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

Michael Murr

Räumlich-zeitliche Variabilität des Abflusses entlang eines Gewässernetzes – topographische und geologische Einflussfaktoren

Diplomarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg im Breisgau, Januar 2009

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

Michael Murr

Räumlich-zeitliche Variabilität des Abflusses entlang eines Gewässernetzes – topographische und geologische Einflussfaktoren

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

Diplomarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler Freiburg im Breisgau, Januar 2009 Meinen Eltern.

Mein Dank gilt

Prof. Dr. Markus Weiler für die Vergabe und Betreuung des Themas.

Dr. Jens Lange für die Übernahme des Koreferats.

Emil Blattmann und Jürgen Strub für die Bereitstellung der Arbeitsgeräte.

Michael Stölzle, Klemens Rosin, Jakob Holch und Simon Klaffl für die fruchtbare Diskussion.

Allen Anderen, die auf Ihre Art zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Und nicht zuletzt dem Element Wasser.

Inhaltsverzeichnis

In	halts	verzeic	hnis						i
Ał	obildu	ungsve	zeichnis						\mathbf{v}
Ta	belle	enverze	ichnis						vii
Sy	mbo	lverzei	chnis						ix
Ał	okürz	ungssv	erzeichnis						xi
Ζι	ısamı	menfas	sung						xiii
Sι	ımma	ary							xv
1	Einl	eitung							1
	1.1	Zielset	zung			•	•		1
	1.2	Stand	der Forschung						2
	1.3	Vorgel	nensweise		•	•		•	5
2	Geb	iete							9
	2.1	Einzu	gsgebiet Bleiche	 •		•	•	•	11
		2.1.1	Meteorologie und Hydrologie				•		12
		2.1.2	Pedologie und Hydrogeologie				•		12
	2.2	Einzu	gsgebiet Brugga			•			16
		2.2.1	Meteorologie und Hydrologie			•			17
		2.2.2	Pedologie und Hydrogeologie						17
	2.3	Einzu	gsgebiet Ettenbach				•		19
		2.3.1	Meteorologie und Hydrologie						20
		2.3.2	Pedologie und Hydrogeologie				•		20
		2.3.2	Pedologie und Hydrogeologie						•

i

3	GIS-	-Meth	odik	23
	3.1	Meteo	rologische Faktoren	23
		3.1.1	Mittlere Niederschlagshöhen	23
		3.1.2	Mittlere korrigierte Niederschlagshöhen	24
		3.1.3	Potentielle Verdunstung	24
		3.1.4	Mittlere jährliche tatsächliche Verdunstung	24
		3.1.5	Einstrahlung	25
		3.1.6	Wasserbilanz	25
		3.1.7	Lufttemperatur	26
	3.2	Topog	raphische Faktoren	26
		3.2.1	Neigung	26
		3.2.2	Hangwölbung	27
		3.2.3	Topographischer Index	27
		3.2.4	Landnutzung	28
	3.3	Pedole	ogische Faktoren	28
		3.3.1	Bodenart	28
		3.3.2	Speicherfähigkeit des Bodens	29
	3.4	Geolog	gie: K_f -Werte	29
	3.5	Morph	nologie: Größe der Talsohle	30
	3.6	Zusan	nmenfassung aller Faktoren	31
	3.7	Fehler	betrachtung	32
4	Met	hodik		33
	4.1	Abflus	ssmessung	33
		4.1.1	Feldarbeit und Planung	33
		4.1.2	Datenverarbeitung	35
			4.1.2.1 Berechnung des lateralen Zuflusses	35
			4.1.2.2 Extrapolation der Durchgangskurve	35
		4.1.3	Bewertung der Genauigkeit	37
		4.1.4	Einordnung in den zeitlichen Kontext	37
			4.1.4.1 Niederschlag	38
			4.1.4.2 Abfluss	39
	4.2	Misch	ungsrechnung	39
		4.2.1	Erläuterung der Methode	40

		4.2.2	Probleme bei der Durchführung
	4.3	Fehler	rechnung Abflussspende
		4.3.1	Vorbereitungen
		4.3.2	Abflussmessung
		4.3.3	Datenverarbeitung
		4.3.4	Zusammenfassung der Fehlerrechnung
	4.4	Testst	atistik
		4.4.1	Rangkorrelation nach SPEARMAN
		4.4.2	Regressionsbäume
5	Res	ultate	49
	5.1	Räum	liche Variabilität der Abflussspenden
		5.1.1	Bleiche
		5.1.2	Brugga
		5.1.3	Ettenbach $\ldots \ldots 52$
	5.2	Zeitlic	he Variabilität der Messtage
		5.2.1	Bleiche
		5.2.2	Brugga
		5.2.3	Ettenbach $\ldots \ldots 55$
	5.3	Leitfä	higkeit
		5.3.1	Bleiche
		5.3.2	Brugga
		5.3.3	Ettenbach $\ldots \ldots 59$
	5.4	Statis	tische Analyse
		5.4.1	Rangkorrelation nach Spearman
			5.4.1.1 Bleiche
			5.4.1.2 Brugga \ldots 64
			5.4.1.3 Ettenbach \ldots 69
		5.4.2	Regressionsbäume
			5.4.2.1 Bleiche
			5.4.2.2 Brugga
			5.4.2.3 Ettenbach \ldots 74
			5.4.2.4 Sandstein
			5.4.2.5 Alle Einzugsgebiete

6	o Synthese und Diskussion				
	6.1	Ergebnisse der statistischen Analyse	77		
		6.1.1 Rangkorrelation nach SPEARMAN	77		
		6.1.2 Regressionsbäume	78		
	6.2 Einzugsgebiet Bleiche				
	6.3 Einzugsgebiet Brugga				
	6.4	Einzugsgebiet Ettenbach	84		
7	Fazi	t und Ausblick	87		
Α	Tab	ellen der Abflussspenden und Einflussfaktoren	91		
Α	Tab A.1	ellen der Abflussspenden und Einflussfaktoren Bleiche	91 91		
Α	Tab A.1 A.2	ellen der Abflussspenden und Einflussfaktoren Bleiche	91 91 93		
Α	Tab A.1 A.2 A.3	ellen der Abflussspenden und EinflussfaktorenBleicheBleiggaBruggaEttenbach	91 91 93 98		
A B	Tab A.1 A.2 A.3 Imp	ellen der Abflussspenden und Einflussfaktoren Bleiche Brugga Brugga Ettenbach Ettenbach	 91 93 98 101 		
A B Lit	Tab A.1 A.2 A.3 Imp	ellen der Abflussspenden und Einflussfaktoren Bleiche Brugga Brugga Ettenbach Ettenbach ressionen aus der Feldarbeit	 91 93 98 101 103 		

Abbildungsverzeichnis

2.0.1	Lage der Untersuchungsgebiete Bleiche, Brugga und Ettenbach.	10
2.1.1	Hypsometrische Kurve der Bleiche	11
2.1.2	Bodenarten im EZG Bleiche	13
2.1.3	Hydrogeologie im EZG Bleiche	14
2.1.4	Geologische Schnitte im EZG Bleiche.	15
2.2.1	Hypsometrische Kurve der Brugga	16
2.2.2	Hydrogeologie im EZG Brugga	18
2.3.1	Hypsometrische Kurve des Ettenbachs	19
2.3.2	Bodentypen im EZG Ettenbach	21
2.3.3	Hydrogeologie im EZG Ettenbach	21
4.1.1	Niederschläge (Tagessummen) der Station Lahr	38
4.1.2	Niederschläge (Tagessummen) des Klimaturmes Katzensteig	38
4.1.3	Abflussganglinien der Pegel Oberried und St.Wilhelm.	39
4.3.1	Schema der durchgeführten Fehlerrechnung	44
5.1.1	Karte der mittleren AS im EZG Bleiche	50
5.1.2	Karte der mittleren ASn im EZG Brugga	51
5.1.3	Karte der mittleren ASn im EZG Ettenbach	52
5.2.1	Zeitlich vergleichende Darstellung der Messtage im EZG Bleiche.	53
5.2.2	Zeitlich vergleichende Darstellung der Messtage im EZG Brugga.	54
5.2.3	Zeitlich vergleichende Darstellung der Messtage im EZG Ettenbach.	55
5.3.1	Karte der mittleren LF im EZG Bleiche	57
5.3.2	Karte der mittleren LF im EZG Brugga	58
5.3.3	Karte der mittleren LF im EZG Ettenbach	59
5.4.1	Plots der AS gegen Niederschlag, EZG Bleiche.	61
5.4.2	Plots der AS gegen MRVBF, EZG Bleiche.	62
5.4.3	Plots der AS gegen Topographischer Index.	63

5.4.4	Plots der AS gegen Speicherfähigkeit des Bodens, EZG Bleiche.	63
5.4.5	Plots der AS gegen potentielle Verdunstung, EZG Brugga	65
5.4.6	Plots der AS gegen Wasserbilanz, EZG Brugga	66
5.4.7	Plots der AS gegen Höhe, EZG Brugga	67
5.4.8	Plots der AS gegen K_f -Werte, EZG Brugga	68
5.4.9	Plots der AS gegen potentielle Verdunstung, EZG Ettenbach. $\ .$.	69
5.4.10	Plots der AS gegen Versiegelung, EZG Ettenbach	70
5.4.11	Plots der AS gegen Talweite (MRVBF), EZG Ettenbach	71
5.4.12	Plots der AS gegen K_f -Werte, EZG Ettenbach	71
5.4.13	Baumdiagramm für das EZG Bleiche.	73
5.4.14	Baumdiagramm für das EZG Brugga	73
5.4.15	Baumdiagramm für das EZG Ettenbach	74
5.4.16	Baumdiagramm für den Buntsandstein.	75
5.4.17	Baumdiagramm für die EZG Bleiche, Brugga und Ettenbach	76

Tabellenverzeichnis

2.1.1	Landnutzung nach Flächenanteilen im EZG Bleiche	12
2.2.1	Landnutzung nach Flächenanteilen im EZG Brugga	17
2.3.1	Landnutzung nach Flächenanteilen im EZG Ettenbach	20
3.6.1	Übersicht aller in GIS erarbeiteten Faktoren.	31
5.3.1	LF-Werte aus den Mischungsrechnungen für alle EZG	56
5.4.1	Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman	60

Symbolverzeichnis

\mathbf{K}_{f}	hydraulische Durchlässigkeit	$m \cdot s^{-1}$
rad	Winkel im Bogenmaß	_
$ ho_s$	Korrelationskoeffizient nach Spearman	—
T_{Luft}	Lufttemperatur	$^{\circ}C$
qA	Abflussspende aus Messtag A	$l\cdot s^{-1}\cdot km^{-2}$
qMean	arithmetisches Mittel der Abflussspende aller	$l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$
	Messtage	

Abkürzungssverzeichnis

AS	Abflussspende
DGM	Digitales Gelände Modell
DWD	Deutscher Wetterdienst
ETP	Evapotranspiration
EZG	Einzugsgebiet
fgew.	flächengewichtet
ĞIS	Geographisches Informations System
HSHJ	Hydrologisches Sommerhalbjahr
HW	Hangwölbung
m LF	(elektrische) Leitfähigkeit
MRVBF	Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness
NS	Niederschlag
SKK	SPEARMAN'scher Korrelationskoeffizient
SHJ	$\operatorname{Sommerhalbjahr}$
Speicher	Speicherfähigkeit des Bodens
TDK	Tracerdurchgangskurve
TEZG	Teileinzugsgebiet
TI	Topographischer Index
USG	${ m Untersuchungsgebiet}$
WaBoA	Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg
WBilanz	Wasserbilanz

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, ein verbessertes Systemverständnis von Einzugsgebieten hinsichtlich deren Abflussverhalten zu erlangen und darauf aufbauend Strukturmodifiktationen für Modelle ableiten zu können.

Hierfür muss zunächst ein Verständnis für räumliche und zeitliche Abflussvariabilität entwickelt werden, welche in Bezug zu topographischen und geologischen Einflussfaktoren gesetzt werden kann. Daneben wurde als eigentlich Hypothese untersucht, ob unterirdischer Wassertransport aus den *headwaters* in tiefer gelegene Bereiche eines Flusseinzugsgebiets stattfindet und dort erst im Gerinne als Abfluss wirksam wird Dieser Prozess wird unter dem Begriff *Subvalley-Flow* eingeführt.

Dazu wurden in der vorliegenden Arbeit an den Gerinnen verschiedener Einzugsgebiete im Südwesten Deutschlands, räumlich und zeitlich differenzierte Abflussmessungen für Teilbereiche durchgeführt. Diese aufgeschlüsselten Abflussinformationen wurden unter Zuhilfenahme von Fernerkundungs- und Statistikanalysen mit statischen Parametern der Topographie und Geologie in Zusammenhang gebracht.

Auswertungen der statistischen Analysen zeigten keine signifikanten Zusammenhänge zwischen räumlicher Abflussvariabilität und den untersuchten Einflussfaktoren. Durch grafische Auswertung der Ergebnisse konnten Hinweise für die Existenz des *Subvalley-Flows* in den untersuchten Gebieten gefunden werden.

Summary

Aim of the present thesis is to improve understanding of watershed basins with regards to runoff generation and potentially derive modifications for hydrological models.

It is necessary to understand spatial and temporal variability of runoff generation within watersheds to identify certain processes and conditions that may influence variations in runoff generation. The main assumption of this thesis is the so-called *subvalley-flow*, which entitles subsurface flow from headwaters to downvalley reaches within a watershed. To furnish proof, it is necessary as an auxiliary assumption to identify and relate static topographic and geologic parameteres to spatial variability in stream runoff.

Fieldwork has been done to attain spatially differentiated information of runoff rates along channel networks for several watersheds in southwest Germany. Hence it was possible to attain information about the amount of runoff produced in certain parts of a watershed basin. These information were related to parameters gained from remote sensing data by statistical methods.

Results of the statistic correlations gave no statistical significant relations between static topographic parameters and runoff amount in the investigated partial areas. It was not possible to interpret the statistic results in terms of the main assumption of this work. Graphical interpretations gave evidence, but no proof of subvalley-flow in the study areas.

1 Einleitung

Hydrologische Untersuchungen zur Abflussbildung erweisen sich häufig als problematisch, wenn keine räumlich differenzierten Informationen über die Variabilität des oberirdischen Abflusses innerhalb des Einzugsgebietes (kurz: EZG) vorliegen. Oftmals wird nur am Unterlauf eines Gerinnes eine kontinuierliche Abflussmessung vorgenommen. Hydrologische Modelle werden meistens anhand dieser einen Punktinformation kalibriert und validiert. Es ist nicht möglich, eine zwischen Abflussbildungsprozessen und Herkunftsräumen differenzierende Bewertung durchzuführen; vielmehr wird eine Integration der Vorgänge im Einzugsgebiet validiert.

Zur Aufschlüsselung der räumlichen und zeitlichen Variabilität des Abflusses entlang eines Gerinnenetzes ist es notwendig, Abflussinformationen an verschiedenen Punkten eines Gerinnes zu erheben. Diese Notwendigkeit mündet in den methodischen Ansatz dieser Arbeit. In der folgenden Einleitung soll erörtert werden, wie die gestellte Hypothese und Fragestellung durch die Methodik beantwortet werden können.

1.1 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Beantwortung der Frage, ob sich Abflussvariabilität entlang eines Gerinnes durch statische Faktoren erklären lässt oder, ob an räumlicher und zeitlicher Variabilität auch laterale Fließprozesse im Untergrund beteiligt sind. Einer dieser Prozesse, die Abflussvariabilitäten entlang eines Gerinnenetzes hervorrufen können, könnte unterirdisches Perkolieren von in Höhenlagen infiltriertem Niederschlag talabwärts sei. Denkbar ist also, dass dieses Richtung Gebietsauslass perkolierende Wasser aus Höhenlagen stammt, aber erst in den flussabwärts gelegenen Bereichen als Abfluss im Gerinne wirksam wird. Dieser Prozess wird im Folgenden als *Subvalley-Flow* bezeichnet und dessen Nachweis ist Hauptuntersuchsungsgegenstand der vorliegenden Arbeit. Dazu soll anhand von einer Auflistung bisheriger Studien zunächst geklärt werden, inwiefern die Topographie, und daraus abgeleitete Parameter zur Beschreibung des Geländes, im Zusammenhang mit Abflussvariabilität betrachtet werden müssen.

1.2 Stand der Forschung

ANDERSON & BURT (1978) haben eine Reihe von Studien zur Bewegung des Bodenwassers – und damit potentieller Abflussbildung – in durchschnittlich 20° geneigten Hangabschnitten durchgeführt. Die Untersuchung wurde dabei von der zweidimensionalen Betrachtung des Hangs um die Komponente der Hangwölbung als dritte Dimension erweitert. Es wurde eine im Hang gelegene Mulde und die angrenzenden Erhebungen mit einem ausreichend dichten und automatischen Tensiometersystem versehen, welches eine Erfassung der Bodenfeuchte an allen Messpunkten innerhalb einer Stunde ermöglichte. Zusätzlich wurde ein Niederschlagsmesser aufgestellt. Ausserdem wurden drei Messwehre installiert, über die der Zufluss der verschiedenen Teile des Hangabschnittes ermittelt werden konnte. Bei der Analyse eines Niederschlagsereignisses wurde eindeutig gezeigt, dass eine konvergente Fliessbewegung des Bodenwassers in die Mulde stattfindet. ANDERSON & BURT (1978) konnten auch darstellen, dass selbst auf einem verhältnismässig flachen Hang Fliessbewegungen hauptsächlich durch das Gravitationspotenital verursacht werden; dies ist bei steileren Hängen noch wesentlich deutlicher beobachtbar und betont die dominante Rolle der Topographie in der Steuerung der Bodenwasserfliessbewegungen.

Diese Ergebnisse werden von ANDERSON & KNEALE (1982) bestätigt, indem sie die kontrollierende Rolle von kleinräumigen topographischen Elementen wie Aussparungen oder Erhebungen auf die Fliessbewegungen von Bodenwasser erarbeiten. Für die Autoren scheint es wichtig aus diesen topographischen Variationen der Hangskala auf diejenigen Flächen zu schließen, die tatsächlich zum Gerinneabfluss beitragen. Ausserdem schlagen sie vor, neue Indizes zu entwickeln, anhand derer eine Unterscheidung von Hangflächen hinsichtlich ihrer Abflusswirksamkeit möglich wird.

Einen Vergleich zwischen Messdaten und der theoretischen Aussage solcher topographischen Indizes für einen Hang wurde von BURT & BUTCHER (1985) durchgeführt. Es wurden zwei Indizes, die horizontale Hangwölbung (entlang einer Konturlinie) und ein dem Topographischen Index (Erläuterung siehe Kapitel 3.2.3) ähnelndem Index, hinsichtlich ihres Vorhersagepotentials zur Bodenfeuchteverteilung in einem Hang untersucht. Es konnten allerdings keine eindeutigen Zusammenhänge gefunden werden.

GENEREUX ET AL. (1993) untersuchten ein Kartsgebiet, indem sie mehrere Gerinneabschnitte verschiedener Längen auf ihren lateralen Zufluss hin untersuchten. Es konnte dabei ein großes Spektrum an Abflussmengen untersucht werden. Zur Bestimmung der kontrollierenden Faktoren für die lateralen Zuflüsse wurde der Skalenbereich der Gerinneabschnitte und der Faktoren abgeglichen. Die Variabilität des Niederschlaginputs und der bodenhydraulischen Eigenschaften ist der Publikation nach auf der betrachteten Skala zu klein, um maßgebend für die räumliche Variabilität der Zu- bzw. Abflussmengen innerhalb der verschiedenen Abschnitte zu sein.

Als kontrollierende Faktoren bestimmten GENEREUX ET AL. (1993) die Vegetation, Topographie und die Klüftung des Untergrundes. Aus den gewonnenen Ergebnissen wurde geschlussfolgert, dass im untersuchten EZG die Verkarstung, und nicht die Variabilität von topographischen Faktoren, dominierend für die Abflussbildung ist. Die von ihnen beobachteten Abflussbildungsprozesse sind mit denen anderer Karstgebiete vergleichbar, wobei die zeitliche und räumliche Variabilität der Abflüsse spezifisch für das Untersuchungsgebiet ist.

SEIBERT ET AL. (2002) kamen zu dem Ergebnis, dass Faktoren wie Hangposition, Vorfeuchtebedingungen und die Lage der lokalen Grundwasserspiegel verantwortlich für die hydrologische Charakteristik einer Landschaftseinheit sind. Die Einflussfaktoren unterscheiden sich hier also deutlich von denen von GENEREUX ET AL. (1993).

Eine weitere Reihe von Untersuchungen zur Bestimmung des Abflussverhaltens von Teilflächen innerhalb von EZGn wurden von MCGLYNN & MCDONNELL (2003), MCGLYNN & SEIBERT (2003) und MCGLYNN ET AL. (2004) durchgeführt. Die Autoren unterscheiden primär zwischen *Riparian Zones* (Gerinnenahe Flächen - Begriff bei MCGLYNN & SEIBERT (2003)) und Hängen. *Riparian Zones* mit guter hydraulischer Verbindung zu den angrenzenden Hangflächen konnten als Flächen bestimmt werden, die im Falle eines Niederschlagsereignisses wesentlich an der Entstehung von hohen Abflüssen im Gerinne beitragen. Das Wasser aus den Hangflächen selbst hat einen nur sehr geringen Anteil am Ereignisabfluss. Die Hangflächen tragen im Wesentlichen zur hydrologischen Verhaltensstabilität der Riparian Zones bei und liefern laut MCGLYNN & MCDONNELL (2003) zwischen den Ereignissen durch beständige Drainage wesentlichen Beitrag zum Basisabfluss. Dahingegen präsentieren DUNNE & BLACK (1970) als ein Ergebnis ihrer Studie, dass das hydrologische Verhalten der zum Abfluss beitragenden Teilbereiche zwischen Niederschlagsereignissen variabel und prinzipiell auch saisonal geprägt ist. Als Schlussfolgerung geben sie allerdings auch an (vgl. MCGLYNN & MCDONNELL (2003); MCGLYNN & SEIBERT (2003); MCGLYNN ET AL. (2004)), dass für ihr Untersuchungsgebiet hautpsächlich Sättigungsflächenabfluss, speziell in den höher gelegenen Teilbereiche, für den Ereignisabfluss verantwortlich ist. Die übrigen Bereiche des EZGs, also Hänge und tiefere gelegene Teile, sind hautptsächlich als Reservoire anzusehen, die durch Niederschlagsereignisse gefüllt werden und zwischen den Ereignissen als Quelle für Basisabfluss dienen.

SHAMAN ET AL. (2004) stellen in ihren Ergebnissen dar, dass der kontrollierende Faktor für die Wasserführung in EZGn mit einer Fläche größer 10 km² die Ausdehnung der *Riparian Zones* ist und somit der Einfluss der höher gelegenen Teileinzugsgebiete (kurz: TEZG) aufgrund kaum vorhandener *Riparian Zones* unwesentlich ist. Dieser Effekt verstärkt sich mit der zunehmenden Größe des EZGs und primäre Attribute der Topographie treten somit in den Hintergrund. Für die EZGe bzw. TEZGe kleiner als 10 km² ist die Abflussvariabilität geprägt durch räumlich variierende Niederschlags- und Verdunstungsmengen, als auch durch Sonneneinstrahlung und hydraulische Eigenschaften der Böden.

SHAMAN ET AL. (2004) sehen, wie in Kapitel 1, erster Absatz angesprochen, die Notwendigkeit von der Mesoskala auf die Prozesse in kleineren Skalenbereichen zurückzugreifen, um mesoskalige Modelle zu verbessern oder auch neu zu entwickeln. Dabei ist es wichtig, besseren Einblick auf kontrollierende Faktoren und Prozesse zur Abflussvariabilität zu erlangen. Dies wurde auch von BRONSTERT & PLATE (1997) ausgeführt, als sie bei der Vorstellung eines halbphysikalischen Niederschlag-Abfluss-Modells die Notwendigkeit detaillierter Betrachtung von Hängen v.a. in gebirgigen Gegenden erwähnen und postulieren, dass derartige Einzugsgebiete als ein Mosaik der beitragenden Hänge betrachtet werden müssen.

UCHIDA ET AL. (2005) gehen auf das unterschiedliche hydrologische Verhalten von Teilgebieten auf der Hangskala ein. Es werden TEZGe in den oberen Teilen eines EZGs, sogenannte *Headwaters*, untersucht. Damit verkleinern die Autoren den betrachteten Skalenbereich von SHAMAN ET AL. (2004) auf die Hangskala. Sie gehen davon aus, dass eine Verständnis der Prozessvariabilität in dieser Größeneinheit essentiell für eine integrative Betrachtung von mesoskaligen Einzugsgebieten ist. So konnte gezeigt werden, dass eine Zusammenfassung mehrerer Hänge zu einem *headwater* eine Integration der einzelnen Hangprozesse darstellt, wodurch die Variabilität bei der Abflussbildung mit Erhöhung des Skalenbereichs gedämpft wird.

Die Bedeutung der räumlichen Diskretisierung von verschiedenen Landschaftseinheiten führen auch MCGLYNN ET AL. (2004) auf. Erst dadurch könne Einsicht darüber gewonnen werden, welche Bereiche eines EZGs tatsächlich zur Abflussbildung beitragen. Dies sei eben nicht möglich, sobald nur eine Abflussinformation am Konvergenzpunkt des EZGs vorliegt (vgl. Kap. 1).

SHAMAN ET AL. (2004) stellen die Hypothese auf, dass mit zunehmender EZG-Größe auch der relative Beitrag von Grundwasser aus größeren Tiefen zum Niedrigwasserabfluss zunimmt. Als Gegenhypothese nennen sie die Komposition von Niedrigwasserabfluss aus mehreren TEZGn. Die Untersuchung zielt auf die Bestimmung der Größenordnung von Einzugsgebieten, ab denen der Gerinneabfluss im Niedrigwasserbereich nicht mehr der Summe der Abflüsse aus den Oberliegergebiete darstellt. Die aufgestelle Hypothese, dass mit der EZG-Größe der relative Anteil des Wassers aus tieferen Grundwasserbereichen am Gerinneabfluss Richtung Gebietesauslass zunimmt, ist nach den Ergebnissen der Untersuchung nicht haltbar. Eine ergänzenden Studie dazu wurde von UCHIDA ET AL. (2005) durchgeführt. Sie gehen einen Skalenschritt tiefer als SHAMAN ET AL. (2004) und zeigen in ihrer Schlussbetrachtung auf, dass die hohe Variabilität auf der Hangskala hauptsächlich vom Interface Boden – Gestein beeinflusst wird. Dies gelte aber nur für kleine Teile eines EZGs und sei nicht auf ein größeres EZG übertragbar. Die These des mit der Größe zunehmenden Anteils von tiefem Grundwasser im Abfluss von SHAMAN ET AL. (2004) sei auch mit den Ergebnissen der untersuchten Skala von UCHIDA ET AL. (2005) nicht vertretbar.

Die Quintessenz der betrachteten Studien und deren Ergebnisse geben Anlass zu einer weiteren Untersuchung des Zusammenhangs zwischen statischen Geländeparametern (Topographie und Geologie) und der räumlichen sowie zeitlichen Abflussvariabilität. Diese Feststellüng mündet in die Vorgehensweise dieser Arbeit und soll im nächsten Abschnitt ausgeführt werden.

1.3 Vorgehensweise

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, ist es laut SHAMAN ET AL. (2004) und UCHI-DA ET AL. (2005) vorstellbar, dass in Höhenlagen gebildetes Grundwasser hangparallel perkolieren und dem Gerinne talabwärts zufließen kann. Die Einflussnahme dieses Subvalley-Flows auf die Variabilität des Abflusses ist ein Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit. Auf der anderen Seite muss die Wirksamkeit von Geologie und Topographie in Hinblick auf die Abflussvariabilität in einem EZG näher beleuchtet werden, und dies in Zusammenhang mit dem Subvalley-Flow gebracht werden.

In der Synthese dieser beiden Ziele zeigt sich, dass für die Vorgehensweise innerhalb dieser Arbeit die vorgestellten Ansätze aus der Literatur (vgl. 1.2) nicht kopiert werden können, sondern die erwähnten Publikationen vielmehr als Anregungen für eine eigene Herangehensweise anzusehen sind. Grund dafür ist, dass dort die zwei Ansätze der hier vorliegenden Arbeit nicht parallel untersucht worden sind.

