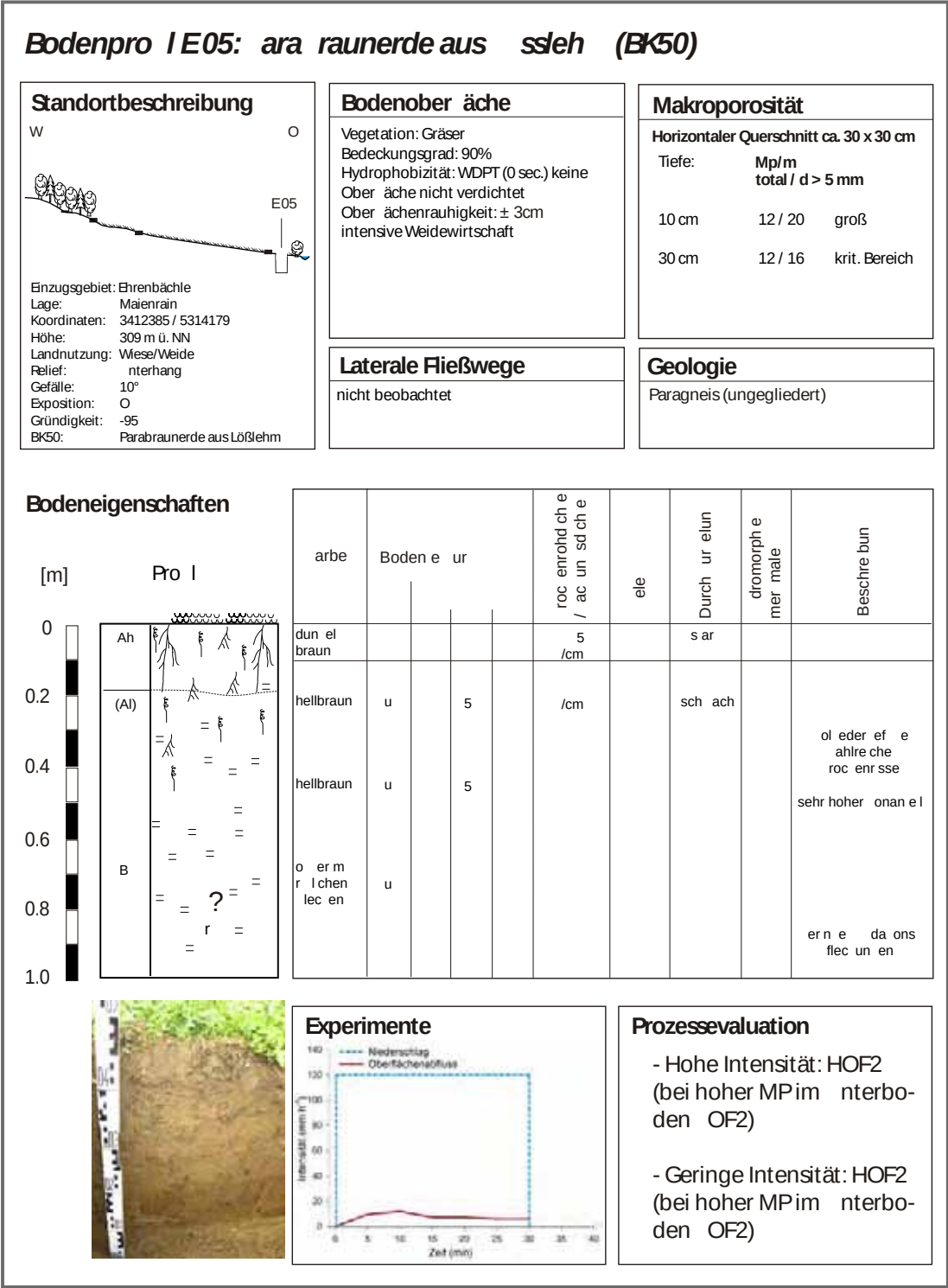


Abbildung B.6: Bodenansprache des Standortes E05 im Ehrenbächle-Einzugsgebiet.

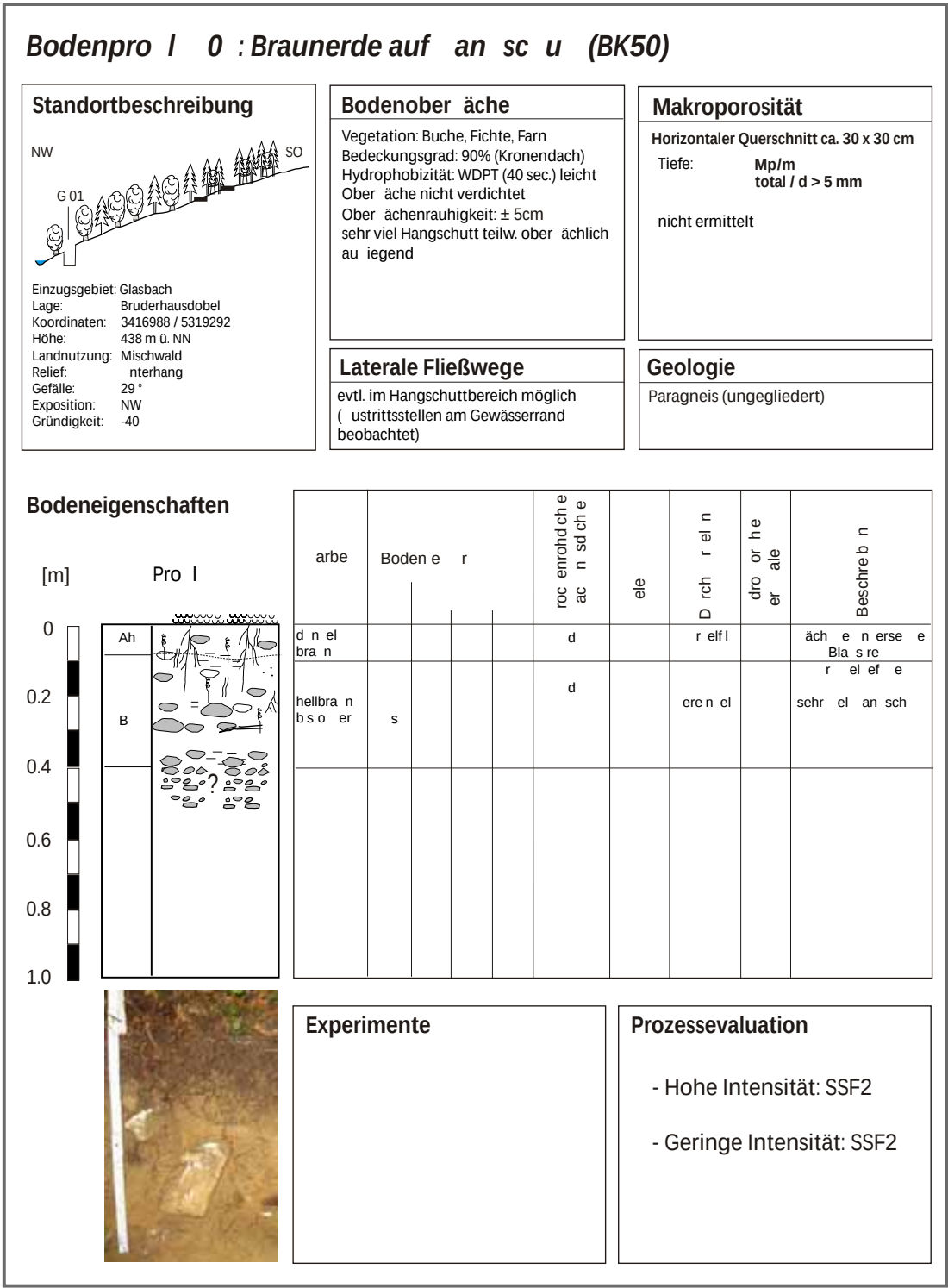
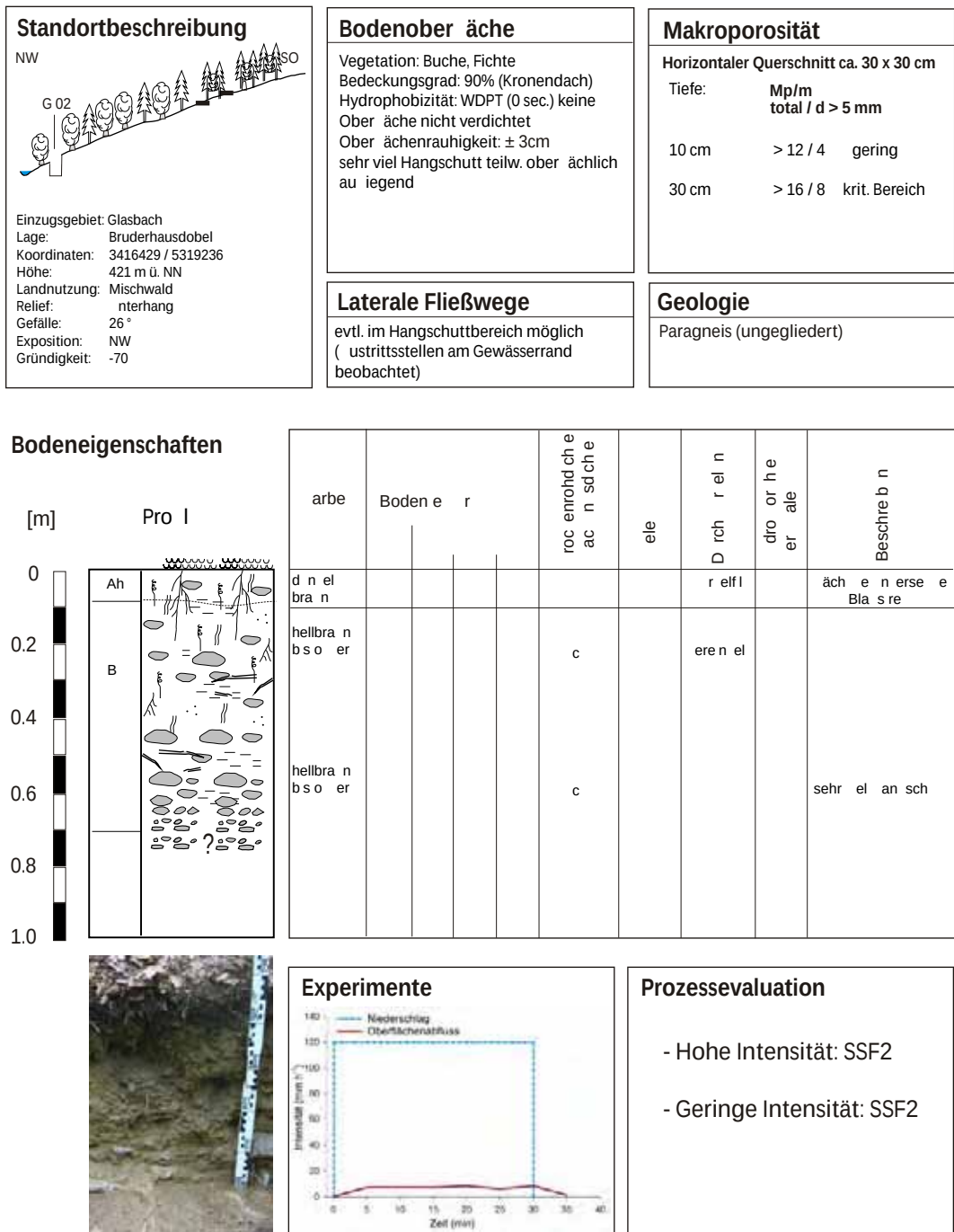


