



**Dynamik und Prozesse der Abflussbildung und  
Abflusskonzentration eines steilen voralpinen  
Einzugsgebiets im Alptal (SZ)**

**Peter Herrmann**

Titelbild: 90° Thomson-Messwehr des Sub-Einzugsgebiet 21 (Bild: P.Herrmann, September 2013)

Masterarbeit GEO 511

# **Dynamik und Prozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration eines steilen voralpinen Einzugsgebiets im Alptal (SZ)**

30. Juni 2014

**Peter Herrmann**

herrmannpeter@bluewin.ch

Matrikelnummer: 07-739-840

Betreuung:

**Michael Rinderer**

michael.rinderer@geo.uzh.ch

Betreuung und Fakultätsmitglied:

**Prof. Dr. Jan Seibert**

jan.seibert@geo.uzh.ch

Physische Geographie Abteilung Hydrologie & Klima

Geographisches Departement

Universität Zürich

Winterthurerstrasse 190

CH-8057 Zürich



# Vorwort

Das Wasser und sein kontinuierlicher Kreislauf übten schon immer eine grosse Faszination auf mich aus. Die Möglichkeiten, welche sich uns heutzutage bieten, mittels unterschiedlichen Methoden und Messinstallationen den verschiedenen Prozessen auf den Grund zu gehen, sind immens und ebenso faszinierend. Sie haben mich dazu motiviert, meine Masterarbeit im Bereich der Hydrologie zu schreiben.

Diese Arbeit wäre jedoch nicht zustande gekommen ohne die Hilfe und Unterstützung vieler Leute. Ein sehr grosser Dank gilt meinem Betreuer Michael Rinderer. Er unterstützte mich mit vollem Einsatz, mit wertvollen Ratschlägen, konstruktiver Kritik und interessanten Diskussionen von der Feldarbeit, der Datenaufbereitung, der Datenanalyse bis zum Schreibprozess. Seine aufgestellte und motivierende Art gab mir immer wieder neue Energie die Probleme anzupacken.

Weiter möchte ich mich bei meiner Schwester Eva, Jasmin Grenacher und Timo Olivieri für die kräftige Unterstützung und die angenehme Gesellschaft im Feld bedanken, bei Ian Hersberger für seine Einführung und den vielen guten Tipps im Umgang mit dem Random Forest und bei Eugen Sorg, der sich die Zeit nahm meine Arbeit zu redigieren.

Mein Dank gilt ebenfalls allen Freunden und natürlich meiner Familie, die mich während der Zeit der Masterarbeit begleitet haben und mir in vieler Hinsicht eine moralische oder tatkräftige Unterstützung waren. Ein spezieller Dank gilt meiner Freundin Jasmin Grenacher, die mir bei Hochs und Tiefs zur Seite stand.

Peter Herrmann

Zürich, 30. Juni 2014

# Inhalt

<b>Vorwort .....</b>	<b>III</b>
<b>Inhalt .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungen.....</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellen.....</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungen.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Aufbau der Arbeit .....	2
1.2 Abflussprozesse .....	3
1.3 Stand der Forschung zur Abflussreaktion.....	4
1.4 Hydrologische Forschung im Alptal.....	8
1.5 Zielsetzung.....	10
1.6 Forschungsfragen .....	10
<b>2 Material.....</b>	<b>13</b>
2.1 Gebietsbeschreibung.....	13
2.2 Forschungsmessnetz Studibach .....	14
2.3 Monitoringnetzwerk und Messdaten.....	15
2.4 Datenaufbereitung .....	19
2.5 Einzugsgebietseigenschaften .....	20
2.6 Feldarbeit .....	21
<b>3 Methoden.....</b>	<b>22</b>
3.1 Definition Timing .....	22
3.2 Statistische Analyse .....	27
<b>4 Resultate .....</b>	<b>31</b>
4.1 Abfluss .....	31
4.2 Methodenvergleich: Bestimmung der Reaktionszeiten .....	36
4.1 Rangkorrelation .....	42
4.2 Random Forest .....	47

<b>5</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>51</b>
5.1	Forschungsfrage 1 - Methodenvergleich: Bestimmung der Reaktionszeiten .....	51
5.2	Forschungsfrage 2 - Abflussmenge .....	53
5.3	Forschungsfrage 3 - Abflussdynamik.....	55
5.4	Abflussdynamik und steuernde Prozesse.....	57
5.5	Synthese der Abflussprozesse am Studibach .....	60
5.6	Abflussdaten und deren Unsicherheiten.....	62
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick.....</b>	<b>64</b>
	<b>Literatur.....</b>	<b>66</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>70</b>
Anhang A	Situationsplan Abfluss-Grundwasser-Monitoring-Netzwerk .....	70
Anhang B	Niederschlagsereignisse .....	71
Anhang C	Boxplots Methodenvergleich .....	72

# Abbildungen

<b>Abb. 1.</b> Schematische Darstellung des Timings anhand Abflussganglinien. ....	2
<b>Abb. 2.</b> Abflussprozesse an einem Hang .....	3
<b>Abb. 3.</b> Karte der Schweiz mit der hervorgehobenen Lage des Alptals .....	13
<b>Abb. 4.</b> Situationsplan des Abfluss- und Grundwasser-Monitoring-Netzwerk am Studibach .....	14
<b>Abb. 5.</b> Messinstallationen Abfluss .....	15
<b>Abb. 6.</b> Abflussmessinstallation der Makropore .....	16
<b>Abb. 7.</b> Makroporenmessinstallation mit Makroporenausgang .....	16
<b>Abb. 8.</b> Messinstallationen Grundwasser für verschieden feuchte Standorte .....	17
<b>Abb. 9.</b> Schematische Darstellung der Timing-Messgrößen .....	22
<b>Abb. 10.</b> Schematische Darstellung der Bestimmungsmethode „Minimum“ .....	24
<b>Abb. 11.</b> Schematische Darstellung der Bestimmungsmethode „Minimum erweitert“ .....	25
<b>Abb. 12.</b> Schematische Darstellung der Bestimmungsmethode „fixer Schwellenwert“ .....	25
<b>Abb. 13.</b> Schematische Darstellung der Bestimmungsmethode „variabler Schwellenwert“ .....	26
<b>Abb. 14.</b> Schematische Darstellung der Bestimmungsmethode „Komplex“ .....	27
<b>Abb. 15.</b> Boxplots der verschiedenen Oberflächenabflussmessstationen.....	32
<b>Abb. 16.</b> Boxplots der händisch bestimmten Zeit vom Niederschlagsbeginn bis zur Reaktion .....	33
<b>Abb. 17.</b> Boxplots der händisch bestimmten Zeit vom Niederschlagsbeginn bis zur EC-Reaktion.....	34
<b>Abb. 18.</b> Boxplots der Unterschiede in der Reaktion von Wasserstand und EC .....	35
<b>Abb. 19.</b> Boxplots der Unterschiede in der Reaktion des Wasserstands der händisch bestimmten Zeit und den Methode „Komplex“, „Minimum“, „Minimum erweitert“, „variabler Schwellenwert“ und „fixer Schwellenwert“ .....	37
<b>Abb. 20.</b> Boxplots der Unterschiede in der Reaktion des Wasserstands der Methode „Minimum erweitert“ und „Komplex“ .....	39
<b>Abb. 21.</b> Boxplots der Unterschiede in der EC- Reaktion der händisch bestimmten Zeit und der Methode „Komplex“, „Minimum“, „Minimum erweitert“, „variabler Schwellenwert“ und „fixer Schwellenwert“ .....	40
<b>Abb. 22.</b> Boxplots der Unterschiede in der EC- Reaktion der Methode „variabler Schwellenwert“ und der Methode „Minimum“ .....	41
<b>Abb. 23.</b> Median Abfluss als eine Funktion der Prädiktoren.....	44
<b>Abb. 24.</b> Median der händisch bestimmten EC- Reaktionszeit als eine Funktion der Prädiktoren ....	46
<b>Abb. 25.</b> Wichtigkeit verschiedener, topographischer Prädiktorvariablen für den Median Wasserstand bestimmt mit dem Random Forest Ansatz.....	48

<b>Abb. 26.</b> Wichtigkeit verschiedener, topographischer Prädiktorvariablen für den Median Abfluss bestimmt mit dem Random Forest Ansatz.....	48
<b>Abb. 27.</b> Wichtigkeit verschiedener, topographischer Prädiktorvariablen für den Median der händischen Bestimmung der EC- Reaktionszeit bestimmt mit dem Random Forest Ansatz.....	50
<b>Abb. 28.</b> Wichtigkeit verschiedener, topographischer Prädiktorvariablen für den Median der besten automatischen Bestimmungsmethode der EC- Reaktionszeit bestimmt mit dem Random Forest Ansatz .....	50
<b>Abb. 29.</b> Die nahe Umgebung des Quellstandorts 81.2 .....	59
<b>Abb. 30.</b> Situationsplan des Abfluss- und Grundwasser-Monitoring-Netzwerk am Studibach .....	70
<b>Abb. 31.</b> Boxplots der Zeit vom Niederschlagsbeginn bis zur Wasserstandsreaktion der Methode „Komplex“, „Minimum“, „Minimum erweitert“, „variabler Schwellenwert“ und „fixer Schwellenwert“ .....	72
<b>Abb. 32.</b> Boxplots der Zeit vom Niederschlagsbeginn bis zur EC-Reaktion der Methode „Komplex“, „Minimum“, „Minimum erweitert“, „variabler Schwellenwert“ und „fixer Schwellenwert“ .....	73

## Tabellen

<b>Tab. 1.</b> Unterschiedliche Messintervalle für STS und Odyssey Logger.....	18
<b>Tab. 2.</b> Topographische Einzugsgebietseigenschaften für die Abfluss-, Quell- und den Makroporenstandort .....	21
<b>Tab. 3.</b> Manuell definierter Schwellenwert für alle Standorte mit installiertem STS Logger .....	26
<b>Tab. 4.</b> Statistische Eckdaten für den Abfluss resp. den spezifischen Abfluss .....	31
<b>Tab. 5.</b> Statistische Kenngrößen der händisch bestimmten Zeit vom Niederschlagsbeginn bis zur Reaktion der Gerinneabfluss-, Quell-, Makroporen- und Grundwasserstandorte .....	33
<b>Tab. 6.</b> Statistische Kenngrößen der händisch bestimmten Zeit vom Niederschlagsbeginn bis zur EC-Reaktion der Gerinneabfluss-, Quell-, Makroporen- und Grundwasserstandorte .....	34
<b>Tab. 7.</b> Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen dem Median bzw. Mittelwert des Wasserstands und spezifischen Abflusses für alle Abflussstandorte und den verschiedenen topographischen Einzugsgebietseigenschaften. ....	42
<b>Tab. 9.</b> Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen median und mittlerer Reaktionszeit des Abflusses bzw. der EC und verschiedenen, topographischen Prädiktoren .....	45
<b>Tab. 10.</b> Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen den einzelnen topographischen Einzugsgebietsprädiktoren .....	47

# Abkürzungen

bzw.	beziehungsweise
°C	Grad Celsius
ca.	circa
cm	Zentimeter
CARTs	Klassifikations- oder Regressionsbäume (engl. classification and regression trees)
DTM	digitales Geländemodell
EC	elektrische Leitfähigkeit (engl. electrical conductivity)
engl.	englisch
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
EZG	Einzugsgebiet
ha	Hektar
IQA	Interquartilsabstand
km	Kilometer
LiDAR	light detection and ranging
m	Meter
min	Minute
mm	Millimeter
mTry	Anzahl zufällig vorselektierter Prädiktoren für jede Aufspaltung (Random Forest)
m ü. M.	Meter über Meer
nTree	Gesamtzahl der Bäume im Wald (Random Forest)
nPerm	Anzahl der Permutationen pro Klassifikationsbaum (Random Forest)
resp.	respektive
RF	Random Forest
$r_s$	Rangkorrelation nach Spearman / Rangkorrelationskoeffizient
rSeed	Anfangswerte für Pseudozufallsgenerator (Random Forest)
TWI	topographischer Feuchtigkeitsindex (engl. topographic wetness index)
u.a.	unter anderem
WRB	World Reference Base for Soil Resources
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
%IncMSE	prozentuale Zunahme der mittleren quadratischen Abweichung bei Verwendung von zufällig gewählten Prädiktorwerten im Vergleich zu gemessenen („out-of-bag“) Prädiktorwerten. Ist ein Mass für die Wichtigkeit des Prädiktors (Random Forest)

# Zusammenfassung

Die hydrologischen Einzugsgebiedsdynamiken, vor allem die des Zwischenabflusses, sind sehr variabel und komplex. Ein tiefgründiges Prozessverständnis der Abflussbildung und Abflusskonzentration ist von Nöten. Mit meiner Masterarbeit versuche ich Prinzipien zu ergründen, die der Heterogenität und der Komplexität zugrunde liegen. Dafür untersuchte ich in einem steilen voralpinen Einzugsgebiet mit wenig durchlässigen Böden den Einfluss verschiedener topographischer Einzugsgebietseigenschaften auf die Abflussmenge, sowie die Zeit bis zur Reaktion der Ganglinie des Abflusses und der elektrischen Leitfähigkeit. Zusätzlich wurden verschiedene einfache automatische Methoden für die Bestimmung der Zeit vom Niederschlagsbeginn bis zur Ganglinienreaktion analysiert und mit einer komplexen Methode und der händischen Bestimmung verglichen. Die Wichtigkeit der topographischen Einzugsgebietseigenschaften wurde mit einer bivariaten und einer multivariaten Technik analysiert. Als bivariate Methode wurde die Rangkorrelation nach Spearman, als multivariate Methode der Random Forest Ansatz angewandt. Der Abfluss sowie die elektrische Leitfähigkeit wurden anhand 10 Messstellen mit unterschiedlich grossen Einzugsgebieten, in einem 20 ha grossen Grundwasser-Abfluss-Monitoring-Netzwerk im Alptal, Kanton Schwyz, für 4 Monate untersucht. Meine Untersuchungen am Studibach haben aufgezeigt, dass die Einzugsgebietsfläche und der topographische Feuchtigkeitsindex (TWI) am Standort gute Prädiktoren für den median Abfluss, sowie die median Reaktionszeit der elektrischen Leitfähigkeit für ein steiles, voralpines Einzugsgebiet mit wenig durchlässigen Böden sind. Die Abflussreaktionszeit war jedoch nicht mit topographischen Einzugsgebietseigenschaften korreliert. Die Rangkorrelationsanalyse nach Spearman sowie der Random Forest Ansatz haben dieselben Zusammenhänge aufgezeigt. Aufgrund der hohen Korrelation der Abflussmenge und der Reaktionszeit der elektrischen Leitfähigkeit mit der Einzugsgebietsfläche, kann anhand der Einzugsgebietsfläche eines feuchten, steilen Einzugsgebietes mit wenig durchlässigen Böden ohne Messinstallationen, die median Abflussmenge oder die median Reaktionszeit der elektrischen Leitfähigkeit vorhergesagt werden. Der Methodenvergleich für die Bestimmung der Reaktionszeit hat ergeben, dass die beste einfache automatische Bestimmungsmethode sich nur minimal von einer Komplexen resp. der händischen Bestimmung unterscheidet, jedoch grosse Unterschiede zu den restlichen einfachen Methoden aufweist. Die Methode „Minimum“, die den tiefsten Punkt der Ganglinie zwischen Niederschlagsbeginn und Ganglinienmaximum als Reaktion bestimmt, hat sich als einfache Bestimmungsmethode bewährt. Anhand meiner Messresultate konnte eine schnelle Abflussreaktion sowie ein grosser zeitlicher Unterschied zwischen der Abflussreaktion und dem Einsetzen der Verdünnung durch Ereigniswasser beobachtet und damit die Wichtigkeit von Vorereigniswasser bei Niederschlagsereignissen aufgezeigt werden. Zwei wesentliche Prozesse, die die Abflussbildung und Abflusskonzentration im Oberboden massgeblich beeinflussen, konnten identifiziert werden. Zum einen der Piston Flow resp. laterale Matrixfluss, dessen schnelle Reaktion auf den Prozessen der Druckübertragung basiert, zum anderen präferentielles Fliessen durch hoch durchlässige Strukturen oder Makroporen.