Somit ergibt sich folgende Vorgehensweise für diese Arbeit: Es werden räumlich und zeitlich differenzierte Abflussinformationen entlang eines Gerinnes erhoben. Dies erfolgt aber nicht anhand einer Einteilung etwa in Hydrotope Flächen gleichen Verhaltens, sondern objektiviert, durch konstante Größe der oberirdischen EZG-Fläche für ein Teilgebiet. So kann erkannt werden, inwieweit Abflussvariabilitäten durch die Geländeoberfläche erklärt werden können. Dazu erfolgt zunächst eine Unterteilung der Untersuchungsgebiete (kurz: USG) in TEZGe zu je 2 km², die von den headwaters herab in Richtung Einzugsgebietesauslass durch nummeriert werden. Das Einhalten der einheitlichen Fläche ist aufgrund der Ableitung der oberflächlichen EZG aus dem DGM und den Seitenarmen nicht immer möglich, weswegen – wie später in diesem Kapitel beschrieben – auf die Flächen normiert wird. An den Konvergenzpunkten dieser TEZGe werden jeweils die Abflussmenge und Leitfähigkeit bestimmt. Dabei wird gemäß dem Ansatz dieser Arbeit davon ausgegangen, dass alle Abflussmessungen innerhalb eines Untersuchungsgebietes zeitgleich erfolgen und so eine Momentaufnahme der vorherrschenden Abflusssituation im Bereich des Niedrigwasserabflusses darstellen.

Die Abflussmengen an den oberen Schnittpunkten des TEZGs mit dem Gerinne – dies können auch mehrere sein – werden mit der Abflussmenge am unteren Schnittpunkt zur zufliessenden Abflussmenge eines TEZGs verrechnet. Dieser errechnete Abfluss ist damit ein Maß für die Menge an Wasser, die innerhalb der Gerinneabschnitte eines TEZGs lateral zu- bzw. abfliesst und wird im Folgenden als *lateraler Zufluss* bezeichnet. Die Normierung auf die Fläche innerhalb der TE-ZGe ermöglicht eine Vergleichbarkeit der TEZGe untereinander. Die so gewonnene Größe wird im Rahmen dieser Arbeit als Abflussspende (kurz: AS) eines TEZGs bezeichnet. Die herkömmliche Verwendung des Begriffes der Abflussspende bezieht sich auf ein gesamtes EZG und bezeichnet die Menge des Abflusses am Konvergenzpunkt, welcher pro Flächeneinheit des TEZGs produziert wird. Simultan zu dieser Begrifflichkeit wird hier die Abflussspende für TEZGe mit derselben Einheit $\frac{l}{s \cdot km^2}$ verwendet.

Weiterhin soll aus der gemessenen Leitfähigkeit (kurz: LF) des lateralen Zuflusses eine qualitativ Abschätzung der Kontaktdauer des lateralen Zuflusses mit der Lithosphäre oder auch mit der Pedosphäre ermöglicht werden. Die Leitfähigkeit der lateralen Zuflüsse wird über eine Mischungsrechnung in Form einer Massenbilanz bestimmt. In diesem Zusammenhang soll in der Diskussion der Ergebnisse Rücksicht auf die beteiligte Geologie genommen werden.

Die Messkampagne muss zu Zeiten des Niedrigwasserabflusses durchgeführt werden, um den möglichen Effekt des Subvalley- Flow überhaupt sichtbar werden zu lassen. Abflusswellen im Gerinne während eines Niederschlagsereignisse oder auch hohe Auslaufsraten der Wasserspeicher direkt nach einem Niederschlagsereignis würden diesen Effekt überlagern.

Die Informationen über die Menge des lateralen Zuflusses werden dann im Verlauf dieser Arbeit auf statistische Zusammenhänge mit topographischen und geologischen Faktoren untersucht. Diese sollen unter Zuhilfename eines Graphischen Informationssystems (kurz: GIS) bestimmt werden.

2 Gebiete

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wurden Gebiete in Baden-Württemberg, Deutschland mit jeweils homogener Geologie ausgesucht. Jedoch war es wichtig, dass die Gebiete untereinander verschiedene geologische Formationen aufweisen, weil dadurch eventuell unterschiedliches Verhalten der einzelnen Fazies gezeigt werden könnte. Ein weiteres Kriterium für die Auswahl der Gebiete war die Nähe zu Freiburg, um die logistischen Anforderungen für die Feldarbeit bewältigen zu können.

Die ausgewählten EZGe sind die Buntsandsteingebiete Bleiche und Ettenbach bei Herbolzheim und im Kristallin das EZG der Brugga bei Freiburg. Die Lage ist zusammen mit den wichtigsten geologischen Formationen in Abbildung 2.0.1 dargestellt.

Es wird im Folgenden auf topographische Eigenschaften, Landnutzung, klimatische und hydrologische Begebenheiten, sowie pedologischen und hydrogeologischen Aufbau der einzelnen Gebiete eingegangen. Dabei ist zu beachten, dass eine Beschreibung der Gebiete auf der Datengrundlage erfolgt, die auch für die weitergehende Untersuchung und Auswertung der Hypothese benutzt wurde. Der Grund dafür liegt in dem Umstand, dass die Durchführung der Methodik eine ausführlichere Literaturrecherche an diesem Punkt nicht möglich gemacht hat.

Grundlage für die Gebietsbeschreibung räumlich explizite Daten aus der digitalen Version des Waboa (UMBW, 2007) und der CD-ROM Geowissenschaftliche Übersichtskarten von Badem-Württemberg (LGRB, 1998) und daraus abgeleitete Faktoren gewonnen mit der GIS-Software SAGA, der Statistiksoftware R und MS-Excel[©].

Erläuterungen zur Erhebung der Gebietsparameter, sind im Kapitel 3 aufgeführt. Die Begriffe Untersuchungsgebiet und Einzugsgebiet werden im Folgenden gleichbedeutend verwendet.



Abbildung 2.0.1: Lage der Untersuchungsgebiete Bleiche, Brugga und Ettenbach.

2.1 Einzugsgebiet Bleiche

Das Untersuchungsgebiet der Bleiche liegt östlich der Stadt Herbolzheim in der Emmendingen-Lahr Vorbergzone und umfasst eine Fläche von 50,3 km². Die mittlere Höhe beträgt 346 m ü.NN (178–615 m ü.NN) bei einer durchschnittlichen Hangneigung von 10,5° (0–36,3°). In Abbildung 2.1.1 ist die hypsometrische Kurve der Bleiche dargestellt (Erstellung vgl. DINGMAN (2002)) Deutlich zu erkennen ist,



Abbildung 2.1.1: Hypsometrische Kurve der Bleiche

dass ein Großteil des Einzugsgebietes sich in Höhenlagen zwischen 200 und 450 m ü. NN befindet, und etwa zehn Prozent der Fläche über 450 m ü.NN liegen.

Eine Übersicht zur Landnutzung gibt Tabelle 2.1.1 auf Seite 12. Ackerland und Weinbau kommen zusammen mit Siedlungsflächen und komplexen Parzellenstrukturen (Nebeneinander von unterschiedlichen landwirtschaftlichen Anbauformen/-Kulturen) ausschliesslich im unteren Drittel des Einzugsgebietes vor. Südöstlich des EZG-Schwerpunktes findet sich eine zweite bewirtschaftete und bewohnte Region, die sich über die Hanglagen nach Süden fortsetzt. Die Mischwälder beherrschen das obere Drittel des EZGes, während Laubwälder hauptsächlich im mittleren

Landnutzung	Flächenanteil
Siedlung	$0,\!024$
Ackerland	$0,\!032$
Weinbauflächen	$0,\!095$
Grünland	$0,\!052$
Komplexe Parzellenstrukturen	$0,\!237$
Nadelwälder	$0,\!148$
Mischwälder	$0,\!411$

Tabelle 2.1.1: Landnutzung nach Flächenanteilen im EZG Bleiche. (Quelle: UMBW (2007))

Drittel situiert sind. Die antropogene Beeinflussung der Wasserführung im Gerinne ist vornehmlich auf den Hauptfluter beschränkt. Hier sind unter anderem Straßenbau, Fischzuchtteiche, eine Wassermühle und im Bereich des Ackerlandes Drainagegräben zu nennen. Die maschinelle Bewirtschaftung der Grünflächen entlang des Hauptfluters zieht Bodenverdichtung nach sich. Eine weitere große Baumaßnahme ist die Anlage eines Rückhaltebeckens, welches das komplette obere Einzugsgebiet vor dem Zufluss des großen Seitenarms aus dem Süden (Kirnbach) einschliesst.

2.1.1 Meteorologie und Hydrologie

Der korrigierte mittlere Niederschlag im Sommerhalbjahr (kurz: SHJ) ist für das EZG der Bleiche 630 mm, wobei im westlichen Teil 575 mm vorkommen, in den östlichen, höhergelegenen Teilen werden etwa 650 mm berechnet. Die durchschnittliche Lufttemperatur beträgt in den Sommermonaten 14,8° Celsius. Für die potentielle Verdunstung im SHJ werden 440 mm bei einer aktuellen Jahresverdunstung von 665 mm angegeben . Da im Gebiet der Bleiche keine kontinuierlichen Abflussmessungen vorgenommen werden, kann hier auf gewässerkundliche Hauptzahlen nicht eingegangen werden. Der Formfaktor nach Horton ist ein Maß für die Kreisförmigkeit eines EZGs und beträgt hier 0,36. Die Flussdichte ist mit einem Wert von 1,21 $\frac{km}{km^2}$ für ein Buntsandsteingebiet relativ hoch. Beide Faktoren wurden mit Hilfe von SAGA und des dort implementierten Werkzeuges zur Entfernungsmessung manuell bestimmt.

2.1.2 Pedologie und Hydrogeologie

Die vorkommenden Bodenarten mit ihrer räumlichen Verteilung sind in Abbildung 2.1.2 auf Seite 13 dargestellt. Die im westlichen Teil vorkommenden Pararendzinen entwickelten sich aus kalkhaltigen fluvialen, aber auch aus aölischen Ablagerungen. Der Rest des Einzugsgebietes wird geprägt von Braunerden, den daraus weiter entwickeltem Stadium der Parabraunerde und den bei weiterer Versauerung bzw. Carbonatauswaschung daraus entstandenen Podsolen. Das im EZG durchmischte räumliche Auftreten dieser letzten drei Bodentypen spricht für unterschiedliche Feuchtebedingungen als auch Variationen im anstehenden Gestein (SCHACHTSCHA-BEL ET AL., 2002).

Das anstehende Gestein im EZG Bleiche ist in Abbildung 2.1.3 verdeutlicht. Die darin enthaltenen schwarzen Linien bezeichnen die Lage von drei geologischen Schnitten. Diese sind in Abbildung 2.1.4 dargestellt. Die Hydrogeologie des Bleiche-EZGes ist geprägt von Buntsandsteinvorkommen aus dem Untertrias, auf denen im Süden des EZGs Muschelkalk aus dem Mitteltrias überlagert ist. Im mittleren Einzugsgebiet ist die Gerinneeintiefung so weit fortgeschritten, dass die unter dem Sandstein liegenden, geringer durchlässigen, metapmorphen Gneise aus dem Paläozoikum zum Vorschein treten. Fluviale und äolische Ablagerungen aus dem Tertiär bildeten im Westen ausgeprägte Lößablagerungen und im Bereich des Unterlaufs der Bleiche quartäre Kiesfüllungen. Abbildung 2.1.4 zeigt geologische Schnittprofi-



Abbildung 2.1.2: Bodenarten im EZG Bleiche



Abbildung 2.1.3: Hydrogeologie im EZG Bleiche

le im Untersuchungsgebiet Bleiche. Diese geologischen Informationen können weitestgehend auf das Untersuchungsgebiet Ettenbach übertragen werden. Dies gilt insbesondere für den gerinneparallelen Schnitt B1-B3.

Eine Grundcharakteristik, die von diesen Schnitten abgeleitet werden kann, ist eine homogene, relativ horizontale Lagerung der Gesteinsformationen. Die von citetVoss unterschiedenen Typen von Buntsandstein wurden im Sinne einer hydrogeologischen Interpretation zusammengefasst. Zu erkennen sind im Osten der Emmendingen-Lahrer Vorbergzone mehrere Staffelbrüche mit einer Störungslinie, die von Süd nach Nord verläuft (vgl. Abb. 2.1.4, Schnitt B). Im Bereich des Unterlaufs der Bleiche ist aus Schnitt A, als auch aus der Kartendarstellung die erosive Wirkung der Bleiche zu erkennen, die sich bis auf den kristallinen Gneis eingeschnitten hat.




2.2 Einzugsgebiet Brugga

Das Untersuchungsgebiet der Brugga umfasst eine Fläche von 59,6 km² und liegt östlich von Freiburg im Bereich des kristallinen Grundgebirges des Südschwarzwaldes. Die mittlere Höhe beträgt 843 m ü.NN bei einem Intervall von 331-1474 m ü.NN. Die Neigung erreicht im Mittel einen Wert von 19° und bewegt sich von ebenen Flächen mit 0° bis hin zu 47° steilen Hängen im oberen EZG.

In Abbildung 2.2.1 ist die hypsometrische Kurve der Brugga dargestellt. Es fällt



Abbildung 2.2.1: Hypsometrische Kurve der Brugga

auf, dass alle Höhenstufen relativ gleich verteilt sind, da sich der Flächenanteil linear zu den Höhenstufen verhält. Nur die steilen Hänge in den obersten Bereichen des EZG zeigen sich in einem Anstieg der hypsometrischen Kurve auf den letzten fünf Prozent der Fläche.

Die Landnutzung teilt sich im Gebiet der Brugga nach Tabelle 2.2.1 auf. Die nur sehr geringen Anteile an Siedlungsfläche und Ackerland beschränken sich in ihrer räumlichen Ausprägung auf die Hauptfluter. Grund dafür sind die steilen Hänge im EZG, die eine Bebauung und Bewirtschaftung erschweren. Offene Bewirtschafts-

Landnutzung	Flächenanteil	
Siedlung	0,016	
Ackerland	0,014	
Grünland	0,246	
Komplexe Parzellenstrukturen	$0,\!001$	
Nadelwälder	$0,\!470$	
Mischwälder	0,253	

Tabelle 2.2.1: Landnutzung nach Flächenanteilen im EZG Brugga. (Quelle: UMBW (2007))

form ist Grünland, welches in den oberen Teilen des EZGs zumeist mit Viehhaltung einhergeht. Der größte Teil des EZGes ist mit Wald bewachsen, wobei Nadel- und Mischwälder wechselnd ineinander übergehen und so nicht differenzierbar sind.

2.2.1 Meteorologie und Hydrologie

Der korrigierte mittlere Niederschlag im SHJ liegt bei 830 mm, die Spannweite reicht dabei von 650 bis zu 972 mm. Hier ist allerdings anzumerken, dass auf der Wetterstation Feldberg mittlere Niederschläge von mehr als 1700 mm gemessen werden und in diesem steilen Gebiet das zu grobe Raster mit 1 km Seitenlänge der Niederschlagsdaten aus dem Waboa große Fehler produziert (Siehe auch 3.2.1). Es ist ein starker Höhengradient vorherrschend, der in der Literatur mit 66,5 mm pro 100 m Höhendifferenz angegeben wird (UHLENBROOK, 1991). Die durchschnittliche Lufttemperatur für das SHJ beträgt 11,2° Celsius und für die potentielle Verdunstung eines Jahres beträgt 596 mm (UMBW, 2007). Der MQ der Brugga am Pegel Oberried aus den Jahren 1934-1979 liegt bei 1560 $\frac{l}{s}$. Der Formfaktor nach Horton beträgt für das EZG der Brugga 0,33 bei einer Flussdichte von 1,06 $\frac{km}{km^2}$. Damit ist die Brugga als gut entwässerndes System anzusehen. Auch hier ist wiederrum anzufügen, dass die Faktoren manuell aus SAGA extrahiert wurden und nur als Richtwerte dienen können.

2.2.2 Pedologie und Hydrogeologie

Der überwiegende Teil des Brugga EZGs ist von Braunerden bedeckt, die im unteren Teil des EZGes Tendenzen zur Podsolierung aufweisen. Entlang des Unterlaufs der Brugga treten Auenböden auf, die sich auf rezenten Kiesfüllungen entwickelt haben. Da die Verteilung der Bodenart relativ homogen ist, wird auf eine grafische Darstellung an dieser Stelle verzichtet. Es sei noch angefügt, dass bei Waldwuchs auf Braunerden von sehr guten Infiltrationseigenschaften ausgegangen werden kann.

In Abbildung 2.2.2 sind die geologischen Verhältnisse anhand der räumlichen Verteilung von hydrogeologischen Einheiten innerhalb des EZGs der Brugga verdeutlicht. Hier ist erkennbar, dass ein Großteil des EZGs aus Schwarzwald-typischen Gneisen besteht, die in den oberen Bereichen teilweise mit Möränensedimenten verfüllt sind. Im Unterlauf bilden rezente Talfüllungen die Grundlage für die oben bereits angesprochenen Auenböden.



Abbildung 2.2.2: Hydrogeologie im EZG Brugga

2.3 Einzugsgebiet Ettenbach

Das EZG des Ettenbach schliesst nördlich der Bleiche an. Damit sind mehrere Übereinkünfte mit dem EZG der Bleiche möglich, v.a. hinsichtlich des Klimas und der geologischen Beschaffenheit. Das Untersuchungsgebiet umfasst eine Fläche von 23,4 km² und ist damit nach UHLENBROOK (1991) ebenso ein mesoskaliges EZG. Die mittlere Neigung beträgt 13,8° (0-37°) bei einer mittleren Höhe von 362m ü.NN. Die Höhenstufen bewegen sich im Intervall von 184-535 m ü. NN und sind nach der hypsometrischen Kurve (Abb. 2.3.1 auf S. 19) relativ homogen verteilt.



Abbildung 2.3.1: Hypsometrische Kurve des Ettenbachs

Einen Überblick über die Anteile der verschiedenen Landnutzungen innerhalb EZG lässt sich aus Tabelle 2.3.1 gewinnen. Die drei Prozent Siedlungsfläche sind im unteren Drittel des EZGs gelegen, ebenso sind Ackerland und Weinbauflächen nahe des Gebietsauslasses vorzufinden. Die Bewirtschaftung durch Grünland entlang des Hauptfluters besteht hauptsächlich aus Wiesen und wenig Kleinviehhaltung. Vorherrschende Landbedeckung sind Mischwälder, die den kompletten oberen Teil des EZGs ausmachen.Antropogene Beeinflussung beschränkt sich im Wesentlichen auf Versiegelung und Gerinnebegradigungen im Umkreis der Siedlungsflächen und

Landnutzung	Flächenanteil	
Siedlung	$0,\!031$	
Ackerland	$0,\!003$	
Weinbauflächen	$0,\!024$	
Grünland	$0,\!083$	
Komplexe Parzellenstrukturen	$0,\!026$	
Nadelwälder	$0,\!008$	
Mischwälder	$0,\!825$	

Tabelle 2.3.1: Landnutzung nach Flächenanteilen im EZG Ettenbach. (Quelle: UMBW (2007))

Verdichtung von Böden durch maschinelle Bewirtschaftung der Grünflächen und Wälder.

2.3.1 Meteorologie und Hydrologie

Die mittleren korrigierten Niederschläge für das SHJ betragen 637 mm gegenüber einer potentiellen Verdunstung von 443 mm für den gleichen Zeitraum. Die mittlere Lufttemperatur für den Sommer liegt bei 14,6° Celsius (UMBW, 2007). Im Gebiet des Ettenbachs liegen ebenfalls keine kontinuierlichen Abflussmessungen vor, also bleiben auch keine gewässerkundlichen Hauptzahlen zu nennen. Aus SAGA extrahiert ergaben sich der Formfaktor nach Horton mit einem Wert von 0,48 und einer Flussdichte von 0,99 $\frac{km}{km^2}$. Damit ist das Untersuchungsgebiet des Ettenbach von gedrungener Form mit einer relativ guten Entwässerung.

2.3.2 Pedologie und Hydrogeologie

Die vorkommenden Bodentypen mit ihrer räumlichen Verteilung sind in Abbildung 2.3.2 auf Seite 21 dargestellt. Zusammenfassend ist dafür zu sagen, dass auch hier die Buntsandstein typische Braunerde mit ihren verschiedenen Entwicklungsstadien vorherrschend ist. In den höher gelegenen Bereichen des Einzugsgebietes ist Podsolierung aufgrund höherer Niederschläge vorhanden, während in den Niederungen die für trockenere und wärmere Gebiete typische Genese zur Parabraunerde zugegen ist. Entlang des Unterlaufes sind in weiteren Bereichen auch Pseudogleye anzutreffen, die als wasserstauende Böden ausgewiesen werden können. In der unmittelbaren Nähe des Gerinnes sind auch die typischen Auenböden anzutreffen.



Abbildung 2.3.2: Bodentypen im EZG Ettenbach



Abbildung 2.3.3: Hydrogeologie im EZG Ettenbach

Die Darstellung der Hydrogeologie (Abb. 2.3.3 auf S. 21) zeigt die Verbreitung von Buntsandstein über das gesamte EZG, welches hinsichtlich seiner Geologie sehr homogen erscheint. Zu erkennen ist, vergleichbar mit der Bleiche, ein Vorkommen von Lößablagerungen am Auslaß des Untersuchungsgebietes. Ebenso vorhanden sind rezente Talfüllungen im Unterlauf und marginale Vorkommen von Muschelkalk in den höheren Lagen des westlichen EZGs.

3 GIS–Methodik

Ideen und Anregungen für Umsetzung und Berechnung einzelner Parameter konnten aus der Literatur gewonnen werden (u.a. CONRAD (1998), DENG (2007), KLINGS-EISEN (2004), MOORE ET AL. (1991), WILSON & GALLANT (2000)). Die Ausführung der praktischen Arbeiten wurde mit dem GIS-Programm SAGA, der Statistiksoftware R und der von BRENNING (2008) veröffentlichten Schnittstelle RSAGA durchgeführt.

Die Rohdaten für die Arbeiten im GIS wurde aus den folgenden Produkten zusammen gestellt:

- CD-ROM "Geowissenschaftliche Übersichtkarten von Baden-Württemberg 1:350000", herausgegeben vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB, 1998).
- "Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg" (kurz: WaBoA), herausgegeben von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (UMBW, 2007)

3.1 Meteorologische Faktoren

3.1.1 Mittlere Niederschlagshöhen

Der Niederschlag ist Eingangsgröße im Wasserkreislauf und bedingt durch seine Dargebot auch die potentielle Abflussmenge aus einem EZG. Die Daten zur mittleren Niederschlaghöhe wurden aus dem WaBoA (UMBW, 2007), Kapitel "2.2.2 Mittlere Niederschlagshöhen" entnommen. Dies sind vom Deutschen Wetterdienst (kurz: DWD) bereitgestellte Daten, die mit dem BONIE–Verfahren gewonnen wurden. BONIE ist ein Interpolationsverfahren, das sich einerseits durch eine statistische Übertragung der Messdaten von unregelmäßig verteilten Niederschlagsstationen auf ein räumlich regelmäßiges Raster auszeichnet. Desweiteren integriert es räumliche Verteilungsmuster von Niederschlägen und beinhaltet so auch Informationen z.B. über Lee- und Luveffekte (UMBW, 2007).

3.1.2 Mittlere korrigierte Niederschlagshöhen

Die mittleren korrigierten Niederschlagshöhen sind im Gegensatz zu den mittleren Niederschlagshöhen um den systematischen Messfehler der Niederschlagsmessgeräte korrigiert. Die Geräte messen stets eine kleinere Menge an Niederschlag, als tatsächlich gefallen ist. Verursacht wird dieser Messfehler unter anderem durch Windfehler, Benetzungsverluste oder Verdunstungsverluste (UMBW, 2007).

Die mittleren korrigierten Niederschlagshöhen wurden aus dem WaBoA, Kapitel "2.2 mittlere korrigierte Niederschlagshöhen" entnommen (UMBW, 2007). Die Daten liegen in Shape-Files vor, sind allerdings gerastert mit einer Kantenlänge von 1 km. Die Werte für den Niederschlag selbst sind in Intervallen vorhanden, von denen zur weiteren Berechnung die Klassenmitten mit einer Flächengewichtung versehen werden, um so für jedes TEZG einen numerischen Wert zu erhalten.

3.1.3 Potentielle Verdunstung

Die potentielle Verdunstung ist ein Parameter zur Darstellung des Verdunstungsanspruches der Atmosphäre. Es ist eine Ausgangsgröße in der hydrologischen Wasserbilanz und dient als Maß für die Menge an Wasser, die aus einem Gebiet von der Erdoberfläche, bzw. unterhalb dieser durch Verdunstung in die Atmosphäre überführt wird. Der Begriff *potentielle* Verdunstung beinhaltet die Bedingung von unbegrenzt verfügbarem Wasser (UMBW, 2007). Dies ist in der Realität nur bei Oberflächengewässern oder komplett gesättigten Böden der Fall. Die Daten werden aus dem WaBoA, Kapitel "2.11 Mittlere potentielle Verdunstung" entnommen. Berechnet wurden die Daten mit Hilfe des exakten physikalischen Ansatzes der Gras-Referenzverdunstung auf Basis der Verdunstungsgleichung von Penman-Monteith. Dabei werden die Parameter der Penman-Monteith-Gleichung an einen ganzjährig grünen Grasbestand der Höhe 12cm angepasst und berechnet (UMBW, 2007).

3.1.4 Mittlere jährliche tatsächliche Verdunstung

Im Gegensatz zur potentiellen Verdunstung ist die tatsächliche oder aktuelle Verdunstung angepasst an die jeweiligen Feuchtebedingungen. Die für diesen Parameter verwendete Karte wurde aus dem WaBoA, Kapitel "2.10 Mittlere jährliche tatsächliche Verdunstung" entnommen. Die Daten, die dieser Kartendarstellung zugrunde liegen, wurden unter Zuhilfename des Modells GWN_BW errechnet (vgl. UMBW (2007). Dieses ist ein eindimensionales, konzeptionelles Modell mit einer Rasterweite von 500 m x 500 m und beinhaltet unter anderem folgende Ansätze: räumliche Interpolation der meteorologischen Eingangsdaten, Änderungen des Bodenwasserhaushaltes, Art der Landnutzung, variable Bestandesentwicklung und Interzeptionsverdunstung (UMBW, 2007).

3.1.5 Einstrahlung

Die Einstrahlung bestimmt das Energieangebot auf eine betrachteten Fläche und wird hier angegeben in $\frac{W}{m^2}$. Die Einstrahlung kann somit als ein weiteres Maß für die potentielle Verdunstung angesehen werden. Die Daten werden gewonnen unter Zuhilfenahme des SAGA Moduls *Insolation*. Dieses Modul basiert auf SADO (System for the Analysis of Discrete Surfaces), welches laut Modulbeschreibung in SAGA von Boehner & Trachinow entwickelt worden ist, eine Literaturrecherche brachte jedoch keine Referenzen. Verwendete Eingangsparameter des Moduls, mit speziell in dieser Arbeit verwendeten Werten, sind im folgenden aufgelistet:

- water.vapour.pressure = 10 (konstanter Wasserdampfdruck in mbar)
- type = day (Angabe, dass kummuliert über einen Tag gerechnet wird)
- latitude = 48 (Angabe des Breitengrades)
- radius = 6366737.96 (Erdradius)

Die hier dargestellte Berechnung der Eintrahlung ist nur sehr qualitativ, und für statistische Zusammenhänge nur bedingt zu gebrauchen. Jedoch können Größenordnungen hierüber abgeschätzt werden

3.1.6 Wasserbilanz

Die klimatische Wasserbilanz trifft eine Aussage über die Wassermenge, die aus einem betrachteten System abfliessen kann. Dieser Abfluss kann sowohl unterirdisch als auch oberflächlich geschehen.

Datengrundlage stellt der WaBoA, in dem die mittlere klimatische Wasserbilanz für das hydrologische Sommerhalbjahr im Kapitel "2.12. Mittlere klimatische Wasserbilanz" dargestellt ist. Berechnet wurde die Bilanz anhand der korrigierten mittleren Niederschlagsmengen und der potentiellen Verdunstung (UMBW, 2007).

3.1.7 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur hat Einfluss auf meterologische Parameter wie etwa der Verdunstung. Die Daten dafür werden entnommen aus dem Kapitel "2.15. Mittlere Lufttemperaturen", Karte "Mittlere Luffttemperatur Sommerhalbjahr" (UMBW, 2007). Das Raster ist allerdings mit einer Weite von 1 km² sehr grob.