Abbildung B.7: Bodenansprache des Standortes G01 im Glasbach-Einzugsgebiet.

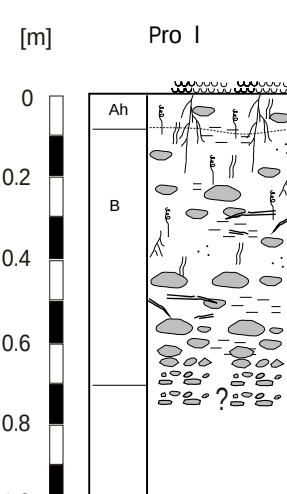
Bodenprofil 0 : Braunerde auf anscu (BK50)



Bodeneigenschaften

[m]

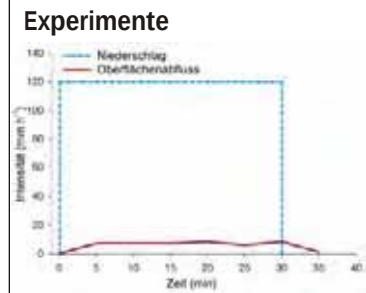
Profil



Horizont	Farbe	Bodenstruktur	Verfestigung	Verwitterung	Drainage	Drainage	Beschreibung
Ah	hellbraun					relativ	schwach entkalkt
B	hellbraun bis ocker		c		erweitert		
	hellbraun bis ocker		c				sehr elastisch



Experimente



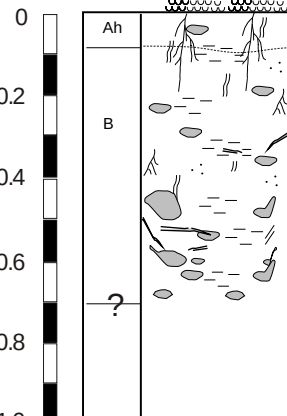
Prozessevaluation

- Hohe Intensität: SSF2
- Geringe Intensität: SSF2

Abbildung B.8: Bodenansprache des Standortes G02 im Glasbach-Einzugsgebiet.

Bodenprofil 0 : Braunerde auf Hangschutt (BK50)

Standortbeschreibung  Einzugsgebiet: Glasbach Lage: Höllriegel Koordinaten: 3416549 / 5319584 Höhe: 410 m ü. NN Landnutzung: Mischwald Relief: nterhang Gefälle: 25 ° Exposition: Gründigkeit: -70	Bodenoberfläche Vegetation: Buche Fichte Bedeckungsgrad: 50% (Kronendach) Hydrophobizität: WDPT (150 sec.) mittel Oberfläche nicht verdichtet Oberflächenrauigkeit: ± 3cm stark verdichteter Unterboden Teilwäldet	Makroporosität Horizontaler Querschnitt ca. 30 x 30 cm Tiefe: Mp/m total / d > 5 mm nicht ermittelt
	Laterale Fließwege nicht beobachtet	Geologie Paragneis (ungegliedert)

Bodeneigenschaften [m] Pro I 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Farbe</th> <th>Bodenbeurteilung</th> <th>rocken / an / un / sd / ch / e</th> <th>ele</th> <th>Durchwurzelung</th> <th>dromorphe / mer / male</th> <th>Beschreibung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>dunkelbraun</td> <td>ls</td> <td></td> <td>d</td> <td>5</td> <td>m el</td> <td>mäch / e un / erse / e Bla / s / reu</td> </tr> <tr> <td>hellbraun bs o / er</td> <td>u</td> <td></td> <td>d</td> <td></td> <td>m el</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Farbe	Bodenbeurteilung	rocken / an / un / sd / ch / e	ele	Durchwurzelung	dromorphe / mer / male	Beschreibung	dunkelbraun	ls		d	5	m el	mäch / e un / erse / e Bla / s / reu	hellbraun bs o / er	u		d		m el								
Farbe	Bodenbeurteilung	rocken / an / un / sd / ch / e	ele	Durchwurzelung	dromorphe / mer / male	Beschreibung																							
dunkelbraun	ls		d	5	m el	mäch / e un / erse / e Bla / s / reu																							
hellbraun bs o / er	u		d		m el																								

Experimente	Prozessevaluation - Hohe Intensität: OF2 (THOF bei Hydrophoben Verhältnissen möglich) - Geringe Intensität: OF2
--------------------	--

Abbildung B.9: Bodenansprache des Standortes G03 im Glasbach-Einzugsgebiet.

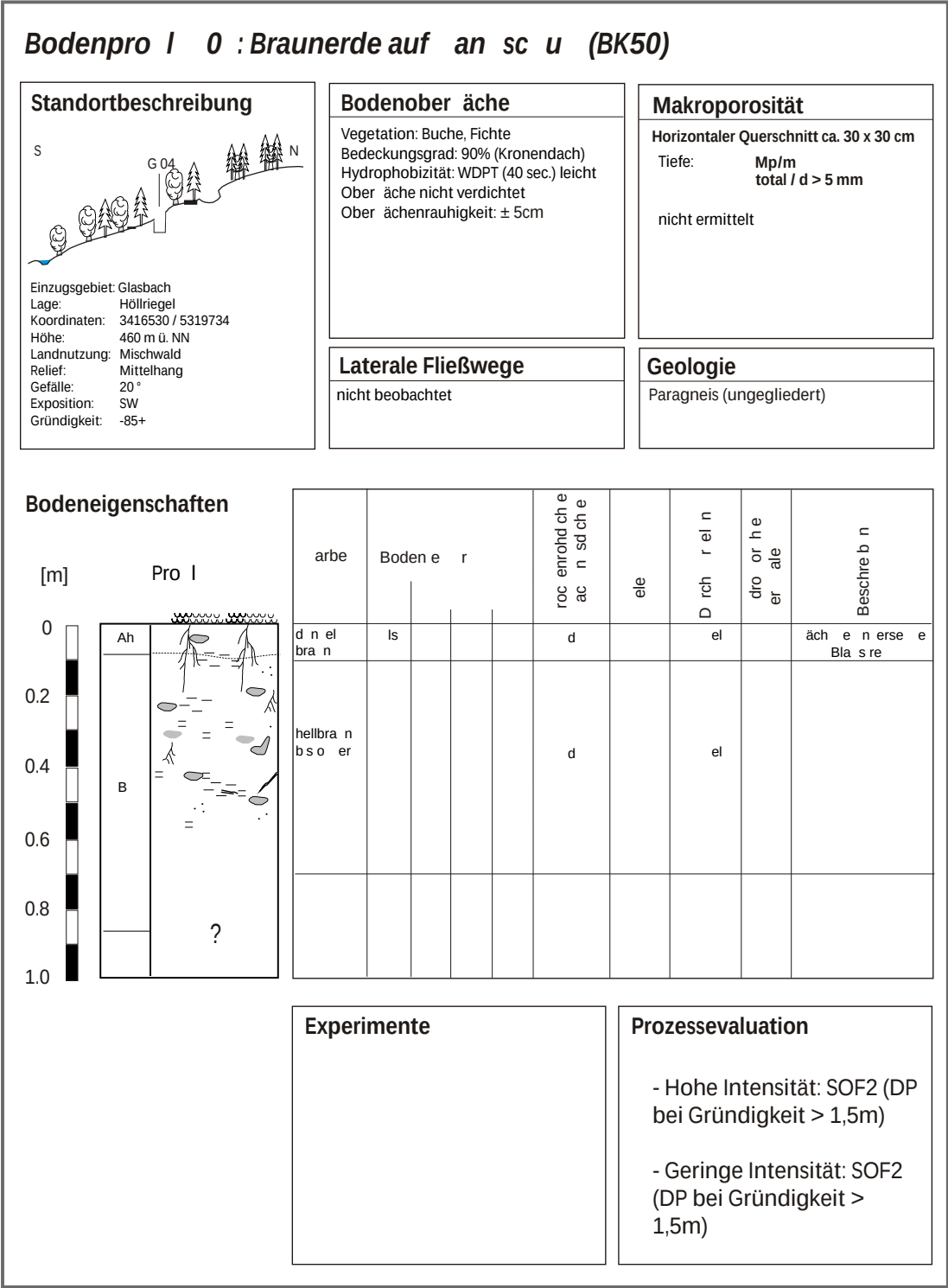
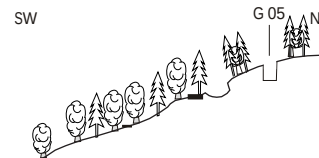


Abbildung B.10: Bodenansprache des Standortes G03 im Glasbach-Einzugsgebiet.