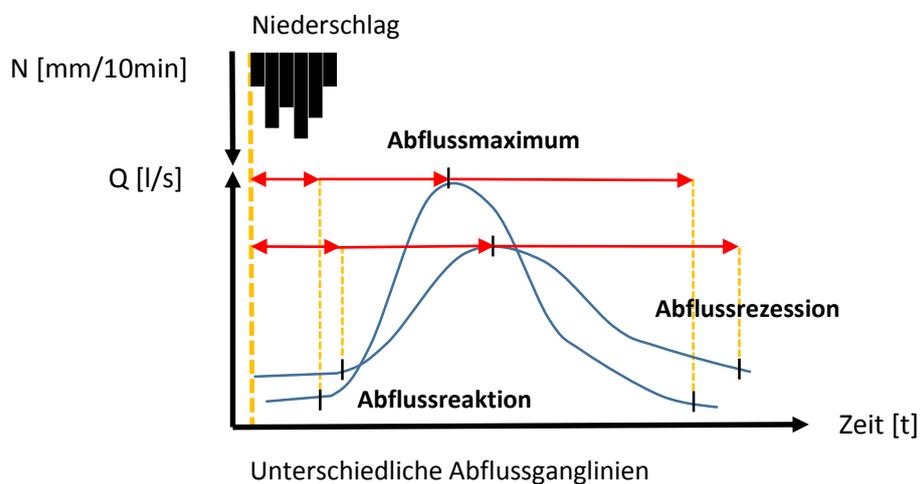
# 1 Einleitung

Extreme Hochwasser kamen in der Vergangenheit vor und werden auch in Zukunft auftreten. Das letzte grosse Hochwasserereignis im August 2005 in der Schweiz und den angrenzenden Nachbarstaaten ist noch vielen Leuten in den Köpfen, sechs Tote und ein ökonomischer Schaden von rund drei Milliarden Franken allein in der Schweiz. Die betroffenen Regionen lagen hauptsächlich in den Voralpen. Gewisse Flüsse erreichten Extremabflüsse, die noch nie aufgezeichnet wurden (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), 2008). Bei den operationellen Hochwasserprognosen ist man bestrebt, Abflüsse auf Basis von Niederschlagsdaten vorherzusagen, damit der Schaden in kritischen Situationen in Grenzen gehalten werden kann. Um die Übertragbarkeit solcher Prognosemodelle auf möglichst vielen Gebiete zu gewährleisten, ist eine genaue Kenntnis der Prozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration erforderlich. Vor allem für alpine und voralpine Gebiete besteht hier noch erheblicher Forschungsbedarf, denn genau diese Gebiete von den Hochwassergefahren am stärksten betroffen sind (Wetzel, 2001). Die Forschung der letzten 100 Jahre in der Hydrologie hat versucht die enorme Heterogenität und Komplexität der Niederschlags-Abflussprozesse zu charakterisieren und katalogisieren (McDonnell et al. 2007). Die Forschung war aus praktischen und finanziellen Gründen jedoch vermehrt fokussiert auf kleinräumigere Skalen. Bei der Anwendung der gewonnenen Prozessverständnisse auf nicht beprobte Hänge oder Einzugsgebiete (EZG), stimmen die Beobachtungen jedoch nicht immer mit den Vorhersagen der Abflussreaktion überein, da zusätzliche Einflussfaktoren, Steuerungsgrößen und Skaleneffekte wirken (Sivapalan, 2005). McDonnell et al. (2007) betonen, dass eine generalisierte Beschreibung dieser landschaftlichen Heterogenität und der Komplexität der Prozesse nötig ist, um die Beobachtungen auf verschiedene Gebiet oder über verschiedene Skalen übertragen zu können. Es ist wichtiger, die Prinzipien zu ergründen, die der Heterogenität und der Komplexität zugrunde liegen, als die Prozesskomplexität zu reproduzieren (McDonnell et al., 2007).

In diesem Sinne untersuche ich in meiner Masterarbeit den Einfluss der topographischen Einzugsgebietseigenschaften auf die Abflussmenge und das Timing des Abflusses und der elektrischen Leitfähigkeit (EC) und versuche grundlegende anwendbare Zusammenhänge der Hangeinzugsgebietskala herauszufinden. Neben der Topographie spielen verschiedene weitere Steuerfaktoren wie beispielsweise die Vegetation, Bodenfeuchte, Bodeneigenschaften, geologische Gegebenheiten oder Niederschlagscharakteristiken auch eine Rolle. Ich habe mich jedoch auf die Untersuchung der Charakteristika der Oberflächentopographie konzentriert, da sie einerseits einfach aus dem digitalen Terrainmodell abzuleiten sind und andererseits, da ich vermute, dass die Topographie in einem steilen EZG mit wenig durchlässigen Böden und hohen Grundwasserständen einen massgeblichen Steuerfaktor der Abflussmenge und des Timings des Abflusses und der EC darstellt.

Unter „Timing“ verstehe ich die Zeitspanne vom Niederschlagsbeginn bis zu einem spezifischen Punkt der Ganglinie, welche zeitverzögert auf den Niederschlag reagiert, ansteigt, ein Maximum erreicht und wieder auf den Ausgangswert zurückgeht (s. Abb. 1). Es wird zwischen dem Timing des Oberflächenabflusses, des Boden- und des Grundwassers unterschieden. Sinngemäss verstehe ich das Timing für die Ganglinie der EC. Die EC ist ein Mass für die chemische Zusammensetzung des Abflusswassers. Anhand der Messung der EC kann nicht nur die quantitative hydrologische Reaktion auf ein Niederschlagsereignis, sondern auch der Anteil an Ereignis- und Vorereigniswasser untersucht werden, um das hydrologische Verhalten eines EZG während eines Niederschlagsereignisses besser zu verstehen (Laudon und Slaymaker, 1997). Die wichtigste Timing Messgrösse für meine Untersuchung ist die Zeit vom Niederschlagsbeginn bis zur Reaktion der Ganglinie, also die Zeit bis die Abflusskurve ansteigt resp. die Zeit bis die Verdünnung durch Niederschlagswasser eintritt.

Die Verwendung des Begriffs „Timing“ ist laut Duden im Deutschen zulässig und wird, sofern nichts anderes vermerkt wird, als Gesamtbegriff für alle Zeitcharakteristika der Abfluss-, Grundwasser- und elektrische Leitfähigkeitsganglinien relativ zum Niederschlagsbeginn definiert.



**Abb. 1.** Schematische Darstellung des Timings anhand Abflussganglinien (eigene Darstellung).

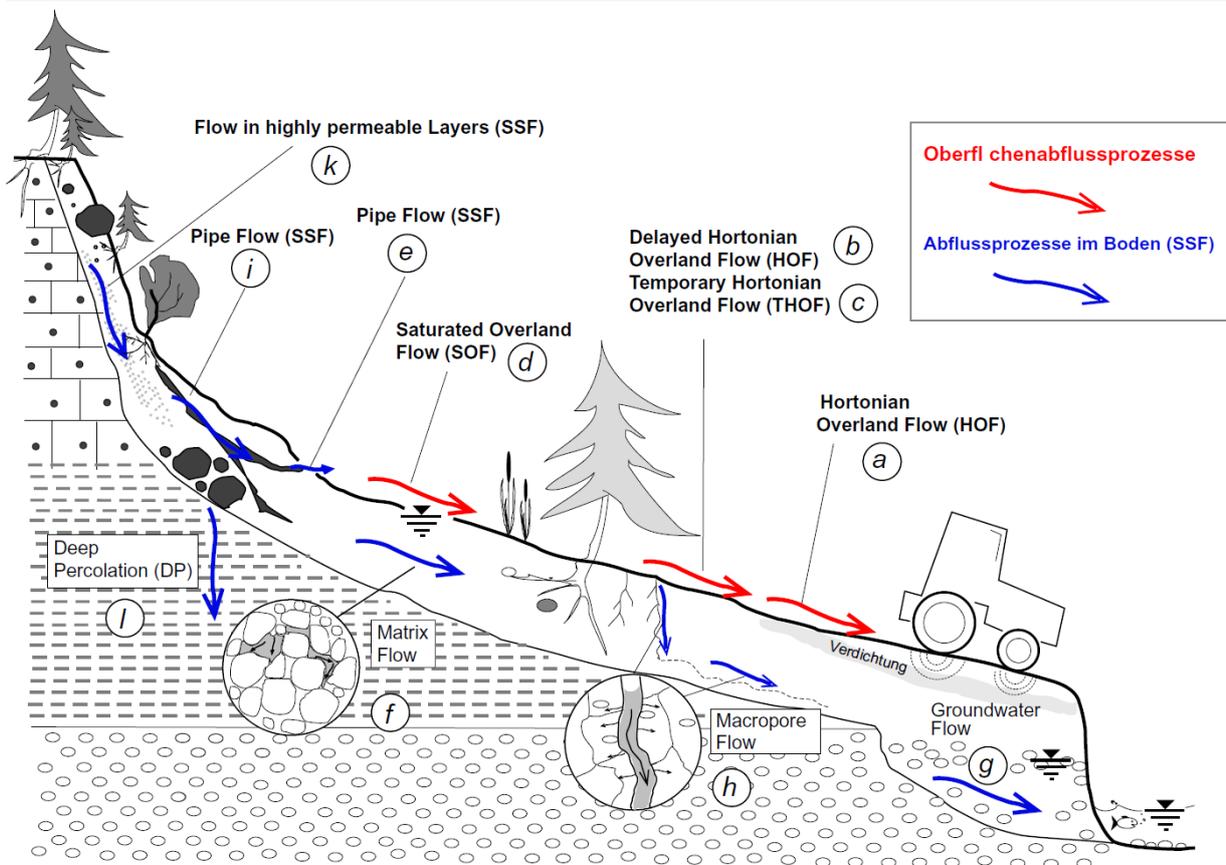
## 1.1 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in sechs Kapitel gegliedert. Nach der Einführung und der Präsentation der für meine Arbeit relevanten Literatur und den daraus abgeleiteten Fragestellungen werden im Kapitel 2 das Untersuchungsgebiet, das Monitoring Netzwerk, die analysierten Einzugsgebietseigenschaften sowie die Aufbereitung der Daten kurz vorgestellt. Im Kapitel 3 wird die verwendete Methodik erläutert und die unterschiedlichen statistischen Analysen beschrieben. Im Kapitel 4 werden die Ergebnisse präsentiert. Diese werden im Kapitel 5 anhand der gestellten Forschungsfragen diskutiert. Abschliessend werden im Kapitel 6 die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige potentielle Forschungsschwerpunkte gegeben.

## 1.2 Abflussprozesse

Der Abflussprozess beruht auf drei Vorgängen, dem Prozess der Abflussbildung, der beschreibt, wo und wann der Abfluss im Boden entsteht; dem Prozess der Abflusskonzentration, der sich mit der Frage befasst, wie lange der Abfluss benötigt, um an den Betrachtungspunkt zu gelangen; und dem Fließprozess im offenen Gerinne.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird der Fokus auf die Prozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration gelegt. Diese häufig gleichzeitig ablaufenden Prozesse lassen sich in zahlreiche Unterprozesse aufteilen. Allgemeinen kann der Abflussprozess in Oberflächenabflussprozesse und Abflussprozesse im Boden unterschieden werden (s. Abb. 2).



**Abb. 2.** Abflussprozesse an einem Hang (Scherrer, 1997).

Oberflächenabfluss entsteht, wenn die Niederschlagsintensität die momentane Infiltrationsrate des Bodens übersteigt. Dies tritt überwiegend bei undurchlässigen oder schwach durchlässigen Böden auf. Eine weitere Form des Oberflächenabflusses ist der Return Flow. Bereits in den Boden infiltrierte Wasser gelangt nach kurzer Fließstrecke wieder an die Oberfläche. Gründe für den Austritt können beispielsweise Gefällewechsel im Hang oder Makroporen sein. Infiltrierte Niederschlagswasser in den Boden, kann das Wasser in der Bodenmatrix gespeichert werden oder bis zu einem vorhandenen Grundwasserkörper sickern. Die Bewegung des Wassers ist entweder kapillar in den Poren der Bodenmatrix oder nicht-kapillar in Makroporen. Dabei kann zwischen verschiedenen Formen des Wasserflusses im Boden unterschieden werden. Beim Matrixfluss bewegt sich das Wasser durch Mikro- und Mesoporen der Bodenmatrix, beeinflusst durch die Kapillarspannung und den herrschenden Druckunterschied. Der Fluss durch die Makroporen, das sind beispielsweise Klüfte oder Gänge von Bodentieren

und Wurzeln, unterliegt der Schwerkraft und kann vertikal oder lateral erfolgen. Makroporen können in kürzester Zeit bedeutende Wassermassen transportieren. Der Fluss in hoch durchlässigen Schichten entsteht über Fels oder schwach durchlässigen Substraten aufgrund flächiger Auswaschung von Feinmaterial. Im Zusammenwirken mit dem Makroporenfluss kann das Wasser als Zwischenabfluss schnell durch den Boden geleitet werden. Der Grundwasserabfluss basiert auf dem Prinzip der Schwerkraft, er hängt von der Morphologie und der Durchlässigkeit des Bodens ab (Scherrer, 2006).

## 1.3 Stand der Forschung zur Abflussreaktion

### 1.3.1 Elektrische Leitfähigkeit als Tracer für die Bestimmung der Reaktionszeit

Die elektrische Leitfähigkeit ist ein physio-chemischer Tracer, ein Mass für die Konzentration der gelösten Ionen im Wasser. Anhand deren Konzentration können Aussagen bezüglich des Timings und Stärke der Verdünnung durch Niederschlagswasser am Gesamtabfluss gemacht werden. Durch den Kontakt des Wassers mit dem Gestein werden Salze oder Mineralien gelöst. Je länger die Aufenthaltsdauer des Wassers in der Bodenmatrix ist, desto mehr Ionen (v.a.  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$ ) können gelöst werden, was eine höhere EC zur Folge hat (Wetzel, 2003). Da die EC des Niederschlags beinahe null ist, können diese zwei Komponenten Niederschlags- resp. Ereigniswasser und Vorereigniswasser anhand eines Mischungsmodell (EMMA - end member mixing modell; Hooper et al., 1990) am Abfluss separiert werden. Für mehr Details zur Methode verweise ich auf Genereux und Hooper (1998). Um EC als geochemischer Tracer für  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$ - Ionen verwenden zu dürfen, müssen nach Wetzel (2003) einige Grundvoraussetzungen erfüllt sein, wie beispielsweise, dass die geochemischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet homogen sein müssen oder dass die unterschiedlichen Quellen, die zum Abfluss beitragen, eine signifikant unterschiedliche EC aufweisen müssen. Diese Grundvoraussetzungen sind im Alptal erfüllt.

Bei der Verwendung der EC als Tracer ist zu beachten, dass EC kein konservativer Tracer ist und somit eine gewisse Unsicherheit birgt. Durch Lösungsprozesse erhöht sich die EC prinzipiell mit der Verweilzeit in der Bodenmatrix, wobei ebenfalls eine Ausfällung von Mineralien (e.g. Bildung einer Salzkruste) auftreten kann. Für die Nutzung der EC als Timing-Indikator für Niederschlagswasser spielt diese Unsicherheit jedoch eine untergeordnete Rolle, da nicht die Konzentration, sondern das Timing der EC untersucht wird.

Der grösste Vorteil der Verwendung der EC als ein natürlicher Tracer ist, dass eine Aufteilung des Hydrographen in die zwei Komponenten grundsätzlich sehr einfach durchzuführen ist (Zabaleta und Antigüedad, 2012). Ein weiterer Vorteil des Gebrauchs der EC ist, dass EC kontinuierlich gemessen und mit Datenloggern gespeichert werden kann und sehr einfach und relativ kostengünstig zu messen ist (Zabaleta und Antigüedad, 2012). Alternative natürliche Tracer zur elektrischen Leitfähigkeit wären beispielsweise die Silikatmessung oder die Messung der stabilen Isotope Deuterium ( $^2\text{H}$ ) oder Sauerstoff-18 ( $^{18}\text{O}$ ). Die letzteren sind in der Hydrologie die am häufigsten angewendeten natürlichen Tracer. Diese liefern genauere und umfangreichere Resultate als die Messung der EC, basieren jedoch auf Stichprobenmessungen (Leibundgut und Seibert, 2011).

### 1.3.2 Timing der Abfluss-, Boden- und Grundwasserdynamik

Penna et al. (2011) untersuchten den Einfluss der Bodenfeuchte auf die Abflussentstehung in einem alpinen Quelleinzugsgebiet. Dabei analysierten sie die zeitlichen Dynamiken der Abflussreaktion auf den Niederschlag, um die dominanten Prozesse, die das hydrologische Verhalten ihres alpinen Quelleinzugsgebiets kontrollieren, besser zu verstehen. Dafür nutzen Penna et al. (2011) einen für meine Studie vergleichbaren Ansatz des Timings. Sie bestimmten die Zeitspannen zwischen dem Niederschlagsbeginn und dem Start sowie dem Maximum des Abflusses, der Bodenfeuchte und dem Grundwasserspiegel. Um den Effekt der Ereignislänge zu reduzieren werden jedoch alle Zeiten mit der Zeit von Niederschlagsbeginn bis zum Grundwassermaximum (die längste Zeitdauer) normalisiert. Über die genaue Bestimmung der Abflussreaktion werden keine Angaben gemacht. Die Analysen zeigten auf, dass der Abfluss sowie die Bodenfeuchte eine schnelle Reaktion zeigten, der Grundwasserspiegel jedoch verspätet reagierte. Während trockener Vorbedingungen reagierte und wies der Abfluss das Maximum vor der Bodenfeuchte am Hang auf, bei feuchten Vorbedingungen hingegen nach der Bodenfeuchte.

Weitere Forschungsarbeiten bezüglich des Timings des Abflusses, wie z.B. diejenige von Yu et al. (2000) untersuchten nicht die Zeitspanne bis zur Abflussreaktion sondern die „peak-to-peak“ Zeitspanne, also die Zeit vom Niederschlagsintensitätsmaximum bis zur Abflussspitze. Sie untersuchten dabei die Einflüsse der Oberflächenbearbeitungsverfahren auf die Beziehung zwischen der Abflussrate und der Zeitspanne auf Plot-Skala auf lehmhaltigen Sand.