3.2 Topographische Faktoren

Laut MOORE ET AL. (1991) ist eine Aufteilung in primäre und sekundäre topograpische Attribute sinnvoll. Dabei werden primäre Attribute als diejenigen bezeichnet, die direkt aus einem Digitalem Gelände Modell (kurz: DGM) abgeleitet werden können, so z.B. Neigung, Exposition, Höhe, Hangwölbung und Weitere.

Sekundäre topograpische Attribute sind hingegen aus primären Attributen zusammengesetzt und können so als Indizes für räumliche Variabilität oder spezifische Prozesse innerhalb von Landschaftseinheiten genutzt werden (MOORE ET AL., 1991).

3.2.1 Neigung

Die Neigung beschreibt die Änderung der Höhe in der Richtung des steilsten Gefälles und ist laut MOORE ET AL. (1991) eine der meist genutzten Parameter bei der Analyse von topographischen Gegebenheiten. Sie lässt Aussagen über Geschwindigkeit von Oberflächen- bzw. epidermischen Abfluss und eine Einschätzung zur Abflussreaktion von Hängen zu (MOORE ET AL., 1991).

Die Neigung wird mit Hilfe der Methode nach ZEVENBERGEN & THORNE (1987) berechnet, welche ein Polynom zweiten Grades an die Geländeoberfläche anpasst und die erste Ableitung daraus berechnet. Die Information der Geländeoberfläche wird dabei von einer 3x3 Submatrix in einem dreidimensionalen Koordinatensystem bereitgestellt (ZEVENBERGEN & THORNE, 1987). Diese Methode entspricht einer Verallgemeinerung der Methode von Evans (1980) (in: FLORINSKY (1998)) und liefert laut ZEVENBERGEN & THORNE (1987) eine flexiblere und genauere Fassung. Nach FLORINSKY (1998) sei die Methode von Evans (1980) genauer, wird in dieser Arbeit aber mangels Integration in der SAGA-Umgebung nicht verwendet.

3.2.2 Hangwölbung

Die Hangwölbungen werden mit Hilfe der zweiten Ableitung aus den Parametern Exposition und Neigung berechnet, dabei wird unterschieden in horizontale und vertikale Wölbung. Die horizontale Wölbung wird aus der Exposition abgeleitet und ist ein Indiz für die Wasserbewegung in einem Hang. Bei konkaver horizontaler Wölbung, ausgedrückt durch negative Werte, ist eine konvergierende Fliessbewegung des Oberflächen- und Bodenwassers die Folge, bei konvexer Wölbung (positive Werte) eine divergierende Fliessbewegung am betrachteten Hangabschnitt (MOORE ET AL., 1991).

MITASOVA & HOFIERKA (1993) geben den Hinweis, dass die herkömmliche Berechnung der horizontalen Wölbung sehr große Werte für kleine Neigungen berechnet. Sie schlagen daher vor, die Werte der horizontalen Wölbung mit dem Sinus des an dieser Stelle vorherrschenden Neigungswinkels zu mulitplizieren und erhalten daraus die so genannte tangentiale Wölbung. Deren räumliche Verteilung stimmt mit der Ausbreitung der horizontalen Wölbung überein (MITASOVA & HOFIERKA, 1993). Diese Anpassung scheint angesichts der geringen Fliessgeschwindigkeiten in flachen Geländeabschnitten notwendig, da hier die Wirkung des Gravitationspotentials relativ gesehen abnimmt. Die vertikale Wölbung wird aus der Neigung berechnet und gilt als Index für die Änderung des Gravitationspotentials und somit auch als Beschleunigungsfaktor von Fliessbewegungen in oder auf dem Hang (MOORE ET AL., 1991).

3.2.3 Topographischer Index

Der topographische Index (kurz: TI) ist ein Maß für die Feuchtebedingungen eines Standortes, je höher der Wert, desto größer die Neigung einer Flächeneinheit Bodenwasser zu akkumulieren. Dabei werden die zu diesem Standort beitragende Entwässerungsfläche und Neigung zueinander in Verhältnis gesetzt. Dies geschieht hier über die Formel:

$$TI = ln\left(\frac{a}{tan\beta}\right),\tag{3.2.1}$$

wobei a die Einzugsgebietesfläche oberhalb der betrachteten Zelle, und β der Neigungswinkel der Zelle ist. Es erfolgt eine Korrektur aller Neigungswinkel um 2° nach oben, um für Neigungen nahe 0° keine unrealistischen Werte aus dem Tangens heraus zu erhalten. Da dies aber alle Zellen gleich betrifft wird nur das Niveau und nicht die Tendenz verschoben.

3.2.4 Landnutzung

Aus dem WaBoA (UMBW, 2007) werden Informationen zur Landnutzung extrahiert. Die Landnutzung hat durch verschiedene Faktoren Einfluss auf den Wasserhaushalt einer Landschaftseinheit. Durchwurzelungstiefe, Bestandeshöhe, *Leave Area Index* und Weitere haben großen Einfluss auf z.B. Verdunstungsmengen oder Infiltrationsraten und damit auf den Wasserhaushalt. Im Speziellen teilt sich die Landnutzung hier auf in:

- $\bullet~{\rm Acker}$
- Grünland
- Siedlung
- Versiegelung
- Wald

Die aus dem Waboa entnommenen Daten sind als Shape-Files vorliegend und werden für die Auswertung als Anteile an den Flächen der TEZGe berechnet. Die Versiegelung ist im vorliegenden Shape-File angegeben in prozentualer Versiegelung für unterschiedlichen Gebiete innerhalb eines TEZGs. Die Informationen werden anhand ihrer Flächenanteile ausgedrückt und hierdurch für jedes TEZG ein gewichtetes Mittel gewonnen, welches den Versiegelungsgrad in Prozent angibt.

3.3 Pedologische Faktoren

3.3.1 Bodenart

Die Bodenart hat wesentlichen Einfluss auf zwei Faktoren im Prozess der Niederschlag-Abflussbildung. Hier ist zum einen die Infiltrationskapazität von Niederschlagswasser, hauptsächlich gesteuert über den Parameter der gesättigten Wasserleitfähigkeit, zu nennen. Zum Anderen stellt der Boden ein wichtiges Steuerelement in der Prozesskette Infiltration, Wasserspeicherung, Perkolation und somit der Trennung von schnellen und verzögerten Abflusskomponenten dar. Über sein Wasserspeichervermögen funktioniert der Boden als Ausgleichskörper im Wasserkreislauf (SCHACHTSCHABEL ET AL., 2002).

3.3.2 Speicherfähigkeit des Bodens

Abflussverminderung und -verzögerung sind von elementarer Bedeutung für die zeitliche und räumliche Variabilität der Wasserführung in oberirdischen Fliessgewässern. Der Grad der Perkolation ins Grundwasser, Retentionseigenschaften und die Speicherfähigkeit des Bodens steuern die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser und damit die potentielle Menge an Transpiration (LGRB, 1998). Wasser, welches in tiefere Schichten gelangt oder auch durch Evapotranspiration in den Gaszustand überführt wird, ist aus dem betrachteten Teilsystem entnommen und wird nicht räumlich unmittelbar zur Abflussbildung beitragen.

Es wird die Karte "Böden als Ausgleichskörper im Wasserkreislauf" verwendet. Die Bewertung der Speicherfähigkeit wurde in den Rohdaten unter Zuhilfenahme von Reliefenergie, Wasserleitfähigkeit und nutzbarer Feldkapazität durchgeführt (LGRB, 1998).

Die vom LGRB (1998) verwendeten 16 Bewertungsklassen werden nummeriert, wobei die Bewertungsklassen 12–16 aufgrund ihrer Eigenschaften der hohen Wechselhaftigkeit hinsichtlich der Speicherfähigkeit aussen vor gelassen werden. Den Bewertungsklassen 0-11 werden also numerische Werte von 1–12 zugeordnet. Die Höhe des Zahlenwertes ist damit repräsentativ für die Speicherfähigkeit des Bodens, wobei hohe Werte für eine hohe Wasserspeicherfähigkeit, niedrige Werte für eine geringe Wasserspeicherfähigkeit stehen.

Die Flächen der Unterklassen werden mit den Flächen der TEZGe in Verhältnis gesetzt und so ein gewichtetes Mittel für jedes TEZG erstellt, welches als Index-Maß für die Speicherfähigkeit des TEZG gelten kann.

3.4 Geologie: K_f -Werte

Der K_f -Wert ist ein Maß für die hydraulische Leitfähigkeit der obersten grundwasserführenden Schichten, die auf Grundlage der geologischen Übersichtskarte 1:350000 des LGRB (1998) aus geologischen zu hydrogeologischen Einheiten zusamengefasst wurden. Anzumerken ist hier die Gliederung der Geologie nach stratigraphischen Gesichtspunkten und in Folge dessen eine teils nicht adäquate Klassifizierung der Hydrogeologie. Besondere Probleme entstehen hierbei durch eine starke Differenzierung der Petrographie und inhomogene Verteilung von wasserwirksamen Fliesswegen v.a. zwischen Verwitterungszone und dem anstehenden Gestein (LGRB, 1998). Die Grundlage der räumlichen Verteilung innerhalb der Einzugsgebiete liefert ein Shape-File vom LGRB (1998) mit einer nach GRIMMELMANN ET AL. (1997) gegebenen Klassifizierung der Durchlässigkeit in den Metadaten. Die hydrogeologische Kartieranleitung der GRIMMELMANN ET AL. (1997) wird benutzt, um den jeweiligen Unterklassen hydrogeologischer Einheiten die K_f -Werte zur quantitativen Auswertung zuzuteilen. Bei den vom LGRB (1998) definierten Sonderklassen, bei denen zwei Schichten unterschiedlicher Durchlässigkeit übereinander liegen, wird der K_f -Wert der aufliegenden Schicht übernommen. Dies begründet sich darin, dass bei Niederschlag zuerst die überliegende Schicht betroffen ist.

3.5 Morphologie: Größe der Talsohle

Talsohlen sind wichtige Steuerglieder bei der Abflusskonzentration im Gerinne. Sie können als Pufferzone verstanden werden, in denen die Abflussprozesse der einzelnen Hänge bzw. Hangsegmente konvergieren und interagieren. Durch die Ausdehnung und Beschaffenheit der Talsohle wird die Transmissivität geregelt und damit auch die Filtrationsverhältnisse für Boden- bzw. Grundwasser und dem oberflächlichen Gerinne. Eine Unterscheidung von Talsohle und Hangfläche in Zusammenhang mit räumlich differenzierter Abflussbildung scheint daher unbedingt notwendig.

GALLANT & DOWLING (2003) definieren den dimensionslosen Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (kurz: MRVBF), dessen Anwendung als Beurteilungskriterium für Depositionstendenz von Sedimenten gedacht ist. Die Autoren verweisen auf die Anwendbarkeit zur Beschreibung von Grundwasserfluss und hier v.a. zur Beschreibung von Verengung und Aufweitung von Tälern. Der Index klassifiziert die erkannten Talsohlen in verschiedene Grade von Flachheit und Ausdehnung, je größer der Zahlenwert des Index, desto flacher und ausgedehnter ist eine Talsohle. Eine steile und kleine Talsohle ist im Werteintervall 0,5 bis 1,5 definiert, ab 1,5 wird die Ausdehnung dann weiter und flacher.

3.6 Zusammenfassung aller Faktoren

In Tabelle 3.6.1 sind alle in GIS erarbeiteten Faktoren zusammengestellt. Es erfolgt eine Aufteilung in Kern- und Nebenfaktoren. Fett gedruckt sind die Kernfaktoren. Diese werden als wesentlicher erachtet, da sie zum Großteil die Nebenfaktoren beinhalten, bzw. mit diesen korrelieren. Die numerischen Werte für alle EZGe und Faktoren sind den Tabellen im Anhang zu entnehmen.

Faktor	Art	Bezugszeitraum	Einheit	Quelle
Abflussspende	Messwert	Messungen 2008	$\left[\frac{l}{s*km^2}\right]$	FELD
${ m Leitf\"ahigkeiten}$	Messwert, (Hintergrund-LF)	Messungen 2008	$\left[\frac{\mu S}{cm}\right]$	FELD
Acker	Flächenanteile (Shapefile)	Stand 2007	[-]	WaBoA
Grünland	Flächenanteile (Shapefile)	Stand 2007	[-]	WaBoA
Wald	Flächenanteile (Shapefile)	Stand 2007	[-]	WaBoA
Siedlung	Flächenanteile (Shapefile)	Stand 2007	[-]	WaBoA
Landnutzung	Flächenanteile (Shapefile)	Stand 2007	[-]	WaBoA
T_{luft}	Klassenmittelwerte (Shapefile)	$_{ m SHJ}$	$[^{\circ}C]$	WaBoA
NS	fgew. Klassenmittelwerte (Shape)	\mathbf{SHJ}	[mm]	WaBoA
korr. NS	fgew. Klassenmittelwerte (Shape)	\mathbf{SHJ}	[mm]	WaBoA
pot. ETP	fgew. Klassenmittelwerte (Shape)	\mathbf{SHJ}	[mm]	WaBoA
akt. ETP	fgew. Klassenmittelwerte (Shape)	Jahr	$\left[\frac{mm}{a}\right]$	WaBoA
\mathbf{W} bilanz	fgew. Klassenmittelwerte (Shape)	HSHJ	[mm]	WaBoA
Versiegelt	fgew. Mittelwert (Shape)	Stand 2007	[-]	WaBoA
Höhe	Höhenangabe (Grid)	statisch	[m ü.NN]	SAGA
Strahlung	Mengenangabe (Grid)	statisch	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	SAGA
MRVBF	Indexwert (Grid)	statisch	[-]	SAGA
Neigung	Gradangabe (Grid)	statisch	[rad]	SAGA
Hangwölbung	Konkav-Konvex (Grid)	statisch	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$	$\mathbf{S}\mathbf{A}\mathbf{G}\mathbf{A}$
HW-horizontal	Konkav-Konvex (Grid)	statisch	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$	SAGA
HW-vertikal	Konkav-Konvex (Grid)	statisch	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$	SAGA
${f HW}$ -tangential	Konkav-Konvex (Grid)	statisch	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$	SAGA
торо	Indexmaß (Grid)	statisch	[-]	SAGA
Geologie	Name und Verteilung Fazies (Shape)	statisch	[-]	LGRB
Speicher	Indexmaß (Shape)	Stand 1998	[-]	LGRB
Bodenart	Name und Verteilung Boden (Shape)	Stand 1998	[-]	LGRB
Hydrogeologie	Name ubd Verteilung Fazies (Shape)	statisch	[-]	LGRB
\mathbf{K}_{f}	obere Hydrogeologie (Shape)	statisch	$\left[\frac{m}{s}\right]$	LGRB

Tabelle 3.6.1: Übersicht aller in GIS erarbeiteten Faktoren. Die Abkürzung fgew.bedeutet flächengewichtet.

3.7 Fehlerbetrachtung

FLORINSKY (1998) formuliert Verfahren zur Berechnung von Standardabweichungen der primären topographischen Attribute und hielt folgende Aussagen fest:

- Die Standardabweichungen von Neigung, Exposition und Hangwölbung sind jeweils direkt proportional zu den Standardabweichungen der Höhen aus dem DGM.
- Die Standardabweichungen nehmen mit gröberer Auflösung des Höhenmodells zu, die Hangwölbung reagiert dabei sensibler als die Neigung oder Exposition.
- Im Flachland oder Regionen mit geringen Neigungen nehmen die Werte der Standardabweichungen erheblich zu.

In dieser Arbeit wurde ein DGM aus dem WaBoA UMBW (2007) mit einer Rasterweite von 50 m verwendet. Die Größe der daraus folgenden Fehler steht jedoch in Relation zur bearbeiteten Skalenebene. Die EZGe in dieser Arbeit sind in der Mesoskala anzusiedeln (vgl. UHLENBROOK (1991)) und es wird angenommen, dass innerhalb dieser Größenordnung der relative Fehler durch ein grobes Raster von 50 m zu vernachlässigen ist. Daher wird von einer Fehlerbetrachtung der primären Geländeattribute im Rahmen dieser Arbeit abgesehen. Auch für die übrigen Attribute, die aus den Daten vom LGRB (1998) und UMBW (2007) erarbeitet wurden, wird angenommen, dass diese in ausreichender Genauigkeit vorliegen und von einer Fehlerbetrachtung somit abgesehen werden kann.

4 Methodik

4.1 Abflussmessung

Die Abflussmessungen im Feld werden nach der Salzverdünnungsmethode mit Momentaneinspeisung durchgeführt (DINGMAN, 2002). Dabei wurde ein Großteil der Messungen mit dem Fahrrad erledigt. Zur Aufzeichnung und Auswertung der Tracerdurchggangskurven (kurz: TDK) wird das Gerät MST-2 der Firma *Sommer* verwendet. Das System ist in diesem Fall zusammengestellt aus der Registriereinheit MRS-4, zwei Messonden der Variante STANDARD und einem Eichset bestehend aus Messzylinder, Eichgefäß, Eichlösung und Laborpipette. Zur Auswertung der Tracerdurchgänge wird die Software PCTrace (Version 1.0.1.9i) verwendet.

4.1.1 Feldarbeit und Planung

Die Durchführung der Abflussmessungen erfolgt nach den Richtlinien einschlägiger Literatur (FÜR UMWELTSCHUTZ, 2002; WEILER ET AL., 2005), gestützt durch persönliche Korrespondenz mit Pascal Szeftel von der University of Brititsh Columbia und Erfahrung in der Durchführung von Abflussmessungen mit der Verdünnungsmethode aus einem Praktikum beim Bundesamt für Umwelt, Schweiz.

Die Verwendung der benötigten Tracermenge wird angepasst an die naturräumlichen Begebenheiten und logistischen Machbarkeit im Rahmen der Messungen. Es wird angestrebt, die von der FÜR UMWELTSCHUTZ (2002) empfohlene Erhöhung der Hintergrundleitfähigkeit um mindestens 20 % zu erreichen. Dabei kommen Salzmengen zum Einsatz, die in der Größenordung 2 $\frac{g}{l}$ Abfluss liegen. Das Salz wird unter gleichbleibenden Luftfeuchtebedingungen im Labor gelagert und für die Feldarbeit in Mengen zu 25, 50, 100, 250 und 500 g portioniert.

Die Wahl der Eingabe- und Messstellen erfolgt anhand naturräumlicher Eigenheiten, wobei durch Unterstützung mit einem GPS-Gerät die zuvor im GIS festgelegten Messpunkte möglichst genau eingehalten werden. Auf der Messstrecke sollen wechselhafte Fliessbedingungen im Verlauf der Durchmischungsstrecke vorkommen. Dazu gehören Mäander, wechselnde Fliessgeschwindigkeiten und Querschnitte (FÜR UMWELTSCHUTZ, 2002), als auch Durchmischung fördernde Gegebenheiten wie größere Steine, Äste und Wasserfälle. Diese Hilfsmittel werden auch ggf. manuell integriert.

Grundsätzlich vermieden werden oberflächliche Zu- und Abflüsse im Bereich der Durchmischungsstrecke. Im Falle eines nicht vermeidbaren Zuflusses wird darauf geachtet, dass die Messstelle eine ausreichende Entfernung zum Punkt des Zuflusses aufweist, um eine vollständige Durchmischung des Tracers zu gewährleisten (FÜR UMWELTSCHUTZ, 2002).

Die Positionierung der zwei Messsonden erfolgt in der Weise im Gerinne, dass das Hauptaugenmerk auf der Erfassung der Hauptströmung gelegt wird und Randbereiche nicht erfasst werden. Laut Empfehlung der FÜR UMWELTSCHUTZ (2002) sollte bei der Verwendung von zwei Messsonden darauf geachtet werden, dass eine Sonde auf 10 % der Gerinnebreite, die andere Sonde auf 60 % der Gerinnebreite positioniert wird. Dies soll eine eventuell nicht vollständige Durchmischung des eingebrachten Salztracers aufzeigen, bei der zwei stark unterschiedliche Abflusswerte die Folge sind.

Die Erfahrung im Feld zeigt allerdings, dass am Rand eines turbulent fliessenden Gerinnes aufgrund stark erhöhter Rauhigkeiten oftmals Kehrwasser und Wirbel entstehen. Diese führen dazu, dass tracerhaltiges Wasser mehrmals die Sonde umspült und so eine längere Durchgangskurve entsteht, als dies ohne Wirbel der Fall wäre. Hieraus folgend wird eine zu geringe Abflussmenge berechnet.

Da bei der Wahl von Eingabe- und Messstelle besonderes Augenmerk auf eine ausreichend lange Durchmischungsstrecke gelegt wurde, wird stets von einer vollständigen Durchmischung ausgegangen. Daher werden die Sonden beide in die Hauptströmung eingebracht. Dabei wird besonderer Wert darauf gelegt, dass die beiden Messsonden jeweils Stromstriche gleicher Art erfassen. Stromstriche gleicher Art sollen diejenigen sein, die ein ähnliches Abflussverhalten hinsichtlich Pegelstand und Fliessgeschwindigkeit, aber auch möglichst gleichen und zudem nahen Abstand zur Hauptströmung im Gerinne haben. Dadurch können die Messergebnisse der beiden Sonden gemittelt werden, ohne eine Gewichtung der Messungen vorzunehmen.

Weiterhin wird darauf geachtet, dass die Sonden möglichst nicht direkt auf dem Gerinnegrund aufliegen. Dies könnte insbesondere bei laminarem Fließen dazu führen, dass ein Großteil der Tracerwolke oberhalb der Sonde vorbeifließt, was eine Überschätzung der Abflussmenge zur Folge hat. (FÜR UMWELTSCHUTZ, 2002). Durch Platzierung der Sonden auf größeren Steinen oder Verklemmen in Ästen wird diesem Umstand Rechnung getragen. Um die Zeitdauer, die für eine gesamte Messkampagne in einem EZG benötigt wird, möglichst gering zu halten, werden die Messungen im Feld während des Abflachens der Tracerkonzentration abgebrochen. Der Abbruch der Messung erfolgt, nachdem die LF unter 10 % der relativen Erhöhung gegenüber der Hintergrund-LF zurück gegangen ist.

4.1.2 Datenverarbeitung

Die im Feld registierten Daten werden über eine serielle Schnittstelle ausgelesen und mit der Software PCTrace ausgewertet. Es werden daraus die Abflusswerte, die Werte der Hintergrund-LF und die Temperaturen zum Zeitpunkt des Peaks beider Sonden entnommen und zur weiteren Verarbeitung in MS-Excel[©] übertragen.

Weiterhin bietet PCTrace eine Funktion zum Export der Messdaten. So kann jeder Datenpunkt in tabellarischer Form ausgegeben werden. Dies ist zur weiteren Verarbeitung der Daten, insbesondere der Extrapolation der abgebrochenen TDKs, notwendig.

4.1.2.1 Berechnung des lateralen Zuflusses

Zur Berechnung des lateralen Zuflusses in ein Gebiet wird die Abflussmenge am Auslass eine TEZGs von der Summe aller oberirdischen Zuflüsse in ein TEZG subtrahiert. Der so erhaltene Wert quantifiziert die Menge an Wasser, die auf der gesamten Strecke des Gerinneabschnittes diesem zugeführt wurde. Ist die Abflussmenge am Auslass kleiner als die Summe aller Zuflüsse ergibt sich also ein negativer lateraler Zufluss.

4.1.2.2 Extrapolation der Durchgangskurve

Zur Extrapolation der Durchgangskurve im abflachenden Teil wird ein Makro in MS-Excel[©] (erstellt von Pascal Szeftel (UBC), Vancouver - Keinada) als Vorlage zur Erstellung eines eigenen Excel-Makros verwendet.

Die aus PCTrace exportierten Tabellen werden durch das Makro in MS-Excel[©] folgendermaßen bearbeitet:

- Aus den diskreten Zeitschritten in Sekunden werden die logarithmischen Werte berechnet.
- Es wird eine Hintergrundleitfähigkeit festgelegt, so dass eine relative Leitfähigkeit aus der Subtraktion der gemessenen Leitfähigkeiten und des benannten Hintergrundes errechnet werden kann.

- Diese relative Leitfähigkeit wird logarithmiert und dann gegen die logarithmische Zeit aufgetragen. So ergibt sich ein Diagramm, anhand dessen durch grafische Festlegung eines Regressionsbereiches (auslaufender Ast der TDK entspricht im Diagramm einer Geraden) und der Anwendung einer linearen Regression ein Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und der Zeit erstellt werden kann.
- Die Gleichung der sich ergebenden linearen Regressionsgeraden wird zu Beginn des Regressionsbereiches eingefügt und ab diesem Zeitpunkt eine Extrapolation der logarithmierten relativen Leitfähigkeit durchgeführt. Die logarithmierte Zeit wird als Argument in der Regressionsgleichung verwendet.
- Im Folgenden werden die extrapolierten Werte durch Anwendung der Exponentialfunktion zurück in die relativen Leitfähigkeiten übersetzt.
- Durch Multiplikation der relativen Leitfähigkeiten mit den zugehörigen Eichkoeffizienten werden die Konzentrationswerte in Milligramm pro Liter überführt. Diese werden dann zur Berechnung des Abflusses aufsummiert, bis der Wert der relativen Leitfähigkeit unter 0,5 μS cm sinkt. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass das Messsystem keine Dezimalwerte der Leitfähigkeit ausgibt.

Diese Regression mit der grafischen Anpassung der linearen Beziehung ist nicht vollständig objektivierbar und somit sind die Ergebnisse einer Fehlerüberprüfung zu unterziehen.

Die Anwendung einer Glättungsfunktion ist notwendig, da das Messsystem des MST-2 keine Dezimalstellen unterstützt und so bei geringen Erhöhungen über die Hintergrund-LF ein oft sehr stufiger Verlauf der TDK entsteht. Nur ein geglätteter Durchgang stellt eine Ausgangsposition für eine Extrapolation dar. Die Glättung wird durch die Anwendung eines gleitenden Mittels auf die einzelnen Messpunkte erreicht. Ausreichend große gleitende Mittel ermöglichen eine gute Glättung der Kurve. Die Wahl der Länge der gleitenden Mittel erfolgt anhand der Messdauer und Stufigkeit der Messung. Ist eine stark gestufte Messreihe vorhanden, wird ein Zehntel der Messdauer, abgerundet auf die nächst kleinere ungerade Länge des gleitenden Mittels verwendet. Bei keiner bis geringer Stufigkeit wird ein Zwanzigstel der Messdauer zu Grunde gelegt. Die Unterscheidung zwischen geringer und großer Stufigkeit erfolgt grafisch und wird auch am Ergebnis der geglätteten Kurve bemessen. Im Falle, dass die Extrapolation einen zum unkorrigierten Wert erhöhten Abflusswert ausgibt, wurde auf die Extrapolation verzichtet. Es wurde dann der tatsächlich gemessene Wert angegeben. Eine Ursachenforschung für die mangelhafte Extrapolation gab keine expliziten Hinweise darauf, unter welchen Bedingungen die Extrapolation keine guten Ergebnisse bringt.

4.1.3 Bewertung der Genauigkeit

DAY (1976) führte eine Studie zur Bewertung der Genauigkeit von Abflussmessungen mit der Salzverdünnungsmethode durch. Hier werden für 409 einzelne Messungen mittlere Fehler von 4,7–7,3 % angegeben. Nach Expertise der eigenen Messergebnisse und den zugehörigen Überlegungen zur Fehlerbetrachtung erschien es unzweckmäßig, einen Literaturwert als pauschale Fehlergröße zu verwenden. Für die Erklärung des in dieser Arbeit verwendeten Klassifikationsverfahrens wird auf Kapitel 4.3 verwiesen.

4.1.4 Einordnung in den zeitlichen Kontext

Um die jeweiligen Messtage einer Abflusssituation in einem EZG zuzuordnen, wäre es notwendig eine Ganglinie des Abflusses vor den jeweiligen Messtagen zu erstellen. Dafür sind kontinuierliche Messungen des Gerinnepegels notwendig, mit denen über eine P-Q-Beziehung die zugehörigen Abfussmengen errechnet werden können. Bedingt durch den Anspruch, dass eine Messkampagne eine Momentanaufnahme eines EZGs darstellt (vgl. Kap. 1.3), waren die Messungen bei gleichbleibenden Abflussverhältnissen im Einzugsgebiet durchzuführen. Dies bedeutet bei einer Erstreckung der Messkampagne über mehrere Tage, dass das Auslaufverhalten der Bodenspeicher eines EZGs möglichst konstant sein sollte, sich also zeitlich gesehen nicht im stark abfallenden Ast der Abflussganglinie befindet. Zur Erfüllung dieser Bedingung wurde im Rahmen der Messtage darauf geachtet, dass mindestens einen Tag vor der eigentlich Messung keine nennenswerte Niederschlagsmenge gefallen ist. In den EZGn Bleiche und Ettenbach gibt es keine Pegel, an denen eine kontinuierliche Abflussmessung durchgeführt wird, so muss auf die Niederschlagsmessungen an einer für die EZGe repräsentativen Station zurück gegriffen werden. Dies wird im Folgenden behandelt.