Bodenpro I 05: Braunerde auf an sc u (BK50)

Standortbeschreibung SW  Einzugsgebiet: Glasbach Lage: Fuchsköp e Koordinaten: 3416628 / 5319912 Höhe: 541 m ü. NN Landnutzung: Mischwald Relief: nterhang Gefälle: 18 ° Exposition: SW Gründigkeit: -85+	Bodenober äche Vegetation: Buche, Fichte Bedeckungsgrad: 30% (Kronendach) Hydrophobizität: WDPT (20 sec.) Ober äche nicht verdichtet Ober ächenrauigkeit: ± 3cm	Makroporosität Horizontaler Querschnitt ca. 30 x 30 cm Tiefe: Mp/m total / d > 5 mm nicht ermittelt
	Laterale Fließwege nicht beobachtet	Geologie Paragneis (ungegliedert)

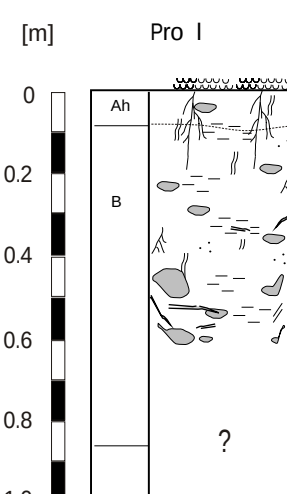
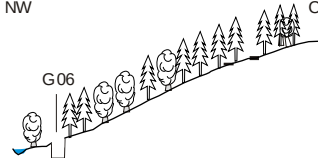
Bodeneigenschaften [m] Pro I 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>arbe</th> <th colspan="4">Boden e r</th> <th>roc enrohdche ac n sd che</th> <th>ele</th> <th>D rch r el n</th> <th>dro or he er ale</th> <th>Beschre b n</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>d n el bra n</td> <td>ls</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>d</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>hellbra n bs o er</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>d</td> <td></td> <td>el</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	arbe	Boden e r				roc enrohdche ac n sd che	ele	D rch r el n	dro or he er ale	Beschre b n	d n el bra n	ls				d					hellbra n bs o er					d		el												
		arbe	Boden e r				roc enrohdche ac n sd che	ele	D rch r el n	dro or he er ale	Beschre b n																														
		d n el bra n	ls				d																																		
hellbra n bs o er					d		el																																		
	Experimente	Prozessevaluation - Hohe Intensität: SOF2 (DP bei Gründigkeit > 1,5m) - Geringe Intensität: SOF2 (DP bei Gründigkeit > 1,5m)																																							

Abbildung B.11: Bodenansprache des Standortes G05 im Glasbach-Einzugsgebiet.

Bodenpro I 0 : Braunerde auf Hangschutt (BK50)

Standortbeschreibung  Einzugsgebiet: Glasbach Lage: überbrunnen Koordinaten: 3417639 / 5319456 Höhe: 558 m ü. NN Landnutzung: Mischwald Relief: nterhang Gefälle: 14° Exposition: NW Gründigkeit: -70	Bodenoberfläche Vegetation: Fichte Bergahorn Buche Bedeckungsgrad: 70% (Kronendach) Hydrophobizität: WDPT (5 sec.) kaum Oberfläche nicht verdichtet Oberflächenrauigkeit: ± 3cm	Makroporosität Horizontaler Querschnitt ca. 30 x 30 cm Tiefe: Mp/m total / d > 5 mm nicht ermittelt
	Laterale Fließwege nicht beobachtet	Geologie Paragneis (ungegliedert)

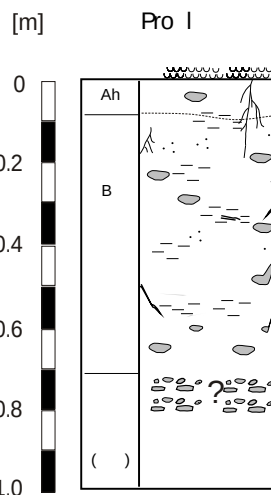
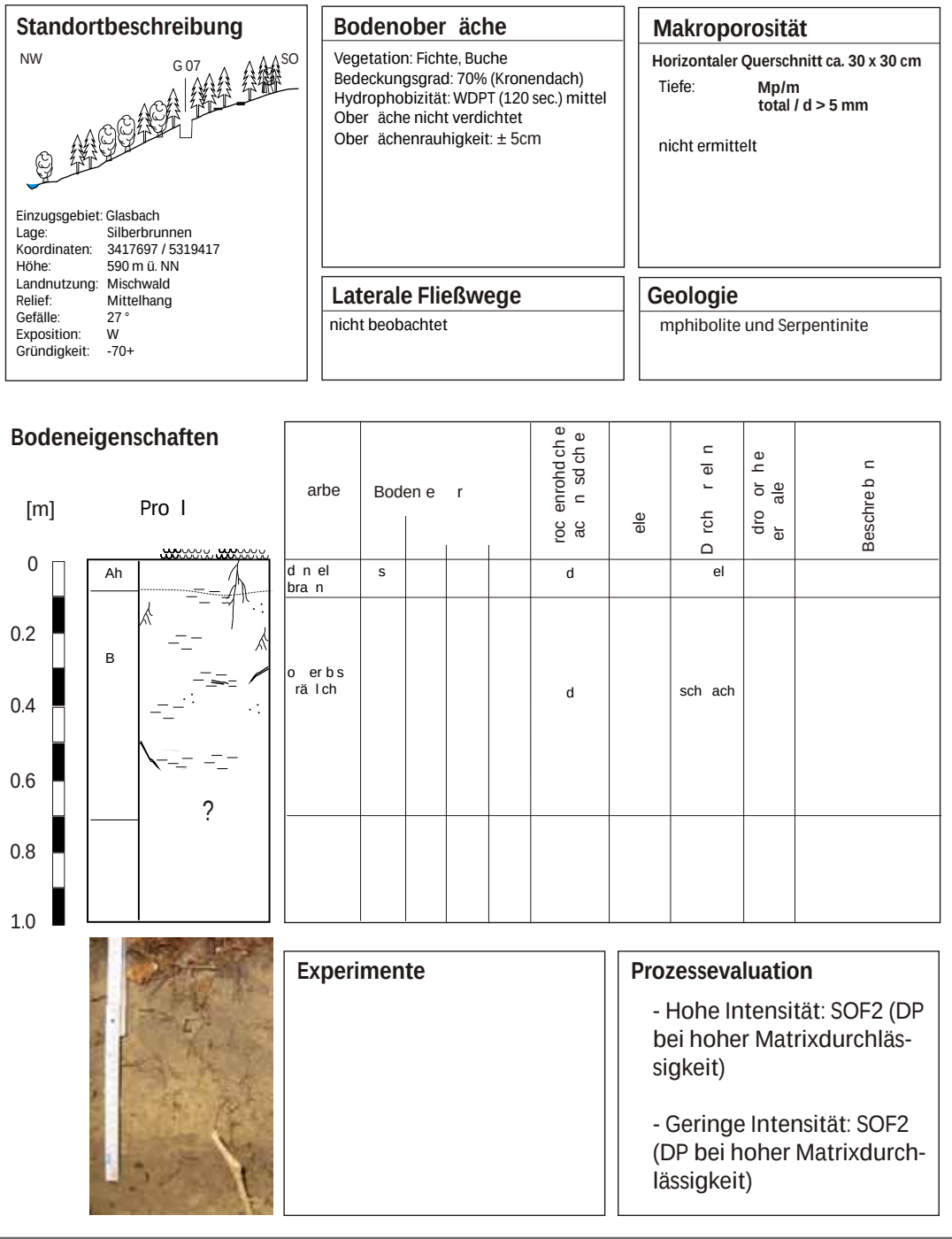
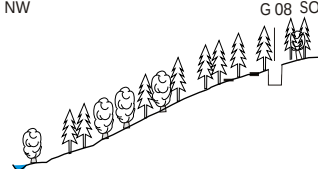
Bodeneigenschaften 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>arbe</th> <th>Boden e ur</th> <th>roc enröhdche / ac un sd che</th> <th>ele</th> <th>Durch ur elun</th> <th>dromorphe mer male</th> <th>Beschre bun</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>dun el braun</td> <td>s</td> <td>d</td> <td></td> <td>sch ach</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>o er bs räul ch</td> <td>u</td> <td>d</td> <td></td> <td>sch ach</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	arbe	Boden e ur	roc enröhdche / ac un sd che	ele	Durch ur elun	dromorphe mer male	Beschre bun	dun el braun	s	d		sch ach			o er bs räul ch	u	d		sch ach									
		arbe	Boden e ur	roc enröhdche / ac un sd che	ele	Durch ur elun	dromorphe mer male	Beschre bun																					
		dun el braun	s	d		sch ach																							
		o er bs räul ch	u	d		sch ach																							
Prozessevaluation - Hohe Intensität: OF2 (DP bei hoher Matrixdurchlässigkeit) - Geringe Intensität: OF2 (DP bei hoher Matrixdurchlässigkeit)																													
	Experimente																												

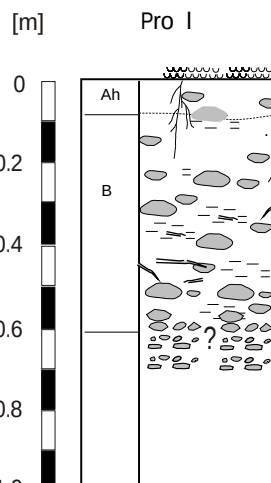
Abbildung B.12: Bodenansprache des Standortes G06 im Glasbach-Einzugsgebiet.