Haught und van Meerveld (2011) untersuchten ebenfalls die räumlich-zeitliche Beziehung mit einem „peak-to-peak“ Timing, jedoch zwischen der Abflussspitze und dem Grundwasserspiegelmaximum. Sie untersuchten die räumliche Variation der Reaktion des hängenden Grundwasserspiegels zwischen dem unteren und oberen Hangbereich. Haught und van Meerveld (2011) zeigten auf, dass die Grundwasserstandorte im unteren Hangbereich vor dem Abfluss reagierten, während die im oberen Hangbereich verspätet reagierten, eine grössere Zeitspanne zwischen Abflussspitze und Grundwasserspiegelmaximum und eine höhere Variabilität aufwiesen. Mit zunehmender Vorfeuchte wurde zudem die Zeitspanne zwischen der Abflussspitze und dem Grundwasserspiegelmaximum kürzer (Haught und van Meerveld, 2011).

Viele Untersuchungen, die das Timing betreffen, wurden an Einzelstandorten und Hängen oder nur anhand weniger Niederschlagsereignissen durchgeführt. Relativ wenig ist jedoch bekannt über die Variabilität des Timing und der Steuermechanismen auf Einzugsgebietsskalen.

### 1.3.3 Timing-Untersuchungen anhand der elektrischen Leitfähigkeit

Forschungsarbeiten, die die EC hinsichtlich des Timings der Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit im Bach- und Bodenwasser während eines Niederschlagsereignisses untersuchten, konnten in der Literatur nicht gefunden werden. Die bisherigen Untersuchungen, die die elektrische Leitfähigkeit als Tracer verwendet haben, wurden mehrheitlich im Bereich der Hydrographen- resp. Ganglinienseparation betrieben. Dabei wurden die prozentualen Anteile des Ereignis- und Vorereigniswassers am Gesamtabfluss analysiert, um Erkenntnisse über die Dynamik der Herkunft des Wassers zu erlangen (e.g. McDonnell et al. (1990) und Wetzel (2003)). Um eine Hydrographen- resp. Ganglinienseparation durchzuführen, wurden in der Vergangenheit mehrheitlich andere natürlichen Tracer wie Silikate oder die

stabilen Isotope Deuterium ( $^2\text{H}$ ) oder Sauerstoff-18 ( $^{18}\text{O}$ ) verwendet. Dies liegt höchstwahrscheinlich daran, dass die EC kein stabiler Tracer ist und sich die EC-Werte während der Verweilzeit im Boden verändern und somit eine gewisse Unsicherheit aufweisen. Forschungen, die anhand der Isotopenkonzentration die unterschiedlichen Komponenten am Abfluss analysierten, wurden von e.g. Sklash et al. (1976), Pearce et al. (1986), McDonnell et al. (1990), Genereux und Hooper (1998) oder McGlynn (2004) durchgeführt. Sie haben aufgezeigt, dass der Oberflächenabfluss während eines Niederschlagsereignisses den Abfluss nicht zu bestimmen vermag, da dieser hauptsächlich aus Ereigniswasser besteht. Beim Abfluss dominiert Vorereigniswasser den Hydrographen. In den meisten Fällen ist der Abfluss zu mehr als 50 % durch Vorereigniswasser bestimmt (Genereux und Hooper, 1998). Sklash et al. (1976) erklären die hohen Anteile an Vorereigniswasser mit einem gestiegenen hydraulischen Gradienten des Grundwasserkörper aufgrund eines Niederschlagsinput, der dazu führt, dass aufgrund eines Verdrängungsprozesses zuerst Vorereigniswasser und erst verspätet Ereigniswasser zum Abfluss gelangt. Dieser Fließprozess wird im Folgenden als Piston Flow bezeichnet.

Die Erkenntnis der Dominanz des Vorereigniswassers wurde auch von Wetzel (2003) gemacht. Er führte eine Ganglinienseparation anhand EC- Messwerten durch, dabei untersuchte er den Abflussbildungsprozess in lockerem Sedimentgestein in einem kleinen alpinen EZG in Oberbayern. Er hat aufgezeigt, dass der Piston Flow Prozess ein Abflussbildungsprozess typisch für vegetationsbedeckte Hänge mit steilem alpinem Relief ist. Er beobachtete eine Abflussreaktion bereits wenige Minuten nach Niederschlagsbeginn. Zudem zeigt er auf, dass die Vegetationsbedeckung keinen Einfluss auf die Abflussreaktion ausübt, jedoch eine Verminderung der Abflussspitze und der Abflusstiefe verursacht. Feyen (1998) führte ebenfalls eine Ganglinienseparation anhand der EC durch. Er untersuchte den Stickstoffkreislauf in Waldökosystemen im Alptal (mehr Details in Kap. 1.4). Dabei zeigte er auf, dass der Gebietsabfluss an zwei Standorten mit unterschiedlicher Humusform zu 71 resp. 59 % durch Vorereigniswasser bestimmt war und es mehr als eine Stunde dauerte, bis die Verdünnung durch Niederschlagswasser einsetzte. Details zum Vergleichen von Timing-Messgrößen der EC sind aus den Untersuchungen nicht zu entnehmen.

### 1.3.4 Die Rolle der Topographie hinsichtlich der Abflussreaktion

Eine wichtige Steuerungsgröße der Abflussreaktion ist die Topographie. Sie beeinflusst die Bodeneigenschaften, die Vegetationsgegebenheiten und das Mikroklima. Viele Einflüsse, die die Topographie auf die hydrologischen Prozesse ausübt, sind eher intuitiv, trotzdem wurde die Rolle der unterschiedlichen topographischen Eigenschaften (Einzugsgebietsgröße, Hangneigung, Hanggeometrie, Aspekt und Mikrotopographie) auf die Abflussbildung quantitativ untersucht (Bachmair und Weiler, 2011).

Viele Hänge weisen eine komplexe dreidimensionale Form auf, die durch ihre Profilkrümmung (topographische Krümmung entlang der Flusslinie: konvex, planar, konkav) und ihre Konturkrümmung (Krümmung entlang der Höhenlinien: divergierend, parallel, konvergierend) charakterisiert ist. Diese Attribute kontrollieren das Fließverhalten und die Sättigung über einen Hang (Troch et al. 2003). Troch et al. (2003) beispielsweise stellten fest, dass konvergierende und divergierende Hänge unterschiedlich schnell entwässern, da der Zwischenabfluss am Hangfuss reduziert ist. Des Weiteren zeigen Troch et al. (2003) auf, dass die Akkumulation des Bodenwassergehalts am Hangfuss des konvergierenden Hanges in glockenförmigen Hydrographen resultieren, hingegen schnell abfließende divergierende Hänge

einen spitzen Hydrographen aufweisen. Neben der grossflächigen Hanggeometrie beeinflusst ebenfalls die Mikrotopographie der Oberflächen und des Ausgangsgesteins die Abflussreaktion (Tromp-van Meerveld und McDonnell, 2006). Der „fill-and-spill“ Mechanismus von Tromp-van Meerveld und McDonnell (2006) zeigt auf, dass während einem Niederschlagsereignis zuerst Ausgangsgesteinssenken aufgefüllt werden müssen, bevor das Wasser über die Kante der Senke fliesst und zum Bodenwasserfluss beiträgt. Grössere Hangneigungen reduzieren diesen Effekt. Dieser „fill-and-spill“ Prozess tritt nur auf, wenn eine Interaktion zwischen dem Ausgangsgestein und dem darüber liegenden Boden besteht, wie dies beispielsweise bei wasserdurchlässigen Böden der Fall ist (Bachmair und Weiler, 2011).

Kuras et al. (2008) analysierten die raum- zeitliche Variabilität der Abflussbildung und Grundwasserdynamiken in einem vom Schnee dominierten EZG in British Columbia (Kanada) anhand verschiedener Parameter inkl. der Einzugsgebietsgrösse. Sie zeigten anhand ihrer Daten von Abflussmessinstallationen für 42 verschachtelte EZG (3 - 18 ha) auf, dass die Abflussmenge signifikant korreliert ist mit der EZG Fläche. Jedoch betonen Kuras et al. (2008), dass neben der Einzugsgebietsgrösse noch weitere geomorphologische Parameter die raum - zeitliche Variabilität der Abflussbildung beeinflussen. McGlynn et al. (2004) untersuchten in Maimai (Neuseeland) ebenfalls die Rolle der Einzugsgebietsgrösse, basierend auf hydrometrischen und Tracerdaten von Flussauen- und Hangdynamiken für fünf Skalen von Hangabschnitten bis zum 280 ha EZG. Dabei stellten sie fest, dass für die Analyse von zwei untersuchten Niederschlagsereignissen keine klare Beziehung zwischen der Einzugsgebietsgrösse und dem Beitrag des Ereigniswassers zum Abfluss besteht. Die Zeitspannen bis zur Tracerreaktion jedoch wurden systematisch länger mit steigender Grösse des EZG. Zudem zeigten McGlynn et al. (2004) auf, dass der Abfluss hauptsächlich aus den Auenzonen im Quellgebiet stammt, wobei ebenfalls Hänge und sich im Talboden befindende Auengebiete während längeren Niederschlagsereignissen und feuchteren Vorfeuchtebedingungen direkt zum Abfluss beigetragen haben.

Weiter wurde der Zusammenhang zwischen der Topographie und der Abflussreaktion von Zehe und Flühlner (2001) anhand von Farbtracer Experimenten (Plot-Skala) untersucht. Sie haben herausgefunden, dass Standorte am Fusse des Hanges tendenziell eher präferentielle Fliesswege aufweisen als Standorte im oberen Teil des Hanges. Sie erklären dies mit der Anwesenheit von tieferen, biologisch aktiveren und öfters feiner texturierten Böden am Hangfuss. Eine Untersuchung von Holden (2009) zu der räumlichen Verteilung des Fliessens durch Makroporen als ein Mass der Bodendurchlässigkeit auf feucht-temperierten Hängen zeigt auf, dass der bodennahe Makroporenfluss mit der Position am Hang variiert. Die räumlichen Muster unterscheiden sich jedoch zwischen den Hängen aufgrund unterschiedlicher Bodentypen. Eine weitere Untersuchung, die die Wichtigkeit der Topographie für den Abfluss bestätigt, wurde von Nippgen et al. (2011) durchgeführt. Anhand von einfachen Transferfunktionen von Niederschlags-Abfluss Modellansätzen haben sie herausgefunden, dass das Abfluss/Niederschlagsverhältnis bei schneedominierten Systemen hauptsächlich durch die Topographie bestimmt ist. Jencso et al. (2011) zeigten ebenfalls auf, dass der Abfluss in ihrem Untersuchungsgebiet hauptsächlich durch die Topographie gesteuert ist. Sie untersuchten in 11 geschachtelten Quelleinzugsgebieten wie EZG-Topographie, Vegetation und Geologie, die Muster des Bachnetzwerks und der Hang-Flussauen-Bach-Konnektivität sowie die Abflussdynamik auf saisonaler und jährlicher Zeitskala beeinflussen.

Smith et al. (2013) untersuchten in einem schneedominierten EZG mit durchlässigen Böden in British Columbia (Kanada) die räumlichen Steuergrößen, jedoch für die Grundwasserdynamik. Sie konnten aufzeigen, dass die EZG Fläche sowie die Hangneigung wichtige Steuergrößen für Dauer der oberflächennahen Grundwasserreaktion sind.

Topographische Steuergrößen für die Grundwasserdynamik wurden ebenfalls von Detty und McGuire (2010) untersucht. Detty und McGuire (2010) analysierten die Muster der räumlichen Konnektivität anhand oberflächennahen Grundwasserschwankungen zwischen dem Hangfuss, Mittelhang und Hangrücken eines kleinen bewaldeten EZG nahe bei West Thornton (USA). Die grössten Grundwasserschwankungen und die längste Grundwasserdauer (d.h. Zeitanteil mit messbaren Grundwasserständen) wurden bei den Hangfussstandorten beobachtet, die kleinsten bei den Standorten am Hangrücken. Die Standorte beim Mittelhang und jene in Oberflächenmulden reagierten zuerst und am dynamisten auf Niederschlagsereignisse nachdem ein gewisser Schwellenwert überschritten wurde. Die hydrologische Konnektivität wies starke saisonale Schwankungen auf. Während trockenen Vorfeuchtebedingungen, typischerweise in der Wachstumsjahreszeit, waren nur die feuchtesten gerinnenahen Hangfussstandorte hydrologisch verbunden, hingegen bei feuchteren Vorfeuchtebedingungen waren der Hangfuss sowie der Mittelhang fast kontinuierlich mit dem Gerinne verbunden (Detty und McGuire, 2010). Des Weiteren haben Detty und McGuire (2010) aufgezeigt, dass Die Grundwasserstandorte mit dem TWI (topographischer Feuchtigkeitsindex) korreliert waren. Allgemein konnten sie aufzeigen, dass die Grundwasserstände nicht nur von statischen Steuergrößen, wie beispielsweise von der Topographie, abhängig sind, sondern auch vom Niederschlag und den Vorfeuchtebedingungen.

## 1.4 Hydrologische Forschung im Alptal

Die eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) betreibt seit dem Jahr 1976 Forschung im Alptal. Das Untersuchungsgebiet beinhaltet drei unterschiedlich bewaldete, zwischen 0.75 und 1.5 km<sup>2</sup> grosse EZG (Burch, 1994). Mein Untersuchungsgebiet liegt unmittelbar südlich des Erlenbach-EZG und weist vorwiegend ähnliche Standortcharakteristiken auf. Ursprünglich war das Ziel der Untersuchungen der WSL ein verbessertes Verständnis für die Hochwasserentstehung in kleinen EZG. Die Forschung konzentrierte sich mehrheitlich auf die physikalischen, quantitativen Aspekte des Waldeinflusses auf die Hydrologie (Hegg et al., 2006). Der Fokus richtete sich später ebenfalls auf ökologische Themen wie die Wasserqualität. Es wurde beispielsweise der Stoffhaushalt von Wildbächen, die Kohlenstoff/Stickstoff Einträge und die Umsätze im Waldökosystem untersucht. Weitere Forschungsschwerpunkte liegen in der Schneehydrologie und dem Geschiebetransport (Hegg et al., 2006). In den letzten Jahren entwickelte sich das Alptal mit seinen Forschungsinstallationen zu einem internationalen Hotspot der Geschiebetransportforschung in Wildbächen (Rickenmann et al., 2012). In dieser über 40-jährigen Forschungsgeschichte wurden umfangreiche neue Erkenntnisse gewonnen. Einen guten Überblick dazu geben Burch (1994) und Hegg et al. (2006). Einen aktuellen Auszug der publizierten Artikel kann zudem auf der WSL Homepage gefunden werden.

Untersuchungen bezüglich des Timings des Abflusses oder der Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit während Ereignissen wurden noch keine im Alptal durchgeführt. Vereinzelt wurde die Abflussbildung und Abflusskonzentration untersucht. Drei Studien (Feyen et al., 1997, 1999; Stadler, 1996) können nicht direkt mit den Ergebnissen meiner Arbeit verglichen werden, liefern aber interessante

Ergebnisse, um meine Erkenntnisse hinsichtlich möglicher dominanter Abflussprozesse zu interpretieren. Feyen et al. (1997) untersuchten den Einfluss des Abflussprozesses auf die Stickstoffbilanz von bewaldeten EZG auf zwei unterschiedlich grossen Flächen (10 m<sup>2</sup> und 1500 m<sup>2</sup>) anhand natürlicher Regenereignisse und künstlicher Beregnungsversuche (mit Tracern). Die experimentelle Untersuchung zeigte für die Hydrographen beider Untersuchungsgebiete ähnlich schnelle Oberflächen- und Zwischenabfluss-Reaktionszeiten auf die Niederschlagsinputs, welche auf die Dominanz von schnell fließenden Pfaden, wie Risse und Spalten oder alte Wurzelkanäle, die das Fließen durch die Bodenmatrix umgehen, hindeuten. Zudem beobachteten Feyen et al. (1997) einen raschen vertikalen Rückfluss (return flow) vom gesättigten Unterboden in die oberen Schichten des Oberbodens. Anhand eines Tracer Experiments untersuchten Feyen et al. (1999) unter kontrollierten hydrologischen Bedingungen die Fließwege durch Makroporen im bewaldeten Boden. Die Tracer Injektionen erreichten den Gebietsabfluss etwa 1000 Mal schneller als anhand der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit durch die Bodenmatrix erwartet werden könnte. Die Tests zeigten auf, dass der Unterboden sehr durchlässig ist und ein Netzwerk von verbundenen Makroporen existiert. Im Gegensatz zum Unterboden war der Fluss durch die Bodenmatrix der dominante Transportprozess für die oberen Humusschichten, wobei der Fluss bei diesen, unabhängig von ihrer Art, viel langsamer ist. Weiter lassen die Tests darauf schließen, dass hauptsächlich Ereigniswasser zum Abfluss beiträgt und die wenig durchlässigen, tonigen Unterböden den Austausch des Bodenmatrixwassers verhindern. Die von anderen Autoren beobachtete Mobilisation von Vorereigniswasser (McDonnell, 1990) findet laut Feyen et al. (1999) nicht statt. Im Rahmen einer weiteren Untersuchung des Stickstoffkreislaufes in Waldökosystemen beleuchtete Feyen (1998) die Abflussbildung auf drei räumlichen Skalen. Er zeigte zudem auf, dass trotz der unterschiedlichen Verteilung von Vegetation und Humusformen die Abflussdynamik der Teileinzugsgebiete ähnlich sind. Daraus folgerte er, dass nicht der Flächenanteil an Anmoor oder Rohhumus, sondern deren räumliche Anordnung und die Anwesenheit wassergesättigter Gebiete die Abflussbildung bestimmt. Eine weitere Untersuchung der Stickstoffbilanz von Schleppi et al. (1998) in zwei kleinen Quelleinzugsgebieten zeigt auf, dass die räumliche Heterogenität des Bodens einen Bezug zur Mikrotopographie des Standortes und der Vegetation aufweist. Weiter wird spekuliert, dass der Abfluss hauptsächlich durch präferentielles Fließen durch Makroporen entsteht.