4.1.4.1 Niederschlag

Abbildung 4.1.1 und 4.1.2 zeigen die Niederschlagstagessummen der beiden Stationen in einem für die Feldarbeit jeweils repräsentativen Zeitraum.



Abbildung 4.1.1: Niederschläge (Tagessummen) der Station Lahr. Die roten Punkte kennzeichnen die Messungen und geben keine Niederschlagsmengen an. (Datenquelle: DWD, 2008)



Abbildung 4.1.2: Niederschläge (Tagessummen) des Klimaturmes Katzensteig. Die roten Punkte kennzeichnen die Messungen und geben keine Niederschlagsmengen an. (Datenquelle: DWD, 2008)

Zur qualitativen Einordnung der Messungen in den Rahmen der gefallenen Niederschläge werden für die Untersuchungsgebiete repräsentative Stationen und deren Niederschlagsaufzeichnungen heran gezogen (vgl. Abb. 2.0.1 auf S.10). Für die beiden Buntsandsteingebiete ist dies die Station **Lahr** des Deutschen Wetterdienstes, für die Brugga wird der Klimaturm *Katzensteig* des IHF verwendet.

4.1.4.2 Abfluss

Für das EZG Brugga wurden von der Hochwasser-Vorhersage-Zentrale Baden-Württemberg Abflussdaten bereit gestellt. Diese sind mit den Untersuchungszeiträumen in Abbildung 4.1.3 dargestellt.



Abbildung 4.1.3: Abflussganglinien der Pegel Oberried und St.Wilhelm. Die roten Bereiche zeigen die Druchführung der Messungen im Feld. (Datenquelle: HVZ Karlsruhe, 2008)

Es kann über die verschiedenen Messtage der einzelnen EZG gesagt werden, dass hinsichtlich der Niederschläge ähnliche Vorfeuchtebedingungen präsent waren. Bei Messtag A im EZG Brugga fand allerdings nach dem ersten Teil eine Niederschlagsereignis statt. Wie aber in Abbildung 4.1.3 zu sehen ist, hatte dies keine Auswirkung auf die Abflussituation im Untersuchungsgebiet.

4.2 Mischungsrechnung

Aus den während der Feldarbeit gewonnenen Leitfähigkeiten werden Mischungsrechnungen für die einzelnen Gerinneabschnitte durchgeführt. Es sind jeweils LF-Werte der in ein TEZG zufliessenden und abfliessenden Gerinne vorhanden. Daraus wird mit Hilfe von Mischungsrechnungen auf Basis einer Massenbilanz der theoretische Leitfähigkeitswert des lateral ins Gerinne infiltrierenden Wassers bestimmt. Dieser Leitfähigkeitswert wird deswegen als theoretisch bezeichnet, da die Ex- bzw. Infiltrationsverhältnisse in dem betrachteten Gerinneabschnitt nicht bekannt sind und im Rahmen der Möglichkeiten in dieser Arbeit auch nicht näher ausgewertet werden können.

4.2.1 Erläuterung der Methode

Die Gleichung zur Berechnung der LF-Werte des lateralen Zuflusses lautet:

$$Q_{out}LF_{out} = Q_{in1}LF_{in1} + Q_{in2}LF_{in2} + \dots + Q_iLF_i, \qquad (4.2.1)$$

hierbei ist Q_{out} Abfluss am TEZG-Auslass mit zugehöriger Leitfähigkeit LF_{out} , Q_{in1} der erste oberflächliche Zufluss mit zugehöriger Leitfähigkeit LF_{in1} , Q_{in2} der zweite Zufluss, usw. Q_i bezeichnet die Menge an Zufluss mit zugehöriger LF_i in einem TEZG – gewonnen aus der Bilanzierung zwischen Zu- und Abflüssen Q_{in} und Q_{out} .

Nach Umstellung von Gleichung 4.2.1 ergibt sich für jedes TEZG der zu bestimmende LF-Wert:

$$LF_{i} = \frac{Q_{in1}LF_{in1} + Q_{in2}LF_{in2} + \dots}{Q_{i}}$$
(4.2.2)

4.2.2 Probleme bei der Durchführung

Die Mischungsrechnung geht von der Annahme aus, dass entlang eines betrachteten Gerinneabschnittes keine wechselhaften Filtrationsverhältnisse vorherrschen. Probleme ergeben sich bei diesem Ansatz folglich bei negativen Abflussspenden in einem TEZG. Negative Abflussspenden errechnen sich, wenn die Summe der Zuflüsse in einem TEZG größer ist als der Abflusswert am TEZGs-Auslass (vgl. Kap. 1.3).

Unter diesen Verhältnissen ergibt sich aus der Mischungsrechnung die Leitfähigkeit des theoretisch lateral abfliessenden Wassers. Unter infiltrierenden Bedingungen im Gerinneabschnitt sollte flussabwärts folglich keine Zunahme der Leitfähigkeit festgestellt werden können. Diese Beobachtung konnte jedoch teilweise nicht gemacht werden. Es kann mit dem verwendeten Ansatz über die Gerinneabschnitte keine Lösung gefunden werden, insofern wird auf die Auswertung der Leitfähigkeit bei negativen Abflussspenden verzichtet. Durch die Berechnung kleiner Abflussspenden und geringen Unterschieden – die im Bereich des Messfehlers liegen – zwischen den LFn kann es zu großen Verzerrungen der LF des lateralen Zuflusses kommen. In solchen Fällen wird ebenso auf eine Darstellung des LF-Werts in einem TEZG verzichtet.

4.3 Fehlerrechnung Abflussspende

Im Folgenden wird eine Analyse der möglichen Fehlerquellen für den gesamten Prozess zum Erhalt einer Abflussspende für ein TEZG durchgeführt. Dabei werden systematische und zufällige Fehlerquellen angesprochen. Zufälligen Fehlern, wie etwa der Messungenauigkeit der Sonden bei Leitfähigkeit und Temperatur wird durch eine Pauschalisierung über alle Messungen Rechnung getragen. Systematische Fehler können z.B. durch die Wahl einer zu kurzen Durchmischungsstrecke für den Tracer oder auch durch Zu- bzw. Abflüsse auf dem Messabschnitt entstehen. Fehler dieser Art sind laut WEILER ET AL. (2005) schwer zu quantifizieren, können aber durch sorgfältiges Arbeiten auf ein Minimum reduziert werden. Solche systematischen Fehler werden durch individuelle Fehlerbetrachtung jeder Messung quantifiziert.

Eine komplette Fehlerrechnung nach dem GAUSS'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz wird nicht durchgeführt, da es nicht möglich ist, Fehlerangaben für alle Teilprozesse zu machen – Beispielsweise ist die Menge an Tracer, die nach der Einspeisung im Gefäß verbleibt unbekannt. Auch die sorptiven Eigenschaften von Kochsalz in chemisch verschieden komponierten Gerinnen und Gerinneabschnitten sind im Rahmen dieser Arbeit nicht erfassbar.

In dieser Arbeit wird daher für die Abflussmessungen ein klassifizierendes Verfahren zur Fehlerabschätzung verwendet. Dabei werden zunächst systematische und zufällige Fehlerquellen erörtert, quantifiziert und zusammengefasst. Dies ergibt ein Schema, das auf alle Messungen angewandt wird.

4.3.1 Vorbereitungen

Die möglichen Fehlerquellen vor der eigentlichen Abflussmessung sind im Einzelnen:

- wechselnde Feuchtigkeitsbedinungen bei der Salzlagerung
- Abwiegen der einzuspeisenden Salzmenge im Labor
- Herstellen der Eichlösung im Labor

- Erstellen der Eichgeraden im Gelände (Volumen Messkolben, LF-Messung und Pipettenungenauigkeit)
- Verbleiben von Salzlösung im Einspeisegefäß durch Benetzung
- Wahl der Einspeisemenge

Diese Fehlerquellen sind bei exakter Arbeitsweise als relativ klein anzusehen. Fehler durch unterschiedliche Feuchtebedingungen in Zusammenhang mit der Salzlagerung können weitestgehend ausgeschlossen werden, da die Salzvorräte durchgehend im klimatisierten Labor aufbewahrt wurden.

Das Abwiegen der Salzmengen und Verpacken in kleine Plastiktüten wurde mit großer Sorgfalt durchgeführt. Daher wird bei der Fehlerbetrachtung in diesem Punkt auf die Angabe des Hersteller der Laborwaage Bezug genommen. Diese gibt den Wert von 0,1 g als Messungenauigkeit an. Dies entspricht bei den verwendeten Salzmengen von 25–500 g einem relativen Fehler von 0,4–0,02 %.

Die Erstellung der Eichgeraden im Gelände wird direkt von der Registriereinheit auf die Güte der Korrelation überprüft, und im Falle eines Regressionskoeffizienten kleiner als 0,998 fordert das Gerät dazu auf, die Eichung zu wiederholen. Somit kann für eine erfolgreiche Eichung der Fehler des Eichkoeffizienten mit 0,2 % angesetzt werden.

Durch die Komplettierung mit den Fehlern bei Benetzung des Eimers während der Einspeisung, Verbleiben von Salz in der Transporttüte und Herstellung der Eichlösung im Labor, wird für die in diesem Absatz behandelten Fehlerquellen ein Wert von 1 % angenommen.

Die Wahl der Einspeisemenge beeinflusst die Erhöhung des Peaks der TDK über die Hintergrundleitfähigkeit. Bei zu geringer Erhöhung über die Hintergrund-LF muss von einem schlechteren Messergebnis ausgegangen werden (FÜR UMWELT-SCHUTZ, 2002). Von WEILER ET AL. (2005) wurde allerdings gezeigt, dass bei einer ausreichend hohen Anzahl von Messpunkten (n > 140) für eine TDK der durchschnittliche Fehler in der Abflussmessung auf unter 2 % fällt. Dies gilt auch für Messungen mit kleiner Erhöhung gegenüber der Grundleitfähigkeit. Bei Erhöhung der Leitfähigkeit um mehr als 10 % wird daher ein Fehler von 0 %, bei Erhöhung kleiner 10 % ein relativer Fehler der Abflussmessung von 1 % angesetzt. Dies scheint aufgrund des hohen Messintervalls von einer Sekunde und den größtenteils langen Messdauern von über 300 s angemessen und gerechtfertigt (WEILER ET AL., 2005).

4.3.2 Abflussmessung

Bei der tatsächlichen Abflussmessung im Gelände sind folgende Fehlerquellen zu nennen:

- Fehler durch mangelnde Durchmischung
- Messung der Wassertemperatur
- Messung der Leitfähigkeit

Fehlern durch ungenügende Durchmischung des Salztracers über den Messquerschnitt sind durch die Verwendung mehrerer Sonden vorzubeugen. WEILER ET AL. (2005) geben eine Formel von SCHÄPPI & WALTER (2002) (2002) zur Angabe der Messungenauigkeit an:

$$\frac{\delta Q_{mix}}{Q} = \frac{\sum \sigma(Q_i)}{\bar{Q}} \tag{4.3.1}$$

wobei $\frac{\delta Q_{mix}}{Q}$ den relative Fehler der Gesamtmessung darstellt. $\sigma(Q_i)$ ist die Standardabweichung von beiden Sonden an einem Messpunkt. Die Summierung dieser Standardabweichungen für alle Messtage an einem Messpunkt wird so (bei gleichbleibenden Einspeise- und Messstellen) repräsentativ für die Güte der Durchmischung an diesem Messpunkt und für jeden Messtag dieser resultierende Wert eingesetzt.

Die Messgenauigkeit der Leitfähigkeit einer Sonde wird vom Hersteller mit einer Abweichung von 1 $\frac{\mu S}{cm}$ angegeben. Dies entspricht bei einer LF von 200 $\frac{\mu S}{cm}$ einem relativen Fehler von 0,5 %. Für die meisten Messungen bedeutet dies sogar eine Überschätzung des Fehlers, da im relevanten Bereich der TDK meist höhere LF-Werte erreicht werden. So wird der Geräteungenauigkeit für die Messungen der LF, Temperatur und der Temperaturkorrektur ein relativer Fehler von 0,5 % zugewiesen.

4.3.3 Datenverarbeitung

Die elektronische Weiterverarbeitung der Daten birgt folgende Fehlerquellen:

- Flächenänderung durch Extrapolation
- Differenzbildung der Abflusswerte zur Berechnung der Abflussspende

Die geglätteten TDKn unterscheiden sich von den ursprünglichen Tracerkurven aus dem MRS-4 im Mittel über alle Messungen und Messtage um 0,08 %. Dieser Fehler

wird daher als nicht relevant betrachtet und in der Fehlerrechnung nicht weiter berücksichtigt.

Der direkten Berechnung des lateralen Zuflusses innerhalb der TEZGe wird durch GAUSS'sche Fehlerfortpflanzung Rechnung getragen. Hier werden die Fehler der Abflussmessungen entsprechend der Berechnung der zufliessenden Abflussmenge fortgepflanzt, daraus ergibt sich der relative Fehler für den lateralen Zufluss. Bei der Flächennormierung dieser Abflussmengen wird der relative Fehler nach GAUSS'scher Fehlerfortpflanzung für die Abflussspende übernommen und ein absoluter Wert berechnet.

4.3.4 Zusammenfassung der Fehlerrechnung

in Abbildung 4.3.1 auf Seite 44 wird eine Übersicht über das klassifizierte Fehlerbestimmungsverfahren gegeben. Im ersten Schritt werden die einzelnen Fehlerquellen bestimmt und quantifiziert. Diese werden addiert und ergeben zusammen den relativen Fehler einer Abflussmessung. Eine Fehlerfortpflanzung nach GAUSS liefert den zugehörigen Fehler des lateralen Zuflusses. Dieser entspricht dem relativen Fehler der Abflussspende, da für die Flächenbestimmung der zugehörigen TEZGe kein Fehler veranschlagt wurde (siehe auch Kapitel 3.7, S. 32).



Abbildung 4.3.1: Schema der durchgeführten Fehlerrechnung. Erläuterungen sind dem Text zu entnehmen.

4.4 Teststatistik

Im Folgenden sollen zwei Methoden der statistischen Auswertung erläutert werden, die Rangkorrelation nach Spearman und die Erstellung von Regressionsbäumen. Dabei wird jeweils sowohl das Verfahren allgemein beschrieben, als auch auf Modifikationen eingegangen, die speziell in dieser Arbeit verwendet wurden.

Es werden Korrelationen der Einflussfaktoren mit den mittleren Abflussspenden erarbeitet. Begründet liegt dies in der Annahme, dass statische Faktoren gefunden werden sollen, die eine Erklärung der in einem TEZG produzierten Abflussmenge liefern. In diesem Zusammenhang sei also hauptsächlich die räumliche Variabilität von Bedeutung und die zeitliche Variabilität soll nur eine untergeordnete Rolle spielen. Alle für die Statstik verwendeten Daten sind in den Tabellen im Anhang zu finden.

4.4.1 Rangkorrelation nach Spearman

Der Rangkorrelationstest nach SPEARMAN wird von HARTUNG ET AL. (1998) beschrieben. Dabei werden den Ausprägungen eines Merkmales Rangzahlen zugeordnet. Die mit den Merkmalsausprägungen verknüpften Ränge werden der Größe nach sortiert. Wird das Verfahren für zwei oder mehrere Merkmale durchgeführt, können statistische Zusammenhänge der Merkmal durch den SPEARMAN'schen Rangkorrelationskoeffizienten, im Folgenden bezeichnet mit ρ_s , erklärt werden. Der Korrelationskoeffizient ρ_s nimmt Werte zwischen -1 und +1 an, wobei -1 eine perfekte Umkehrung der Ränge und +1 eine perfekte Übereinstimmung der Ränge angibt. Es muss im Gegensatz zum Korrelationskoeffizienten nach BRAVAIS-PEARSON keine Normalverteilung der Merkmalsausprägungen vorliegen. Durch das Rangordnungsverfahren ist der SPEARMAN'sche Korrelationskoeffizient (kurz: SKK) auch für nicht lineare, monotone Zusammenhänge geeignet. Die Methode ist zudem robust hinsichtlich Ausreissern (HARTUNG ET AL., 1998).

Für die weitere grafische Darstellung und Auswertung werden aus den Kernfaktoren (vgl. Kap. 3.6) diejenigen Zusammenhänge verwendet, bei denen die Korrelation der mittleren Abflussspende mit einem Faktor die Bedingung $-0, 4 \le \rho_s \le 0, 4$ erfüllt. Die Darstellung erfolgt dann sowohl für die einzelnen Messtage, als auch für das arithmetische Mittel aller Messtage und ermöglicht so eine Beurteilung der Korrelation in zeitlicher, aber vor allem in räumlicher Hinsicht.

4.4.2 Regressionsbäume

LEWIS (2000) gibt eine Einführung in die Analyse von Daten mit Hilfe von Regressionsbäumen. Diese sind speziell für viele, sich gegenseitig bedingende Faktoren geeignet, um eine Auswahl an Hauptprädiktoren für eine vorherzusagende Variable zu treffen. Dabei müssen die Faktoren nicht normalverteilt sein. Es dürfen bei dieser Analyse nicht nur nur lineare, sondern auch komplexe Zusammenhänge auftreten. Der Vorteil gegenüber anderen multivariaten Analysen liegt im Entschlüsseln von sehr komplexen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Prädiktoren (LEWIS, 2000).

Die Methode arbeitet auf dem Prinzip der binären rekursiven Aufteilung von Daten, dem sogenannten *Splitting*. Das Splitting erfolgt in der Weise, dass die quadratischen Abweichungen eines Prädiktors zur Zielvariablen innerhalb von zwei gebildeten Untermengen möglichst klein sind (KUTNER ET AL., 2004). Diese Untermengen können dann immer weiter aufgesplittet werden, d.h. es erfolgt eine sukzessive Abarbeitung der jeweils an einem Schnittpunkt zutreffendsten Faktoren (LEWIS, 2000).

Für die Regressionsbäume werden in der Auswertung nur die Kernfaktoren verwendet. Dies ist sinnvoll, da so zufällige Korrelationen durch eher unbedeutende Faktoren ausgeschlossen werden können. Ausserdem werden ausschliesslich die mittleren Abflussspenden für die Erstellung der Regressionsbäume heran gezogen. Die verwendete Methode wird in R anhand der Anleitung von ATKINSON & THER-NEAU (2000) und deren Ausarbeitung der R-Bibliothek **rpart** vorgenommen.

Es werden Regressionsbäume für jedes EZG erstellt, um eine Vergleichbarkeit untereinander zu ermöglichen und spezifische Eigenheiten der Gebiete heraus arbeiten zu können. Zur Überprüfung, ob unterschiedliche Geologie Einfluss auf Prädiktoren hat, wird für die beiden Buntsandsteingebiete Bleiche und Ettenbach zusammen ein Regressionsbaum erstellt. Dieser kann dann mit dem Gneisgebiet der Brugga abgeglichen werden. Desweiteren wird ein Ausführung für alle EZG zusammen erstellt, um Aussagen über signifikante Zusammenhänge zwischen ASn und Einflussfaktoren zu ermöglichen.

Die Regressionsbäume werden in der Art erstellt, dass eine Aufsplittung nur bei mehr als fünf Ereignisträgern im jeweiligen Ast erfolgt. Dies stellt sicher, dass in den Endknoten noch mehrere TEZGe vorhanden sind.

Zur Verbesserung der Güte und um Kreuzkorrelationen auszuschliessen, wird auf ein Verfahren von ATKINSON & THERNEAU (2000) zurückgegriffen. Mittels **rpart** lassen sich mit der Funktion **printcp** Fehler der Kreuzvalidierung (*xerror*) und Standardfehler (*xstd*) der Regressionsbäumen mit unterschiedlicher Anzahl an Aufästelungen ausgeben. Es wird der Regressionsbaum (bzw. Anzahl *Splits*) mit dem kleinsten Kreuzvalidierungsfehler ausgewählt und der zugehörige Standardfehler zu diesem addiert. Der aussägekräftigste Regressionsbaum sei nun derjenige, der den nächst kleineren *xerror* als die Summe auf **xerror** und **xstd** aufweist (ATKINSON & THERNEAU, 2000). Der so ausgewählte Regressionsbaum wird mit der Funktion **prune** beschnitten und zur Ergebnisdarstellung verwendet. Als Gütemaß wird die Summe von **xerror** und **xstd** angegeben und soll einen Eindruck darüber geben, welche statistische Aussagekraft der jeweilige Regressionsbaum hat.

Die Erstellung und Beurteilung der Regressionsbäume durch das Gütemaß, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt sind, wurde von Gregor Laaha (University of Natural Resources and Applied Life Sciences, BOKU Vienna) weitestgehend via persönlicher Korrespondenz über eMail bestätigt.

5 Resultate

Dieses Kapitel dient der Präsentation der Ergebnisse. Es wird zunächst auf die räumliche und zeitliche Variabilität des Abflusses entlang der Gerinne eingegangen und durch eine Darstellung der Leitfähigkeiten ergänzt. Daran anschliessend werden die Ergebnisse der statistischen Analysen in Form von XY-Plots und Baumdiagrammen gezeigt und beschrieben.

5.1 Räumliche Variabilität der Abflussspenden

Es werden die errechneten, mittleren Abflussspenden aller Messtage als Kreise auf einer Karte mit DGM dargestellt. Die Kreise sind ein Maß für die Höhe der Abflussspenden, genaue Zahlenwerte sind den Tabellen im Anhang (siehe A) zu entnehmen. Mit Hilfe dieser Grafiken wird die räumliche Variabilität der Abflussmengen deutlich und soll im Folgenden charakterisiert werden.

5.1.1 Bleiche

In Abbildung 5.1.1 ist die räumliche Verteilung der mittleren Abflussspenden im EZG der Bleiche dargestellt. Die Abflussspenden nehmen vor allem im östlichen Teil des EZGs hohe Werte an, während v.a. in den südlichen TEZGn kein nenneswerter Abfluss im Gerinne registriert wurde. In TEZG 9 ist eine sehr kleine Abflussspende vorhanden, während in den beiden überliegenden TEZGn 6 und 8 viel Abfluss produziert wird.



Abbildung 5.1.1: Karte der mittleren AS im EZG Bleiche. Der Kreisdurchmesser ist Maß für die Größenordnung der AS.

5.1.2 Brugga

Die Verteilung der mittleren Abflussspenden für das EZG Brugga zeigt Abbildung 5.1.2. Deutlich erkennbar ist der Unterschied zwischen den südlichen, höher gelegenen Gebieten mit hohen Abflussspenden und den tiefer gelegenen nördlichen TEZGn. TEZG 31 sticht mit einer hohen Abflussspende heraus, ebenso TEZG 25 mit einer negativen Abflussspende. TEZG 16 weist einen sehr hohen negativen Wert auf, während TEZG 20 einen hohen postiven Wert zeigt. Besonderes Augenmerk gilt noch den TEZGn 7 und 14, die Abflussspenden nahe Null haben und TEZG 11, das einen relativ hohen Wert aufweist.


Abbildung 5.1.2: Karte der mittleren ASn im EZG Brugga. Die Kreise der TEZGe 16 und 20 wurden verkleinert auf 25 bzw. 50 dargestellt (Größe entspricht Zahl in Klammern). Die theoretische Größe ist vor der Klammer angegeben.

5.1.3 Ettenbach

Abbildung 5.1.3 zeigt die Verteilung für das EZG Ettenbach. Im Unterschied zu den beiden anderen EZGn treten hier im unteren Teil des EZGs die höheren Abflussspenden auf. Vor allem in der Abfolge von TEZG 7 mit starken Verluste aus dem Gerinnebett hin zu TEZG 9 und 10 mit hohen Werten der Abflussspende ist dies ersichtlich. Die höher gelegenen Gebiete im Osten des EZG haben alle ähnliche Werte der Abflussspenden.



Abbildung 5.1.3: Karte der mittleren ASn im EZG Ettenbach. Der Kreisdurchmesser ist Maß für die Größenordnung der AS.

5.2 Zeitliche Variabilität der Messtage

In Kapitel 4.1.4 erfolgte eine Einordnung der Messtage in den jeweiligen zeitlichen Kontext. Hier soll nun die zeitliche Variabilität der jeweiligen Messkampagnen untereinander dargestellt werden. Dies erweitert die vorangegangene Kartendarstellung der mittleren Abflussspenden aus Kapitel ?? um den Faktor der zeitlichen Variabilität. Die Grafiken enthalten die errechneten Abflussspenden mit Fehlerbalken (vgl. Kap. 4.3) der einzelnen Messtage aus den jeweiligen TEZGn.

5.2.1 Bleiche

Abbildung 5.2.1 zeigt die drei Messkampagnen der Bleiche. An sich sind die Messungen auf einem sehr ähnlichen Niveau der Abflussmenge angelegt. An Messtag A ergeben sich jedoch große Unterschiede: in TEZG 6 und 8 liegen die roten Punkte deutlich höher als die der anderen Messtage, während in TEZG 9 eine im Vergleich deutlich geringere Abflussspende vorliegt. Im unteren Teil des EZGs liegen die Abflussspenden von Messtag C über allen anderen, wobei in TEZG 18 sehr deutliche Unterschiede auftreten – der Abflussspendenwert von Messtag C liegt hier mit Abstand am höchsten. Dies gilt ebenso für TEZG 16 und 17.



Abbildung 5.2.1: Zeitlich vergleichende Darstellung der Messtage im EZG Bleiche.

5.2.2 Brugga

An den zwei Messtagen im EZG der Brugga (vgl. Abb. 5.2.2) sind in einigen TEZGn sehr deutliche Unterschiede bei den Abflussspenden festzustellen. In den TEZGn 14, 15 und 18 liegen die Abflussspenden von Messtag B weitaus tiefer, als die an Messtag A. In TEZG 14 geht die Abflussspende von B gegenüber A sehr stark zurück, obwohl dies für die darüber liegenden TEZGe nicht gilt. Dort sind nahezu alle Abflussspenden in den TEZGn höher als an Messtag A. Insgesamt gesehen ist Messtag B von der Gesamtmenge des Abflusses im EZG ein wenig höher, dies kehrt sich allerdings bei den TEZGn 14, 18 und 25 ins Gegenteil, hier liegt B deutlich unter A.



Abbildung 5.2.2: Zeitlich vergleichende Darstellung der Messtage im EZG Brugga.

5.2.3 Ettenbach

Die drei Messkampagnen im EZG Ettenbach sind auf sehr ähnlichem Niveau und zeigen auch untereinander eine hohe Konsistenz. Alle Messtage im oberen EZG haben in etwa gleiche Abflussspenden zur Folge. In TEZG 7 liegt C unterhalb der anderen beiden, während sich dies bei TEZG 9 umkehrt. TEZG 11 weist an Messtag A einen deutlich höheren Abflussspendenwert auf, als dies für die beiden anderen Messtage B und C der Fall ist. Dieser Unterschied kehrt sich wiederum für TEZG 12 um.



Abbildung 5.2.3: Zeitlich vergleichende Darstellung der Messtage im EZG Ettenbach.

5.3 Leitfähigkeit

Bei den Kartengrafiken in diesem Abschnitt handelt es sich um Kreisdarstellungen der über alle Tage gemittelten Leitfähigkeiten aus den Mischungsrechungen. Eine Auflistung der den TEZGn zugehörigen Leitfähigkeitswerten Werte findet sich in Tabelle 5.3.1. Dabei sind die mit NA gefüllten Felder diejenigen, an denen keine Abflüsse messbar waren bzw. keine sinnvollen Mischungsrechnungen durchgeführt werden konnten (vgl. Kap. 4.2).

TEZG	Bleiche	Brugga	Ettenbach
[-]	$\frac{\mu S}{cm}$	$\frac{\mu S}{cm}$	$\frac{\mu S}{cm}$
1	278,50	30,00	75,00
2	156,75	$39,\!26$	95,38
3	115,00	$40,\!50$	$105,\!35$
4	110,86	$59,\!46$	$108,\!58$
5	99,33	$50,\!12$	$96,\!67$
6	154,80	109,71	92,23
7	466,83	$48,\!57$	34,50
8	241,79	$74,\!00$	$55,\!00$
9	203, 83	$30,\!50$	$120,\!00$
10	109,50	$55,\!99$	246,40
11	NA	$106,\!34$	$351,\!85$
12	167,86	82,25	478,70
13	NA	NA	-
14	326,00	82,57	-
15	$245,\!64$	82,74	-
16	210, 25	NA	-
17	190,01	$51,\!50$	-
18	323,08	$64,\!79$	-
19	1080,06	70,75	-
20	-	NA	-
21	-	$98,\!00$	-
22	=	$173,\!50$	-
23	=	NA	-
24	-	$182,\!00$	-
25	-	NA	-
26	-	96,50	-
27	=	$60,\!22$	-
28	-	89,03	-
29	-	$336,\!82$	-
30	-	$130,\!25$	-
31	-	$194,\!45$	-

Tabelle 5.3.1: LF-Werte aus den Mischungsrechnungen für alle EZG.