Bodenprofil 0 : Braunerde auf anscu (BK50)



Bodenpro I 0 : Braunerde auf an sc u (BK50)

Standortbeschreibung  Einzugsgebiet: Glasbach Lage: Silberbrunnen Koordinaten: 3417782 / 5319347 Höhe: 634 m ü. NN Landnutzung: Mischwald Relief: Oberhang Gefälle: 18° Exposition: W Gründigkeit: -60+	Bodenoberfläche Vegetation: Fichte, Buche Bedeckungsgrad: 80% (Kronendach) Hydrophobizität: WDPT (1800 sec.) hoch Oberfläche nicht verdichtet Oberflächenrauigkeit: ± 5cm	Makroporosität Horizontaler Querschnitt ca. 30 x 30 cm Tiefe: Mp/m total / d > 5 mm nicht ermittelt
	Laterale Fließwege evtl. im Hangschuttbereich möglich?	Geologie mphibolite und Serpentinite

Bodeneigenschaften 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>arbe</th> <th>Boden e</th> <th>r</th> <th>roc enrdhche ac n sdche</th> <th>ele</th> <th>D rch r el n</th> <th>dro or he er ale</th> <th>Beschre b n</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>d n el bra n</td> <td>ls</td> <td></td> <td>d</td> <td></td> <td>el</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>o er bs rä lch</td> <td></td> <td></td> <td>d</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>sehr hoher An e l an an sch</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	arbe	Boden e	r	roc enrdhche ac n sdche	ele	D rch r el n	dro or he er ale	Beschre b n	d n el bra n	ls		d		el			o er bs rä lch			d				sehr hoher An e l an an sch								
arbe	Boden e	r	roc enrdhche ac n sdche	ele	D rch r el n	dro or he er ale	Beschre b n																										
d n el bra n	ls		d		el																												
o er bs rä lch			d				sehr hoher An e l an an sch																										

Experimente	Prozessevaluation - Hohe Intensität: SOF2 (SSF2 bei lateralen FLie - wegen) - Geringe Intensität: SOF2 (SSF2 bei lateralen FLie - wegen)
--------------------	---

Abbildung B.14: Bodenansprache des Standortes G08 im Glasbach-Einzugsgebiet.

Bodenprofil 0 : Braunerde auf Hangschutt (BK50)

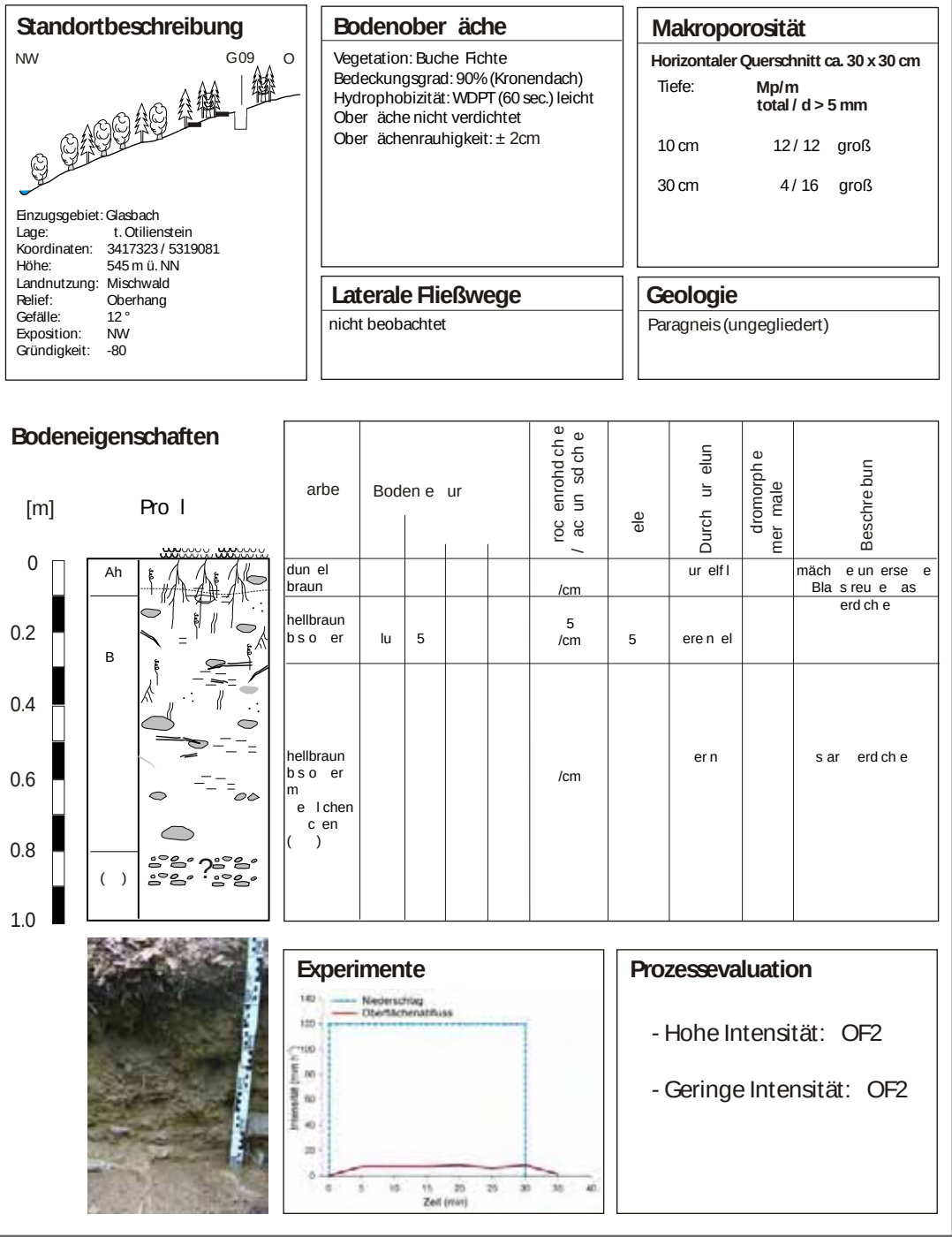


Abbildung B.15: Bodenansprache des Standortes G09 im Glasbach-Einzugsgebiet.

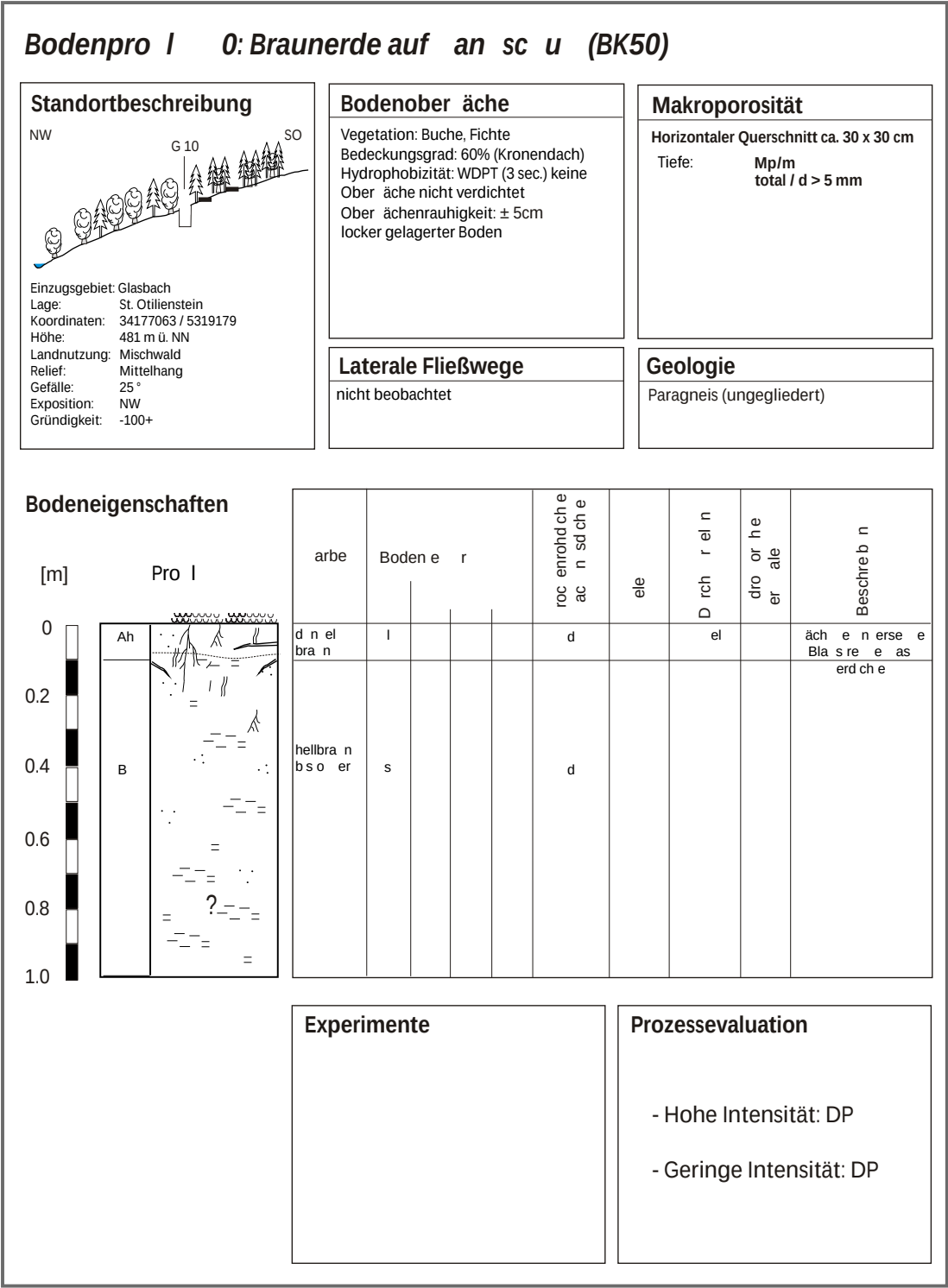
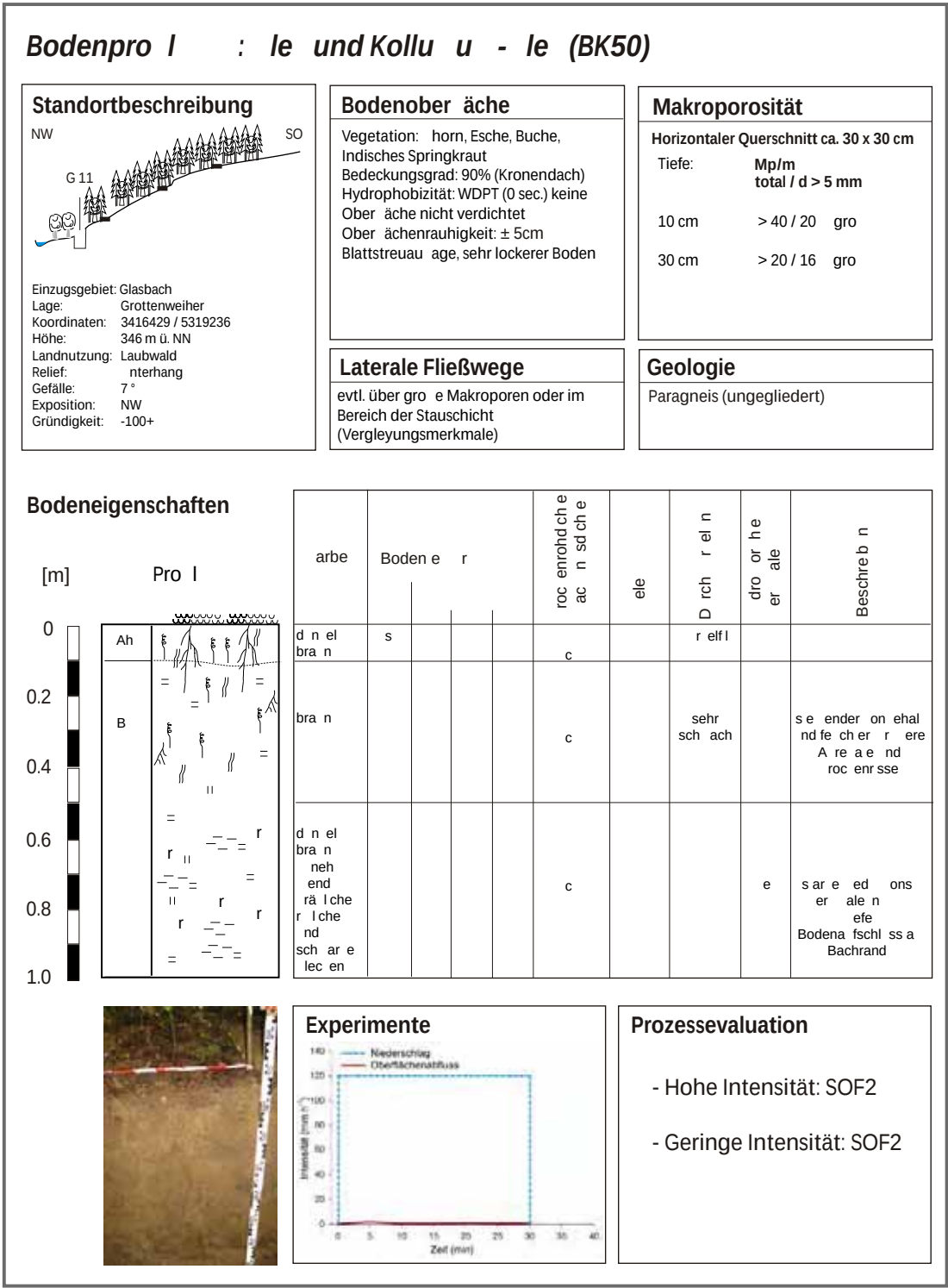
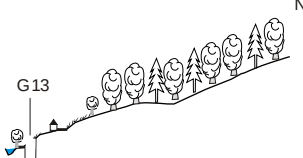