Ali et al. (2011) untersuchte, um die Einzugsgebietsprozesse besser zu verstehen, die hydropedologischen Muster und die Speicher-Abfluss Beziehungen in Hermine (Kanada), in einem vergleichbaren Einzugsgebiet wie wir dies im Alptal vorfinden, bewaldet, mit steiler Oberflächentopographie und niedrigen, schlecht durchlässigen Böden. Ihre Untersuchungen lassen darauf schließen, dass schnelle laterale Fließwege durch präferentielles Fließen einer der Hauptmechanismen ist, der die Abflussgenerierung steuert. Die präferentiellen Fließwege müssten nach Ali et al. (2011) jedoch noch genauer untersucht werden.

Obwohl bereits einige Erkenntnisse zur Abflussbildung und Abflussdynamik existieren, sind die dominanten Abflussprozesse, v.a. auf der Skala ganzer Quelleinzugsgebiete, noch wenig verstanden. In Anbetracht der in den letzten Jahren gewonnenen hydrologischen Erkenntnisse und den Möglichkeiten, die sich durch das Grundwasser und Abfluss Monitoring Netzwerk am Studibach ergeben haben, versuche ich u.a. mit meiner Arbeit ein Beitrag dazu zu leisten, dass die Abflussbildung und Abflussdynamik im Alptal und allgemein in steilen, voralpinen EZG mit wenig durchlässigen Böden, besser verstanden wird.

## 1.5 Zielsetzung

Das Ziel meiner Masterarbeit ist das Erlangen eines besseren Prozessverständnisses der Abflussbildung und Abflusskonzentration in einem steilen, voralpinen EZG mit wenig durchlässigen Böden. Speziell möchte ich den Einfluss unterschiedlicher topographischer Einzugsgebietseigenschaften aufzeigen, die die Abflussprozesse am jeweiligen Messstandort dominieren und einen Teil der beobachteten Variabilität des Abflusses über das EZG erklären können. Dafür quantifiziere ich die

- Abflussmenge und
- Abflussdynamik

und analysiere deren potentiell steuernden Faktoren. Bei der Analyse der Abflussmenge geht es um die Quantität des Wassers im Gerinne allgemein und im Verhältnis zur Einzugsgebietsgrösse. Bei der Abflussdynamik ist die Reaktion des Abflusses sowie der EC, also die Zeiten vom Niederschlagsbeginn bis zum Abflusskurvenanstieg resp. dem Eintreten der EC-Verdünnung von Interesse. Um den Zeitpunkt der Reaktion des Abflusses und der elektrischen Leitfähigkeit zu bestimmen, werden zum einen eine händische, zum anderen fünf automatisierte Methoden angewendet. Es ist weiter ein Ziel herauszufinden, ob eines dieser automatisierten Verfahren die Abfluss- resp. EC- Reaktion ähnlich gut detektieren können wie eine händische Bestimmung. Dafür werden die Reaktionszeiten der verschiedenen Verfahren einander gegenübergestellt und mit der händischen Bestimmung verglichen.

Hauptsächlich werde ich in meiner Arbeit den Oberflächenabfluss analysieren, wobei auch Grundwasser, Quell- und Makroporenabfluss Gegenstand meiner Untersuchungen sind.

## 1.6 Forschungsfragen

Die folgenden Forschungsfragen werden im Rahmen dieser Masterarbeit untersucht:

### 1. Methodenvergleich: Bestimmung der Reaktionszeiten

Wie gross ist der Unterschied verschiedener Methoden in der Bestimmung der Abfluss- resp. EC- Reaktionszeiten? Generieren einfache Methoden ähnlich gute Resultate, im Vergleich zu komplexen Methoden, die mehrere Kriterien berücksichtigen können, und zur händischen Bestimmung? In anderen Worten, welches einfache automatische Verfahren zur Bestimmung der Abfluss- resp. EC- Reaktionszeiten hat im Mittel bzw. Median die geringste Abweichung zur händischen Bestimmung resp. zu einer komplexen Methode?

### 2. Abflussmenge

Welche topographischen Einzugsgebietseigenschaften beeinflussen massgeblich die Abflussmenge in einem steilen, voralpinen EZG mit wenig durchlässigen Böden? Im Speziellen, wie verändert sich die mittlere bzw. median Abflussmenge an den Messstandorten in Abhängigkeit von topographischen Steuerfaktoren?

### 3. Abflussdynamik

Welche topographischen Einzugsgebietseigenschaften beeinflussen massgeblich die Abfluss- resp. EC- Reaktionszeiten in einem steilen, voralpinen EZG mit wenig durchlässigen Böden? Im Speziellen, wie verändern sich die mittleren bzw. median Abfluss- resp. EC- Reaktionszeiten an den Messstandorten in Abhängigkeit von topographischen Steuerfaktoren?

Die Forschungsfragen wurden anhand einer Literaturrecherche, persönlichen Überlegungen und der Diskussion mit Michael Rinderer aufgestellt.

Bei der ersten Forschungsfrage werden verschiedene Methoden für die automatisierte Bestimmung der Abfluss- resp. EC- Reaktionszeit untersucht. Ich gehe davon aus, dass eine händische Bestimmung der Reaktion der Ganglinie die genauesten Resultate liefert, da der Experte bei der Bestimmung des Anstiegs des Abflusses bzw. der Verdünnung der EC mehrere für die Bestimmung der Reaktion relevante Faktoren, wie beispielsweise der Verlauf des Niederschlagsereignisses, das allgemeine Reaktionsverhalten des Messstandorts, der Verlauf der Ganglinie vor und seit des Niederschlagsbeginn oder das Rauschen berücksichtigen und somit einen hydrologisch plausiblen Zeitpunkt der Reaktion identifizieren kann. Da jedoch eine händische Bestimmung der Reaktion resp. der Reaktionszeit mit einem sehr grossen zeitlichen Aufwand verbunden ist, ist es von Vorteil, automatisierte Bestimmungsmethoden zu verwenden. In Anbetracht der Komplexität der Reaktionsbestimmung ergibt sich die Frage, ob komplexe Methoden, die viele dieser Faktoren zu berücksichtigen versuchen, auch wirklich besser sind als einfache Methoden. Hinsichtlich der hydrologischen Bedeutung dieses zeitlichen Masses, welches die Reaktionsgeschwindigkeit des Abflusses auf den Niederschlag resp. das Eintreten der Verdünnung durch Niederschlagswasser widerspiegelt, und der Tatsache, dass die unterschiedlichen Methoden der Bestimmung der Abfluss- bzw. EC- Reaktionszeit und deren Auswirkungen auf die Resultate in der Literatur, wenn überhaupt, nur am Rande beschrieben und bis jetzt noch nicht systematisch untersucht wurden, werde ich verschiedene einfache automatische Bestimmungsmethoden einander gegenüberstellen und mit der Abfluss- sowie EC-Reaktionszeiten einer komplexen Bestimmungsmethode und der händischen Bestimmung vergleichen und versuchen die beste einfache automatische Bestimmungsmethode ausfindig zu machen.

Ich erwarte, dass die beste einfache automatische Bestimmungsmethode der Abfluss- resp. EC- Reaktionszeit sich nur wenig von einer komplexen resp. der händischen Bestimmung unterscheidet, jedoch grosse Unterschiede in der Bestimmung zu den restlichen einfachen Methoden aufweist.

Die zweite und dritte Forschungsfrage beschäftigen sich mit dem Einfluss der topographischen Einzugsgebietseigenschaften auf die Abflussmenge resp. die Abflussdynamik. Nach Jones und Swanson (2001) ist es wichtig, dass allgemeine hydrologische Prinzipien von einzelnen intensiv untersuchten Forschungsgebieten abgeleitet werden, sodass diese untereinander verglichen werden können. Dazu müssen die Hauptsteuerungsmechanismen der Abflussbildung, die die einzelnen Prozesse des Zwischenabflusses beeinflussen, untersucht werden (Weiler et al., 2005). Mehrere Autoren unterstreichen zudem die Wichtigkeit der unterschiedlichen raum-zeitlichen Gegebenheiten (u.a. McGlynn, 2004; Weiler et al., 2005; Uhlenbrook, 2006). Uhlenbrook (2006) betont beispielsweise, dass die hydrologischen Prozesse in ihrer raum-zeitlichen Variabilität auf Einzugsgebietsebene noch genauer untersucht werden sollen und Weiler et al. (2005) hebt hervor, dass detaillierte Messungen des Abflusses kombiniert mit Traceranalysen in Raum und Zeit, essentiell sind, um die konzeptionellen und numerischen Modelle des Zwischenabflusses zu belegen. In Anbetracht dessen versuche ich in meiner Arbeit,

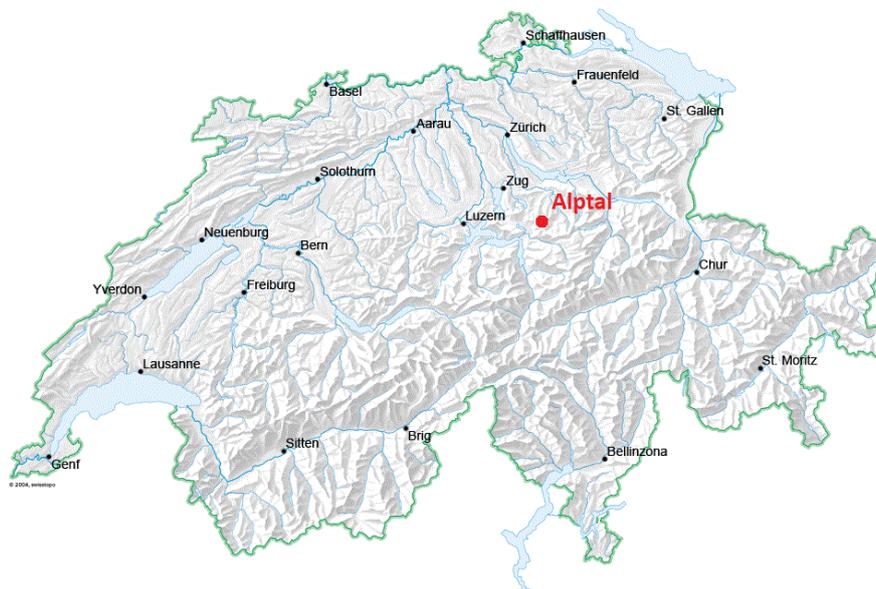
anhand ineinander geschachtelter EZG unterschiedlicher Grösse (von 0.2 ha bis 20 ha) und Untersuchungen bezüglich des Timing der Abflussreaktion, herauszufinden, ob die Topographie resp. topographische Einzugsgebietseigenschaften als ein möglicher Einflussfaktor für die Abflussbildung und -konzentration im Alptal und allgemein für feuchte, steile EZG mit wenig durchlässigen Böden angesehen werden kann.

Ich erwarte, dass die beste, einfache, automatische Bestimmungsmethode der Abfluss- resp. EC- Reaktionszeit sich nur wenig von einer komplexen resp. der händischen Bestimmung unterscheidet, jedoch grosse Unterschiede in der Bestimmung zu den restlichen einfachen Methoden aufweist.

## 2 Material

### 2.1 Gebietsbeschreibung

Das Untersuchungsgebiet liegt im Alptal, im Kanton Schwyz, und grenzt an das EZG des Erlenbachs. Dieser weist eine lange Forschungsgeschichte über den Einfluss von Wald auf den Abfluss, die Wasserqualität und den Geschiebetransport auf (Hegg et al., 2006). Das Alptal beginnt in der Mythenregion und verläuft nordwärts in Richtung Einsiedeln (s. Abb. 3). Das Klima ist feucht-gemässigt mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 6 °C (-2 °C im Februar und 17 °C im August) und einer Niederschlagssumme von 2300 mm pro Jahr (davon 30 % als Schnee), mit dem Maximum im Juni (270 mm) und dem Minimum im Oktober (135 mm) (Feyen et al. 1999).



**Abb. 3.** Karte der Schweiz mit der hervorgehobenen Lage des Alptals (SZ) (verändert nach NSNZ, 2014).

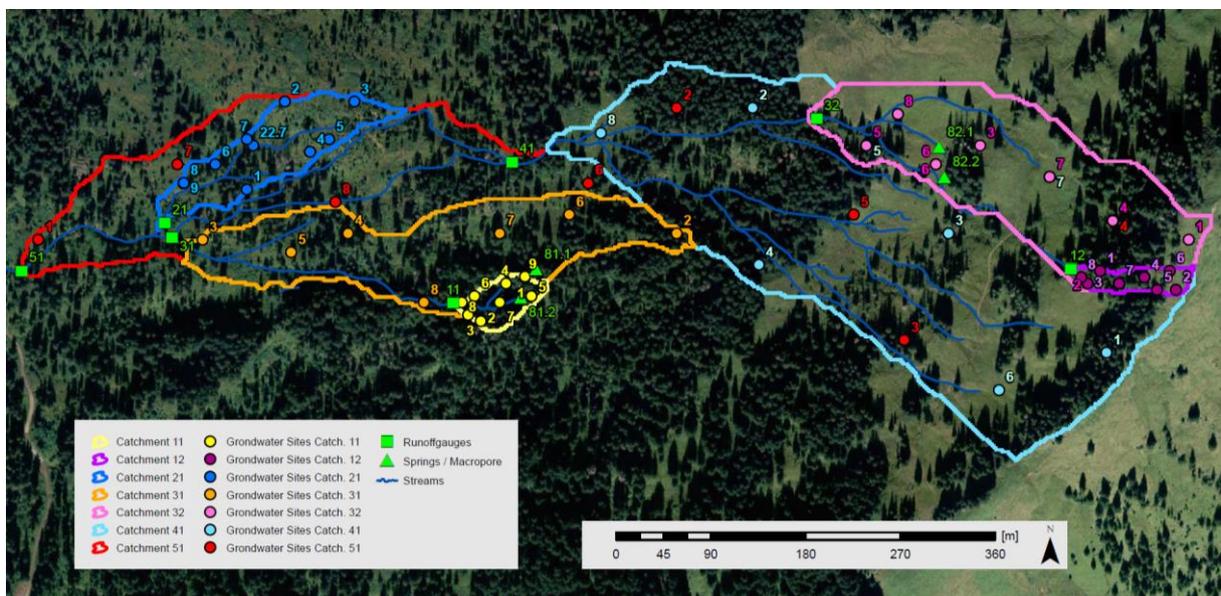
Das untersuchte EZG „Studibach“ ist ein Zufluss des Zwäckentobels und liegt gegenüber des kleinen Mythen. Es ist etwa 20 ha gross, schmal, steil (durchschnittliche Neigung ca. 35 %), mit einer süd-westlichen Ausrichtung und erstreckt sich von 1270 m bis auf 1650 m ü. M. (s. Abb. 4).

Die geologische Formation des Untersuchungsgebiets ist Flysch; ein metamorphes Gestein, bestehend aus Wechsellagen von Tonsteinen und grobkörnigeren Gesteinen (v.a. Sandsteine). Die Unterböden des Gebiets sind ton- und lehmhaltig und weisen eine Tiefe von 0.5 m auf Erhöhungen, bis zu 2.5 m in Senkungen auf. Sie werden nach der World Reference Base for Soil Resources (WRB) als Umbric oder Mollic Gleysols klassiert (Schleppi et al. 1998). Die Bodentextur ist bei den meisten Messstandorten schluffiger Ton, einige weisen sandigen Ton und wenige eine lehmige Textur auf.

Abhängig von der Mikro-Topographie kann zwischen zwei ausgeprägten, organischen Oberböden unterschieden werden: Mor Humus auf kleinen Höhenrücken und Muck Humus in Vertiefungen (Feyen et al. 1999).

Aufgrund der hohen Niederschlagsmengen und dem schlecht durchlässigen Boden, haben sich Moorlandschaften entwickelt. Diese weisen typischerweise eine dicke organische Schicht, mit hohem Humusanteil und dichter Verwurzelung auf (Rinderer et al., 2014). Aufgrund dieser dichten Verwurzelung, vieler Steine und Totholz in der sauerstofffreien Schicht, existiert ein kontinuierliches Netzwerk von Makroporen (Feyen et al. 1996). Zudem haben Erdbeben und Bodenkriechen eine Abfolge von steileren und flacheren Gebieten geformt, die eine komplexe Mikrotopographie aufweisen. Das Drainagenetzwerk ist ziemlich dicht. Abgesehen vom Hauptbach vor dem Untersuchungsgebietsabfluss sind die meisten Bachbetten nicht tief eingeschnitten (Rinderer et al., 2014).

Die vorherrschende Vegetation variiert im EZG. Das obere Drittel besteht aus Weideland (Alpbetrieb im Sommer) und dichteren Nadelwäldern (vorwiegend Fichten), hingegen im unteren Teil sind Moor- und Buschlandschaften sowie offene Nadelwälder vorherrschend. Im Unterwuchs dominieren Blaubeeren, Schachtelhalme und Farne, die Nadelwälder bestehen mehrheitlich aus Fichten.