5.3.1 Bleiche

In Abbildung 5.3.1 ist die räumliche Verteilung der mittleren Leiftfähigkeit im EZG der Bleiche dargestellt. Die größten Werte finden sich im westlichen, tiefer gelegenen Teil des EZGs, während in den östlichen Höhenlagen geringe Werte vorkommen. Abweichungen ergeben sich an der südlichen Grenze des EZGs, hier sind die LF- Werte deutlich höher als in den übrigen *headwaters*, hervor gehoben sei hier TEZG 7 mit einer sehr hohen Leitfähigkeit.



Abbildung 5.3.1: Karte der mittleren LF im EZG Bleiche. Der Kreisdurchmesser ist Maß für die Größe der LF-Werte.

5.3.2 Brugga

Abbildung 5.3.2 zeigt die LF-Werte der einzelnen TEZGe im EZG Brugga. Es ist eine Abnahme der LF-Werte mit zunehmender Höhe erkennbar, wobei TEZG 26 als Ausnahme gilt, da es höhere LF-Werte aufweist als TEZG 27. Hervorzuheben ist außerdem TEZG 6 mit einer höheren Leitfähigkeit als TEZG 7.



Abbildung 5.3.2: Karte der mittleren LF im EZG Brugga. Der Kreisdurchmesser ist Maß für die Größe der LF-Werte.

5.3.3 Ettenbach

Die LF-Werte für das EZG Ettenbach sind in Abbildung 5.3.3 dargestellt. Auch hier ist eine Abnahme der LF-Werte in den höher gelegenen TEZGn erkennbar. TEZG 7 zeigt sehr geringe Leitfähigkeiten, ab dann nehmen die Werte Richtung Gebietsauslaß aber kontinuierlich zu.



Abbildung 5.3.3: Karte der mittleren LF im EZG Ettenbach. Der Kreisdurchmesser ist Maß für die Größe der LF-Werte.

5.4 Statistische Analyse

5.4.1 Rangkorrelation nach Spearman

Zwischen den Abflussspenden und den Einflussfaktoren wurde eine Rangkorrelation nach SPEARMAN durchgeführt. Die Ergebnisse von ρ_s für alle Faktoren sind in Tabelle 5.4.1 dargestellt. Mit diesen Ergebnissen wurde eine grafische Aufarbeitung in Form von XY-Plots durchgeführt. Die Auswahl der Faktoren für die Darstellungen erfolgt anhand einer Eingrenzung des SPEARMAN'schen Korrelationskoeffizienten (vgl. Kap. 4.4.1). Außerdem werden für die grafische Auswertung nur die Kernfaktoren (vgl. Kap. 3.6) in Betracht gezogen. Dies ermöglicht einen Abgleich mit den Regressionsbäumen in der abschliessenden Diskussion.

Faktor	Bleiche	Brugga	Ettenbach
	$ ho_s$	$ ho_s$	$ ho_s$
Acker	-0,28	-0,36	$0,\!15$
Grünland	-0,13	-0,15	-0,07
Wald	0,22	0,16	-0,37
Siedlung	-0,17	-0,22	$0,\!46$
T_{Luft}	0, 19	-0,40	$0,\!35$
NS	$0,\!41$	0,29	-0,32
korr. NS	-0,19	$0,\!37$	-0,57
pot. ETP	-0,27	$-0,\!46$	$0,\!49$
akt. ETP	-0,03	-0,26	0,33
Wbilanz	-0,14	$0,\!41$	-0,26
Versiegelt	-0,19	-0,40	$0,\!41$
Höhe	0,16	$0,\!48$	-0,36
$\operatorname{Strahlung}$	$0,\!01$	0,28	0,03
MRVBF	-0,56	-0,12	$0,\!43$
Neigung	0,40	0,03	-0,14
Hangwölbung	$0,\!32$	-0,17	-0,12
HW-horizontal	0,03	-0,28	0,21
HW-vertikal	$0,\!04$	0,29	-0,38
HW-tangential	0,15	-0,17	0,28
TOPO	-0,47	0,06	$0,\!36$
Speicher	-0,58	-0,06	$0,\!31$
\mathbf{K}_{f}	0,22	$-0,\!43$	$0,\!69$
m LF	-0,40	$0,\!15$	$0,\!69$

Tabelle 5.4.1: Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman für die Korrelationen der Abflussspende gegen die jeweiligen Einflussfaktoren.

Alle Grafiken beinhalten jeweils die einzelnen Messtage und das arithmetische Mittel der Einzelmessungen innerhalb eines TEZGs. Zur räumlichen Zuordnung der TEZGe sind im Plot des arithmetischen Mittels die TEZG-Nummern in rot angefügt. Diese lassen sich anhand der jeweiligen Abszissenwerte in die Plots der Einzelmessungen übertragen. Auf die zeitliche Variabilität wird bei den Plots nur bedingt eingegangen, da eine Beschreibung bereits durchgeführt wurde (vgl. Kap. 5.2). Weiterhin sollen die Grafiken nicht detailliert beschrieben, sondern nur die wesentlichen Tendenzen herausgearbeitet werden. In den folgenden Beschreibungstexten wird der SPEARMAN'sche Korrelationskoeffizient (vgl. Kap. 4.4.1) der Kürze halber nur mit Korrelationskoeffizient benannt.

5.4.1.1 Bleiche

Abbildung 5.4.1 zeigt den Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abflussspende der TEZGe im EZG Bleiche. Für die Messtage A und B liegen positive Korrelationskoeffizienten vor. Dies zeigt sich auch grafisch in den oberen beiden Plots von Abbildung 5.4.1. Hier sind insbesondere die östlichen TEZGe mit hohen Niederschlägen und den positiven Werten von ρ_s für entsprechend hoh Abflussspenden verantwortlich. Die südlich gelegenen TEZGe 1, 7, 14 und zusätzlich TEZG 9 weisen trotz hoher Niederschläge nur sehr geringe Abflussspenden auf.



Abbildung 5.4.1: Plots der Abflussspende gegen Niederschlag, EZG Bleiche. Die roten Zahlen sind die TEZGe.

In Abbildung 5.4.2 ist die Korrelation zwischen der Talausdehnung (MRVBF) und der Abflussspende dargestellt. Es ist für alle Messtage und für das arithmetische Mittel ein negativer Korrelationskoeffizient errechnet. Dies ist deutlich zu erkennen bei TEZG 19, welches mit einer großen Talausdehnung stets geringe Abflussspenden aufweist. Die TEZGe 13, 14 und 15 haben hohe Werte von MRVBF, weisen passend dazu weite und ebene Flächen auf bei geringen Abflussspenden. Gegensätzlich dazu zeichen sich die im Osten gelegenen TEZGn 2, 6 und 8 dagegen durch höhere MRVBF-Werte und und große Abflussspenden aus.



Abbildung 5.4.2: Plots der Abflussspende gegen MRVBF, EZG Bleiche. Die roten Zahlen bezeichnen die TEZGe.

Den Zusammenhang zwischen Topographischen Index und Abflussspenden zeigt Abbildung 5.4.3. Die tief gelegenen TEZGe 18 und 19 sind mit den größten topographischen Indizes und einer relativ geringen mittleren Abflussspende gekennzeichnet. Die *headwaters* im Osten des EZGs zeichnen sich hingegen durch geringe TIs aus.

Der beste statistische Zusammenhang laut der Rangkorrelation nach SPEARMAN mit einem Wert von $\rho_s = -0,58$ ergab sich für den Zusammenhang von Abflussspende gegen die Speicherfähigkeit des Bodens im EZG Bleiche. Wie in Abbildung 5.4.4 zu sehen ist, bedingt hohe Speicherfähigkeit eines TEZGs stets eine kleine Abflussspende. Auch hier ist eine deutliche räumliche Differenzierung möglich zwischen dem östlichen Teil mit geringen Speicherfähigkeiten und den westlichen Teil des EZGs mit hohen Speicherfähigkeiten der Böden.



Abbildung 5.4.3: Plots der Abflussspende gegen Topographischer Index, EZG Bleiche. Die roten Zahlen bezeichnen die TEZGe.



Abbildung 5.4.4: Plots der Abflussspende gegen Speicherfähigkeit des Bodens, EZG Bleiche. Die roten Zahlen bezeichnen die TEZGe.

5.4.1.2 Brugga

Abbildung 5.4.5 zeigt die Korrelationsmuster der Abflussspende gegen die potentielle Verdunstung. Es ist je ein negativer Korrelationskofeeizient vorhanden, der für beide Messtage und das Mittel in etwa konsistent ist. Hohe Verdunstungsraten sind besonders für den unteren Teil des EZGs der Brugga gegeben, während die Abflussspenden dort sehr niedrig sind. Eine Ausnahme bildet hier das TEZG 31, das bei einer hohen potentiellen Verdunstung auch eine hohe Abflussspende liefert.

Der Zusammenhang zwischen Abflussspenden und Wasserbilanz ist Inhalt der Abbildung 5.4.6. Beide Größen korrelieren positiv, d.h. eine niedrige Wasserbilanz tritt zusammen mit einer geringen Abflussspende auf. Auch hier ist wiederrum TEZG 31 durch seine hohen Abflussspenden ein Sonderfall, welcher nicht in das Muster der Korrelation passt. Ansonsten fällt auf, dass die Werte für niedrige Wasserbilanzen weitaus weniger streuen, als dies für die hohen Werte der Fall ist.

Ein ähnliches Verteilungs- und Streuungsmuster zeigen die Plots Höhe gegen Abflussspende in Abbildung 5.4.7. Hier ist bei einer positiven Korrelation auch eine starke Streuung bei den höher liegenden TEZG zugegen, während in den Niederungen, abgesehen von den Aussreissern, ein quasi linearer Zusammenhang besteht.

Abbildung 5.4.8 unterscheidet sich von den anderen Plots durch eine extrem linkssteile Verteilung der Wertepaare von K_f -Wert und Aflussspende. Der Korrelationskoeffizient mit einem ρ_s -Wert von -0, 43 des arithmetischen Mittels entspricht den Werten, die in den anderen Plots der Brugga berechnet wurden, allerdings unterscheidet sich die Verteilung stark. Die K_f -Werte sind relativ konstant über alle TEZGe der Brugga, nur die TEZGe 18, 24 und 25 weichen davon ab. In der gradlinigen Anhäufung der Punkte besteht im unteren Teil eine Tendenz nach rechts, d.h. bei steigenden K_f -Werten gehen die Abflussspenden zurück, wie dies auch durch den negativen Korrelationskoeffizienten ausgedrückt ist.



Abbildung 5.4.5: Plots der Abflussspende gegen potentielle Verdunstung, EZG Brugga. Die roten Zahlen bezeichnen die TEZGe.



Abbildung 5.4.6: Plots der Abflussspende gegen Wasserbilanz, EZG Brugga. Die roten Zahlen bezeichnen die TEZGe.



Abbildung 5.4.7: Plots der Abflussspende gegen Höhe, EZG Brugga. Die roten Zahlen bezeichnen die TEZGe.



Abbildung 5.4.8: Plots der Abflussspende gegen K_f -Werte, EZG Brugga. Die roten Zahlen bezeichnen die TEZGe.

5.4.1.3 Ettenbach

Abbildung 5.4.9 zeigt die Korrelation von Abflussspende und K_f -Werte für das EZG des Ettenbachs. Im Mittel ergibt sich hier ein relativ starker positiver Zusammenhang mit $\rho_s = 0, 49$, der aber bei den einzelnen Messtagen deutlich weniger stark ausgeprägt ist. Messtag A liefert noch einen sichtbaren Zusammenhang, während bei Messtag B keine Tendenz in der Verteilung der Punkte erkennbar ist.



Abbildung 5.4.9: Plots der Abflussspende gegen potentielle Verdunstung, EZG Ettenbach. Die roten Zahlen bezeichnen die TEZGe.

Für die Korrelation Abflussspende gegen Versiegelung (siehe Abb. 5.4.10) ergibt sich für das Mittel $\rho_s = 0, 41$. Diese Korrelation ist allerdings nicht für die Einzelmessungen gültig, insbesondere gilt dies für Messtag A. Es ist eine Zweiteilung der Wertepaare erkennbar: eine Gruppe mit kleinem Grad an Versiegelung zwischen 6 und 8 % und die andere Gruppe mit Versiegelungsgrad zwischen 12 und 17 %. Dabei weisen nur diejenigen TEZGe (9, 10, 11 und 12) mit höherer Versiegelung auch die höheren Abflussspenden auf.



Abbildung 5.4.10: Plots der Abflussspende gegen Versiegelung, EZG Ettenbach. Die roten Zahlen bezeichnen die TEZGe.

Die Darstellung von Abflussspenden gegen den MRVBF ist in Abbildung 5.4.11 aufgeführt. Für die einzelnen Messtage sind laut dem Korrelationskoeffizienten wiederum nur sehr schwache Zusammenhänge $(0, 11 \le \rho_s \le 0, 18)$ vorhanden, welche sich bei der Mittelung der Messtage stark verbessern ($\rho_s = 0, 43$). TEZG 7 mit einem MRVBF von etwa 0,2 bringt eine deutlich negative mittlere Abflussspende, während TEZG 12 mit dem höchsten MRVBF eine mittlere Abflussspende von unter 10 $\frac{l}{s \cdot km^2}$ liefert. Diese Abflussspende entspricht denen der höher gelegenen TEZGe mit geringen MRVBF-Werten.

Abbildung 5.4.12 zeigt den Zusammenhang zwischen K_f-Werten und Abflussspenden der TEZGe. Diese Korrelation liefert den besten Wert mit Hilfe der Rangkorrelation nach SPEARMAN für das EZG Ettenbach, wobei nicht nur die Mittelung, sondern auch die Einzelmessung relativ hohe Werte von ρ_s annehmen. Es gibt eine Anhäufung von Wertepaaren bei K_f-Werten nahe Null, bei denen Abflussspenden im Bereich von etwa 0–10 $\frac{l}{s \cdot km^2}$ vorkommen. Die TEZGe mit höheren K_f-Werte liefern indes Abflussspenden von 10 $\frac{l}{s \cdot km^2}$ oder höher, Ausnahme bildet hier TEZG 7.



Abbildung 5.4.11: Plots der Abflussspende gegen Talweite (MRVBF), EZG Ettenbach. Die roten Zahlen bezeichnen die TEZGe.



Abbildung 5.4.12: Plots der Abflussspende gegen K_f -Werte, EZG Ettenbach. Die roten Zahlen bezeichnen die TEZGe.

5.4.2 Regressionsbäume

Dieses Kapitel dient der Darstellung von Regressionsbäumen zusammen mit einem Güßemaß. Es werden zuerst die einzelnen EZGe behandelt, dann folgt der Regressionsbaum für die beiden zusammengefassten Buntsandsteingebiete Bleiche und Ettenbach. Den Abschluss bildet der Regressionsbaum über alle EZG.

Das Gütemaß setzt sich zusammen aus dem Fehler der Kreuzvalidierung und dem Standardfehler für den jeweiligen Regressionsbaum (vgl. Kap. 4.4.2).

In den Darstellungen ist die resultierende Abflussspende für jeden Ast in den Rechtecken angegeben (zunehmend von links nach rechts), im folgenden auch Endknoten genannt. Unterhalb der Rechtecke ist die Anzahl n der TEZG angegeben, für welche die Bedingung zutrifft. Das oberste Oval stellt den ersten *Split* bzw. Splitfaktor dar, davon ausgehend sind die weiteren Unterverästelungen dargestellt.

Bei den Ausführungen zu den Bäumen wird nicht auf alle Einzelheiten eingegangen, insbesondere wenn die Anzahl der Verästelungen zunimmt. Das Hauptaugenmerk soll auf diejenigen Endknoten (und die dazu führenden Verästelungen) gelegt werden, denen auch die meisten TEZG zugeordnet sind.

5.4.2.1 Bleiche

Abbildung 5.4.13 zeigt den Regressionsbaum für das EZG der Bleiche. Hauptprädiktor ist laut Analyse der MRVBF, dabei liefern kleine MRVBF-Werte auch kleine Abflussspenden. Für die TEZG mit hohen MRVBF-Werten erfolgt eine zweite Unterteilung anhand der Werte der Wasserbilanz. Weist ein TEZG einen kleinen Wert der Wasserbilanz auf, ist auch die Abflussspende gering und anders herum. Dies gilt allerdings nur für drei TEZGe.

Das Gütemaß von 1,94 setzt sich zusammen aus dem Fehler der Kreuvalidierung von 1,50 und dem Standardfehler von 0,44.

5.4.2.2 Brugga

Der Regressionsbaum für das EZG der Brugga ist in Abbildung 5.4.15 dargestellt. Der erste Split wird anhand des K_f -Wertes durchgeführt, wobei große K_f -Werte in kleinen Abflussspenden, und kleine K_f -Werte in großen Abflussspenden resultieren. Für den Fall kleiner K_f -Werte wird weiter anhand der Neigung der TEZG unterteilt. Für große Neigungen fällt die Abflussspende klein aus und anders herum. Zu beachten ist hier besonders, dass über 80 % der TEZG mittlere Abflussspenden



Abbildung 5.4.13: Baumdiagramm für das EZG Bleiche. Darstellung zeigt Abflussspenden in Rechtecken, Einflussfaktoren in Ovalen.

(mittleres Rechteck) aufweisen, während in den anderen beiden Endknoten jeweils nur zwei TEZG auftreten.

Das Gütemaß von 1,56 setzt sich zusammen aus dem Fehler der Kreuzvalidierung mit einem Wert von 1,23 und dem Standardfehler von 0,33.



Abbildung 5.4.14: Baumdiagramm für das EZG Brugga. Darstellung zeigt Abflussspenden in Rechtecken, Einflussfaktoren in Ovalen.

5.4.2.3 Ettenbach

In Abbildung 5.4.15 ist der Regressionsbaum für das EZG des Ettenbach veranschaulicht. Im Gegensatz zu den anderen beiden EZGn erfolgte hier eine Aufsplittung anhand von vier Faktoren. Diese sind von oben nach unten: K_f -Werte, Flächenanteil Grünland, vertikale Hangwölbung (kurz: HW-vertikal) und Neigung innerhalb der TEZGe. Dabei sind den resultierenden Endknoten nur jeweils zwei oder drei TEZGe zugeordnet. Aus großen K_f -Werten folgt für die TEZG des Ettenbachs eine große Abflussspende und umgekehrt. Bei diesem Split ist auch der prägnanteste Unterschied in den resultierenden Abflussspenden zu beobachten.

Der Fehler der Kreuzvalidierung von 1,58 und der Standardfehler mit einem Wert von 0,67 bilden in der Summe das Gütemaß von 2,25.



Abbildung 5.4.15: Baumdiagramm für das EZG Ettenbach. Darstellung zeigt Abflussspenden in Rechtecken, Einflussfaktoren in Ovalen.

5.4.2.4 Sandstein

Den gemeinsamen Regressionsbaum für die beiden Buntsandstein Gebiete Bleiche und Ettenbach zeigt Abbildung 5.4.16. Hier erfolgt der erste *Split* anhand der K_f-Werte. Große Werte haben eine große Abflussspende innerhalb der TEZG zur Folge, wobei diese Bedingung nur für zwei TEZG erfüllt ist. Für kleine K_f-Werte erfolgt im zweiten Schritt eine Unterteilung durch die tangentiale Hangwölbung (kurz: HW). Hier ergeben sich für 23 TEZG mit horizontal-konkaven Hänge die höheren Abflussspenden, niedrige Abflussspenden sind bei horizontal-konvexer Krümmung vorzufinden. Das Gütemaß von 1,86 setzt sich für diesen Regressionsbaum aus dem Kreuzvalidierungsfehler mit dem Wert 1,36 und Standardfehler von 0,50 zusammen.



Abbildung 5.4.16: Baumdiagramm für den Buntsandstein. Darstellung zeigt Abflussspenden in Rechtecken, Einflussfaktoren in Ovalen.

5.4.2.5 Alle Einzugsgebiete

Für den Regressionsbaum aller EZG in Abbildung 5.4.17 wurden zwei *Splittings* durchgeführt. Das erste Splitting erfolgte anhand des K_f -Wertes der TEZG: Große hydraulische Leitfähigkeiten haben kleine Abflussspenden zur Folge, während kleine K_f -Werte in großen Abflussspenden enden. Für die kleinen K_f -Werte wurde eine weitere Aufästelung anhand der Höhe vorgenommen. Je höher ein TEZG, desto größer ist laut der Regression auch seine Abflussspende.



Abbildung 5.4.17: Baumdiagramm für die EZG Bleiche, Brugga und Ettenbach. Darstellung zeigt Abflussspenden in Rechtecken, Einflussfaktoren in Ovalen.

6 Synthese und Diskussion

Im folgenden Kapitel sollen die Resultate aus Kapitel 5 zusammengefasst und diskutiert, aber auch hinsichtlich der Zielsetzung der Arbeit gefiltert werden. Es wird dabei anhand der statistischen Analyse aus Kapitel 5.4 zunächst die Fragestellung bearbeitet, in welchem Maße die Abflussvariabilität anhand topographischer und geologischer Faktoren erklärt werden kann. Im Anschluss daran wird eine Diskussion hinsichtlich der eingangs gestellten Arbeitshypothese über die Nachweisbarkeit des *Subvalley-Flow* durchgeführt. Dabei sollen Hinweise auf den Prozess des Subvalley-Flow anhand der grafischen Kartendarstellungen von Abflussspenden und Leitfähigkeiten (vgl. Kap. 5.1) sowie Hydrogeologie (vgl. Kap. 2) erarbeitet werden. Die Ergebnisse der statistischen Analysen, Auswertung der Einflussfaktoren und Erkentnisse aus der Feldarbeit ergänzen diese Ausführungen.

Eine Auswertung der zeitlichen Variabilität innerhalb der verschiedenen Messtage wird beschränkt auf die Diskussion hinsichtlich der Aussagekraft der berechneten mittleren Abflussspenden. Gegenstand der Diskussion soll es also sein, die Resultate aus Kapitel 5 hinsichtlich der Hypothese und Fragestellung zu diskutieren und wesentliche Ergebnisse herauszufiltern.

6.1 Ergebnisse der statistischen Analyse

6.1.1 Rangkorrelation nach Spearman

Die Korrelationskoeffizienten nach SPEARMAN aus Tabelle 5.4.1 geben einen Uberblick über die Stärke der Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Abflussspenden. Für die gesamte Rangkorrelationsanalyse nach SPEARMAN kann festgehalten werden, dass sich prinzipiell keine guten Korrelationskoeffizienten finden lassen. Der stärkste gefundenene Zusammenhang liegt mit $\rho_s = 0,69$ im EZG Ettenbach, allerdings mit einer sehr geringen Anzahl an Datenpunkten (n = 12). Ebenso sind die Werte innerhalb eines Parameters für die drei EZGe teilweise sehr inhomogen. Es sind Vorzeichenwechsel der Korrelationskoeffizienten und deutliche Unterschiede in der Größenordnung vergleichbarer Einflussfaktoren zu erkennen. Die einzelnen Ergebnisse können nicht im Detail interpretiert werden, da die Aussagekraft vieler Koeffizienten als zu gering betrachtet werden muss. Anhand eines Beispiels sollen jedoch examplarisch die Interpretationsmöglichkeiten dieser statistischen Untersuchunsgmethode verdeutlicht werden.

Auffällig ist der Vorzeichenwechsel beim Zusammenhangs von K_f -Wert und Ablussspende für die EZGe Brugga (ρ_s ist negativ) und Ettenbach (ρ_s ist positiv). Dies könnte durch unterschiedliche Geologie, Gneis für Brugga und Sandstein für Ettenbach, begründet sein. Das EZG Bleiche als zweites Sandsteingebiet hat wie das EZG Ettenbach einen positiven, wenn auch sehr schwachen Zusammenhang von K_f -Wert und Ablussspende. Eine mögliche Erklärung für den schwächeren Zusammenhang könnte die inhomogenere Geologie im EZG Bleiche sein (vgl. Kap. 2.1.2).

Abschliessend soll für die Rangkorrelation noch eine Auffälligkeit heraus gearbeitet werden:

In den Plots in Kapitel 5.4.1 fällt für alle drei EZGe eine Gruppierung der Punktepaare in zwei *Cluster* (Anhäufung) auf. Dies ergibt sich zumeist sowohl für eine Zweiteilung der Werte entlang der Abszisse als auch Ordinate. Im EZG der Bleiche bilden die Wertepaare der östlichen *headwaters* meist einen *Cluster* durch die höheren Abflussspenden, aber auch durch die einzelnen Einflussfaktoren. Dies zeigt sich besonders deutlich in den Abbildungen 5.4.1 und 5.4.2. Für die Brugga verhält sich diese Zweiteilung ähnlich; die tiefer gelegenen TEZG sind meist innerhalb eines *Clusters* mit geringer Streuung anzutreffen, während der andere *Cluster* (mit höherer Streuung) hauptsächlich die TEZGe aus höheren Lagen beinhaltet. Für das EZG des Ettenbachs wird diese Form der Gruppierung besonders in den Abbildungen 5.4.10 und 5.4.11 deutlich.

Diese Clusterbildung wird aufgrund der Struktur und Anordnungen der für die Plots zugrunde liegenden Daten hervorgerufen. Hieraus wird eine Unterscheidbarkeit der drei Untersuchungsgebiete in einen höherliegenden Teil und einen tieferliegenden Teil des EZGs abgeleitet. Diese Zweiteilung der EZG kann also auch mittels der hier vorliegenden statistischen Ergebnissen abgeleitet werden.

6.1.2 Regressionsbäume

Regressionsbäume sollen helfen Einflussfaktoren als Steuergrößen für die Abflussvariabilität in EZGn identifizieren zu können. Die erstellten Regressionsbäume weisen allerdings eine geringe Anzahl an Datenpunkten durch geringe Anzahl an TEZGn auf. Der unzureichende Stichprobenumfang ist durch die Anzahl der TEZGe in den Endknoten, also aus den Größen der letzten Untermengen, ersichtlich. Die Anzahl der TEZGe, die in diesen Abflussspenden (Endknoten) resultieren, ist meist zu klein, um eine Normalverteilung innerhalb der Untermengen zu bilden bzw. eine allgemeine Aussagekraft haben zu können. Zum anderen werden die Auswirkungen des Stichprobenumfangs auf die Güte der Regressionsbäume auch an der Entwicklung des Gütemaßes (4.4.2) mit abnehmender Anzahl an TEZGn deutlich. Je mehr TEZGe für einen Baum verwendet werden, desto höher das Gütemaß. Leider liegen keine Vergleichswerte für Gütemaße vor, eine qualitative Abschätzung für die erstellten Regressionsbäume durch Vergleiche untereinander soll aber trotzdem durchgeführt werden.

Für den Regressionsbaum des EZGs Bleichbach (vgl. Abb. 5.4.13) errechnet sich das Gütemaß mit 1,94. Dies ist der zweithöchste Wert. Allerdings zeigt sich nach dem ersten *Split* durch den MRVBF für beide Äste noch eine ausreichende Anzahl an TEZGn, wodurch dem Baum durchaus eine Aussagekraft zugesprochen werden kann. Die Hauptaussage der Darstellung ist, dass eine kleine Ausdehnung der Talfläche innerhalb eines TEZGs große Abflussspenden erzeugt. Dies kann mit der Haupthypothese der Arbeit in Zusammenhang gebracht werden, da auf Festgestein strömendes Grundwasser bei Verengung des Talquerschnittes tendenziell zur Geländeoberfläche hinbewegt wird und als Konsequenz daraus zu oberflächlichem Abfluss in einem Gerinnebett beitragen kann.