Abbildung B.16: Bodenansprache des Standortes G10 im Glasbach-Einzugsgebiet.



Bodenprofil : Parabraunerde Braunerde Parabraunerde (BK50)

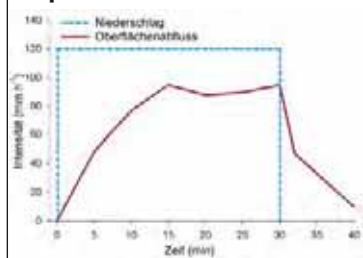
Standortbeschreibung  Einzugsgebiet: Glasbach Lage: Panoramahotel Mercure Koordinaten: 3415904 / 5319333 Höhe: 310 m ü. NN Landnutzung: Wiese/Weide Relief: nterhang Gefälle: 24° Exposition: Gründigkeit: -70	Bodenoberfläche Vegetation: Gräser Bedeckungsgrad: 60% Hydrophobizität: WDPT (0 sec.) keine Oberfläche verdichtet Oberflächenrauigkeit: ± 3cm gestörte Grasnarbe leichte Verschlämmungsneigung Beregnungsversuch mit BB zeigt Inaktivität der Makroporen Laterale Fließwege nicht beobachtet	Makroporosität Horizontaler Querschnitt ca. 30 x 30 cm Tiefe: Mp/m total / d > 5 mm 10 cm 20 / 12 groß 30 cm 16 / 16 groß Geologie Paragneis (ungegliedert)
--	---	---

Bodeneigenschaften

[m]	Profil	Farbe	Bodenstruktur	Horizontale / vertikale Röhren	Elektrode	Durchwurzelung	Dromorphie	Beschreibung
0	Ah	hellbraun	lu 5	/cm		ur elf l		ne Umsaule es re Grasnarbe
0.2	B	hellbraun bis ocker	lu 5	/cm	5	schwach		sar erdcheer n erboden
0.4								
0.6								
0.8	?							
1.0								



Experimente



Prozessevaluation

- Hohe Intensität: HOF2
- Geringe Intensität: OF2

Abbildung B.18: Bodenansprache des Standortes G13 im Glasbach-Einzugsgebiet.

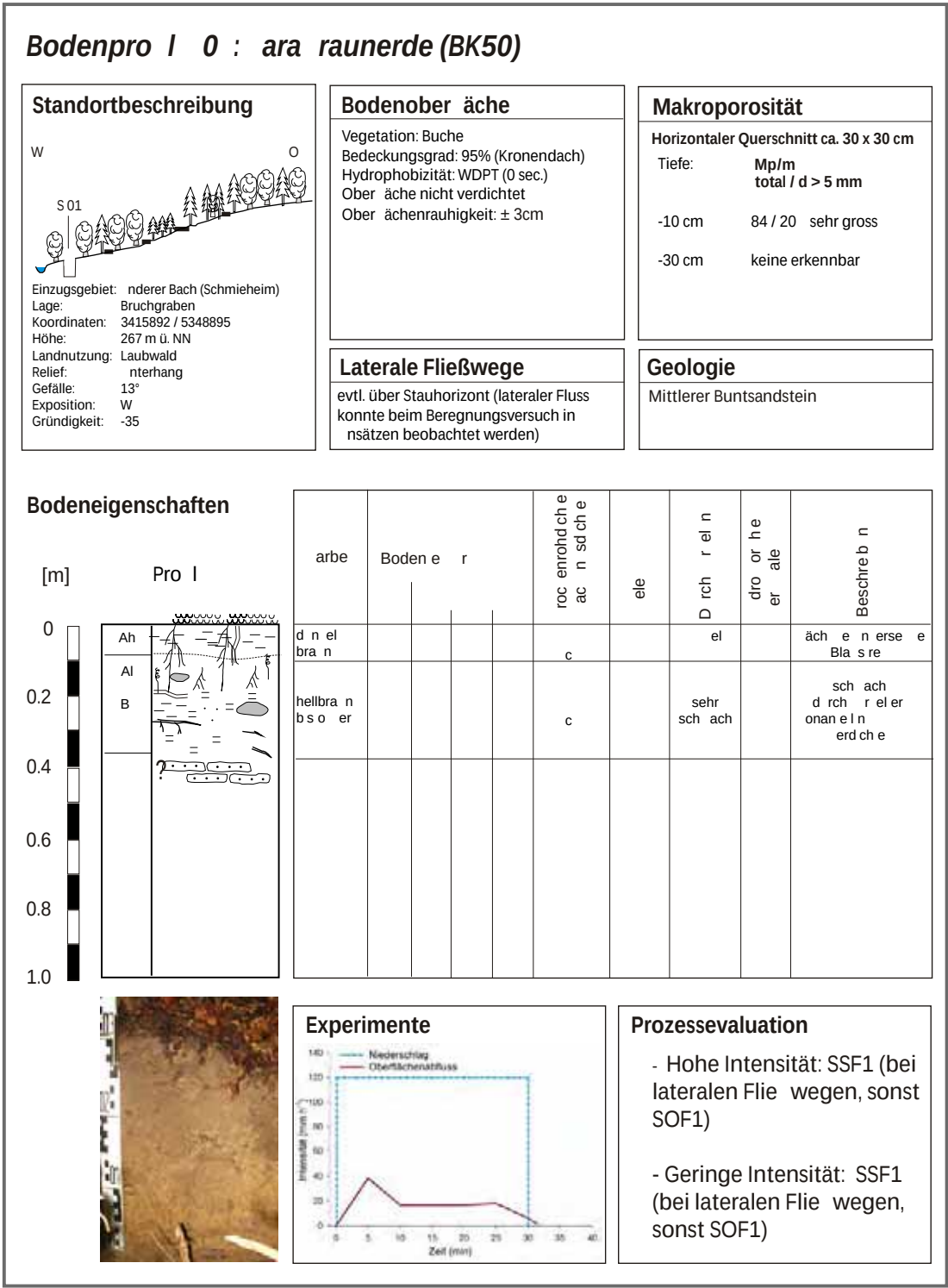


Abbildung B.19: Bodenansprache des Standortes S01 im Einzugsgebiet Anderen Baches.