**Abb. 4.** Situationsplan des Abfluss- und Grundwasser-Monitoring-Netzwerk am Studibach (Alptal, SZ). Dargestellt sind die ineinander geschachtelten Teil-EZG mit den räumlich verteilten Grundwassermessstandorten (durchnummeriert von 1 – 9 in jedem Teil-EZG) sowie die Abflussmessstandorte in grün (Gerinneabfluss: Quadrat, Quelle/Makropore: Dreieck) (eigene Darstellung).

## 2.2 Forschungsmessnetz Studibach

Das Grundwasser-Abfluss-Monitoring-Netzwerk am Studibach wurde von meinem Betreuer, Michael Rinderer, im Rahmen seiner Doktorarbeit in Zusammenarbeit mit der H2K Gruppe der Universität Zürich aufgebaut. Der Studibach wurde ausgewählt, da in dem EZG keine anthropogenen Drainagesysteme existieren und wir an natürlichen Bedingungen interessiert sind. Michael Rinderer untersuchte im EZG des Studibachs die hydrologische Konnektivität, die räumlichen Muster der Grundwasserdynamik, sowie die Abflussreaktion auf unterschiedlichen Skalenebenen, um den Einfluss der Einzugsgebietseigenschaften auf die Funktionsweise des Systems einschätzen zu können.

Im Rahmen meiner Masterarbeit nutze und betriebe ich dieses bereits bestehende hydrologische Messnetz für das Jahr 2013. Um meinen Fragestellungen und Hypothesen nachzugehen erweiterte ich das

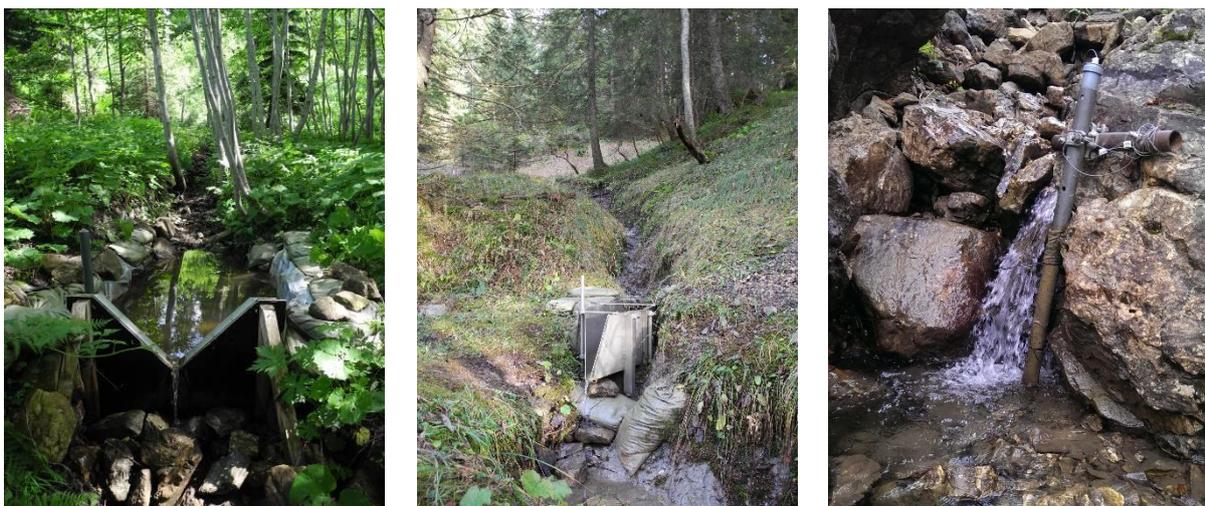
Messnetz mit einer zusätzlichen Quell- sowie einer Makroporenmessinstallation, die neben dem Abfluss auch die elektrische Leitfähigkeit und die Temperatur aufzeichnen.

Weltweit gibt es nur ein bis zwei weitere Gebiete, in denen die Grundwasser- und Abflussdynamik das ganze Jahr, mit vergleichbarer Grösse des EZG und Dichte der Messstandorte, untersucht wird (Ali et al. 2011). Der Datensatz der seit 2010 aufgebaut wird, ist weltweit aussergewöhnlich.

## 2.3 Monitoringnetzwerk und Messdaten

Der Abfluss wurde an zehn verschiedenen Stellen im Einzugsgebiet des Studibachs gemessen. Sieben Abflussmessstationen befinden sich beim Auslass von verschachtelten Teil-EZG. Diese weisen, um eine gute räumliche Abdeckung zu erhalten, unterschiedliche Skalen ( $\sim 0.2$  ha,  $\sim 1$  ha,  $\sim 3.5$  ha,  $\sim 12$  ha und  $20$  ha) auf. Zusätzlich zu den Abflussmessstellen der einzelnen Teil-EZG wird der Abfluss von zwei Quellen und einer Makropore gemessen. Eine Quell- sowie die Makroporeninstallation habe ich im Rahmen meiner Masterarbeit dem Monitoring-Netzwerk hinzugefügt, um u.a. das Timing der Verdünnung durch Niederschlagswasser genauer zu untersuchen.

Um den Abfluss der Teil-EZG zu messen wurden drei unterschiedliche Messinstallationen verwendet. HS Flumes (Teil-EZG 11 und 12) und  $90^\circ$  Thomson-Wehre (Teil-EZG 21, 31, 32) (s. Abb. 5) wurden im Gerinne mit geringem Fluss und moderatem Sedimenttransport eingesetzt. Aus den gemessenen Pegelständen wurde anhand von Pegelschlüsselkurven (U. S. Department of the Interior, 2001), die mit mehreren Salzverdünnungs- und Eimermessungen überprüft wurden, den Durchfluss berechnet. Für das grösste und zweitgrösste EZG (51 und 41) wurden die Pegelstände anhand eines natürlichen Durchflussquerschnitts (s. Abb. 5) bestimmt, da eine Wehrkonstruktion nicht möglich war. Änderungen im natürlichen Querschnitt wurden regelmässig dokumentiert, waren jedoch vernachlässigbar für den Untersuchungszeitraum. Um die Pegelschlüsselkurve zu ermitteln wurde auch hier die Salzverdünnungsmethode angewandt.



**Abb. 5.** Messinstallationen Abfluss:  $90^\circ$  Thomson Wehr 21.0 (l.), HS Flume 11.0 (m.) und Pegelstandsmessung am offenen Querschnitt 51.0 (r.) (Foto: Herrmann, Sommer/ Herbst 2013).

Um den Abflusspegel der Quell- sowie dem Makroporenstandort zu messen wurde jeweils eine der Abflussmenge entsprechend grosse Utz Box mit integriertem 45° V-Wehr verwendet (s. Abb. 6). Mit Hilfe der Pegelschlüsselkurven (U. S. Department of the Interior, 2001) wurde der Durchfluss berechnet. Die beprobte Makropore wurde während eines Niederschlagsereignisses ausfindig gemacht. Die Beprobung dieser Makropore ist insofern interessant, da ich mir u.a. mögliche Hinweise über das Timing des präferenziellen Fließens durch die Makropore und der Verdünnung durch Niederschlagswasser erhoffe. Da nur ein Makroporenstandort untersucht wird, können jedoch keine allgemeingültigen Aussagen gemacht werden, für repräsentative Messungen bräuchte es mehr Standorte. Die Makropore weist einen Durchmesser von ca. 3 bis 4 cm auf und wurde sehr wahrscheinlich von Mäusen gegraben (s. Abb. 7).



**Abb. 6.** Abflussmessinstallation der Makropore 81.1 (EZG 11) (l.) und der zwei Quellen 81.2 (EZG 11) (m.) und 82.1 (EZG 32) (r.) (Foto: Herrmann, Sommer/ Herbst 2013).



**Abb. 7.** Makroporenmessinstallation mit Makroporenausgang (3 - 4 cm Durchmesser) (EZG 11) (Foto: Herrmann, 28.10.2013).

An 51 Standorten im EZG wird kontinuierlich den Grundwasserpegel gemessen. Da die einzelnen EZG verschachtelt sind, konnte die Anzahl Messstandorte durch EZG überlappende Standorte optimiert werden. 56 Grundwassermessstellen sind installiert, acht pro Teil-EZG. Diese acht Standorte wurden jeweils mit Hilfe des topographischen Feuchtigkeitsindex (TWI) bestimmt, da der TWI, wie Felduntersuchungen aufzeigten, im Studibach-EZG ein guter Feuchtigkeitsindikator ist. Standorte mit gleichem TWI weisen ähnliche Grundwasserreaktionen auf. Der TWI ist definiert als  $\ln(a / \tan\beta)$ , wobei  $a$  als die Fläche des EZG relativ zur Konturlänge [m] und  $\beta$  als die Hangneigung am Messstandort [°] definiert ist (Sörensen, Zinko, & Seibert, 2005). Für jedes Teil-EZG wurden die Pixel in acht TWI Klassen gruppiert. Die Koordinaten der Messstellen wurden durch selektieren der Pixel mit einem ähnlichen TWI wie der Median TWI jeder Gruppe bestimmt.

Der Grundwasserpegel wird in einem PVC Rohr gemessen (s. Abb. 8). Das Rohr mit 4 cm Durchmesser wurde bis zum Grundgestein im Boden versenkt und mit Bentonit verschlossen. Diverse Schlitzte und ein 1.5 cm dicker Mantel aus Sand entlang des Rohrs wurde für eine optimale Infiltration des Grundwassers angebracht. Um Messfehler durch Sickerwasser entlang des Rohres vorzubeugen, wurde eine dünne Plastikabdeckung horizontal 2 - 4 cm unterhalb der Erdoberfläche angebracht. Die Länge der Rohre variieren je nach Tiefe des Festgesteins am Messstandort von 0.46 m bis 2.16 m (mittlere Tiefe ist 1.06 m). Die Grundwasserdaten wurden alle 2 bis 3 Monate beim Datendownload mit händischen Messungen des Wasserstands überprüft.

Die Bezeichnung der Messstandorte besteht aus drei Zahlen; die ersten beiden weisen auf die Skala oder Grösse des Teil-EZG (1 bis 5) sowie auf die Anzahl vorhandener Teil-EZG mit gleicher Grösse hin (1 oder 2). Die dritte Zahl definiert den TWI Rang des jeweiligen Standortes (1 bis 8). Der Standort 12.8 beispielsweise befindet sich im zweiten der zwei kleinsten Teil-EZG und weist den feuchtesten Standort des Teil-EZG 12 auf.

Es gibt drei Grundwasserstandorte (mit der Endung 9), an denen auf zwei unterschiedlichen Tiefen der Grundwasserpegel gemessen wird. Bei 32.6 resp. 32.9 wurden zusätzlich die elektrische Leitfähigkeit sowie die Temperatur gemessen.



**Abb. 8.** Messinstallationen Grundwasser für verschieden feuchte Standorte (51.2: TWI = 3.84, 41.3: TWI = 4.64, 32.5: TWI = 5.46 und 51.8: TWI = 8.96) mit steigendem TWI von trocken (l.) bis feucht (r.) (Foto: Herrmann, November 2013).

Um die Daten kontinuierlich aufzuzeichnen, werden im Untersuchungsgebiet zwei Logger mit unterschiedlichem Messprinzip verwendet. Zum einen Odyssey Logger (Capacitance Water Level Recorder - Dataflow Systems Pty Limited, New Zealand), die den Wasserstand mit Hilfe eines Teflonkabels anhand der Veränderung des elektrischen Widerstandes bei unterschiedlichen Pegelständen messen, zum andern STS Drucklogger (DL/N 70 Water Level Logger - Sensor Technik Sirnach AG), die die Temperatur, die elektrische Leitfähigkeit sowie den Druck aufzeichnen. Der gemessene Druck wird im Nachhinein in den Wasserstand umgerechnet, er ist eine Kombination aus dem vorherrschenden Luftdruck und dem durch den Wasserstand wirkenden Druck auf das Druckmembran (s. Kap. 2.4) für mehr Details).

Für die Grundwasserpegelmessung werden mehrheitlich Odyssey Logger eingesetzt. Für sechs hydrologisch sehr interessante Standorte mit unterschiedlichem mittleren Grundwasserstand (11.6, 12.8, 21.1, 31.3, 32.6, 32.9) wurden hingegen STS Logger verwendet, um die Veränderung der EC im Grundwasser zu beobachten. Die Abflussmessung wird mit STS Logger durchgeführt, für die Wintermonate werden jedoch diese durch Odyssey Logger ersetzt, da die STS Logger frostempfindlich sind. Die Messintervalle variieren mit der Art Logger, dem Messtyp sowie mit der Jahreszeit (s. Tab. 1).

Der Niederschlag, die Temperatur sowie der barometrische Druck wird etwa 500 m nordwestlich des Untersuchungsgebiets auf 1219 m ü. M. von einer dauerhaften Wetterstation der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) gemessen. Der Niederschlag und die Lufttemperatur werden alle 10 min, der Luftdruck alle 5 min gemessen. Es bestehen keine verlässlichen Informationen bezüglich der räumlich-zeitlichen Muster des Niederschlags, wobei erwartet wird, dass der Höhengradient des Niederschlags klein und das Timing des Einsetzens des Niederschlags sich ausgleichen wird, auch wenn die Untersuchungsperiode mit vier Monaten relativ kurz ist.

**Tab. 1.** Unterschiedliche Messintervalle für STS und Odyssey Logger für die Grundwasser-, Abfluss- sowie die Quell- und Makroporenmessung.

<b>Typ Messstandort</b>	<b>Sommer Intervall / Messgerät</b>	<b>Winter Intervall / Messgerät</b>
<b>Abfluss</b>	1 min (STS)	10 min (Odyssey)
<b>Grundwasser</b>	10 min (Odyssey) 5 min (STS)	10 min (Odyssey) 5 min (STS)
<b>Makropore</b>	1 min (STS)	10 min (Odyssey)

## 2.4 Datenaufbereitung

### **Korrektur Wasserdruck**

Die STS Logger messen mit einer Drucksonde den vorherrschenden Druck am Messstandort. Dieser ist eine Kombination aus dem durch den Wasserstand im Gerinne oder in der Wehrkrone wirkenden Druck und dem Luftdruck. Da der Luftdruck bei der auf 1219 m ü. M. gelegenen Wetterstation der WSL gemessen wird, muss zusätzlich der Druckunterschied aufgrund der Höhendifferenz zwischen der Wetterstation und dem jeweiligen Messstandort Rechnung getragen werden. Somit muss der beim Wehr gemessene Druck einerseits um den Luftdruck der Wetterstation, andererseits um den Druckunterschied infolge der Höhendifferenz korrigiert werden. Als letztes muss die Distanzunterschied zwischen dem Druckmembran und dem tiefsten Punkt des V-Ausschnittes des Wehrs berücksichtigt werden, um den effektiven Wasserstand [cm über V-Wehr Öffnungswinkel] zu erhalten.

### **Korrektur Wasserstand**

Die Odyssey Logger nutzen das Messprinzip des elektrischen Widerstandes, um anhand unterschiedlicher Eintauchtiefe eines Teflonkabels die Wasserstände zu messen. Sie zeichnen Wasserstände relativ zum unteren Ende des Messdrahtes auf, diese müssen in Bezug zur Messinstallation am jeweiligen Standort gesetzt werden. Dabei spielen mehrere Parameter eine Rolle. Für Grundwassermessungen sind dies die Länge des Teflonkabels, mit Hilfe dessen das Gerät die Wasserstände misst, die Bohrtiefe des Messrohrs sowie die Distanz von der Erdoberfläche bis zum Logger, der nicht ebenerdig installiert werden konnte. Um den absoluten Wasserstand pro Standort zu erhalten, müssen diese Werte miteinander verrechnet werden. Sinngemäß wurde dasselbe Prinzip für die Abflussmessungen angewandt.

Zeitgleich zu jedem Datendownload im Feld (alle 2 bis 3 Monate) wurden an allen Messstandorten händisch Wasserstandsmessungen durchgeführt. Diese wurde genutzt um die Datenreihen absolut zu repositionieren. Aufgrund eines systematischen Fehlers, beispielsweise Kalibrierungsungenauigkeiten der Drucksonden resp. der Wasserstandslogger können Abweichungen zur Handmessung auftreten. Die Differenz zwischen händischer Messung und aufgezeichnetem Messwert des Geräts wird für die Bestimmung des endgültigen Wasserstands berücksichtigt. Schwankt die Differenz zwischen zwei Download-Zeitpunkten, so wird dieser Unterschied linear auf alle Messwerte zwischen diesen Zeitpunkten verteilt.

### **Datenbereinigung**

Die teils aufbereiteten Daten der Odyssey sowie der STS Logger weisen jedoch noch Messfehler auf (z.B.: Datenausreisser). Diese müssen erkannt und korrigiert werden. Dies sind Sprünge oder Unregelmäßigkeiten in den Datenreihen, die nicht mit Niederschlagsereignissen erklärt werden können. Zum Beispiel im Wehr angesammelte Ästen oder Laub, die bei einer Abflusstation den Pegel steigen lassen. Weitere Möglichkeiten sind Störungen oder Defekte eines Loggers.

### **Datenlücken**

Die Daten liegen nach dem Auslesen in einzelnen Teilen vor, diese müssen zu einer durchgehenden Datenreihe pro Standort zusammengefügt werden. Dabei sind Datenlücken unvermeidlich. Die Lücken, die nicht länger als 50 min dauern, werden interpoliert, die fehlenden Werte als „nicht verfügbar“ (NA) bezeichnet.