Für das EZG der Brugga (vgl. Abb. 5.4.15) resultieren Endknoten mit stark unterschiedlichen Mengen n an TEZGn vorhanden. Dies kann am großen Höhenunterschied und der daraus folgernden großen Spanne innerhalb der zugrunde liegenden Daten in diesem EZG liegen. Zuerst erfolgt eine Aufteilung anhand des K_f -Werts, allerdings erfolgt diese mittels eines sehr hohen Durchlässigkeitswerts, d.h. große Durchlässigkeiten in der oberen Hydrogeologie haben negative Abflussspenden zur Folge. Dies scheint aus hydrogeologischen Gesichtspunkten plausibel, allerdings folgen nur zwei TEZGe diesem Zusammenhang und infolgedessen ist die Aussagekraft eher gering. Aus dem zweiten *Split* kann abgeleitet werden, dass stärker geneigte Hänge in einem TEZG kleinere Abflussspenden erzeugen. Dies scheint nachvollziehbar, da im Bereich des Niedrigwassers gemessen wurde und Speicher aus steilen Hängen aufgrund hohen Gravitationspotenitals zu diesem Zeitpunkt schon entleert sein könnten.

Der Regressionsbaum für das EZG Ettenbach erliegt aufgrund der zu geringen Anzahl an TEZG einer Überanpassung und kann mit einem Gütemaß von 2,25 nicht für Interpretationen verwendet werden. Es soll hier lediglich angemerkt werden, dass entsprechend zum EZG der Brugga der K_f-Wert als Hauptprädiktor angegeben ist (vgl. Abb. 5.4.15).

Für beide Gebiete im Buntsandstein konnte ebenfalls der K_f -Wert als erste Split-Variable bestimmt werden. Allerdings ist die Verteilung der TEZGe in den Endknoten und das Gütemaß von 1,86 auch hier aus statistischen Gesichtspunkten heraus ungünstig. Es wird daher von einer weiteren Diskussion abgesehen. Erwähnenswert scheint allerdings noch der gegenläufige Zusammenhang des K_f -Werts zwischen Gneis und Buntsandstein. Dies konnte allerdings auch schon durch die Rangkorrelation nach Spearman in Kapitel 6.1.1 gezeigt werden.

Für den Regressionsbaum aller drei EZGe liegt ein Gütemaß von 1,77 zu Grunde (vgl. 5.4.17). Hier erfolgt die erste Aufteilung ebenso anhand des K_f -Werts, allerdings auch mit einer sehr geringen Anzahl TEZG in einem Ast. Aus diesem Baumdiagramm kann abgeleitet werden, dass eine Zunahme der Abflussspende mit der Zunahme der Höhe eines TEZGs erfolgt. Für die Unterteilung anhand der Höhe ergeben sich ausreichend große Untermengen. Dadurch ist die Aussagekraft dieses Zusammenhangs erhöht.

6.2 Einzugsgebiet Bleiche

Das EZG der Bleiche weist insbesondere im östlichen Teil des EZGs hohe Abflussspenden auf (vgl. Kap. 5.1.1). Diese östlichen TEZGe sind sogenannte headwaters und Richtung Westen exponiert. Alle in dieser Arbeit untersuchten EZGe liegen im Bereich der Weswindzone, und somit weisen die meisten Wetterlagen westliche Anströmrichtungen auf. Dies hat für das EZG der Bleiche zur Folge, dass im Osten des EZG ein höherer Eintrag durch orographischen Niederschlag erfolgt und damit die Grundlage für erhöhte Abflüsse gegeben ist. Desweiteren sind hier die Hangneigungen relativ hoch (11–20° Neigung) und somit die Tendenz für oberflächennahen Hangabfluss und damit auch potentielle Infiltration ins Gerinne gegeben. Für die südlichen TEZG 1, 7, 13, 14 und 15 verhält sich dies hinsichtlich des Niederschlagseintrags anders, da sie durch Lee-Lage geschützt liegen. Es werden also nicht die hohen Niederschläge erwartet, wie für die östlichen TEZGe. Außerdem wird angenommen, dass im südlichen Bereich der aufliegende Muschelkalk (vgl. Abb. 2.1.3) und die dafür typisch hohe hydraulische Leitfähigkeit in den Untergrund (vgl. Kap. 5.3.1) für die geringen Abflüsse im Gerinne und damit den geringen Abflüsspenden verantwortlich sind.

Einen Hinweis auf den Einfluss der Geologie lässt sich aus der Darstellung der Leitfähigkeiten in Abbildung 5.3.1 auf Seite 57 ableiten, da im Bereich der kalkgeprägten, südlichen TEZG (mit teils von Muschelkalk beeinflusster Bodenbildung) hohe LF-Werte im lateralen Zufluss beobachtbar sind. Die Kartendarstellung der Leitfähigkeiten im EZG zeigt grundlegend eine deutliche Zunahme der Werte von Ost nach West. Kleine Werte ergeben sich in den östlichen *headwaters* aufgrund geringer Kontaktzeiten des infiltrierten Niederschlagswassers mit der Pedosphäre (Braunerde, Podsol mit Wald) und dem silikatischen, daher schwer löslichen Buntsandstein. Im Süden des Einzugsgebietes nimmt die Leitfähigkeit des lateralen Zuflusses von den *headwaters* (TEZGe 1, 7, 13 und 14) in den TEZGn gerinneabwärts (2, 8 und 15) ab. Dies könnte bedeuten, dass in diesem Fall kein unterirdischer

Zufluss aus den im Kalk liegenden *headwaters* in diese TEZGe erfolgt bzw. eine

andere Zuflusskomponente mit sehr geringen Leitfähigkeiten zukommt. Hinweise auf Subvalley-Flow ergeben sich aus der Abbildung 5.1.1. Hier weist TEZG 16 trotz Lee-Lage eine relativ hohe Abflussspende auf. Als Beispiel eines in Lee-Lage liegenden headwaters kann TEZG 10 mit einer sehr kleinen Abflussspende herangezogen werden. Die erhöhte Abflussspende für das TEZG 16 lässt sich auch nicht durch die statistischen Zusammenhänge bzw. numerischen Werte der Einflussfaktoren erklären. Es scheint möglich, dass der Gerinneabschnitt dieses TEZG durch unterirdischen Zufluss aus den darüberliegenden TEZGn 13, 14 und 15 (evtl. 17) gespeist wird. Diesselbe Erklärung kann auf das TEZG 8 angewandt werden, da auch hier die Abflussspenden deutlich höher liegen als in den darüberliegenden TEZGn. Eine Beobachtung von Subvalley-Flow kann anhand der grafischen Analyse für die tieferliegenden Regionen des EZGs Bleiche nicht getroffen werden. Es müssten dazu in den TEZGn 9, 11, 12 und 18 erheblich höhere Abflussspenden auftreten. Dies ist nicht der Fall, obwohl durch die geologische Situation in diesem Bereich eine eher begünstigende Situation für Subvalley-Flow geschaffen ist. Das Gerinne hat sich hier bis auf den Gneis eingeschnitten (vgl. Abb. 2.1.3) und somit liegen die Buntsandsteinschichten oberhalb des Flussbetts. Diese Situation sollte vermehrt Quellaustritte im Bereich der Grenze zwischen Gneis und Buntsandstein zur Folge haben, da Wasser lateral auf dem Gneis-Aquitarde durch den Buntsandstein-Aquifer Richtung Westen transportiert werden kann (vgl. Abb. 2.1.4). Dadurch kann Wasser, das innerhalb der östlichen headwaters in den Buntsandsteinaquifer infiltriert ist, in die Gerinneabschnitte der tiefer liegenden TEZG zufließen. Diese Überlegung kann jedoch nicht druch erhöhte der Abflussspendenwerte in diesem Bereich verifiziert werden.

Wie in Abbildung 5.2.1 zu sehen ist, sind die Messungen im EZG Bleiche weitestgehend konsistent untereinander. Durch die Interpretation der Ergebnisse anhand der Mittelwertbildung ergeben sich lediglich Differenzen bei den TEZG 9 und geringfügig bei den TEZG 6, 8 und 18. Im Bereich von TEZG 9 ist eine nicht kontinuierlich betriebene Mühle installiert, die aus dem Hauptgerinne der Bleiche gespeist wird und dadurch die Wasserführung auf diesem Gerinneabschnitt beeinflusst werden kann. Es wird aufgrund dieser Beobachtung angenommen, dass die Interpretationen anhand der mittleren Abflussspende repräsentativ für die räumliche Abflussvariabilität innerhalb des EZGs sind.

6.3 Einzugsgebiet Brugga

Das EZG der Brugga lässt eine tendenzielle Zunahme der Abflussspenden mit der Höhe erkennen (vgl. Abb. 5.1.2). Das komplette EZG kann in einen südlichen, höher gelegenen und einen nördlichen, tiefer liegenden Teil aufgespalten werden. Die relativ hohen Abflussspenden in den südlichen headwaters (TEZG 2, 3, 6 und 8) können aus den hohen Wasserbilanzen (stets > 650 mm) in diesen Gebieten resultieren. Die sehr geringe Abflussspende von TEZG 16 lässt sich mit der sehr großen Abflussspende von TEZG 20 in Verbindung bringen. In diesem Bereich ist eine Wasserkraftanlage installiert, für die aus dem Fluss in TEZG 16 Wasser entnommen und in TEZG 20 wieder eingeleitet wird. Daher wird auf eine Interpretation in diesem Bereich (TEZG 16–20) verzichtet. Prinzipiell haben die TEZG 19–24 und 26–30 eher geringe Abflussspenden. Es kann hier vermutet werden, dass aufgrund geringerer Hangneigung, ausgedehnten Flächen und Braunerde mit guten Infiltrationseigenschaften starke Perkolation in die Tiefe stattfindet und so weniger Wasser dem Gerinne zukommt. Der im TEZG 25 negative Abflussspendenwert kann aus der hohen hydraulischen Durchlässigkeit des alluvialen Aquifer resultieren. Wasser aus den westlich von TEZG 25 gelegenen TEZGn 21, 22, 23 und 24 kommt den Gerinnen weder für diese TEZGe (geringe Abflussspenden) noch für TEZG 25 zu. Eine mögliche Erklärung wäre ein tiefer Grundwasserstrom, der die Hauptwassermenge unterirdisch an den Gerinnen in diesem Bereich vorbeiführt und infolgedessen durch die Abflussmessungen nicht erfasst werden konnte.

Für die hohen elektrischen Leitfähigkeiten (vgl. Abb. 5.3.2) im unteren Bereich des EZGs der Brugga lassen sich zwei Erklärungsansätze anführen. Zum einen ist es hier möglich, dass aufgrund der Besiedelung vermehrt Ionen in die Gerinne eingebracht werden und so die Mischungsrechnung hohe Werte für die lateralen Zuflüsse ausgibt. TEZGe 29 und 31 fallen hier sofort ins Auge, die Leitfähigkeiten nehmen im Gegensatz zu den darüber liegenden TEZGn (26, 27 und 28) deutlich zu, ebenso steigt der Anteil der Siedlungsfläche. Eine andere Interpretation für die hohen Leitfähigkeiten wäre möglicherweise, dass die lateralen Zuflüsse an sich tatsächlich höhere Leitfähigkeit aufweisen Dies konnte hervorgerufen werden z.B. durch längere Fliesszeiten im Untergrund. Allerdings ist hier anzufügen, dass Gneise aufgrund des hohen Anteils an Gerüstsilikaten sehr verwitterungsbeständig sind.

Wird der zweite Interpretationsansatz zur Untersuchung des Subvalley-Flows fokussiert, so müssen insbesondere die TEZGe 6, 11, 29 und 31 betrachtet werden. In der Abfolge der TEZG 1-6 ist eine nahezu kontinuierliche Zunahme der Leitfähigkeitswerte talabwärts erkennbar. Dies könnte bedeuten, dass gerinneabwärts der Anteil an älterem Wasser innerhalb des Gerinnes zunimmt. Dieses ältere Wasser stammt womöglich aus den headwaters 1, 2 und 3 und kommt nach Perkolation im Untergrund erst in TEZG 6 wieder dem Gerinne zu. Diese Interpretation deckt sich auch mit den berechneten Abflussspenden (vgl. Abb. 5.1.2), hier weist das TEZG 6 deutlich höhere Werte auf. Das gleiche Bild ergibt sich für TEZG 11 mit den darüber liegenden headwaters 8, 9 und 10 für die Leitfähigkeiten und in sehr hohem Maße für die Abflussspenden. Der im Nordwesten gelegene Teilarm weist ein ähnliches Verhalten für die TEZG 26–29 und weiter flussabwärts für TEZG 31 auf. Es nimmt sowohl die Abflussspende als auch die Leitfähigkeit zu. Besonders auffällig ist hier die verhältnismäßig hohe Abflussspende in TEZG 31, die aus lateralen Zuflüssen der darüber liegenden TEZGe stammen könnte. TEZG 29 weist eher geringe Werte auf, was evtl. an der ausgeprägten antropogenen Gerinnebettfassung in diesem Abschnitt liegen könnte. Der Effekt des Subvalley-Flow kann auch für die Konstellation der TEZGe 13 und 14 mit niedrigen Abflussspenden und dem flussabwärts davon liegendem TEZG 15 mit hoher Abflussspende interpretiert werden.

Bei den beiden Messtagen der Brugga sind innerhalb der Abflussspenden relevante Unterschiede feststellbar (vgl. Abb. 5.2.1). Dies gilt insbesondere für TEZG 14 mit einer positiven und einer negativen Abflussspende. Die Ergebnisse der Messtage zeigen sich zwar sehr inkonsistent zueinander, dennoch decken diese Hinweise auf, welche in die Diskussion der Arbeitshypothesen einfliessen können.

6.4 Einzugsgebiet Ettenbach

Im EZG Ettenbach treten die relativ höheren Abflussspenden im unteren Teil des EZGs auf. Die TEZGe der beiden Seitenarme im Osten des EZGs (TEZGe 1, 2, 3 und 4 bzw. TEZGe 5 und 6) haben im Mittel sehr ähnliche Abflussspenden. Gründe dafür könnten ähnliche Charakteristik in der Topographie (vgl. Kap. 5.4.1.3) und dieselbe Ausrichtung der Täler hinsichtlich der Hauptanströmrichtung der Wetterlagen aus Westen sein. Im TEZG 7 fliessen die beiden Seitenarme zusammen, allerdings ergeben sich hier für das Mittel und auch jede Einzelmessung der Abflussspenden negative Werte (vgl. Abb. 5.1.3 und 5.2.3). Eine Aufweitung der Talsohle im Gegensatz zu den darüber liegenden TEZGn und ein Wechsel des Untergrunds von Festgestein zu rezenten Talfüllungen (vgl. Abb. 2.3.3) sind hier vorstellbare Gründe für Infiltration und Perkolation in die Tiefe und damit den negativen Abflussspenden für TEZG 7.

In diesem Zusammenhang sind die hohen Abflussspenden der von TEZG 7 aus flussabwärts liegenden TEZG 9 und 10 interessant. Es wäre denkbar, dass hier Wasser aus den östlichen TEZGn vom Untergrund an die Oberfläche gedrückt wird und so zu hohen Abflüssen im Gerinne führt. Dieses Verhalten in der Abfolge der TEZGe 1-10 ist ein eindeutiger Hinweis auf den Prozess des *Subvalley-Flow*. Jedoch ist hier anzufügen, dass die antropogene Beeinflussung über Siedlungsfläche ab dem TEZG 7 deutlich zunimmt und somit für Variabilitäten verantwortlich sein kann.

Auch die Verteilung und Größe der Leitfähigkeiten weist auf die Existenz von Subvalley-Flow hin. Der laterale Abfluss (negative Abflussspende) aus dem Gerinneabschnitt von TEZG 7 in den Untergrund hat gemäß der Mischungsrechnung einen recht geringen Leitfähigkeitswert (vgl. Abb. 5.3.3). Auch dies deutet darauf hin, dass in diesem TEZG exfiltrierende Verhältnisse im Gerinneabschnitt überwiegen, da hier kein Boden- oder Grundwasser mit längeren Untergrundkontaktzeiten (höheren Leitfähigkeiten) mit dem Oberflächengewässer zu interagieren scheint. Dies gilt sowohl für Exfiltrations- als auch Infiltrationsvorgänge. Im TEZG 7 gefallener Niederschlag scheint also hauptsächlich als unterirdischer Abfluss aus dem TEZG abzufliessen.

Die Leitfähigkeitswerte in TEZG 9 und 10 (mit den hohen Abflussspenden) liegen über den Werten der *headwaters* 1-6 und könnten somit als Hinweis dienen, dass hier Wasser mit längeren Kontaktzeiten aus dem Untergrund in das Gerinne gelangt. Dieses Wasser könnte nach der Hypothese des *Subvalley-Flow* aus den darüber liegenden TEZGn stammen. Die für TEZG 11 und 12 sehr hohen Leitfähigkeitswerte könnten durch antropogene Zufuhr von Ionen ins Gerinne resultieren und sind kein zwingender Hinweis auf Zugang von Tiefenwasser aus höher gelegenen Bereichen des EZGs.

Die drei Messtage innerhalb des EZG Ettenbach liegen alle auf sehr ähnlichem Niveau hinsichtlich der Abflussmenge im Gebiet. Außerdem folgen alle drei Messtage dem gleichen Muster, so dass von einer deutlichen Aussagekraft der gebildeten Mittelwerte ausgegangen werden kann.
7 Fazit und Ausblick

Räumliche Abflussvariabilität konnte in dieser Arbeit nicht durch topographische und geologische Faktoren erklärt werden. Es wurden dazu zwei statistische Verfahren angewandt; die Rangkorrelation nach *Spearman* und die Erstellung von Regressionsbäumen durch rekursives Aufsplitten der Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Abflussmengen. Beide Verfahren liefern keine statistisch signifikanten Zusammenhänge, was durch die mäßigen und teilweise gegenläufigen Korrelationskoeffizienten bzw. die Robustheit der Regressionsbäume deutlich wird.

Eine Erklärung für niedrige Korrelationskoeffizienten basiert auf der Möglichkeit, dass räumliche Abflussvariabilität nicht oder nur unzureichend durch statische Einflussfaktoren erklärt werden kann. Die zweite Möglichkeit ist, dass die in dieser Arbeit angewandten statistischen Methoden nicht geeignet waren, um statistisch signifikante Nachweise erbringen zu können.

Zusammenfassend lässt sich aus der statistischen Analyse folgern, dass Unterschiede für die verschiedenen geologischen Formationen erkennbar sind. Es deutet sich auch an, dass die Durchlässigkeiten der oberen hydrogeologischen Schichten (in dieser Arbeit der Faktor K_f -Wert) einen Einflussfaktor für die Variabilität der Abflüsse darstellen. Dies wird aus den relativ hohen Rangorrelationskoeffizienten und dem Regressionsbaum für alle EZGe gefolgert. Außerdem scheint , unabhängig von der statistischen Auswertung, die hydraulische Durchlässigkeit des Untergrunds ein entscheidender Faktor bei der Steuerung von unterirdischen Fließprozessen und damit Abflussvariabilität zu sein.

Möglicherweise ist die Herangehensweise mit statistischen Methoden prinzipiell nicht geeignet, um Variabilitäten in räumlicher, als auch zeitlicher Hinsicht für ein System zu erklären. Systeme funktionieren dynamisch und die Veränderung innerhalb ist grundsätzlich mehr als eine Aufsummierung einzelner Teilprozesse. Das hier verwendete bzw. anwendbare Spektrum der statistischen Analysen scheint zu unflexibel hinsichtlich der Verknüpfung von Teilaspekten zur Beschreibung von Abflussvariabilität. Aus diesem Grund wird auch zur Beantwortung der Frage nach dem Prozess des *Subvalley-Flow* auf statistische Methoden verzichtet und lediglich eine grafische Auswertung vorgenommen. Die Analyse der Kartendarstellungen mit Betrachtung der hydrologischen Situationen lassen keine eindeutige Beantwortung der Hypothese des Subvalley-Flow zu. Wie in der Ergebnisdiskussion aufgezeigt, gibt es durchaus Hinweise zur Existenz eines solchen lateralen Fließprozesses im Untergrund. Hier sei insbesondere auf das EZG des Ettenbachs und Teilarme der Brugga verwiesen, wo Subvalley-Flow durchaus nachweisbar ist. In der Gesamtbetrachtung des EZGs der Bleiche hingegen sprechen die Resultate eher gegen die Hypothese, obwohl hier gerade im Bereich des mittleren EZGs theoretisch eine den Subvalley-Flow begünstigende Situation vorliegt (siehe Kap. 6.2).

Von SHAMAN ET AL. (2004) wurde angenommen, dass eine Zunahme des Anteils von tiefem Grundwasser am Abfluss mit der Zunahme der EZG-Größe erfolgt. Aus den in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnissen wird allerdings ersichtlicht, dass v.a. Teilbereiche eines EZGs herausgegriffen und betrachtet werden müssen. Morphologische Faktoren wie z.B. eine Aufweitung des Talquerschnitts mit anschliessender Talverengung flussabwärts können eine wesentlich größere Rolle spielen als die Zunahme der kummulativen Fläche.

Die Aussagekraft, der für die statistischen Analyse verwendeten Zahlenwerte muss für einige Faktoren angezweifelt werden. So hat z.B. die Mittelwertbildung eines XYZ-Rasters für den Z-Wert Hangwölbung sehr wenig Aussagekraft über tatsächliche Fließprozesse (Konvergenz-Divergenz) in diesem Hang. Hier wäre eine andere Form der Klassifikation sicherlich sinnvoller gewesen. Vorstellbar wäre in diesem Zusammenhang eine tatsächliche Kartierung und Klassifizierung von Hangabschnitten und deren Lage zum Gerinnebett.

Sicherlich ist auch eine weiterführende und vertiefende Untersuchung der geologischen Einflussfaktoren durchzuführen. Dies zeichnete sich im Verlauf der Arbeit ab, war aber im gestellten Rahmen und den gegebenen Voraussetzungen nur begrenzt möglich. Hier könnten geoelektrische Untersuchungsmethoden zur genaueren Identifikation von Situationen und insbesondere von Inhomogenitäten in der Geologie bzw. Hydrogeologie hilfreich sein.

Weiterhin muss antropogene Beeinflussung der EZGe durch Straßenbau, Drainagegräben, Bodenverdichtung usw. untersucht werden. Dies dürfte die räumliche und zeitliche Variabilität von Abfluss entlang eines Gerinnenetzes erheblich beeinflussen. Da diese Faktoren und deren Einflussnahme nicht oder nur sehr bedingt durch Fernerkundung erfasst werden kann, sollten für derartige Untersuchungen möglichst naturbelassene EZGe genutzt werden bzw. ausführliche Feldbegehungen zur Kartierung und Erklärung der antropogenen Beeinflussung durchgeführt werden. Außerdem muss eine kontinuierliche Abflussmessung an zumindest einem Punkt nahe des Gebietesauslasses über die Dauer der Messkampagnen erfolgen. Dadurch kann eine bessere Einordnung der Messungen in den zeitlichen Kontext erfolgen, also auch ein Bezug zur Abflusssituation und deren Veränderung innerhalb eines Gebiets hergestellt werden.

Es muss eine differenziertere Betrachtung der Einzugsgebiete erfolgen, um Zusammenhänge zwischen topographischen und geologischen Faktoren herausarbeiten zu können. Es erscheint nicht ausreichend, aus einem digitalen Höhenmodell primäre und sekundäre topographische Attribute abzuleiten und diese als repräsentativ für das jeweilige Teileinzugsgebiet anzusehen.

Da die räumliche Verteilung und die Wechselbeziehungen dieser topographische Faktoren durch ein digitales Höhenmodell unzureichend erfasst werden können, bieten auftretende, kleinskaligere Besonderheiten im Gelände genügend Anhaltspunkte die verwendete Methodik im Einzelfall prüfen zu müssen. So ergeben bestimmte Hangcharakteristika zwar potentiell hohe Abflussspende im Sinne der angewandten Methodik, Einblicke in Drainage solcher Hänge können jedoch nur vor Ort gewonnen werden.

A Tabellen der Abflussspenden und Einflussfaktoren

Die folgenden Tabellen beinhalten sämtliche in dieser Arbeit erhobenen topographischen und geologischen Parameter für alle drei EZGe.