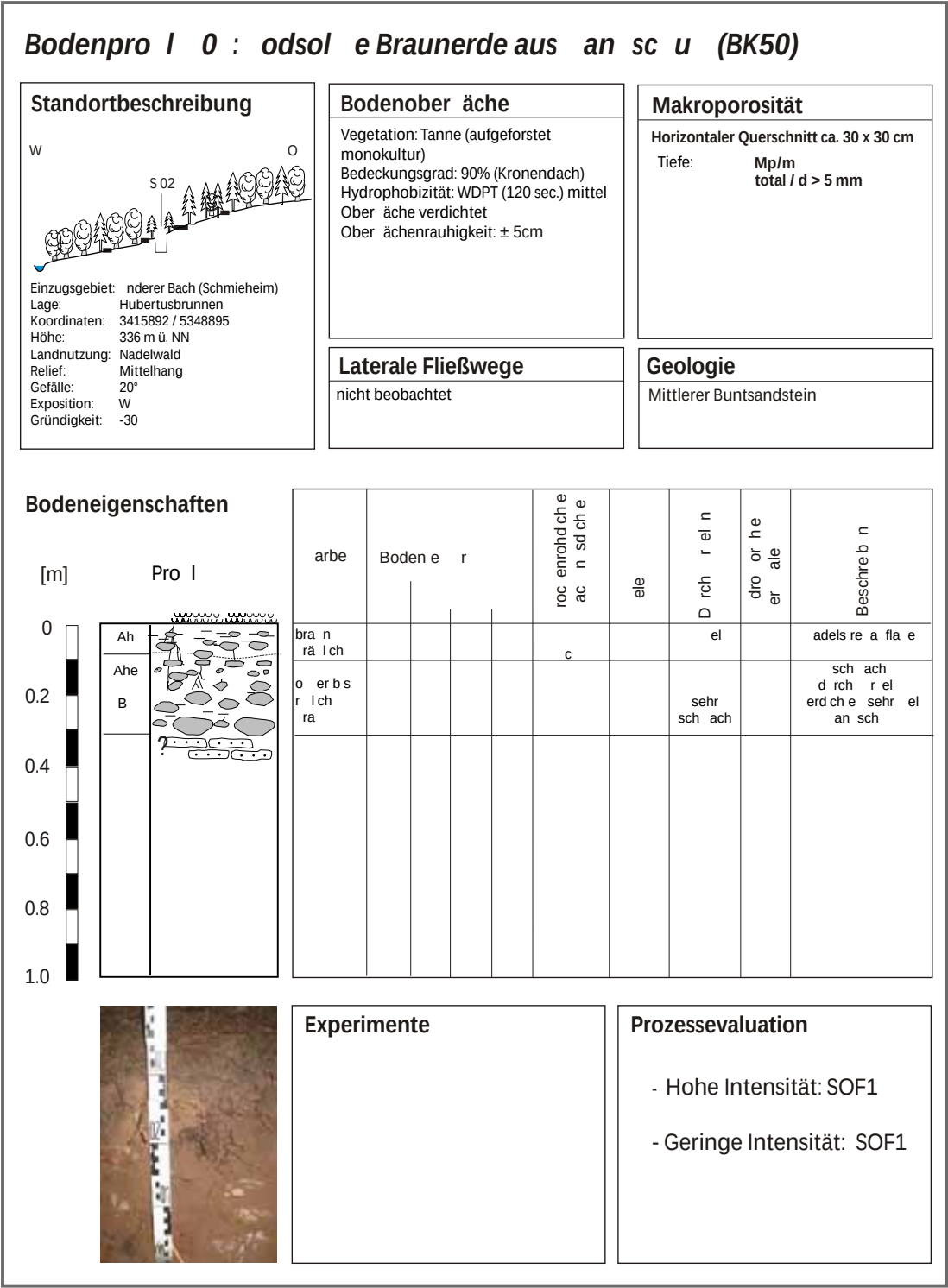


Abbildung B.20: Bodenansprache des Standortes S02 im Einzugsgebiet Anderen Baches.

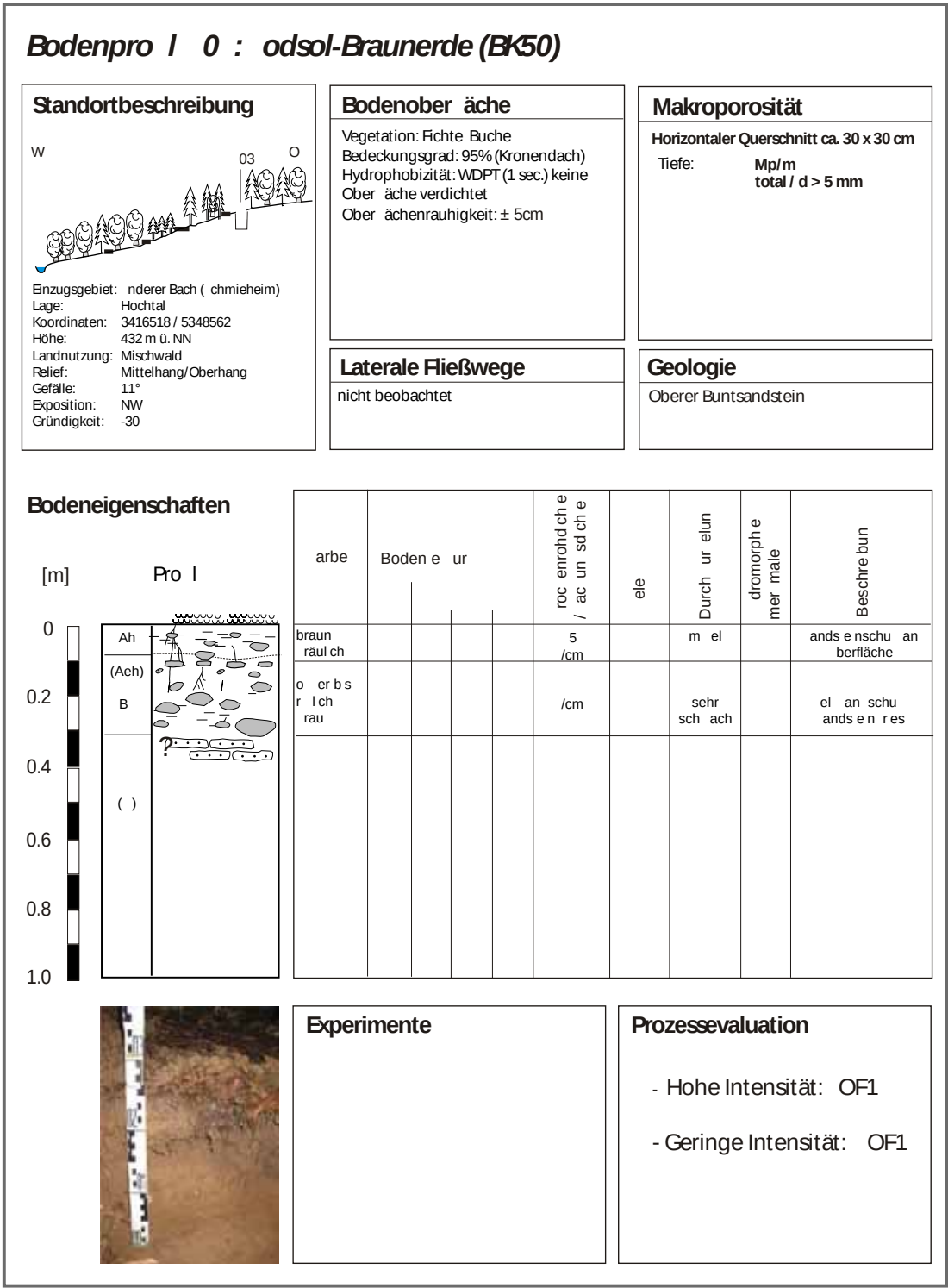


Abbildung B.21: Bodenansprache des Standortes S03 im Einzugsgebiet Anderen Baches.