### Umrechnung des Wasserstandes in den Abfluss

Die gemessenen Pegelstände wurden anhand von Pegelschlüsselkurven (U. S. Department of the Interior, 2001), die mit mehreren Salzverdünnungs- und Eimermessungen während sieben Ereignissen von unterschiedlicher Stärke und einer Messung bei Niedrigwasserfluss überprüft wurden, in den Durchfluss umgerechnet.

Die Aufbereitung und Korrektur der Daten wurde mit „Python“ und „R“, mehrheitlich von Michael Rinderer, durchgeführt.

## 2.5 Einzugsgebietseigenschaften

Steuerfaktoren definierte ich als Eigenschaften, die signifikant mit dem Mittel- und Medianabfluss der einzelnen Messstandorte korrelieren und folglich einen Teil der beobachteten Variabilität des Abflusses des EZG erklären können. Bei den Standorteigenschaften wurde zwischen topographischen Eigenschaften am Standort und topographischen Eigenschaften gemittelt über das jeweilige EZG unterschieden, wobei erwartet wurde, dass für den Oberflächenabfluss nur die letzteren die Reaktionszeit und die Abflussmenge an den Messstandorten beeinflussen. Für das Timing der Grundwasserstandorte zeigten Rinderer et al. (2014) und Rinderer et al. (in preparation), dass sowohl lokale Standorteigenschaften als auch Eigenschaften des EZG mit dem mittleren Grundwasserstand und Timing korrelieren.

Folgende topographische Eigenschaften von Michael Rinderer erhoben (s. Tab. 2):

- Hangneigung am Messstandort [%]
- Krümmung am Messstandort [-]
- Topographischer Feuchtigkeitsindex (TWI) am Messstandort [ $\ln(m)$ ]
- Einzugsgebietsfläche [ $m^2$ ]
- Mittlere Hangneigung des Einzugsgebietes [%]
- Mittlere Krümmung des Einzugsgebietes [-]

Die topographischen Eigenschaften am Messstandort wurden basierend auf dem digitalen Terrainmodell (DTM) berechnet, welches von LiDAR Daten abgeleitet wurde. Verschiedene DTM-Auflösungen wurden getestet, wobei eine 6 m Auflösung sich als Optimum erwies, um markante morphologische Gegebenheiten (Kämme, Senken) abzubilden, aber den Einfluss der Mikrotopographie (Höcker, Kuppen) gering zu halten. Zur Bestimmung der mittleren Einzugsgebietseigenschaften wurden die Eigenschaften oberhalb eines Betrachtungspunktes über die Grösse des EZG gemittelt. Zur Bestimmung der Einzugsgebietsfläche kam der „multiple flow direction“ Algorithmus (Seibert und McGlynn, 2007) zur Anwendung. Die Hangneigung wurde mit Hilfe der Methode von Tarboton (1997) berechnet. Für die Berechnung aller Indices wurde die Open Source Software SAGA-GIS (Conrad, 2007) verwendet. Es muss noch angemerkt werden, dass der Mittelwert des topographischen Index, der das EZG charakterisiert, von der Grösse der Fläche, über welche sie gemittelt wurde, abhängig ist.

**Tab. 2.** Topographische Einzugsgebietseigenschaften für die Abfluss- (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0,41.0, 51.0), Quell- (81.2, 81.1) und den Makroporenstandort (81.1).

Standort	11.0	12.0	21.0	31.0	32.0	41.0	51.0	81.1	81.2	82.1
Hangneigung am Standort [%]	25.9	54.6	18.9	17.5	19.5	30.0	27.5	49.4	45.9	28.0
Krümmung am Standort [-]	-0.44	-0.17	-0.08	-0.42	-0.63	-0.25	-1.17	0.37	-0.16	-0.04
TWI Standort [ln(m)]	7.13	6.13	8.84	10.19	10.27	11.00	11.47	3.09	4.16	5.97
Mittlere Hangneigung EZG [%]	42.1	45.1	32.2	34.5	39.5	38.1	35.4	43.3	37.6	43.3
Mittlere Krümmung EZG [-]	0.0247	0.0365	0.0010	0.0002	-0.0012	0.0002	0.0001	0.4800	0.1539	0.0258
Fläche EZG [m <sup>2</sup> ]	1'929	1'503	5'929	27'904	33'696	10'9131	158'056	65	177	658

## 2.6 Feldarbeit

Um das Monitoring-Netzwerk über das ganze Jahr betreiben zu können, müssen aufgrund der Speicherkapazität der Logger die Daten mindestens vier Mal ausgelesen werden. Weiter ist es erforderlich das Monitoring-Netzwerk vor dem ersten Schnee auf Winterbetrieb umzustellen. Die mit frostempfindlichen STS Logger ausgerüsteten Standorte müssen für den Einsatz von Odyssey Logger umgerüstet werden. Die Grundwassermessinstallationen, bei denen die Gefahr besteht durch Schneegleiten und -kriechen abgeknickt oder beschädigt zu werden, werden geschlossen, das Grundwasserrohr bodeneben abgenommen und abgedichtet. Die verbleibenden Grundwasserrohre werden fixiert. Im Frühjahr, sobald der Schnee geschmolzen ist, wird das Monitoring-Netzwerk wieder auf Vollbetrieb umgestellt, die abgenommenen Grundwasserrohre wieder aufgebaut, die Winterschäden behoben und die anfallenden Unterhaltsarbeiten durchgeführt. Diese beinhalten beispielsweise das Auszuheben von angesammeltem Sediment im Staubereich der Abflusswehre oder das Aufbauen von Zäunen und Schutzinstallationen gegen neugierige Kühe.

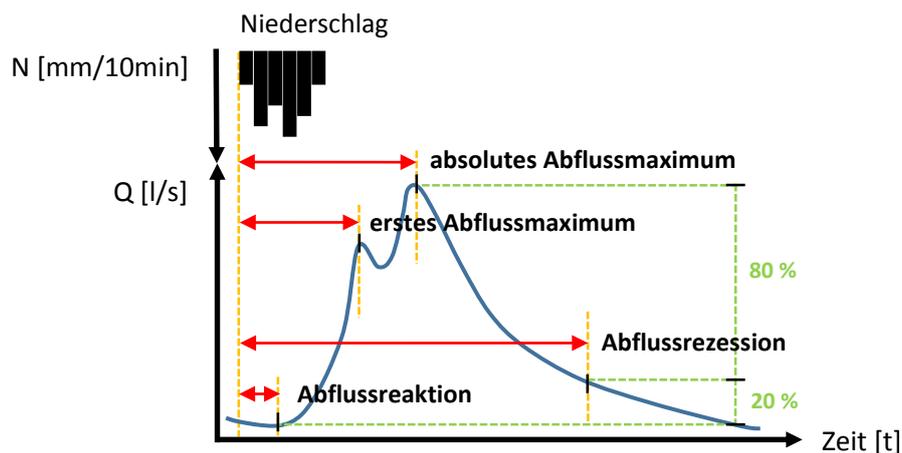
Die Betreuung des Monitoring-Netzwerks für das Jahr 2013 war Teil meiner Aufgaben im Rahmen der Masterarbeit.

## 3 Methoden

### 3.1 Definition Timing

Bei der Untersuchung der Abflussdynamik steht in meiner Arbeit in erster Linie das Timing des Abflusses und an zweiter Stelle die Amplitude im Fokus. Unter „Timing“ verstehe ich die Zeitspanne vom Niederschlagsbeginn bis zu einem spezifischen Punkt der Ganglinie für den Abfluss, das Grundwasser sowie der elektrischen Leitfähigkeit. Um das Timing zu charakterisieren habe ich mehrere Messgrößen definiert (alle in [min]). Die Zeit vom Niederschlagsbeginn bis zur Reaktion, also der Zeitspanne vom Niederschlagsbeginn bis die Ganglinie ansteigt, wird im Rahmen dieser Masterarbeit detailliert untersucht. Weitere untersuchte Messgrößen sind die Zeitspanne bis zum ersten Maximum, zum absoluten Maximum, zum 95 % Maximum oder zur Abflussrezession. Das 95 % Maximum ist definiert als 95 % des absoluten Anstiegs, als die Zeitdifferenz zwischen dem Niederschlagsbeginn und dem Abflusswert mit 95 % des Abflussmaximums. Das 95 % Maximum wurde untersucht, da es vor allem für Standorte, die zuerst stark ansteigen, danach jedoch nur langsam weitersteigen, robuster ist als das absolute Maximum. Die Abflussrezession ist definiert als 80 % Rückgang des absoluten Anstiegs vom Abflussmaximum, in anderen Worten als Rückgang der Abflusskurve vom Maximum um 80 % der Differenz des Abflusswertes vom Niederschlagsbeginn und Abflussmaximum (s. Abb. 9). Sinngemäss wurden die erwähnten Messgrößen mit denselben Methoden auch für die Quellen, die Makropore und das Grundwasser berechnet. Das Timing der elektrischen Leitfähigkeit, der Zeitpunkt des Rückganges der elektrischen Leitfähigkeit, der Zeitpunkt des niedrigsten Leitfähigkeitswertes und der Zeitpunkt des Wiedererreichens der Ausgangsleitfähigkeit nach dem Ereignis wurden ebenfalls mit den gleichen Methoden bestimmt und analysiert. Zeitpunkt

Aufgrund des begrenzten Rahmens der Masterarbeit wurde bei der Untersuchung des Timings das Hauptgewicht auf die Reaktionszeit gelegt.



**Abb. 9.** Schematische Darstellung der Timing-Messgrößen; Abflussreaktion, erstes Abflussmaximum, absolutes Abflussmaximum und Abflussrezession (eigene Darstellung).

### 3.1.1 Abgrenzung der Niederschlagsereignisse

Um das Timing des Abflusses automatisiert bestimmen zu können, mussten zunächst die Niederschlagsereignisse bestimmt werden, welche die Abflussreaktion verursachen. Um die einzelnen Niederschlagsereignisse im Untersuchungszeitraum zu bestimmen, habe ich Annahmen getroffen und Schwellenwerte definiert, die eine automatisierte Bestimmung ermöglichen. Die minimale Zeit zwischen zwei Niederschlagsereignissen wurde auf 120 min festgelegt. Dies bedeutet, dass es 2 Stunden vor sowie 2 Stunden nach dem Ereignis niederschlagsfrei sein muss, um ein Ereignis klar von einem nachfolgenden abzutrennen. Weiter ausschlaggebend für die Definition eines Niederschlagsereignisses sind die Niederschlagssumme und die Niederschlagsintensität pro Messintervall. Für die Bestimmung ein Ereignisses muss mindestens einer der beiden Schwellenwerte übertroffen werden. Für die Niederschlagssumme habe ich einen Wert von 5 mm und für die Niederschlagsintensität einen Wert von 2 mm pro 10 min gewählt. Die Niederschlagsereignisdefinition wurde anhand unserer Daten plausibilisiert und die Parameter durch händisches Prüfen der Zeitreihen optimiert. Mit den gewählten Schwellenwerten werden die kleinsten Niederschlagsereignisse ohne nennenswerte Abfluss- oder Grundwasserreaktion ausgespart. Die Ausscheidung der Niederschlagsereignisse erfolgte automatisiert mit einem R-Skript von Michael Rinderer.

Um den Aufwand des manuell zu bestimmenden Timings in einem angemessenen Rahmen zu halten, wurden für die Generierung der Resultate von den 34 automatisch identifizierten Niederschlagsereignissen die grössten 27 Ereignisse, welche ein Niederschlagsmaximum von 1.4 mm und eine Niederschlagssumme von 6 mm überschreiten, in die Untersuchung miteinbezogen. Eine Statistik zu den Charakteristiken der 27 Niederschlagsereignisse ist im Anhang B zu finden.

### 3.1.2 Bestimmung der Reaktionszeit

#### 3.1.2.1 Referenzmethode - Händische Abgrenzung

Die händische Abgrenzung der Wasserstands- resp. EC- Reaktion wird für meine Arbeit als Referenz angesehen, im Vergleich zu deren ich die verschiedenen automatischen Methoden der Reaktionsbestimmung verglichen habe. Diese Vorgangsweise geht von der Annahme aus, dass der Experte die Reaktion am genauesten ermitteln kann.

Um eine kongruente Bestimmung des Kurvenanstiegs für alle Messstandorte zu erhalten, wurden gewisse Kriterien festgelegt. Als Abflussanstieg wurde immer jener Teil der Ganglinie bezeichnet, der die grösste Amplitude (Hauptanstieg) aufweist. Kleinere, vorgeschaltete Anstiege, meist verursacht durch kurze oder wenig intensive Regenfälle zu Beginn eines Ereignisses, wurden vernachlässigt. Als Schwellenwert für Ereignisse ohne deutlichen Kurvenanstieg wählte ich 2 cm für den Abfluss, 1 cm für das Grundwasser sowie 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  für die elektrische Leitfähigkeit. Um eine tatsächliche Reaktion vom Datenrauschen unterscheiden zu können, wurde der Niederschlagsverlauf des Ereignisses berücksichtigt und kleinere Schwankungen mit einer Amplitude von weniger als ca. 0.5 cm ignoriert. Dies entspricht in etwa der Messgenauigkeit der Odyssey-Datenlogger. Ganglinienreaktionen mit geringem Gradient wurden als Reaktion berücksichtigt, sofern diese als vom Niederschlag induziert betrachtet werden konnten und das Mass der natürlichen, täglichen Schwankung an Tagen ohne Niederschlag von ca. +/- 0.5 cm hinausgingen.

Die händische Bestimmung der Wasserstands- resp. EC- Reaktion war wegen des teils starken Rauschens der Daten und zum Teil mehreren Anstiegen und zugehörigen Abflussspitzen während eines Ereignisses schwierig und nicht immer eindeutig. Ich gehe jedoch davon aus, dass die Berücksichtigung genau dieser Schwierigkeiten ein Vorteil der Reaktionsbestimmung eines Experten gegenüber einer automatisierten Abgrenzung ist. Ein Kritikpunkt der händischen Abgrenzung ist die Subjektivität. Auch wenn Kriterien für die händische Bestimmung definiert wurden, um die Reaktion immer nach dem gleichen Muster zu bestimmen, ist eine objektive händischen Bestimmung nicht gewährleistet.

### 3.1.2.2 Automatisierte Abgrenzung

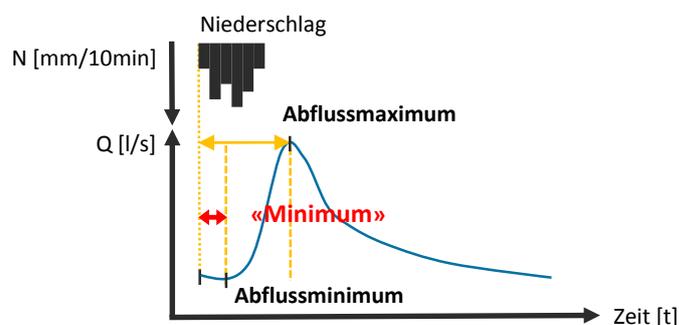
In Anbetracht des sehr grossen Zeitaufwandes für eine händische Abgrenzung der Wasserstands- und der EC- Reaktion, welche für meine Masterarbeit gegen eine Woche in Anspruch genommen haben, sowie wegen der Subjektivität in der Bestimmung der Zeitpunkte, sind automatisierte Verfahren notwendig.

Ein Teil der Arbeit stellt ein Methodenvergleich unterschiedlich komplexer Methoden zur Bestimmung der Reaktionszeit dar. Mich interessierte, ob einfache Methoden, im Vergleich zu komplexeren, vergleichbar gute Resultate liefern. Komplexe Methoden sind umfangreicher und berücksichtigen Spezialfälle des Ganglinienverlaufs, die bei einfacheren Methoden eher zu ungenaueren Bestimmungen der Reaktion führen würden. Dafür implementierte und analysierte ich fünf Methoden unterschiedlicher Komplexität mit dem Statistikprogramm R. Um die Resultate der einzelnen Methoden quantitativ einordnen zu können, wurde der Zeitpunkt des Kurvenanstiegs für alle Standorte mit STS Loggern, für die grössten 27 von 34 Niederschlagsereignisse des Sommers und Herbsts 2013, manuell bestimmt. Die Methoden wurden anhand von Abfluss-, elektrische Leitfähigkeits- sowie Grundwasserdaten hinsichtlich der Bestimmung der Wasserstands- und EC- Reaktion geprüft und jeweils mit den händisch bestimmten Reaktionszeiten verglichen. Je geringer der mittlere Unterschied in den Reaktionszeiten jeder Bestimmungsmethode relativ zur händisch bestimmten Reaktionszeit ist, desto genauer bestimmt die jeweilige automatisierte Methode die Reaktion des Wasserstands resp. der EC.

Die einzelnen Methoden, die ich im Rahmen meiner Masterarbeit implementiert habe, charakterisieren sich wie folgt:

#### **Methode 1: „Minimum“**

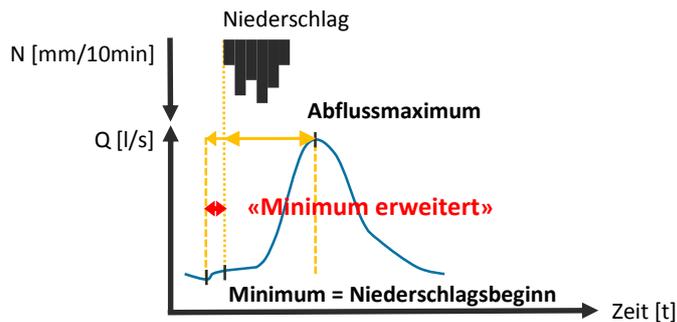
Der Zeitpunkt der Reaktion ist definiert als letztes Abflussminimum zwischen dem Niederschlagsbeginn und dem Abflussmaximum (s. Abb. 10).