TEZG	Fläche	$\mathbf{q}\mathbf{A}$	$\delta \mathbf{q} \mathbf{A}$	\mathbf{qB}	$\delta \ \mathbf{qB}$	\mathbf{qC}	$\delta \ \mathbf{qC}$
[-]	$[km^2]$	$\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$	$\left[\frac{l}{s\cdot km^2}\right]$	$\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$	$\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$	$\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$	$\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$
1	1,94	2,30	0,05	1,69	0,04	0,87	0,03
2	2,12	7,85	0,26	6,79	0,24	7,09	0,29
3	1,69	6,24	0,19	5,33	0,17	4,90	0,17
4	2,18	5,29	0,26	5,70	0,30	6, 14	0,34
5	1,91	5,40	0,18	4,59	0,17	4,69	0,17
6	1,82	13,73	0, 91	5,42	0,42	5,86	0,45
7	1,98	$1,\!99$	0,18	1,39	$0,\!13$	1,38	0,12
8	2,39	16,41	1,53	7,59	0,73	7,18	0,69
9	1,73	-11,92	1,06	6,90	0,71	5,82	0,61
10	1,22	1,16	0,04	1,06	$0,\!04$	1,02	0,04
11	2,28	0,43	0,04	0,75	0,07	3,11	0,30
12	1,96	4,07	0,28	0,33	0,02	2,48	0, 16
13	1,95	0,26	0,02	0,00	0,00	$0,\!00$	0,00
14	1,91	1,06	0,08	0,68	0,06	$0,\!34$	0,03
15	1,89	0,33	0,04	0,05	0,01	$0,\!67$	0,07
16	2,06	5,29	0,45	4,78	0,50	6,79	0,57
17	1,98	1,76	0, 14	1,25	$0,\!12$	4,13	0,31
18	1,76	$^{-2,80}$	$_{0,23}$	2,76	0,25	9,08	0,74
19	15,55	0,60	$_{0,05}$	0,88	0,09	2,55	0,20
TEZG	qMean	δ qMean	Acker	Grünland	Wald	Siedlung	\mathbf{T}_{luft}
TEZG [-]	$\mathbf{qMean} \ [rac{l}{s\cdot km^2}]$	δ qMean $[rac{l}{s \cdot km^2}]$	Acker [-]	Grünland [-]	Wald [-]	Siedlung [-]	T _{luft} SHJ [°C]
TEZG [-] 1	qMean $[\frac{l}{s \cdot km^2}]$ 1,62	δ qMean $\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$ 0.07	Acker [-]	Grünland [-] 0,358	Wald [-]	Siedlung [-]	T _{luft} SHJ [° C] 15.00
TEZG [-] 1 2	qMean $[\frac{l}{s \cdot km^2}]$ 1,62 7,24	$\delta \mathbf{qMean}$ $\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$ $0,07$ $0,46$	Acker [-] 0,299 0,072	Grünland [-] 0,358 0,139	Wald [-] 0,137 0,603	Siedlung [-] 0,030 0,002	T _{luft} SHJ [° C] 15,00 14,60
TEZG [-] 1 2 3	qMean $\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$ 1,62 7,24 5,49	$δ$ qMean $[\frac{l}{s \cdot km^2}]$ 0,07 0,46 0,31	Acker [-] 0,299 0,072 0,003	Grünland [-] 0,358 0,139 0,254	Wald [-] 0,137 0,603 0,710	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000	$\begin{array}{c} {\bf T}_{luft} \\ {\bf SHJ} \ [^{\circ}{\bf C}] \\ \\ 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \end{array}$
TEZG [-] 1 2 3 4	qMean $\left[\frac{l}{s \cdot km^{2}}\right]$ 1,62 7,24 5,49 5,71	δ qMean [$\frac{l}{s \cdot km^2}$] 0,07 0,46 0,31 0,52	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,006	Grünland [-] 0,358 0,139 0,254 0,159	Wald [-] 0,137 0,603 0,710 0,805	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000 0,000	$\begin{array}{c} {\bf T}_{luft} \\ {\bf SHJ} \ [^{\circ}{\bf C}] \\ \hline 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \end{array}$
TEZG [-] 1 2 3 4 5	$\begin{array}{c} \mathbf{qMean} \\ \hline [\frac{l}{s\cdot km^2}] \\ 1.62 \\ 7.24 \\ 5.49 \\ 5.71 \\ 4.89 \end{array}$	$\delta \text{ qMean} \\ \left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right] \\ 0,07 \\ 0,46 \\ 0,31 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 0,52 \\ $	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,006 0,003	Grünland [-] 0,358 0,139 0,254 0,159 0,033	Wald [-] 0,137 0,603 0,710 0,805 0,962	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000 0,000 0,000	$\begin{array}{c} \mathbf{T}_{luft} \\ \textbf{SHJ [°C]} \\ 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \\ 14,86 \end{array}$
TEZG [-] 1 2 3 4 5 6	$\begin{array}{c} \mathbf{qMean} \\ \hline [\frac{l}{s\cdot km^2}] \\ 1.62 \\ 7.24 \\ 5.49 \\ 5.71 \\ 4.89 \\ 8.34 \end{array}$	$\delta \text{ qMean} \\ \begin{bmatrix} \frac{l}{s \cdot km^2} \end{bmatrix} \\ 0,07 \\ 0,46 \\ 0,31 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 1,06 \end{bmatrix}$	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,006 0,003 0,000	Grünland [-] 0,358 0,139 0,254 0,159 0,033 0,033	Wald [-] 0,137 0,603 0,710 0,805 0,962 0,966	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000 0,000 0,000 0,000	$\begin{array}{c} \mathbf{T}_{luft} \\ \textbf{SHJ [°C]} \\ 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \\ 14,86 \\ 14,65 \end{array}$
TEZG [-] 1 2 3 4 5 6 7	$\begin{array}{c} \mathbf{qMean} \\ \hline [\frac{l}{s\cdot km^2}] \\ 1.62 \\ 7.24 \\ 5.49 \\ 5.71 \\ 4.89 \\ 8.34 \\ 1.59 \end{array}$	$\delta \mathbf{qMean} \\ \begin{bmatrix} l \\ s \cdot km^2 \end{bmatrix} \\ 0,07 \\ 0,46 \\ 0,31 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 1,06 \\ 0,25 \end{bmatrix}$	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,000 0,003 0,000 0,134	Grünland [-] 0,358 0,139 0,254 0,159 0,033 0,033 0,033 0,423	Wald [-] 0,137 0,603 0,710 0,805 0,962 0,966 0,176	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,064	$\begin{array}{c} \mathbf{T}_{luft} \\ \textbf{SHJ [°C]} \\ 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \\ 14,86 \\ 14,65 \\ 14,61 \end{array}$
TEZG [-] 1 2 3 4 5 6 7 8	$\begin{array}{c} \mathbf{qMean} \\ [\frac{l}{s\cdot km^2}] \\ 1.62 \\ 7.24 \\ 5.49 \\ 5.71 \\ 4.89 \\ 8.34 \\ 1.59 \\ 10.39 \end{array}$	$ \delta \mathbf{qMean} \begin{bmatrix} l \\ s \cdot km^2 \end{bmatrix} $ 0,07 0,46 0,31 0,52 0,30 1,06 0,25 1,71	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,003 0,000 0,003 0,000 0,134 0,102	Grünland [-] 0,358 0,139 0,254 0,159 0,033 0,033 0,033 0,423 0,074	Wald [-] 0,137 0,603 0,710 0,805 0,962 0,966 0,176 0,652	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000 0,000 0,000 0,000 0,064 0,001	$\begin{array}{c} \mathbf{T}_{luft} \\ \textbf{SHJ [°C]} \\ 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \\ 14,86 \\ 14,65 \\ 14,61 \\ 15,17 \end{array}$
TEZG [-] 1 2 3 4 5 6 7 8 9	$\begin{array}{c} \textbf{qMean} \\ \hline [\frac{l}{s \cdot km^2}] \\ \hline 1,62 \\ 7,24 \\ 5,49 \\ 5,71 \\ 4,89 \\ 8,34 \\ 1,59 \\ 10,39 \\ 0,27 \end{array}$	$ \begin{array}{c} \delta \ \mathbf{qMean} \\ \hline \left[\frac{l}{s \cdot km^2} \right] \\ 0,07 \\ 0,46 \\ 0,31 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 1,06 \\ 0,25 \\ 1,71 \\ 0,05 \end{array} $	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,003 0,000 0,134 0,102 0,000	Grünland [-] 0,358 0,139 0,254 0,159 0,033 0,033 0,033 0,423 0,074 0,068	Wald [-] 0,137 0,603 0,710 0,805 0,962 0,966 0,176 0,652 0,928	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000 0,000 0,000 0,000 0,064 0,001 0,000	$\begin{array}{c c} \mathbf{T}_{luft} \\ \textbf{SHJ} \ [^{\circ}\mathbf{C}] \\ \hline 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \\ 14,86 \\ 14,65 \\ 14,61 \\ 15,17 \\ 14,66 \\ \end{array}$
TEZG [-] 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	$\begin{array}{c} \mathbf{qMean} \\ \hline [\frac{l}{s\cdot km^2}] \\ 1,62 \\ 7,24 \\ 5,49 \\ 5,71 \\ 4,89 \\ 8,34 \\ 1,59 \\ 10,39 \\ 0,27 \\ 1,08 \end{array}$	$ \delta \mathbf{qMean} \\ \begin{bmatrix} l \\ s \cdot km^2 \end{bmatrix} \\ 0,07 \\ 0,46 \\ 0,31 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 1,06 \\ 0,25 \\ 1,71 \\ 0,05 \\ 0,07 \end{bmatrix} $	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,000 0,003 0,000 0,134 0,102 0,000 0,166	Grünland [-] 0,358 0,139 0,254 0,159 0,033 0,033 0,423 0,074 0,068 0,185	Wald [-] 0,137 0,603 0,710 0,805 0,962 0,966 0,176 0,652 0,928 0,433	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000 0,000 0,000 0,000 0,064 0,001 0,000 0,000	$\begin{array}{c} \mathbf{T}_{luft} \\ \textbf{SHJ [°C]} \\ \hline 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \\ 14,86 \\ 14,65 \\ 14,65 \\ 14,61 \\ 15,17 \\ 14,66 \\ 15,02 \\ \end{array}$
TEZG [-] 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11	$\begin{array}{c} \mathbf{qMean} \\ \hline [\frac{l}{s\cdot km^2}] \\ 1,62 \\ 7,24 \\ 5,49 \\ 5,71 \\ 4,89 \\ 8,34 \\ 1,59 \\ 10,39 \\ 0,27 \\ 1,08 \\ 1,43 \end{array}$	$ \delta \ \mathbf{qMean} \\ \left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right] \\ 0,07 \\ 0,46 \\ 0,31 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 1,06 \\ 0,25 \\ 1,71 \\ 0,05 \\ 0,07 \\ 0,23 \\ \end{array} $	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,000 0,003 0,000 0,134 0,102 0,000 0,166 0,008	Grünland [-] 0,358 0,139 0,254 0,159 0,033 0,033 0,033 0,423 0,074 0,068 0,185 0,058	$\begin{array}{c} \textbf{Wald} \\ \hline [-] \\ 0,137 \\ 0,603 \\ 0,710 \\ 0,805 \\ 0,962 \\ 0,966 \\ 0,176 \\ 0,652 \\ 0,928 \\ 0,433 \\ 0,923 \end{array}$	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000 0,000 0,000 0,000 0,064 0,001 0,000 0,000 0,000	$\begin{array}{c} \mathbf{T}_{luft} \\ \textbf{SHJ [°C]} \\ \hline 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \\ 14,86 \\ 14,65 \\ 14,65 \\ 14,61 \\ 15,17 \\ 14,66 \\ 15,02 \\ 14,52 \\ \end{array}$
TEZG [-] 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	$\begin{array}{c} \mathbf{qMean} \\ \hline [\frac{l}{s\cdot km^2}] \\ 1,62 \\ 7,24 \\ 5,49 \\ 5,71 \\ 4,89 \\ 8,34 \\ 1,59 \\ 10,39 \\ 0,27 \\ 1,08 \\ 1,43 \\ 2,29 \end{array}$	$ \delta \ \mathbf{qMean} \\ \left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right] \\ 0,07 \\ 0,46 \\ 0,31 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 1,06 \\ 0,25 \\ 1,71 \\ 0,05 \\ 0,07 \\ 0,23 \\ 0,26 \\ \end{array} $	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,006 0,003 0,000 0,134 0,102 0,000 0,166 0,008 0,000	$\begin{array}{c} {\bf Gr\ddot{u}nland}\\[-]\\0,358\\0,139\\0,254\\0,159\\0,033\\0,033\\0,033\\0,423\\0,074\\0,068\\0,185\\0,058\\0,032\end{array}$	$\begin{array}{c} \textbf{Wald} \\ \hline [-] \\ 0,137 \\ 0,603 \\ 0,710 \\ 0,805 \\ 0,962 \\ 0,966 \\ 0,176 \\ 0,652 \\ 0,928 \\ 0,433 \\ 0,923 \\ 0,968 \end{array}$	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000 0,000 0,000 0,000 0,064 0,001 0,000 0,000 0,000 0,000	$\begin{array}{c c} \mathbf{T}_{luft} \\ \textbf{SHJ} \ [^{\circ}\mathbf{C}] \\ \hline 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \\ 14,86 \\ 14,65 \\ 14,65 \\ 14,61 \\ 15,17 \\ 14,66 \\ 15,02 \\ 14,52 \\ 14,50 \\ \end{array}$
TEZG [-] 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	$\begin{array}{c} \textbf{qMean} \\ \hline [\frac{l}{s\cdot km^2}] \\ \hline 1,62 \\ 7,24 \\ 5,49 \\ 5,71 \\ 4,89 \\ 8,34 \\ 1,59 \\ 10,39 \\ 0,27 \\ 1,08 \\ 1,43 \\ 2,29 \\ 0,09 \end{array}$	$ \delta \mathbf{qMean} \\ \left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right] \\ 0,07 \\ 0,46 \\ 0,31 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 1,06 \\ 0,25 \\ 1,71 \\ 0,05 \\ 0,07 \\ 0,23 \\ 0,26 \\ 0,02 \\ \end{array} $	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,003 0,000 0,134 0,102 0,000 0,166 0,008 0,000 0,116	$\begin{array}{c} {\bf Gr\ddot{u}nland} \\ \hline [-] \\ 0,358 \\ 0,139 \\ 0,254 \\ 0,159 \\ 0,033 \\ 0,033 \\ 0,033 \\ 0,423 \\ 0,074 \\ 0,068 \\ 0,185 \\ 0,058 \\ 0,032 \\ 0,007 \end{array}$	$\begin{array}{c} \textbf{Wald} \\ \hline [-] \\ 0,137 \\ 0,603 \\ 0,710 \\ 0,805 \\ 0,962 \\ 0,966 \\ 0,176 \\ 0,652 \\ 0,928 \\ 0,433 \\ 0,923 \\ 0,968 \\ 0,870 \end{array}$	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000 0,000 0,000 0,000 0,001 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000	$\begin{array}{c c} \mathbf{T}_{luft} \\ \textbf{SHJ} \ [^{\circ}\mathbf{C}] \\ \hline 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \\ 14,86 \\ 14,65 \\ 14,65 \\ 14,61 \\ 15,17 \\ 14,66 \\ 15,02 \\ 14,52 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ \end{array}$
TEZG [-] 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	$\begin{array}{c} \mathbf{qMean} \\ \hline [\frac{l}{s\cdot km^2}] \\ \hline 1,62 \\ 7,24 \\ 5,49 \\ 5,71 \\ 4,89 \\ 8,34 \\ 1,59 \\ 10,39 \\ 0,27 \\ 1,08 \\ 1,43 \\ 2,29 \\ 0,09 \\ 0,70 \end{array}$	$ \delta \ \mathbf{qMean} \\ \left[\frac{l}{s \cdot km^2} \right] \\ 0,07 \\ 0,46 \\ 0,31 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 1,06 \\ 0,25 \\ 1,71 \\ 0,05 \\ 0,07 \\ 0,23 \\ 0,26 \\ 0,02 \\ 0,10 \\ \end{array} $	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,006 0,003 0,000 0,134 0,102 0,000 0,166 0,008 0,000 0,116 0,196	$\begin{array}{c} {\bf Gr\ddot{u}nland} \\ \hline [-] \\ 0,358 \\ 0,139 \\ 0,254 \\ 0,159 \\ 0,033 \\ 0,033 \\ 0,033 \\ 0,423 \\ 0,074 \\ 0,068 \\ 0,185 \\ 0,074 \\ 0,068 \\ 0,185 \\ 0,058 \\ 0,032 \\ 0,007 \\ 0,275 \end{array}$	$\begin{array}{c} \textbf{Wald} \\ \hline [-] \\ 0,137 \\ 0,603 \\ 0,710 \\ 0,805 \\ 0,962 \\ 0,966 \\ 0,176 \\ 0,652 \\ 0,928 \\ 0,433 \\ 0,923 \\ 0,968 \\ 0,870 \\ 0,369 \\ \end{array}$	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000 0,000 0,000 0,064 0,001 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000	$\begin{array}{c c} \mathbf{T}_{luft} \\ \textbf{SHJ} \ [^{\circ}\mathbf{C}] \\ \hline 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \\ 14,86 \\ 14,65 \\ 14,61 \\ 15,17 \\ 14,66 \\ 15,02 \\ 14,52 \\ 14,50 \\$
TEZG [-] 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15	$\begin{array}{c} \mathbf{qMean} \\ \hline [\frac{l}{s\cdot km^2}] \\ \hline 1,62 \\ 7,24 \\ 5,49 \\ 5,71 \\ 4,89 \\ 8,34 \\ 1,59 \\ 10,39 \\ 0,27 \\ 1,08 \\ 1,43 \\ 2,29 \\ 0,09 \\ 0,70 \\ 0,35 \end{array}$	$ \delta \ \mathbf{qMean} \\ \left[\frac{l}{s \cdot km^2} \right] \\ 0,07 \\ 0,46 \\ 0,31 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 1,06 \\ 0,25 \\ 1,71 \\ 0,05 \\ 0,07 \\ 0,23 \\ 0,26 \\ 0,02 \\ 0,10 \\ 0,07 \\ 0,0$	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,006 0,003 0,000 0,134 0,102 0,000 0,166 0,008 0,000 0,116 0,196 0,008	$\begin{array}{c} {\bf Gr\ddot{u}nland}\\[-]\\0,358\\0,139\\0,254\\0,159\\0,033\\0,033\\0,033\\0,423\\0,074\\0,068\\0,185\\0,074\\0,068\\0,185\\0,058\\0,032\\0,007\\0,275\\0,013\end{array}$	$\begin{array}{c} \textbf{Wald} \\ \hline [-] \\ 0,137 \\ 0,603 \\ 0,710 \\ 0,805 \\ 0,962 \\ 0,966 \\ 0,176 \\ 0,652 \\ 0,928 \\ 0,433 \\ 0,923 \\ 0,923 \\ 0,968 \\ 0,870 \\ 0,369 \\ 0,969 \\ \end{array}$	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000 0,000 0,000 0,064 0,001 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000	$\begin{array}{c c} \mathbf{T}_{luft} \\ \textbf{SHJ} \ [^{\circ}\mathbf{C}] \\ \hline 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \\ 14,86 \\ 14,65 \\ 14,61 \\ 15,17 \\ 14,66 \\ 15,02 \\ 14,52 \\ 14,50 \\$
TEZG [-] 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16	$\begin{array}{c} \mathbf{qMean} \\ \hline [\frac{l}{s\cdot km^2}] \\ \hline 1,62 \\ 7,24 \\ 5,49 \\ 5,71 \\ 4,89 \\ 8,34 \\ 1,59 \\ 10,39 \\ 0,27 \\ 1,08 \\ 1,43 \\ 2,29 \\ 0,09 \\ 0,70 \\ 0,35 \\ 5,62 \end{array}$	$ \delta \ \mathbf{qMean} \\ \left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right] \\ 0,07 \\ 0,46 \\ 0,31 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 1,06 \\ 0,25 \\ 1,71 \\ 0,05 \\ 0,07 \\ 0,23 \\ 0,26 \\ 0,02 \\ 0,10 \\ 0,07 \\ 0,89 \\ \end{array} $	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,006 0,003 0,000 0,134 0,102 0,000 0,166 0,008 0,000 0,116 0,196 0,008 0,000	$\begin{array}{c} {\bf Gr\ddot{u}nland}\\[-]\\0,358\\0,139\\0,254\\0,159\\0,033\\0,033\\0,033\\0,423\\0,074\\0,068\\0,185\\0,074\\0,068\\0,185\\0,058\\0,032\\0,007\\0,275\\0,013\\0,014\end{array}$	$\begin{array}{c} \textbf{Wald} \\ \hline [-] \\ 0,137 \\ 0,603 \\ 0,710 \\ 0,805 \\ 0,962 \\ 0,966 \\ 0,176 \\ 0,652 \\ 0,928 \\ 0,433 \\ 0,923 \\ 0,923 \\ 0,968 \\ 0,870 \\ 0,369 \\ 0,969 \\ 0,981 \\ \end{array}$	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000 0,000 0,000 0,064 0,001 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000	$\begin{array}{c c} \mathbf{T}_{luft} \\ \textbf{SHJ} \ [^{\circ}\mathbf{C}] \\ \hline 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \\ 14,86 \\ 14,65 \\ 14,65 \\ 14,61 \\ 15,17 \\ 14,66 \\ 15,02 \\ 14,52 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 15,02 \\ \end{array}$
TEZG [-] 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17	$\begin{array}{c} \mathbf{qMean} \\ \hline [\frac{l}{s\cdot km^2}] \\ \hline 1,62 \\ 7,24 \\ 5,49 \\ 5,71 \\ 4,89 \\ 8,34 \\ 1,59 \\ 10,39 \\ 0,27 \\ 1,08 \\ 1,43 \\ 2,29 \\ 0,09 \\ 0,70 \\ 0,35 \\ 5,62 \\ 2,38 \end{array}$	$ \delta \ \mathbf{qMean} \\ \left[\frac{l}{s \cdot km^2} \right] \\ 0,07 \\ 0,46 \\ 0,31 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 1,06 \\ 0,25 \\ 1,71 \\ 0,05 \\ 0,07 \\ 0,23 \\ 0,26 \\ 0,02 \\ 0,10 \\ 0,07 \\ 0,89 \\ 0,34 \\ \end{array} $	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,006 0,003 0,000 0,134 0,102 0,000 0,166 0,008 0,000 0,116 0,196 0,008 0,000 0,116	$\begin{array}{c} {\bf Gr\ddot{u}nland} \\ \hline [-] \\ 0,358 \\ 0,139 \\ 0,254 \\ 0,159 \\ 0,033 \\ 0,033 \\ 0,033 \\ 0,423 \\ 0,074 \\ 0,068 \\ 0,185 \\ 0,074 \\ 0,068 \\ 0,185 \\ 0,058 \\ 0,032 \\ 0,007 \\ 0,275 \\ 0,013 \\ 0,014 \\ 0,149 \end{array}$	$\begin{array}{c} \textbf{Wald} \\ \hline [-] \\ 0,137 \\ 0,603 \\ 0,710 \\ 0,805 \\ 0,962 \\ 0,966 \\ 0,176 \\ 0,652 \\ 0,928 \\ 0,433 \\ 0,923 \\ 0,923 \\ 0,968 \\ 0,870 \\ 0,369 \\ 0,969 \\ 0,981 \\ 0,760 \end{array}$	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000	$\begin{array}{c c} \mathbf{T}_{luft} \\ \textbf{SHJ} \ [^{\circ}\mathbf{C}] \\ \hline 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \\ 14,65 \\ 14,65 \\ 14,65 \\ 14,61 \\ 15,17 \\ 14,66 \\ 15,02 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 15,02 \\ 15,13 \\ \end{array}$
TEZG [-] 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18	$\begin{array}{c} \textbf{qMean} \\ \hline [\frac{l}{s\cdot km^2}] \\ 1,62 \\ 7,24 \\ 5,49 \\ 5,71 \\ 4,89 \\ 8,34 \\ 1,59 \\ 10,39 \\ 0,27 \\ 1,08 \\ 1,43 \\ 2,29 \\ 0,09 \\ 0,70 \\ 0,35 \\ 5,62 \\ 2,38 \\ 3,01 \end{array}$	$ \begin{array}{c} \delta \ \mathbf{qMean} \\ \hline \left[\frac{l}{s \cdot km^2} \right] \\ 0,07 \\ 0,46 \\ 0,31 \\ 0,52 \\ 0,30 \\ 1,06 \\ 0,25 \\ 1,71 \\ 0,05 \\ 0,07 \\ 0,23 \\ 0,26 \\ 0,02 \\ 0,10 \\ 0,07 \\ 0,89 \\ 0,34 \\ 0,44 \end{array} $	Acker [-] 0,299 0,072 0,003 0,006 0,003 0,000 0,134 0,102 0,000 0,166 0,008 0,000 0,116 0,196 0,008 0,000 0,116 0,196 0,008	$\begin{array}{c} {\bf Gr\ddot{u}nland} \\ \hline [-] \\ 0,358 \\ 0,139 \\ 0,254 \\ 0,159 \\ 0,033 \\ 0,033 \\ 0,033 \\ 0,423 \\ 0,074 \\ 0,068 \\ 0,185 \\ 0,058 \\ 0,058 \\ 0,032 \\ 0,007 \\ 0,275 \\ 0,013 \\ 0,014 \\ 0,149 \\ 0,201 \end{array}$	$\begin{array}{c} \textbf{Wald} \\ \hline [-] \\ 0,137 \\ 0,603 \\ 0,710 \\ 0,805 \\ 0,962 \\ 0,966 \\ 0,176 \\ 0,652 \\ 0,928 \\ 0,433 \\ 0,928 \\ 0,433 \\ 0,923 \\ 0,968 \\ 0,870 \\ 0,369 \\ 0,969 \\ 0,981 \\ 0,760 \\ 0,605 \\ \end{array}$	Siedlung [-] 0,030 0,002 0,000	$\begin{array}{c c} \mathbf{T}_{luft} \\ \textbf{SHJ} \ [^{\circ}\mathbf{C}] \\ \hline 15,00 \\ 14,60 \\ 14,92 \\ 14,55 \\ 14,86 \\ 14,65 \\ 14,61 \\ 15,17 \\ 14,66 \\ 15,02 \\ 14,52 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 14,50 \\ 15,02 \\ 15,13 \\ 15,28 \end{array}$

A.1 Bleiche

TEZG	NS	korr. NS	pot. ETP	akt. ETP	\mathbf{W} bilanz	Versiegelt	Höhe
[-]	SHJ [mm]	SHJ [mm]	SHJ [mm]	$\left[\frac{mm}{a}\right]$	HSHJ [mm]	[-]	[m ü.NN]
1	679,41	650,00	434,94	575,60	257, 39	0,094	425, 49
2	$684,\!58$	647, 47	421,90	608, 44	$267,\!55$	0,104	428, 45
3	711, 94	629,07	412,32	653, 38	$235,\!84$	0,096	462,83
4	$691,\!37$	599,57	432,95	627, 40	$236,\!80$	0,101	$425,\!81$
5	690, 42	648, 92	$427,\!62$	690, 30	293, 32	0,079	$425,\!62$
6	$675,\!00$	$606,\!65$	$448,\!34$	647, 93	240,71	0,074	358,03
7	672, 24	650,00	439,30	589,47	$292,\!59$	$0,\!129$	403,03
8	$675,\!00$	647, 98	442,45	622,71	$251,\!88$	0,094	392,73
9	$675,\!00$	$592,\!24$	$447,\!94$	646, 74	226, 19	0,087	$382,\!55$
10	638, 45	649,90	441, 91	584, 14	265, 32	0,103	418,78
11	$643,\!05$	600, 49	452,75	$625,\!04$	$228,\!56$	0,064	357,02
12	$625,\!00$	$612,\!07$	$453,\!30$	721,76	$225,\!67$	0,070	$356,\!17$
13	637, 43	650,00	437,50	712,16	279,52	0,086	409,22
14	653, 46	650,00	437,50	$641,\!37$	296, 17	0,111	409,22
15	$625,\!00$	650,00	437,50	748,71	299,80	0,080	399,88
16	$625,\!00$	$650,\!00$	$436,\!88$	$715,\!05$	$289,\!32$	0,072	377, 21
17	$625,\!00$	650,00	428, 21	660, 27	268, 12	0,085	385, 83
18	617, 92	585, 19	460,80	673, 82	$171,\!62$	0,088	265, 27
19	577, 15	$574,\!68$	467, 44	651, 18	$141,\!63$	0,130	239,34

TEZG	Strahlung	MRVBF	MRVBF	Neigung	HW	HW-	HW-
						norizontal	vertikal
[-]	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	[-]	med. [-]	[rad]	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$
1	2,294	0,277	0,089	0,136	-1,82E-04	-6,21E-05	$-1,20{ m E}-04$
2	2,261	0,210	$0,\!052$	0,188	-6,88E-05	-2,18E-05	$-4,70\mathrm{E}{-}05$
3	2,365	0,142	0,035	0,226	-2,50E-04	$-6,20 ext{E}-05$	$-1,88 \mathrm{E}{-}04$
4	2,168	0,142	0,027	0,242	$1,\!49E-05$	1,62E-04	$-1,47 \mathrm{E}{-}04$
5	2,308	0,161	0,035	0,215	-1,22E-04	-8,97E-05	$-3,20 \mathrm{E}{-}05$
6	2,364	0,093	0,009	0,339	-4,48E-05	$3,70\mathrm{E}\text{-}04$	$-4,15\mathrm{E}{-}04$
7	2,251	0,268	$0,\!112$	0,127	-6,27E-05	-7,25E-05	$9,76{ m E}{ m -}06$
8	$2,\!301$	0,220	0,057	0,180	2,85E-05	$2,69\mathrm{E}{-}05$	$1,\!60{ m E}{ m -}06$
9	2,411	0,165	0,017	0,269	-1,16E-04	1,86E-04	$-3,03 \mathrm{E}{-}04$
10	2,099	0,249	0,088	0,164	$-3,\!63E-05$	$-8,20 ext{E}-05$	$4,\!57 \mathrm{E}{-}05$
11	$2,\!293$	0,144	0,013	0,284	-2,51E-05	$2,97 ext{E-04}$	$-3,22 \mathrm{E}{-}04$
12	2,271	0,155	0,020	0,252	-1,25E-04	1,04E-04	$-2,29\mathrm{E}{-}04$
13	2,292	0,366	0,103	0,120	-1,11E-04	2,14E-05	$-1,33\mathrm{E}{-}04$
14	2,356	0,310	$0,\!112$	$0,\!125$	$-2,\!64E-05$	$3,55\mathrm{E} ext{-}05$	$-6, 19 \mathrm{E}{-}05$
15	$2,\!265$	0,292	0,051	0,184	-2,44E-04	2,34E-04	$-4,77 \mathrm{E}{-}04$
16	$2,\!156$	0,148	0,015	0,275	-1,05E-04	1,26E-04	$-2,31\mathrm{E}{-}04$
17	2,285	0,202	0,043	0,214	9,59E-07	1,06E-04	$-1,05{ m E}{-}04$
18	2,377	0,330	0,018	0,245	1,16E-05	5,03E-04	$-4,91 ext{E-04}$
19	2,226	0,689	0,138	0,119	-8,57E-05	4,64E-05	$-1,32 \mathrm{E}{-}04$

\mathbf{LF}	KF	Speicher	торо	HW-	ГЕZG
				tangential	
$\left[\frac{\mu S}{cm}\right]$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	[-]	[-]	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$	[-]
278,50	1,83E-06	7,70	11,09	1,01E-06	1
156,75	$8,55 ext{E-06}$	3,69	10,93	$1,69\mathrm{E}{-}05$	2
115,00	$1,60 \pm 0.05$	4,22	10,66	$2,06\mathrm{E}$ -06	3
110,86	$1,92 ext{E-05}$	3,00	10,67	$8,37 ext{E-05}$	4
99,33	$2,43 ext{E-05}$	3,67	10,70	$3,02 ext{E-06}$	5
154,80	2,61E-05	2,07	10,57	$1,65 ext{E-04}$	6
466,83	2,91E-06	$7,\!96$	11,10	$-1,06 ext{E}-07$	7
241,79	1,16E-05	4,66	10,97	2,27E-05	8
203,83	2,44E-05	3,74	10,70	$1,12 ext{E-04}$	9
109,50	7,24E-06	5,71	11,07	-2,07E-05	10
NA	$1,98 ext{E-05}$	3,78	10,77	$1,30\mathrm{E}{-}04$	11
167,86	1,46 E-05	6, 46	10,86	$6,88 ext{E-05}$	12
ΝA	1,00E-06	8,20	11,08	1,02E-05	13
326,00	$3,37 ext{E-06}$	8,53	11,09	2,14E-05	14
245,64	$1,04\mathrm{E}{-}05$	6,76	11,01	$^{8,82\mathrm{E}-05}$	15
210,25	2,02E-05	6, 14	10,75	7,14E-05	16
190,01	$1,25 ext{E-05}$	5,69	10,93	$5,75\mathrm{E}{-}05$	17
323,08	3,61E-04	8,25	11,24	1,67E-04	18
1080,06	4,98E-04	$9,\!61$	11,46	$9,79 ext{E-06}$	19