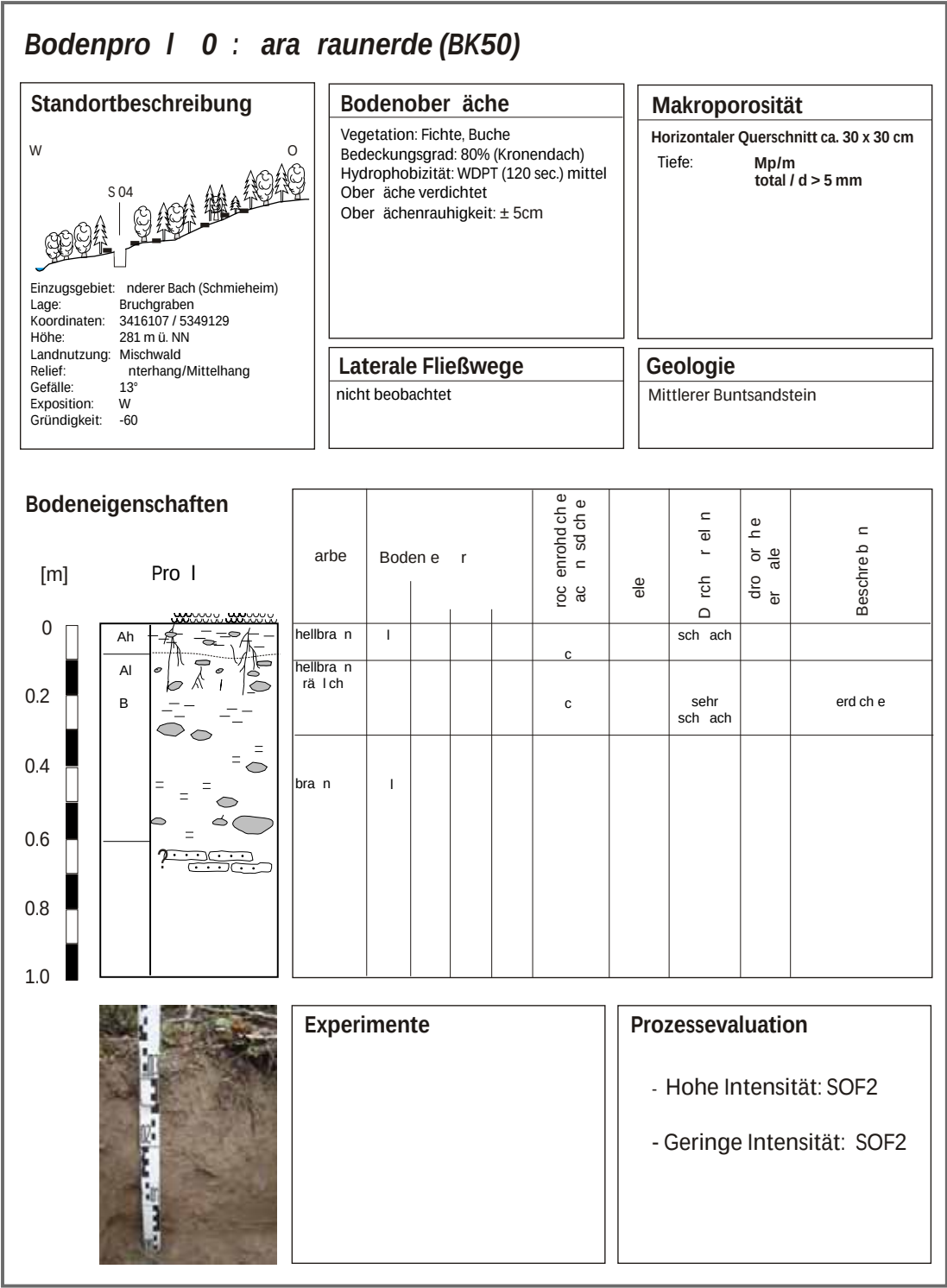


Abbildung B.22: Bodenansprache des Standortes S04 im Einzugsgebiet Anderen Baches.

Bodenpro I 05: ara raunerde (BK50)

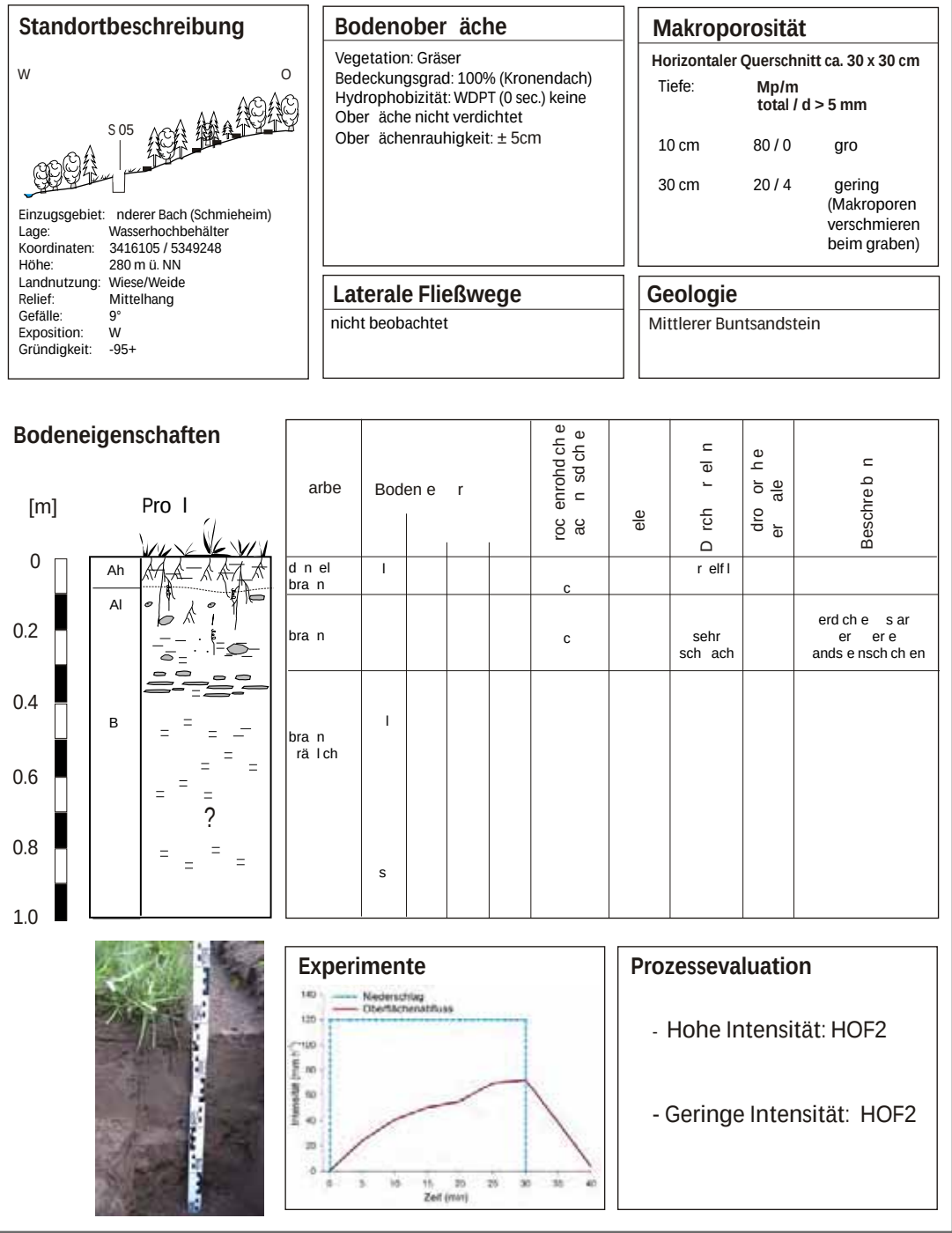
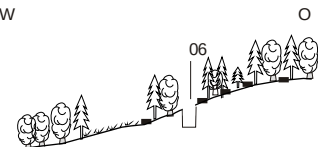
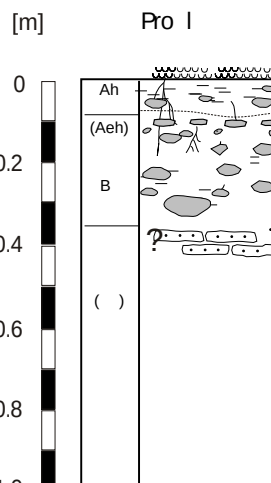


Abbildung B.23: Bodenansprache des Standortes S11 im Einzugsgebiet Anderen Baches.

Bodenprofil 0 : *odsol ge Braunerde aus Hangschutt (BK50)*

Standortbeschreibung  Einzugsgebiet: Anderer Bach (Schmieheim) Lage: Hohenstich Koordinaten: 3416406 / 5349292 Höhe: 339 m ü. NN Landnutzung: Mischwald Relief: Mittelhang Gefälle: 18° Exposition: W Gründigkeit: -35	Bodenoberfläche Vegetation: Buche Fichte Bedeckungsgrad: 100% (Kronendach) Hydrophobizität: WDPT (10 sec.) gering Oberfläche nicht verdichtet Oberflächenrauigkeit: ± 10cm	Makroporosität Horizontaler Querschnitt ca. 30 x 30 cm Tiefe: Mp/m total / d > 5 mm
	Laterale Fließwege nicht beobachtet	Geologie Oberer Buntsandstein

Bodeneigenschaften 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Farbe</th> <th colspan="4">Bodeneigenschaften</th> <th>rocken / an / un / sd / ch / e</th> <th>ele</th> <th>Durchwurzelung</th> <th>dromorphe / mer / male</th> <th>Beschreibung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>dunkelbraun</td> <td>lu</td> <td>5</td> <td></td> <td>5</td> <td>/cm</td> <td></td> <td>mittel</td> <td></td> <td>unersetzte / aubs / reu</td> </tr> <tr> <td>braun</td> <td>l</td> <td>5</td> <td>5</td> <td>5</td> <td>d</td> <td>5</td> <td>sehr / sch / ach</td> <td></td> <td>hoher / ele / an / el</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Farbe	Bodeneigenschaften				rocken / an / un / sd / ch / e	ele	Durchwurzelung	dromorphe / mer / male	Beschreibung	dunkelbraun	lu	5		5	/cm		mittel		unersetzte / aubs / reu	braun	l	5	5	5	d	5	sehr / sch / ach		hoher / ele / an / el										
Farbe	Bodeneigenschaften				rocken / an / un / sd / ch / e	ele	Durchwurzelung	dromorphe / mer / male	Beschreibung																																
dunkelbraun	lu	5		5	/cm		mittel		unersetzte / aubs / reu																																
braun	l	5	5	5	d	5	sehr / sch / ach		hoher / ele / an / el																																

	Experimente	Prozessevaluation - Hohe Intensität: OF2 - Geringe Intensität: OF2
---	--------------------	---

Abbildung B.24: Bodenansprache des Standortes S06 im Einzugsgebiet Anderen Baches.