**Abb. 10.** Schematische Darstellung der Bestimmungsmethode „Minimum“ (roter Pfeil entspricht der bestimmten Zeitspanne) (eigene Darstellung).

### Methode 2: „Minimum erweitert“

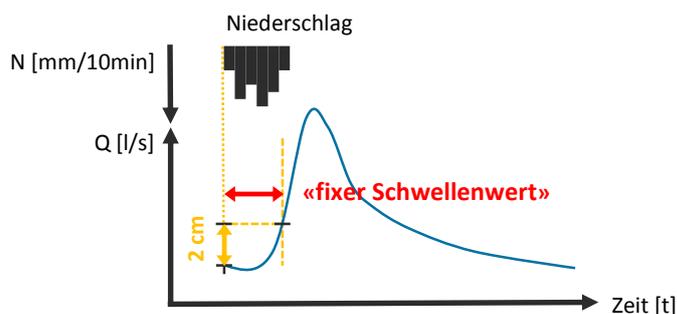
Die Methode „Minimum erweitert“ entspricht „Minimum“, ausgenommen wenn das Minimum auf den Niederschlagsbeginn trifft, wird der Zeitpunkt der Reaktion auf den Zeitschritt mit dem tiefsten Abflusswert in der vorangehenden Stunde gesetzt (inkl. Niederschlagsbeginn) (s. Abb. 11). Dieses Vorgehen erlaubt das tatsächliche Minimum zu detektieren, da aufgrund der räumlichen Variabilität des Niederschlags die Reaktion auch vor dem Niederschlagsbeginn eintreffen kann. Aufgrund dessen kann diese Methode in negativen Reaktionszeiten resultieren, was eine Folge der fehlenden räumlichen Abdeckung der Niederschlagsmessung ist.



**Abb. 11.** Schematische Darstellung der Bestimmungsmethode „Minimum erweitert“ (roter Pfeil entspricht der bestimmten Zeitspanne) (eigene Darstellung).

### Methode 3: „fixer Schwellenwert“

Der Zeitpunkt der Reaktion wird als jener Punkt definiert, bei dem die Reaktion einen fixen Schwellenwert von 2 Messeinheiten (cm oder  $\mu\text{S/cm}$ ) überschreitet (s. Abb. 12). Die entsprechende Reaktionszeit wird relativ zum Niederschlagsbeginn bestimmt. Die Reaktion ist definiert als letzter Abflusswert, bevor der Schwellenwert überschritten wird. Es wird derselbe Schwellenwert von 2 Messeinheiten für die Wasserstands- sowie EC- Reaktion verwendet.



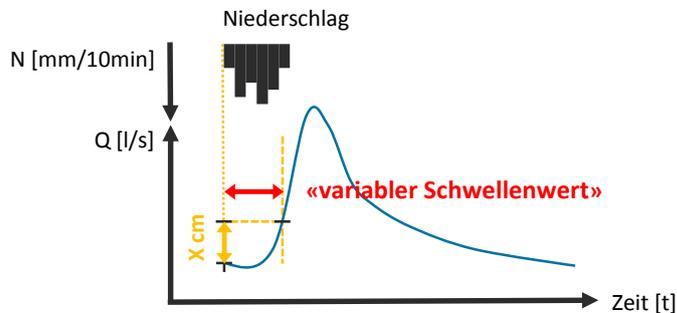
**Abb. 12.** Schematische Darstellung der Bestimmungsmethode „fixer Schwellenwert“ (roter Pfeil entspricht der bestimmten Zeitspanne) (eigene Darstellung).

### Methode 4: „variabler Schwellenwert“

Diese Methode entspricht im Prinzip jener des „fixer Schwellenwertes“, jedoch wird der Reaktionszeitpunkt mittels eines variablen Schwellenwertes bestimmt, der für jede Zeitreihe individuell angepasst wurde (s. Abb. 13). Der variable Schwellenwert liegt zwischen 0.3 und 2 Messeinheiten (cm oder  $\mu\text{S/cm}$ ) (s. Tab. 3). Berücksichtigt für die Bestimmung des Schwellenwertes wurde die Amplitude sowie das Rauschen der Ganglinie, sowie die Messgenauigkeit des jeweiligen Sensors (STS oder Odyssey). Aufgrund des starken Rauschens der Abflussganglinien wurde für die meisten Abflussstandorte denselben Schwellenwert von 1.5 Messeinheiten gewählt.

**Tab. 3.** Manuell definierter Schwellenwert für alle Standorte mit installiertem STS Logger [cm bzw.  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]

Standort	11.0	12.0	21.0	31.0	41.0	51.0	81.1	81.2	82.1	21.1	31.3	32.6	32.9	11.6	12.8
Schwellenwert	0.7	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2	1.5	1.5	0.5	1	1	0.5	1	1



**Abb. 13.** Schematische Darstellung der Bestimmungsmethode „variabler Schwellenwert“ (roter Pfeil entspricht der bestimmten Zeitspanne) (eigene Darstellung).

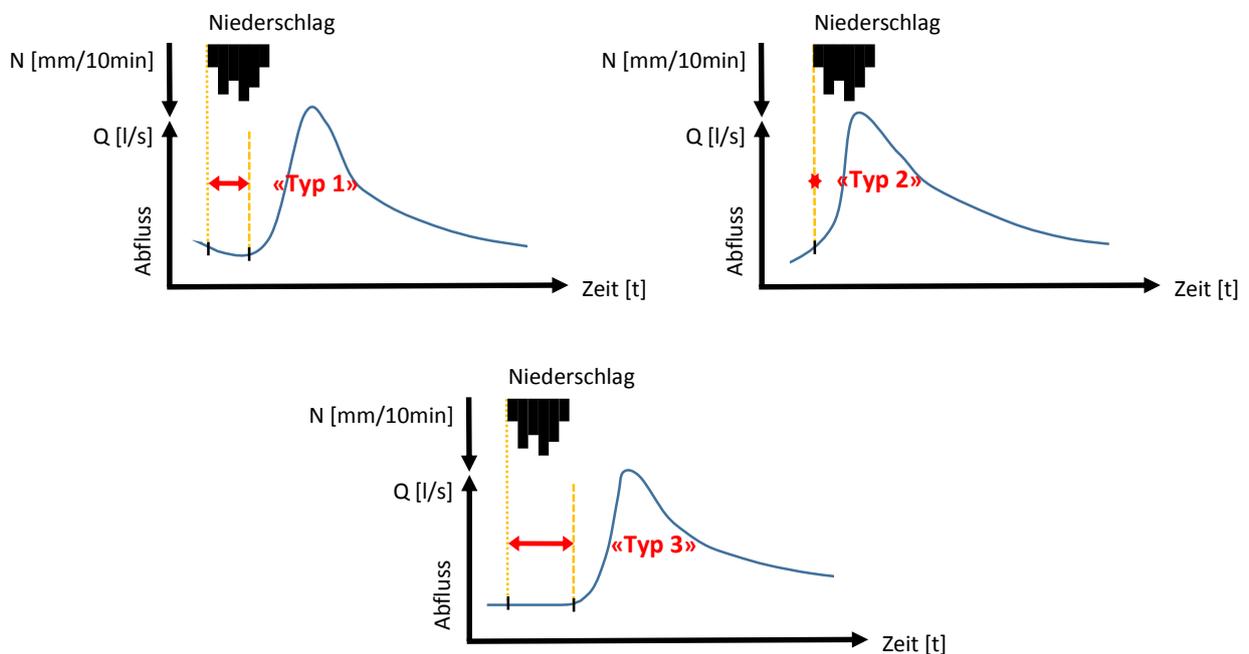
### Methode 5: „Komplex“

Der komplexeste dieser Bestimmungsverfahren wurde von Michael Rinderer im Rahmen seiner Doktorarbeit implementiert. Diese wurde entwickelt und optimiert um Grundwasserreaktionen zu detektieren. Er identifiziert drei unterschiedliche Kurvenreaktionsszenarien (Rinderer et al., in preparation) (s. Abb. 14).

- Typ 1: „Anstieg folgt auf zuvor fallenden Grundwasserstand“. Typ 1 tritt auf, wenn die geglättete Ganglinie nach Niederschlagsbeginn zuerst weiter sinkt, dann aber fünf Zeitschritten mit positiver Steigung sowie mindestens einem Zeitschritt mit grösserer Steigung als ein definierter Minimumschwellewert ( $0.01 \text{ cm}/5 \text{ min}$ ) folgen. Dieser Ganglinienverlauf ist speziell für Grundwasserpegel typisch. Gesucht wird die Abflussreaktion in einem Zeitfenster zwischen dem Niederschlagsbeginn und den darauffolgenden 24 Stunden, sofern die Differenz zwischen Minimum und Maximum einen variablen Schwellenwert übersteigt. Damit können Ereignisse mit geringer Abfluss- oder Grundwasseramplitude herausgefiltert werden. Reagiert der Wasserstand nicht innerhalb 24 Stunden, was bei Grundwasserpegeln der Fall sein kann, dann wird angenommen, dass das betreffende Niederschlagsereignis keine Reaktion des Wasserstandes ausgelöst hat. Diese zusätzliche Bedingung verhindert bei einem Ereignis mit ausbleibender Abflussreaktion, dass Typ 1 aufgrund von Rauschen mehrere Tage später detektiert wird.
- Typ 2: „stärkste Änderung der Steigung bei bereits steigendem Grundwasserstand“. Typ 2 ist definiert durch eine bereits steigende Kurve nach Niederschlagsbeginn. Dies kann v.a. bei Grundwasserpegeln der Fall sein, wenn zwei Niederschlagsereignisse kurz aufeinander folgen und der Grundwasserspiegel noch steigt, während das nächste Niederschlagsereignis einsetzt. Für die Zuordnung eines Anstiegs zum Typ 2 müssen die ersten 6 Zeitschritte steigen, sowie die vordefinierte minimale Steigung ( $0.01 \text{ cm}/5 \text{ min}$ ) bei mindestens einem Zeitschritt überschritten werden. Die Abflussreaktion wird in diesem Fall mit jedem Punkt festgelegt, an dem die maximale Steigungsänderung der Kurve erreicht wird. Wenn diese vor den Niederschlagsbeginn fällt, ist der Zeitpunkt der Abflussreaktion identisch mit dem Niederschlagsbeginn und der neu einsetzende Niederschlag führt unmittelbar zum Anstieg des Pegels.

- Typ 3: „Anstieg folgt auf gleichbleibenden Grundwasserstand“. Dieser Reaktionstyp kommt vor, wenn der Pegelstand nach Niederschlagsbeginn nicht weiter sinkt (Typ 1), sondern konstant bleibt. Der Zeitpunkt der Reaktion ist unter diesen Bedingungen als jener Zeitschritt definiert, der die erste, positive Steigung nach Niederschlagsbeginn aufweist und gleichzeitig die fünf darauffolgenden Zeitschritte auch positiv sind, sowie mindestens eine Steigung den minimalen Steigungsschwellenwert von 0.01 cm/ 5 min übersteigt. Bestimmt wird die Abflussreaktion ebenfalls zwischen dem Niederschlagsbeginn und den darauffolgenden 24 Stunden im Originaldatensatz.

Bei der Methode „Komplex“ ist es möglich, dass die Bestimmung der Reaktion vor den eigentlichen Niederschlagsbeginn fällt und die Reaktionszeiten negativ sind. Dies liegt in erster Linie am raum-zeitlichen Unterschied in der Niederschlagsverteilung, welcher die Pegel im Studibach schon ansteigen lassen, während an der meteorologischen Messstation noch gar keine Niederschlag gemessen wird.



**Abb. 14.** Schematische Darstellung der Bestimmungsmethode „Komplex“: Typ 1 (l.), Typ 2 (r.), Typ 3 (u.) (eigene Darstellung).

### 3.2 Statistische Analyse

Um die Stärke des Zusammenhangs zwischen den einzelnen topographischen Einzugsgebietseigenschaften und einerseits der Abflussmenge, andererseits der Reaktionszeiten zu untersuchen, wurde eine bivariate sowie eine multivariate statistische Methode angewandt. Die Analyse derselben Fragestellung mit zwei unterschiedlichen statistischen Methoden dient der Erhöhung der Validität der Resultate. In Anbetracht, dass nicht normalverteilte Daten vorliegen und nicht von einem linearen Zusammenhang zwischen der zu erklärenden Grösse und den verschiedenen Prädiktoren auszugehen ist, wurde für die bivariate Analyse die Rangkorrelation nach Spearman ( $r_s$ ) (Spearman, 1904) und für das multivariate Verfahren der Random Forest Ansatz (RF) (Breiman, 2001) gewählt (Details siehe unten).

Der verwendete Untersuchungszeitraum dauerte von 27. Juli bis zum 3. November 2013. Für diesen Zeitraum liegt ein vollständiger Datensatz mit durchgehenden Messungen für alle Messstationen vor. Für die Generierung der Resultate der bi- sowie der multivariaten Analysen wurden alle Abfluss-, die Quell- sowie der Makroporenstandort verwendet.

Die Analyse der Daten sowie alle statistischen Tests wurden mit der Software R (Version 3.0.2) (Development Core Team, 2005) durchgeführt.

### 3.2.1 Bivariate Analyse - Rangkorrelation nach Spearman

Die Rangkorrelationsanalyse nach Spearman quantifiziert in meiner Arbeit die Stärke der Beziehung zwischen einer Einzugsgebietseigenschaft (Prädiktor) und der Abflussmenge bzw. den Reaktionszeiten (Zielvariablen), wenn die Einflüsse aller anderen Prädiktoren nicht berücksichtigt werden. Dies wird erreicht, indem anstatt der Rohdaten Rangreihen miteinander verglichen und statistisch auf ihre Übereinstimmung getestet werden. Die Stärke des Zusammenhangs der beiden Variablen wird durch den Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman ( $r_s$ ) ausgedrückt. Bei der Berechnung des Rangkorrelationskoeffizienten handelt es sich um eine nichtparametrische Korrelationsanalyse.

Um den durchschnittlichen Zustand der einzelnen Standorte zu charakterisieren, wurde für die Zielvariable Abflussmenge der Rangkorrelationskoeffizient mit dem Mittelwert bzw. mit dem Median des Wasserstands [cm], des Abflusses [l/s] sowie des spezifischen Abflusses [l/(s·km<sup>2</sup>)] (entspricht dem Abfluss normiert mit der Einzugsgebietsgrösse) berechnet. Für die Reaktionszeiten wurde der Mittelwert bzw. der Median der händischen und der jeweils besten automatisierten Bestimmungsmethode verwendet. Bei allen Tests wurde ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 0.05$  verwendet.

### 3.2.2 Multivariate Analyse - Random Forest Ansatz

Um den Einfluss der unterschiedlichen topographischen Einzugsgebietseigenschaften auf die gemessene Abflussmenge und die Reaktionszeiten aufzuzeigen, wurde zusätzlich zur Korrelationsanalyse ein Random Forest Verfahren durchgeführt. Der Random Forest Ansatz ist ein nicht parametrisches Klassifikations- und Regressionsverfahren, welches aus mehreren verschiedenen, unkorrelierten Entscheidungsbäumen (CARTs) besteht. Es wird eine grosse Zahl an Bäumen (ca. 1000) erstellt und als Vorhersage eines neuen Datenpunkts die durchschnittliche Vorhersage aller Bäume verwendet, dies macht das Verfahren stabiler und aussagekräftiger. Jeder Baum wird anhand einer zufälligen Teilstichprobe der Daten erstellt, dies ermöglicht das Modell zu testen und erlaubt so auch Rückschlüsse auf die Wichtigkeit einzelner Variablen. Die Methode kombiniert so Breiman's „bagging“ Idee und den Ansatz der zufälligen Auswahl einer Teilmenge von Variablen von Ho (1995). Die Regressionsbäume erklären allgemein die Variation einer Zielvariable durch rekursives Teilen der Daten in homogene Gruppen (Strobl et al., 2009). Entwickelt wurde diese „machine learning“ Technik von Leo Breiman (2001).