A.2 Brugga

TEZG	Fläche	$\mathbf{q}\mathbf{A}$	$\delta \mathbf{q} \mathbf{A}$	\mathbf{qB}	$\delta \ \mathbf{qB}$	\mathbf{qMean}	$\delta~{f qMean}$
[-]	$[km^2]$	$\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$					
1	2,23	12,22	0,30	11,85	0,30	12,03	0,43
2	1,61	11,90	1,11	33,08	2,91	22,49	2,88
3	1,85	8,80	0,79	19,50	0,99	$14,\!15$	1,46
4	1,94	5,14	0,70	5,96	$0,\!62$	$5,\!55$	0,96
5	1,59	$23,\!17$	1,97	23,95	1,47	$23,\!56$	2,47
6	2,08	$15,\!27$	1,52	38,78	$2,\!69$	27,02	3,27
7	1,75	8,07	0,79	-9,56	$0,\!66$	-0,74	-0,09
8	2,66	12,59	0,51	21,25	$0,\!64$	16,92	0,85
9	1,18	10,96	0, 21	15,25	0,27	$13,\!11$	0,34
10	2,05	6,92	0,43	13,60	$0,\!65$	10,26	0,81
11	1,98	33,91	3,03	56,73	3,48	45,32	4,91
12	1,82	3,19	0,09	3,48	0,09	3,33	0,12
13	1,92	8,58	0,77	1,78	0,12	5,18	0,58
14	2,01	39,77	3,18	-48,53	3,09	-4,38	-0,45
15	2,30	$18,\!23$	1,71	55,61	4,83	$36,\!92$	4,71
16	1,92	-190,07	19,08	-179,24	$15,\!63$	$-184,\!65$	-24,55
17	2,00	9,95	0,36	23,00	0,56	16,47	0,72
18	1,71	-17,73	1,27	-76,38	4,23	-47,06	-4,26
19	1,68	6,84	0,17	7,80	0,18	7,32	0,25
20	2,50	$157,\!65$	7,74	250,55	15,06	$204,\!10$	15,84
21	1, 49	2,75	0, 10	7,80	0,18	5,27	0,23
22	1,53	2,58	0,08	6, 46	0,14	4,52	0,17
23	0,65	0,00	$0,\!00$	0,00	0,00	$0,\!00$	0,00
24	1,57	0,96	0,09	4,30	0,16	$2,\!63$	0,26
25	3,01	-30,89	3,33	-65,00	4,42	-47,95	-6,11
26	1,87	12,80	0, 44	21,39	0,57	$17,\!09$	0,74
27	1,87	4,02	$_{0,25}$	6,89	0,31	5,46	0,41
28	2,40	3,20	0,21	5,88	0,28	4,54	0,36
29	1,78	$6,\!94$	$0,\!43$	8,23	0,38	$7,\!59$	0,58
30	2,11	1,52	$0,\!04$	4,68	0,09	3,10	0, 10
31	1,72	$27,\!84$	1,21	48,94	1,55	38,39	2,06

TEZG	Acker	Grünland	Wald	Siedlung	\mathbf{T}_{Luft}	NS	korr. NS
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	SHJ [°C]	SHJ [mm]	SHJ [mm]
1	0,00	$0,\!15$	$0,\!849$	0,000	9,973	$875,\!000$	$943,\!06$
2	0,00	$0,\!12$	0,886	0,000	5,958	$875,\!000$	$930,\!35$
3	$0,\!00$	0, 19	$0,\!800$	0,000	11,027	$875,\!000$	$903,\!62$
4	$0,\!00$	$0,\!16$	0,837	0,000	3,768	$875,\!000$	$863,\!53$
5	$0,\!00$	0,40	0,581	0,000	5,886	$872,\!658$	866, 10
6	$0,\!00$	0,27	0,718	0,006	8,289	$875,\!000$	$917,\!00$
7	$0,\!00$	0,05	$0,\!926$	0,018	10,134	$852,\!602$	$871,\!53$
8	0,00	$0,\!17$	0,819	0,000	5,091	$874,\!104$	917, 91
9	0,00	0,00	$0,\!999$	0,000	9,320	875,787	$968,\!59$
10	0,00	0,02	$0,\!979$	0,000	11,545	$873,\!596$	$972,\!62$
11	0,00	0, 39	$0,\!591$	0,000	7,527	$827,\!638$	$867,\!56$
12	0,00	$0,\!80$	0,096	0,065	6,616	$793,\!476$	896, 29
13	0,00	$0,\!41$	$0,\!585$	0,000	5,041	799,337	800,78
14	0,00	$0,\!05$	$0,\!936$	0,000	11,770	$826,\!515$	818,47
15	0,00	0,07	$0,\!926$	0,000	10,478	$795,\!188$	832,40
16	0,00	0,02	0,977	0,000	12,166	774,023	815,35
17	0,00	0,08	0,918	0,000	12,211	$741,\!554$	784,91
18	0,00	0,09	0,889	0,011	13,550	800,600	846,09
19	0,00	0,23	0,745	0,003	13,332	$744,\!491$	$751,\!27$
20	0,00	$0,\!52$	0,317	0,123	14,391	802,312	820,40
21	0,00	0,41	0,571	0,000	14,240	751,770	750,00
22	0,00	0,40	$0,\!584$	0,000	14,498	732,720	$694,\!63$
23	0,00	0,49	$0,\!474$	0,000	14,500	$725,\!152$	$655,\!94$
24	0,00	$0,\!55$	0,402	0,000	14,500	725,000	679,86
25	0,06	0,58	0,250	0,073	14,570	757,951	691,03
26	$0,\!00$	0, 11	0,882	0,000	12,176	$727,\!485$	$790,\!64$
27	$0,\!00$	0,08	0,918	0,000	12,981	$715,\!437$	784, 18
28	$0,\!00$	0, 11	0,880	0,003	14,035	$719,\!108$	760,88
29	0,00	0,25	0,714	0,023	14,348	$724,\!998$	699,65
30	0,00	0, 19	0,799	0,000	13,488	675,407	701,48
31	0,00	0,22	0,691	0,078	14,947	$694,\!829$	654, 46

MRVBF	$\mathbf{Strahlung}$	Höhe	Versiegelt	WBilanz	akt. ETP	pot. ETP	ГEZG
[-]	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	[m ü.NN]	[-]	HSHJ [mm]	$\left[\frac{mm}{a}\right]$	SHJ [mm]	[-]
0,05	2,183	1248,94	0,02	$752,\!50$	$495,\!03$	262,14	1
0,07	2,582	1139,26	0,04	685,74	510,04	272,33	2
0,05	1,908	1147, 39	0,05	695, 22	526, 32	278,24	3
0,08	2,869	1024,44	0,05	$596,\!68$	$540,\!54$	297, 36	4
0,09	$2,\!651$	1048, 83	0,04	$580,\!31$	552,36	301, 39	5
0,07	2,000	1038, 94	0,05	716, 19	539,91	280,73	6
0,05	2,414	$966,\!54$	0,07	621,71	568,20	303, 38	7
0,20	2,387	1100, 17	0,08	687,00	576, 82	290,75	8
0, 10	2,288	1130,84	0,06	718,59	575,00	282,85	9
0, 10	2,310	$1057,\!90$	0,06	$722,\!62$	595,71	281,85	10
0,14	2,377	998,84	0,07	633, 42	573,34	304, 15	11
0,12	2,582	1089,05	0,12	646, 56	500,03	299,06	12
0,06	2,696	953,42	0,08	550,78	576,95	314,65	13
0,06	2,279	855,87	0,05	568,47	576,65	320,38	14
0,05	2,258	888,55	0,06	$580,\!69$	598,10	315,00	15
0,05	2,178	827,88	0,05	517,86	613, 23	330,98	16
0,04	1,981	$928,\!60$	0,08	515, 84	618, 17	329,58	17
0,07	1,882	761,88	0,08	556,73	599, 49	333,00	18
0,06	2,350	748,28	0, 10	450,90	637, 82	369, 26	19
0,16	1,846	610, 31	0,15	491, 43	563,01	366, 26	20
0,11	1,928	$591,\!93$	0,09	396,93	629, 39	399,37	21
0,13	2,035	540,80	0,07	363,93	654, 49	412, 48	22
0,16	1,699	$454,\!01$	0, 10	305,94	644, 25	421,50	23
0,22	1,908	451, 12	0, 10	329, 31	653, 11	405,30	24
1,00	2,037	$417,\!67$	0,13	$300,\!54$	584, 45	419,25	25
0,05	2,004	1032,75	0,06	$540,\!64$	$574,\!67$	294,66	26
0,06	1,918	$804,\!63$	0,08	528, 47	614, 15	322,87	27
0,06	1,821	706, 49	0,07	$498,\!59$	$639,\!89$	344, 16	28
0,11	2,030	535,76	0, 10	377,04	688, 49	392, 61	29
0,07	1,967	$618,\!27$	0,07	$351,\!48$	$705,\!49$	380,46	30
0,13	2,130	$495,\!60$	0, 10	304,46	729,88	419,75	31

TEZG	MRVBF	Neigung	HW	HW-	HW-	HW-	торо
				horizontal	vertikal	tangential	
[-]	med. [-]	[rad]	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$	[-]
1	0,012	0,347	0,000	0,000	1,47E-04	-1,52E-04	$1,06{ m E}{+}01$
2	0,006	0,406	0,000	0,000	-2,15E-04	7,81E-05	$1,04{ m E}{+}01$
3	0,013	0,354	0,000	0,000	4,48E-05	-5,85E-05	$1,06\mathrm{E}{+}01$
4	0,004	0,437	0,000	0,000	-3,95 E-04	1,94E-04	$1,04{ m E}{+}01$
5	0,013	0,322	0,000	0,000	-2,81E-04	$8,53 ext{E-}05$	1,07E+01
6	0,008	0,380	0,000	0,000	$2,48 ext{E-05}$	-2,60E-05	$1,06{ m E}{+}01$
7	0,007	0,412	0,000	0,000	-1,14E-04	-3,51E-06	$1,\!06\mathrm{E}\!+\!01$
8	0,055	0,179	0,000	0,000	-8,61E-05	2,64E-06	$1,\!11E\!+\!01$
9	0,023	0,252	0,000	0,000	1,13E-04	-6,78E-05	$1,08{ m E}{+}01$
10	0,019	0,285	0,000	0,000	-6,29E-05	$3,75 ext{E-05}$	$1,08{ m E}{+}01$
11	0,029	0,241	0,000	0,000	-2,08 E-05	1,94E-05	$1,\!09\mathrm{E}\!+\!01$
12	0,027	0,262	0,000	0,000	-1,55E-04	-3,18E-05	$1,\!06\mathrm{E}\!+\!01$
13	0,010	0,379	0,000	0,000	-1,79E-04	1,28E-04	$1,\!05\mathrm{E}{+}01$
14	0,004	0,461	0,000	0,000	-4,72E-04	2,34E-04	1,04E+01
15	0,005	0,430	0,000	0,000	-7,21E-05	$5,02 ext{E-} 05$	1,04E+01
16	0,007	0,409	0,000	0,000	-2,39E-04	1,16E-04	$1,\!06\mathrm{E}\!+\!01$
17	0,012	0,351	0,000	0,000	1,40 E-04	$-3,60 \pm -05$	$1,\!07\mathrm{E}{+}01$
18	0,009	0,374	0,000	0,000	-3,42E-04	1,23E-04	$1,06{ m E}{+}01$
19	0,012	0,339	0,000	0,000	8,19E-05	$-3,80 \pm -05$	$1,\!05\mathrm{E}\!+\!01$
20	0,019	0,273	0,000	0,000	-2,03E-04	3,22E-05	$1,\!10\mathrm{E}{+}01$
21	0,014	0,316	0,000	0,000	-6,92E-05	1,12E-05	$1,\!05\mathrm{E}{+}01$
22	0,014	0,291	0,000	0,000	-4,86 E-05	1,34E-05	1,04E+01
23	0,020	0,262	0,000	0,000	-7,81E-05	$3,48\mathrm{E}{-}05$	$1,\!05\mathrm{E}\!+\!01$
24	0,029	0,245	0,000	0,000	-1,28E-04	$3,59\mathrm{E}{-}05$	$1,\!07\mathrm{E}{+}01$
25	0,549	0,130	0,000	0,000	-2,79E-04	$7,53 ext{E-05}$	$1,\!23\mathrm{E}{+}01$
26	0,006	0,415	-0,001	0,000	-1,56E-04	-1,77E-04	$1,\!03\mathrm{E}\!+\!01$
27	0,006	0,398	0,000	0,000	-4,18E-04	$^{8,05\mathrm{E}-05}$	$1,\!03\mathrm{E}\!+\!01$
28	0,007	0,386	0,000	0,000	-1,00E-04	$1,73\mathrm{E}{-}05$	$1,04{ m E}{+}01$
29	0,014	0,315	0,000	0,000	$-3,45 ext{E-04}$	1,18E-04	$1,\!06\mathrm{E}\!+\!01$
30	0,005	0,397	-0,001	0,000	-4,67E-04	$4,35\mathrm{E}{-}06$	$1,01{ m E}{+}01$
31	0,009	0,344	0,000	0,000	-5,39E-04	1,47E-04	$1,04\mathrm{E}{+}01$

TEZG	Speicher	KF	\mathbf{LF}
[-]	[-]	$\left[\frac{m}{s}\right]$	$\left[\frac{\mu S}{cm}\right]$
1	$5,33{ m E}{+}00$	0,00	30,00
2	$4,69{ m E}+00$	0,00	39,26
3	$6,76\mathrm{E}{+}00$	0,00	40,50
4	$5,25{ m E}\!+\!00$	0,00	59,46
5	6,31E+00	0,00	50,12
6	$6,34 \mathrm{E}{+}00$	0,00	109,71
7	$5,36{ m E}\!+\!00$	0,00	48,57
8	$9,31 \mathrm{E}{+}00$	0,00	74,00
9	$7,46\mathrm{E}{+}00$	0,00	30,50
10	$6,57{ m E}+00$	0,00	55,99
11	$7,79\mathrm{E}{+}00$	0,00	106,34
12	$7,52\mathrm{E}{+}00$	0,00	82,25
13	$5,50{ m E}+00$	0,00	ŇA
14	$4,29{ m E}{+}00$	0,00	82,57
15	$4,85{ m E}{+}00$	0,00	82,74
16	$5,30{ m E}+00$	0,00	ŃA
17	$5.95\mathrm{E}{+}00$	0,00	51.50
18	$5,38{ m E}{+}00$	0,16	64,79
19	$5,79{ m E}+00$	0,00	70,75
20	$6,75\mathrm{E}{+}00$	0,13	ŃA
21	$6,52{ m E}{+}00$	0,01	98,00
22	6,83E+00	0,01	173,50
23	7,17E+00	0,00	ŃA
24	$7,22\mathrm{E}{+}00$	0,06	182,00
25	$9,61 \mathrm{E} + 00$	0,67	ŇA
26	6,14E+00	0,00	96,50
27	$5,24 \mathrm{E}{+}00$	0,00	60,22
28	$5,33 \mathrm{E}{+}00$	0,00	89,03
29	6,77 E + 00	0,00	336,82
30	$7,00 \mathrm{E} + 00$	0,00	130,25
31	$5.60 \mathrm{E}{+}00$	0.00	194.45

A.3 Ettenbach

TEZG	Fläche	$\mathbf{q}\mathbf{A}$	$\delta \ \mathbf{q} \mathbf{A}$	\mathbf{qB}	$\delta \ \mathbf{qB}$	\mathbf{qC}	$\delta \ \mathbf{qC}$
[-]	$[km^2]$	$\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$					
1	2,10	$11,\!28$	0,73	9,88	0,71	9,32	0,70
2	1,35	8,46	$0,\!65$	$7,\!87$	$0,\!67$	$7,\!62$	0,67
3	1,51	8,41	0,51	4,54	0,31	7,38	0,50
4	2,18	5,56	0,44	6,79	$0,\!60$	7,72	0,64
5	2,01	7,92	0,26	7,43	0,25	8,06	0,26
6	1,79	5,26	0,26	4,89	0,25	6,59	0,32
7	1,86	-15,01	-1,77	-15,14	-1,85	-26,72	-2,10
8	1,70	1,56	0,06	0,54	0,05	0,29	0,03
9	2,00	$30,\!12$	3,00	24,93	3,23	36,33	$3,\!44$
10	1,09	16,46	1,07	21,80	1,55	17,08	1,17
11	2,03	18,43	2,16	4,31	0,48	7,90	0,88
12	$2,\!10$	4,58	$0,\!65$	$13,\!41$	1,71	$7,\!11$	0,90

TEZG	\mathbf{qMean}	$\delta~\mathbf{qMean}$	\mathbf{Acker}	Grünland	Wald	Siedlung	\mathbf{T}_{luft}
[-]	$\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$	$\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$	[-]	[-]	[-]	[-]	SHJ [°C]
1	10,16	1,24	0,000	0,003	0,997	0,000	14,49
2	7,98	$1,\!15$	0,000	0,027	0,975	0,000	13,58
3	6,78	0,77	0,000	0,041	0,955	0,000	14,24
4	$6,\!69$	0,97	0,000	0,041	0,952	0,000	13,83
5	7,80	0,44	0,000	0,054	0,941	0,000	14,92
6	$5,\!58$	0,48	0,000	0,075	0,924	0,000	14,91
7	-18,96	-3,55	0,001	0,104	0,777	0,093	14,49
8	0,80	0, 11	0,000	0,000	0,997	0,000	14,08
9	30,46	5,75	0,004	0,043	0,803	0,097	14,83
10	18,45	2,18	0,000	0,089	0,514	0,126	14,87
11	10,21	2,01	0,000	0,035	0,759	0,092	15,44
12	8,37	1,91	0,131	0,074	0,292	0,101	15,50

TEZG	NS	korr. NS	pot. ETP	$\mathbf{akt.} \mathbf{ETP}$	\mathbf{W} bilanz	Versiegelt	Höhe
[-]	SHJ [mm]	SHJ [mm]	SHJ [mm]	$\left[\frac{mm}{a}\right]$	HSHJ [mm]	[-]	[m ü.NN]
1	711,07	650,00	429,22	646,65	283,52	0,074	414,80
2	$681,\!51$	650,00	442,84	642, 45	239,33	0,064	397,02
3	$675,\!00$	650,00	447,10	625, 19	$241,\!46$	0,068	370,56
4	675,00	650, 51	441,91	660,00	250,82	0,078	380,36
5	677, 31	650,00	428,88	$691,\!04$	$281,\!86$	0,075	412,41
6	$675,\!00$	650,00	438, 12	$623,\!95$	240,92	0,068	369,43
7	672, 15	649,22	441,08	633, 35	240,96	0,132	335,33
8	675,00	650,00	$430,\!62$	770,31	278,08	0,069	442,55
9	660,92	621, 37	445,89	686, 82	243, 82	0,127	338,88
10	$631,\!56$	601, 98	$453,\!66$	660, 74	217, 47	0,148	269,66
11	$626,\!37$	$615,\!83$	$455,\!03$	$685,\!12$	$222,\!13$	$0,\!136$	328,50
12	626, 53	$603,\!64$	466,91	$644,\!55$	182,28	0,165	266,57

TEZG	Strahlung	MRVBF	MRVBF	Neigung	HW	HW- horizontal	HW- vertikal
[-]	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	[-]	med. [-]	[rad]	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$
1	2,240	0,125	0,024	0,259	-1,50E-04	-8,32E-05	-6,64E-05
2	$2,\!650$	0,113	0,014	0,283	-3,20E-04	-4,18E-06	-3,15E-04
3	2,192	0,129	0,018	0,277	8,62E-06	1,92E-04	-1,84E-04
4	2,478	0,094	0,017	0,289	-5,97E-05	2,96 E - 05	-8,93E-05
5	2,255	0,157	0,041	0,209	-1,55E-04	-1,70 E - 04	1,53E-05
6	2,002	0,099	0,020	0,270	-3,82E-05	-1,87E-05	-1,96E-05
7	2,192	0,207	0,030	0,228	-2,89E-05	2,81E-04	-3,10E-04
8	2,532	0,140	0,033	0,234	-8,32E-05	-1,53E-04	6,98E-05
9	2,282	0,173	0,025	0,242	-4,47E-05	1,54E-04	-1,98E-04
10	2,081	0,242	0,022	0,251	4,78E-06	4,98E-04	-4,93E-04
11	2,336	0,218	0,037	0,218	-6,61E-05	2,59E-05	-9,19E-05
12	2,200	0,442	0,071	0,166	-1,17E-04	1,08E-04	-2,25E-04

\mathbf{LF}	KF	Speicher	торо	HW- tangential	TEZG
$\left[\frac{\mu S}{cm}\right]$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	[-]	[-]	$\left[\frac{rad}{100m}\right]$	[-]
75,00	$2,41 ext{E-05}$	$1,\!92$	10,65	$3,52 ext{E-07}$	1
95,38	2,20 E-05	1,82	10,65	3,33E-05	2
105,35	$2,30\mathrm{E}{-}05$	1,07	10,67	8,38E-05	3
108,58	$2,27 ext{E-05}$	2,95	10,69	$1,50\mathrm{E}{-}05$	4
96,67	1,31E-05	3,86	10,73	-9,73E-06	5
92,23	1,97E-05	2,25	10,60	$1,36\mathrm{E}{-}05$	6
34,50	4,69 E-02	4,02	10,97	$9,78 ext{E-05}$	7
55,00	$1,26\mathrm{E}{-}05$	6,79	10,71	-1,71E-05	8
120,00	1,07E-01	5,85	10,96	$5,91\mathrm{E}{-}05$	9
246,40	$2,75\mathrm{E}{-}01$	8,05	11,24	$1,56\mathrm{E}{-}04$	10
351,85	9,63E-02	7,32	11,02	$2,00\mathrm{E}{-}05$	11
478,70	$9,72 ext{E-02}$	8,32	11,27	4,28E-05	12

B Impressionen aus der Feldarbeit







Literaturverzeichnis

- ANDERSON, M.G., BURT, T.P. (1978): The Role of Topography in controlling Throughflow Generation. Earth Surface Processes, Vol. 3, S. 331–344.
- ANDERSON, M.G., KNEALE, P. (1982): The Influence of Low-Angled Topography on Hillslope Soil-Water Convergence and Stream Discharge. Journal of Hydrology, Vol. 57, S. 65–80.
- ATKINSON, E., THERNEAU, T., (2000): An Introduction to Recursive Partitioning Using the RPART Routines. Shortened Version of "Atkinson et al. (1997) An Introduction to Recursive Partitioning Using the RPART Routine. Technical Report 61, Mayo Clinic, Section of Statistics.
- BRENNING, A., (2008): Statistical geocomputing combining R and SAGA: The example of landslide susceptibility analysis with generalized additive models.
- BRONSTERT, A., PLATE, E.J. (1997): Modelling of runoff Generation and Soilmoisture Dynamics for Hillslopes and Micro-Catchments. Journal of Hydrology, Vol. 198, S. 177–195.
- BURT, T., BUTCHER, D. (1985): Topographic Controls of Soil Moisture Distributions. Journal of Soil Science, Vol. 36, S. 469–486.
- CONRAD, O. (1998): Ableitung hydrologisch relevanter Reliefparameter aus einem Digitalen Geländemodell. Diplomarbeit, Georg-August-Universität zu Göttingen.
- DAY, T. (1976): On the Precision of Salt Dilution Gauging. Journal of Hydrology, Vol. 31, S. 293–306.
- DENG, Y. (2007): New Trends in DigitalTerrain Analysis: LAndform Definition, Representation, and Classification. Progress in Physical Geography, Vol. 31, S. 405–419.
- DINGMAN, S. (2002): Physical Hydrology. Prentice-Hall Inc.
- DUNNE, T., BLACK, R. (1970): Partial Area Contributions to Storm Runoff in a Small New England Watershed. Water Resources Research, Vol. 6, S. 1296–1311.
- FLORINSKY, V. (1998): Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations. Progress in Physical Geography, Vol. 22, S. 33-60.

- FÜR UMWELTSCHUTZ, L. (2002): Durchflussermittlung mit der Salzverdünnungsmethode. Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst, Baden-Württemberg.
- GALLANT, C., DOWLING, T. (2003): A multiresolution Index of Valley Bottom Flatness for mapping Depositional Areas. Water Resources Research, Vol. 39, S. 1347–1359.
- GENEREUX, D., HEMOND, H., MULHOLLAND, P. (1993): Spatial and Temporal Variability in Streamflow Generation on the West Fork of Walker Branch Watershed. Journal of Hydrology, Vol. 142, S. 137–166.
- GRIMMELMANN, W., HANNEMANN, M., HECHT, G., MÜLLER, A., PLUM H. ANS PRETSCHOLD, H.H., SCHARPFF, H.J., SCHLIMM, W. (1997): Hydrogeologische Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- HARTUNG, J., ELPELT, B., KLÖSENER, K. (1998): Statistik. Oldenbourg Verlag, München.
- KLINGSEISEN, B. (2004): GIS based Generation of Topographic Attributes for Landform Classification. Diplomarbeit, Fachhochschule Technikum Kärnten.
- KUTNER, M., NETER, J., NACHTSHEIM, C. (2004): Applied Linear Statistical Models. Irwin Professional Pub.
- LEWIS, R., (2000): An Introduction to Classification and Regression Tree (CART) Analysis. Presentation at the 2000 Annual Meeting of the society for Academic Emergency Medicine in Sanf Francisco, California.
- LGRB (1998): CD-ROM: Geowissenschaftliche Übersichtkarten von Baden-Württemberg 1:350000. Tech. ber., Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg.
- MCGLYNN, B., MCDONNELL, J. (2003): Role of Discrete Landscape Units in controlling Catchment Dissolved Organic Carbon Dynamics. Water Resources Research, Vol. 39.
- MCGLYNN, B., MCDONNELL, J., SEIBERT, J., KENDALL, C. (2004): Scale Effects on Headwater Catchment Runoff Timing, Flow Sources, and Groundwater-Streamflow Relations. Water Resources Research, Vol. 40.
- MCGLYNN, B., SEIBERT, J. (2003): Distributed Assessment of Contributing Area and Riparian Buffering along Stream Networks. Water Resources Research, Vol. 39.
- MITASOVA, H., HOFIERKA, J. (1993): Interpolation by Regularized Spline with Tension: II. Application to Terrain Modelling and Surface Geometry Analysis. Mathematical Geology, Vol. 25, S. 657–669.

- MOORE, I., GRAYSON, R., LADSON, A. (1991): Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. Hydrological Processes, Vol. 5, S. 3–30.
- SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H., BRÜMMER, G., SCHWERTMANN, U., HORN, R., KÖGEL-KNABER, I., STAHR, K., AUERSWALD, K., BAYER, L., HARTMANN, A., LITZ, N., SCHEINOST, A., STANJEK, H., WELP, G., WILKE, B. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- SCHÄPPI, P., WALTER, S., (2002): Theorie zur Abflussmessung. Unveröffentlicht.
- SEIBERT, J., BISHOP, K., RODHE, A., MCDONNELL, J. (2002): Groundwater Dynamics along a Hillslope: A Test of the Steady State Hypothesis. Water Resources Research, Vol. 39.
- SHAMAN, J., STIEGLITZ, M., BURNS, D. (2004): Are Big Basins just the Sum of Small Catchments? Hydrological Processes, Vol. 18, S. 3195–3206.
- UCHIDA, T., ASANO, Y., ONDA, Y., MIYATA, S. (2005): Are Headwaters just the Sum of Hillslopes ? Hydrological Processes, Vol. 19, S. 3251–3261.
- UHLENBROOK, S. (1991): Untersuchung und Modellierung der Abflussbildung in einem Mesoskaligen Einzugsgebiet. Dissertation, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i.Br.
- UMBW (2007): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg. Umweltministerium, Baden-Württemberg.
- Voss, H.H. (1966): Geologische Kartierung der Emmendinger Vorbergzone zwischen Freiamt und Bleichheim (1:25000). Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- WEILER, M., MCGUFF, H., TUBILOWICZ, J., (2005): Evaluation of the effectiveness of tracer methods for discharge estimation. University of British Columbia. Univeröffentlicht.
- WILSON, J., GALLANT, C. (2000): Terrain Analysis. John Wiley & Sons.
- ZEVENBERGEN, L., THORNE, C. (1987): Quantitative Analysis of land surface Topography. Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 12, S. 47–56.

Ehrenwörtliche Erklärung

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

Ort, Datum

Unterschrift