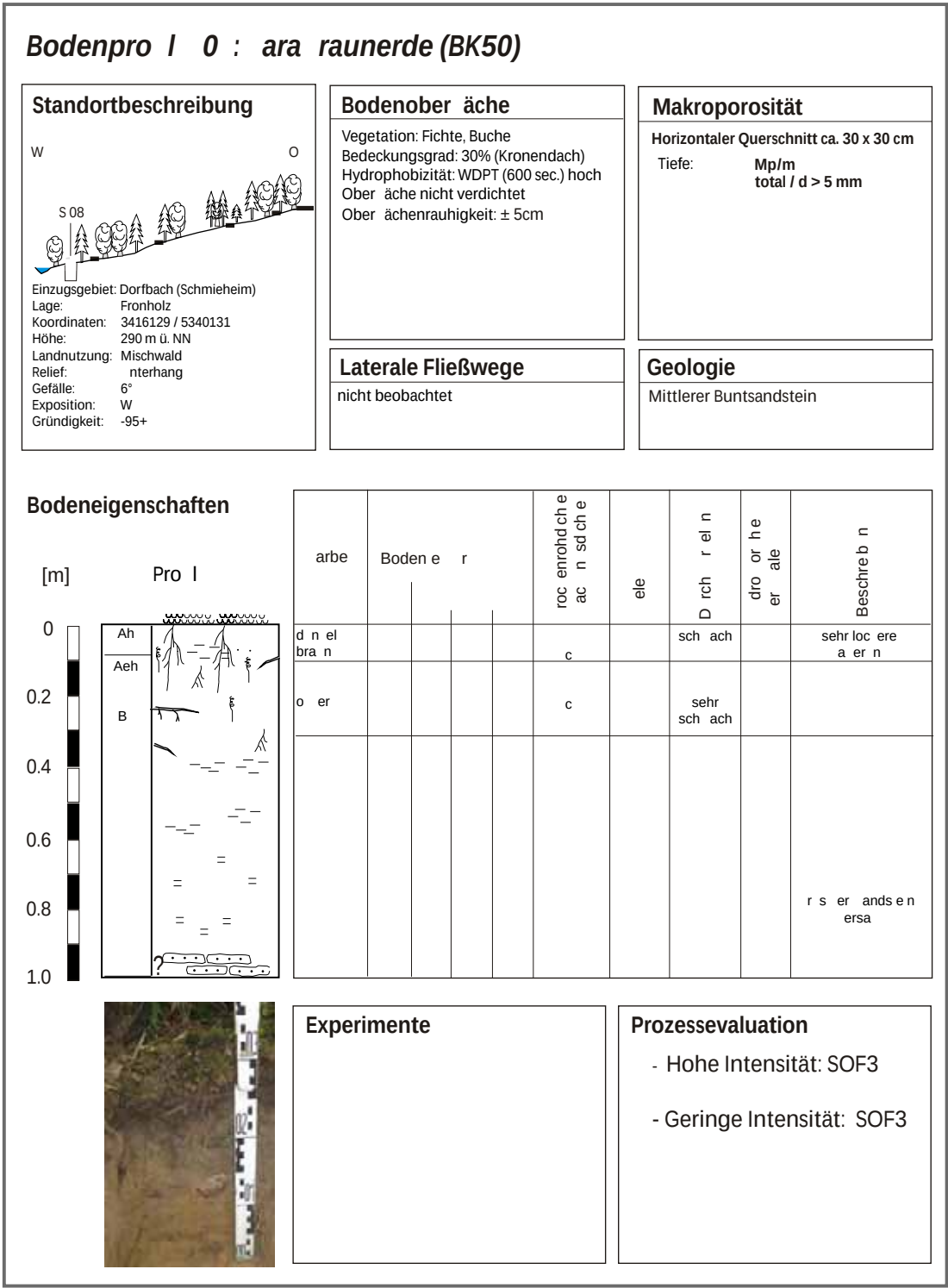
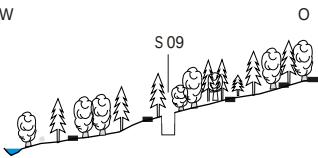


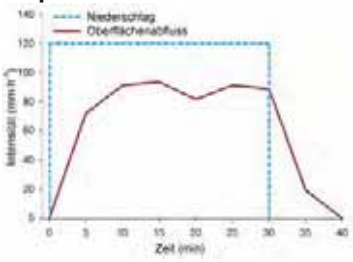
Abbildung B.25: Bodenansprache des Standortes S08 im Dorfbach-Einzugsgebiet.

Bodenpro I 0 : odsol-Braunerde (BK50)

Standortbeschreibung  W O S 09 Einzugsgebiet: Dorfbach (Schmieheim) Lage: Fronholz Koordinaten: 3416331 / 5350037 Höhe: 331 m ü. NN Landnutzung: Mischwald Relief: Mittelhang Gefälle: 17° Exposition: W Gründigkeit: -35	Bodenoberfläche Vegetation: Tanne, Buche Bedeckungsgrad: 70% (Kronendach) Hydrophobizität: WDPT (>600 sec.) hoch Oberfläche verdichtet Oberflächenrauigkeit: ± 3cm Laterale Fließwege nicht beobachtet/eventuell auf anstehendem Gestein möglich	Makroporosität Horizontaler Querschnitt ca. 30 x 30 cm Tiefe: Mp/m total / d > 5 mm Geologie Oberer Buntsandstein
---	--	---

Bodeneigenschaften

[m]	Pro I	arbe	Boden e r	roc enrdche ac n sdche	ele	D rch r el n	dro or he er ale	Beschreib n
0	Ah	r lch bra n	s			el		a bs re a sa fla e
0.2	Ae	r lch bra n						e ne laren or on ren en neh end an sch ans ehen des Ges e n
0.4	B					sch ach		
0.6								
0.8								
1.0								

**Experimente****Prozessevaluation**

- Hohe Intensität: SOF1
(Bei Hydrophobizität HOF1 oder HOF2)
- Geringe Intensität: SOF1
(Bei Hydrophobizität HOF1 oder HOF2)

Abbildung B.26: Bodenansprache des Standortes S09 im Dorfbach-Einzugsgebiet.

C Beregnungsversuche

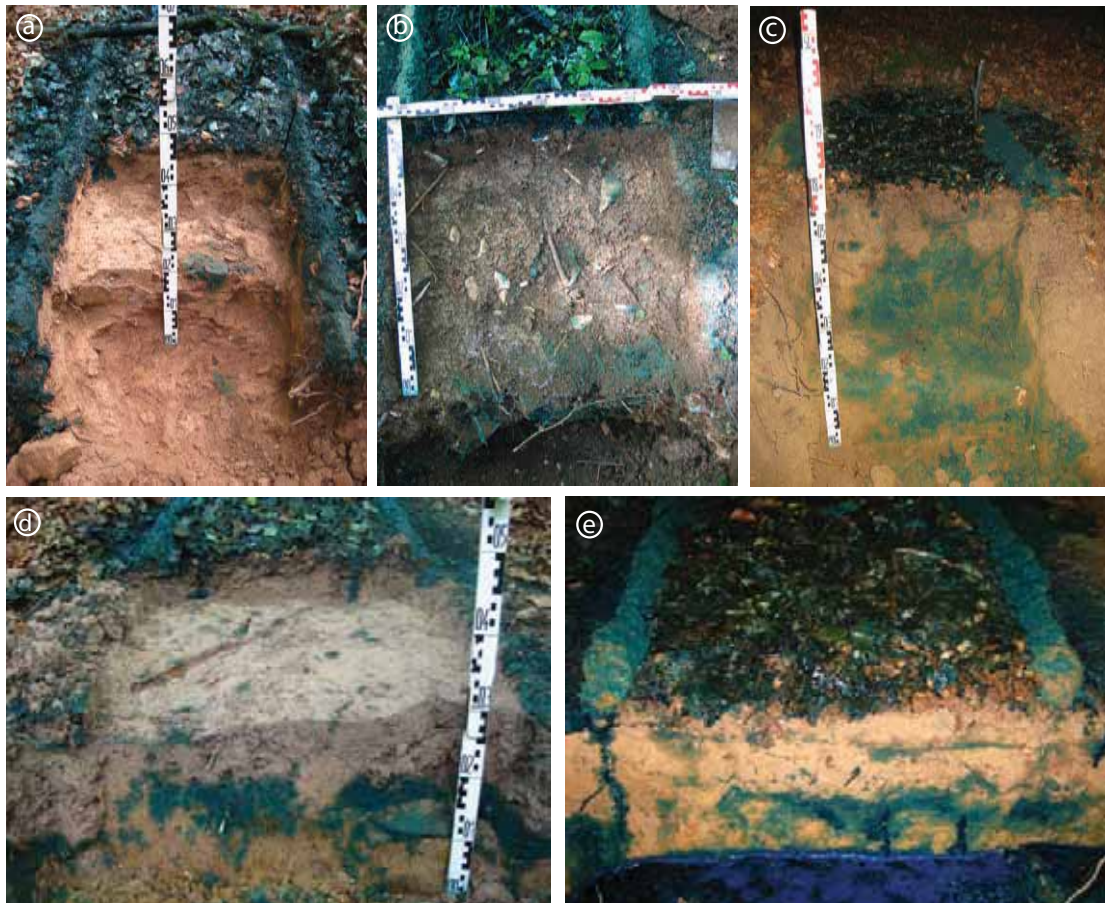


Abbildung C.1: Beregnungsversuche mit BB FCF. a) Schmieheim S09; b) Ehrenbächle E02; c) Glasbach G09; d) & e) Schmieheim S01.



Abbildung C.2: Aktive und inaktive Makropore am Standort S01 und G13. Anzeichen für Hydrophobizität am Standort S09 im August 2009.

D Eindrücke aus den Untersuchungsgebieten



Abbildung D.1: Region um Schmieheim, Blick richtung Osten.



Abbildung D.2: Einzugsgebiet des Glasbaches, Blick richtung Norden.



Abbildung D.3: Schönbergwiesen im Ehrenbächle-Einzugsgebiet, Blick richtung Norden.



Abbildung D.4: Geologie der Einzugsgebiete. Gneis - Glasbach (rechts), Sandstein - Schmieheim (mitte), Jurakalk - Ehrenbächle (links).



Abbildung D.5: Untersuchungen am Ehrenbächle stoßen auf großes Interesse.



Abbildung D.6: Wegeentwässerung in Schmieheim und am Glasbach.



Abbildung D.7: Alte Schleifwege und Gewässerinitiierung in Schmieheim (Anderer Bach).



Abbildung D.8: Reduzierte Gewässerquerschnitte am Anderen Bach (links) und Einlauf des Dorfbaches in den verdolten Abschnitt (rechts). Beim Hochwasser vom 1. September 2008 stand das Wasser am Anderen Bach (mitte) etwa 20 cm über der Straße.



Abbildung D.9: Hochwasser am Glasbach vom 19. Mai 1994 (links). Durch Geschwemmsel staute sich das Wasser an einem Gitter in der Verdolung (Foto zur Verfügung gestellt von H. Sigmund). Reduzierter Querschnitt am Glasbach (mitte). Zu-
lauf aus der Regenwasserkanalisation bei einem Konvektiveignis im Juli 2009 am Glasbach (rechts).

Ehrenwörtliche Erklärung:

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

Freiburg, den 12. März 2010

Fabian Ries