Die Vorteile von Klassifikations- oder Regressionsbäume sind, dass sie sehr effizient auf grosse Datenmengen anzuwenden sind und eine kurze Trainings- beziehungsweise Aufbauzeit eines einzelnen Entscheidungsbaumes aufweisen. Da der RF bei jedem Knoten nur eine kleine Teilmenge aller Prädiktoren berücksichtigt, ist es möglich eine grössere Anzahl Variablen zu bewältigen. Die Trainingszeit bei einem

Random Forest steigt daher linear mit der Anzahl Daten (Strobl et al., 2009). Ein weiterer Vorteil des Random Forest Verfahrens ist, dass es auch für Datensätze mit wenigen Beobachtungen gut anwendbar ist. Die Tatsache, dass die Selektion der Variablen auf eine zufällige Teilmenge im RF limitiert werden kann, macht den RF speziell für „kleine n grosse p“ - Datensätze anwendbar (Strobl et al., 2009). Die Möglichkeit der Analyse eines Datensatzes mit mehr Variablen als Beobachtungen hat viel zur Popularität der RF beigetragen (Strobl et al., 2009). Weiter müssen keine Annahmen über die Verteilung der Daten angenommen werden und beide, kontinuierliche und/oder kategorische Variablen können verwendet werden (Bachmair und Weiler, 2012). Da das Verfahren nicht parametrisch ist, kann es mit Nichtlinearitäten in den Daten umgehen, zusätzlich können durch die Rekursion ebenfalls Interaktionen von Variablen erkannt werden (Bachmair und Weiler, 2012). Nach Strobl et al. (2009) kann ein Random Forest Modell den Beitrag und das Verhalten von jedem Prädiktor besser bestimmen, da der Einfluss jedes Prädiktors individuell als auch in multivariaten Interaktionen mit anderen Prädiktoren berücksichtigt wird. Bei einfacheren Modellen (e.g. einfaches oder gemischtes Regressionsmodell), können interessante, nebengeordnete Prädiktorinteraktionen unentdeckt bleiben, wenn deren Effekt durch andere, dominante Prädiktoren überdeckt werden. Ausserdem wurde aufgezeigt, dass das Resultat einer grösseren Anzahl Bäume, einem „Random Forest“, eine bessere Vorhersage erzielt als ein einzelner Klassifikationsbaum (Strobl et al., 2008). Ein Nachteil von CARTs ist die Bauminstabilität, schon kleine Änderungen bei den Inputdaten können in stark abweichende Bäume zur Folge haben (Prasad et al., 2006).

Es gibt verschiedene Varianten und Ansätze einen Random Forest zu trainieren und Klassifikationen vorzunehmen. Diese Masterarbeit orientiert sich nach Breiman (2001). Weitere Details zur Funktionsweise können aus Breiman (2001) entnommen werden. Für unsere Analyse wurde das in der Softwareumgebung R implementierte randomForest Paket von Liaw und Wiener (2002) verwendet.

Der Ablauf der RF Analyse gliedert sich wie folgt (Bachmair und Weiler, 2012; Strobl et al., 2009):

- nTree „bootstrap“ Stichproben werden aus dem Originaldatensatz gezogen, wobei jede Stichprobe aus  $\frac{2}{3}$  der Daten besteht (nTree, Anzahl der Bäume, ist ein vom Nutzer definierter Parameter).
- Für jede „bootstrap“ Stichprobe wird ein nicht gestutzter (d.h. die Daten werden vollständig aufgeteilt, bis so viele Endknoten wie Beobachtungen vorliegen) Baum erstellt. Bei jedem Knoten wird zufällig eine kleine Anzahl Prädiktoren ausgewählt. Die Daten werden bei jedem Knoten anhand des Prädiktors, dessen Teilung der Daten unter allen anderen zufällig gewählten Prädiktoren den kleinsten quadratischen Fehler aufweist, geteilt. Die Anzahl der zufällig ausgewählten Prädiktoren wird von Nutzer definiert (mTry).
- Bei jeder „bootstrap“ Wiederholung werden die nicht in der Erstellung der Bäume verwendeten Daten („out of bag“ Daten nach Breiman, 2001) anhand der mit der „bootstrap“ Stichprobe erstellten Bäume vorhergesagt. Die „out of bag“ Vorhersagen werden gemittelt und die Fehlerrate berechnet.
- Die Wichtigkeit der Variable wird für jeden Prädiktor bestimmt, indem berechnet wird, wie stark sich der mittlere, quadratische Fehler (MSE) ändert, wenn man nicht die tatsächlichen „out of bag“ Messwerte dieses Prädiktors verwendet, sondern diese zufällig variieren lässt. Hat der Prädiktor starken Einfluss, erhöht sich der MSE stark; hat er keinen Einfluss, sollte sich der MSE nicht verändern.

Das Resultat der RF Analyse, welches für die Interpretation verwendet wird, ist die Modellgüte (Prozentsatz der erklärten Varianz) und die Messung der Wichtigkeit der einzelnen Variablen, %IncMSE (prozentualer Anstieg des mittleren quadratischen Fehlers) (Liaw und Wiener, 2002). Die Messung der Wichtigkeit der Variable zeigt auf, wieviel schlechter die Vorhersage sein würde, wenn die Daten für diesen Prädiktor zufällig permutiert wären und so jegliche Vorhersagekraft verlieren (Prasad et al., 2006).

Die Werte der Wichtigkeit der Variable kann als informativ und wichtig angesehen werden, wenn der Wert höher als der Absolutbetrag der tiefsten negativen Wichtigkeit aller anderer Variablen ist (Prasad et al., 2006). Die Idee hinter dieser Daumenregel ist, dass die Wichtigkeit der irrelevanten Variablen zufällig um Null variiert (Strobl et al. 2009). Hohe Werte gelten als wichtig, wobei nach Strobl et al. (2009) die absoluten Werte der Wichtigkeit der Variable nur als relative Rangliste der signifikanten Prädiktoren interpretiert und nicht mit anderen Studien verglichen werden sollten. Die Interpretation des RF soll sich nur auf einer deskriptiven Rangordnung der Prädiktoren stützen.

Der Parameter nTree, Gesamtzahl der Klassifikations- oder Regressionsbäume, setzte ich auf 5000 (Standard = 500). Eine angemessenen grosse Anzahl von Bäumen äussert sich in einem stabilen Vorhersagefehler und garantiert robustere Ergebnisse auch bei wiederholter Anwendung der Methode auf den gleichen Datensatz (Shih, 2011). mTry, die Anzahl zufällig vorselektierten Prädiktoren für jede Aufspaltung, habe ich auf dem Standard von  $\frac{1}{3}$  der Anzahl Prädiktoren (mTry = 2) belassen. nPerm, die Anzahl der Permutationen pro Baum der "out of bag" Daten für die Abschätzung der Wichtigkeit der Variablen habe ich ebenfalls auf dem Standard von 1 belassen. Nach Liaw und Wiener (2001) resultiert eine grössere Zahl in einer leicht stabileren Abschätzung, ist jedoch nicht sehr effektiv.

Die Resultate der RF Methoden können bei wiederholten Rechenläufen leicht voneinander abweichen. Diese spezielle Eigenschaft von RF liegt einerseits an der zufällig generierten „bootstrap“ Stichprobe andererseits an der zufälligen Vorselektion der Prädiktatoren. Eine weitere Quelle der Variabilität ist die Variabilität in der zufälligen Permutation der Prädiktatoren bei der Berechnung der Permutationswichtigkeit (Strobl et al., 2009).

Aufgrund dieser Zufälligkeit führte ich 30 Durchläufe pro RF mit unterschiedlich gesetzten Seeds (Anfangswerte für Pseudozufallsgenerator) (rSeed) durch und wählte als Resultat den Durchlauf mit der höchsten Modellgüte (Prozentsatz der erklärten Varianz) aus. Die Modellgüte der wiederholten Rechenläufe schwankte um 2 % bis maximal 6 %, wobei sich die Reihenfolge der besten erklärenden Variablen, bei ähnlicher Wichtigkeit, nur minimal änderte. Die erklärenden Variablen mit geringerer Wichtigkeit behielten ihren Rang über die 30 RF Durchläufe. Für die Darstellung der Resultate werden nur die Random Forest Ergebnisse mit der besten Modellgüte aufgezeigt.

## 4 Resultate

Im Kapitel Resultate werde ich zunächst meine Messergebnisse der Abflussmenge und des Abflusstimmings der einzelnen Messstandorte darlegen, sowie die Reaktionszeiten des Abflusses mit jenen der elektrischen Leitfähigkeit vergleichen. Anschliessend präsentiere ich die Resultate der verwendeten Methoden, die der Beantwortung meiner drei Forschungsfragen dienen. Dies geschieht zum einen anhand des Vergleichs der unterschiedlichen Algorithmen zur Bestimmung der Reaktionszeiten, um die beste automatisierte Bestimmungsmethode zu ermitteln, und zum anderen mittels statistischer Analysen, Rangkorrelation nach Spearman und Random Forrest Ansatz, für die Identifikation der dominanten topographischen Einzugsgebietseigenschaften für die Abflussmenge sowie für die Reaktionszeit des Abflusses und der elektrischen Leitfähigkeit.

### 4.1 Abfluss

#### 4.1.1 Abflussmenge

Der Abfluss der einzelnen Messstandorte nimmt mit steigender Grösse des EZG zu (s. Tab. 4). Der Standort 51.0 weist im Median mit 23 l/s den grössten Abfluss auf. Der geringste Abfluss weist der Quellstandort 81.2 auf (Median: 0.003 l/s). Die Abflussmessstelle 12.0 hat einen vergleichbaren Median Abfluss wie der Makroporenstandort 81.2 und die Abflussmessstelle 11.0 eine wie der Quellstandort 82.1, wobei die Abflussmaxima der beiden Abflussmessstellen höher ausfallen als die der Quellmessstandorte. Die gemessenen Abflussmengen der Standorte 41.0 und 51.0 sind im Verhältnis wesentlich höher als die der restlichen Messstellen und weisen eine grössere Variabilität in der Abflussmenge auf (s. Abb. 15 a).

**Tab. 4.** Statistische Eckdaten für den Abfluss [l/s] resp. den spezifischen Abfluss [l/(s·km<sup>2</sup>)] für die verschiedenen Abfluss- (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0, 51.0) (blau), Quell- (81.2, 81.1) (hellgrün) und den Makroporenstandort (81.1) (dunkelgrün) für den Beobachtungszeitraum vom 27.06.2013 bis 03.11.2013.

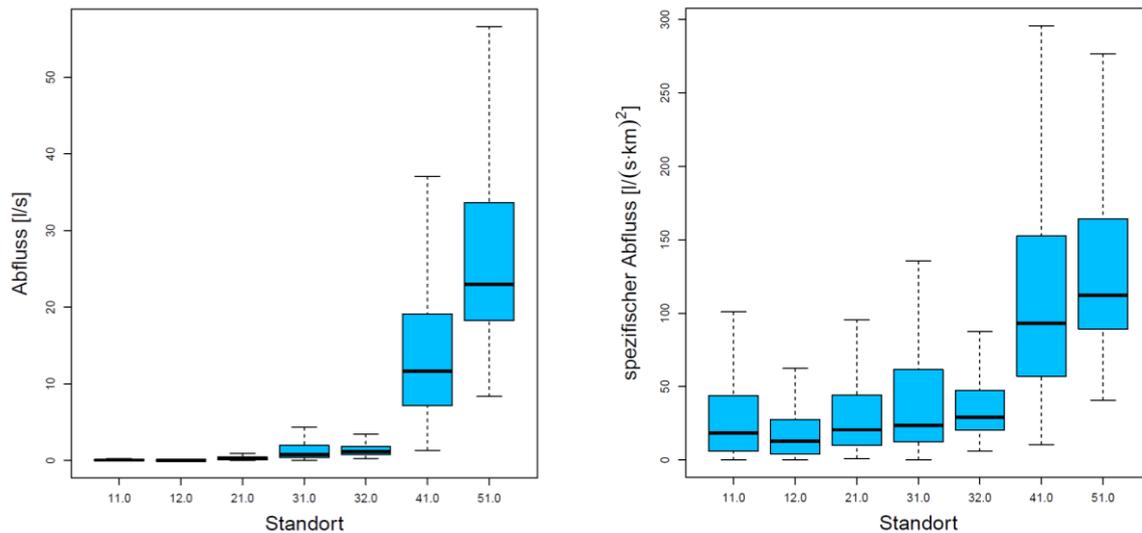
#### Abfluss [l/s]

Standort	11.0	12.0	21.0	31.0	32.0	41.0	51.0	81.1	81.2	82.1
Minimum	0.00	0.00	0.01	0.00	0.23	1.33	8.35	0.00	0.00	0.00
Maximum	11.08	5.29	90.99	139.35	114.50	258.26	480.86	1.42	0.44	5.28
Mittelwert	0.12	0.06	0.88	2.75	2.25	15.85	35.17	0.05	0.01	0.13
Median	0.05	0.03	0.20	0.75	1.15	11.66	22.97	0.02	0.003	0.10

#### Spezifischer Abfluss [l/(s·km<sup>2</sup>)]

Standort	11.0	12.0	21.0	31.0	32.0	41.0	51.0	81.1	81.2	82.1
Minimum	0.00	0.00	1.00	0.13	5.85	10.61	40.78	0.00	0.00	0.00
Maximum	4336	2331	9158	4359	2913	2063	2350	19732	4030	9769
Mittelwert	45.17	27.48	88.72	86.06	57.21	126.60	171.84	669.22	110.22	240.85
Median	18.47	12.73	20.54	23.60	29.17	93.13	112.25	295.92	28.88	186.23

Ohne Berücksichtigung der zugehörigen EZG Fläche sind die Abflussmengen jedoch eingeschränkt miteinander vergleichbar. Deshalb wurde der spezifische Abfluss ermittelt: Den höchsten spezifischen Abfluss weist der Makroporenstandort mit einem Median von 296  $l/(s \cdot km^2)$  auf, gefolgt von dem Quellstandort 82.1 mit einem Median von 186  $l/(s \cdot km^2)$ . Für die Quell- und den Makroporenstandort ist jedoch die tatsächliche Einzugsgebietsfläche nur schwer abzuschätzen (s. Diskussion). Der tiefste spezifische Abfluss hat der Abflussstandort 12.0 mit einem Median von 13  $l/(s \cdot km^2)$ . Die Abflussstandorte 12.0 sowie 32.0 zeigen zudem die kleinsten Spannbreiten vom Minimum bis zum Maximum des gemessenen spezifischen Abflusses auf (s. Tab. 4 und Abb. 15 b).

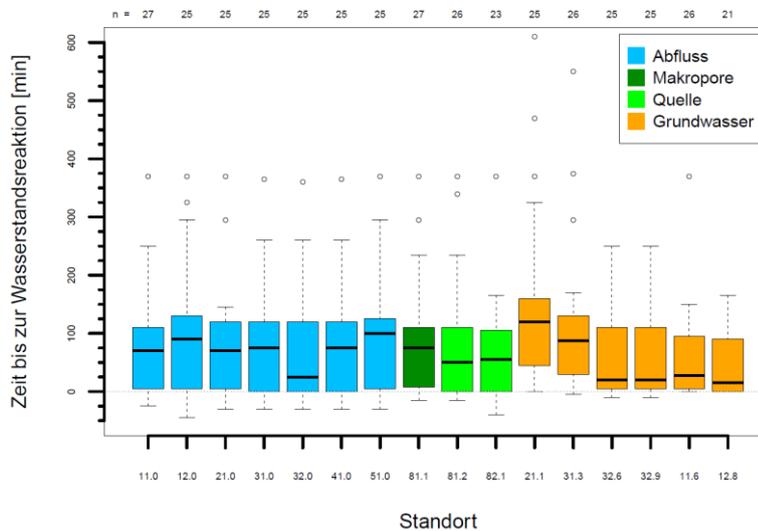


**Abb. 15.** Boxplots der verschiedenen Oberflächenabflussmessstationen (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0, 51.0) für den (a) Abfluss [l/s] und den (b) spezifischen Abfluss [ $l/(s \cdot km^2)$ ] (Daten: Beobachtungszeitraum vom 27.06.2013 bis 03.11.2013; Whiskers: definiert als 1.5-fache des IQA; Ausreisser: nicht geplottet).

#### 4.1.2 Reaktionszeiten der Wasserstände

Die Analyse der 27 von Hand bestimmten Wasserstandsanstiege hat ergeben, dass die Reaktionszeiten der Abfluss- und Quellstandorte sowie dem Makroporenstandort relativ gesehen zum Beginn des Niederschlags ziemlich ähnlich sind (s. Abb. 16 und Tab. 5), mit einem Interquartilsabstand (IQA) zwischen 100 und 120 min und einem Median und Mittelwert von jeweils 50 bis 100 min. Nur der Abflussstandort 32.0 mit einem Median von 25 min (Mittelwert 64 min) reagiert früher. Die Grundwasserstandorte haben einen vergleichbar grossen IQA, der Median mit 15 bis 30 min (Mittelwert: 41 bis 67 min) ist jedoch tiefer. Ausnahme bilden 21.1 und 31.3 mit einem Median von 120 resp. 85 min (Mittelwert: 149 resp. 111 min). Das 25 % Quartil liegt für die meisten Messstandorte nahe bei 0 min und das 75 % Quartil bei ca. 120 min. Die Whisker, definiert als maximal das 1.5-fache des IQA vom 25 % resp. 75 % Quartil, liegen zwischen 270 und 350 min auseinander, ausser bei 21.0, 82.1, 31.3, 11.6 und 12.8 (160 - 200 min). Die Ausreisser liegen für alle Abfluss- und Quellstandorte sowie für den Makroporenstandort bei etwa 380 min. Ausreisser werden definiert als Reaktionszeiten, welche die Whisker übersteigen. Die Grundwasserstandorte 21.1 und 31.3 weisen noch stärkere Ausreisser auf (bis 600 min). Insgesamt konnten im Mittel etwa für 25 von 27 Niederschlagsereignissen an den unterschiedlichen Standorten Abflussreaktionen detektiert werden. Die Spannbreite lag zwischen 21 Reaktionen für den Standort

12.8 und 27 Reaktionen für die Standorte 11.0 und 81.1. Bei den Grundwasserstandorten ist die Tendenz zu beobachten, dass die Reaktionszeit zunimmt, je trockener die Standorte sind. Dieselbe Beobachtung hat Rinderer et al. (2014) deutlich aufzeigen können.



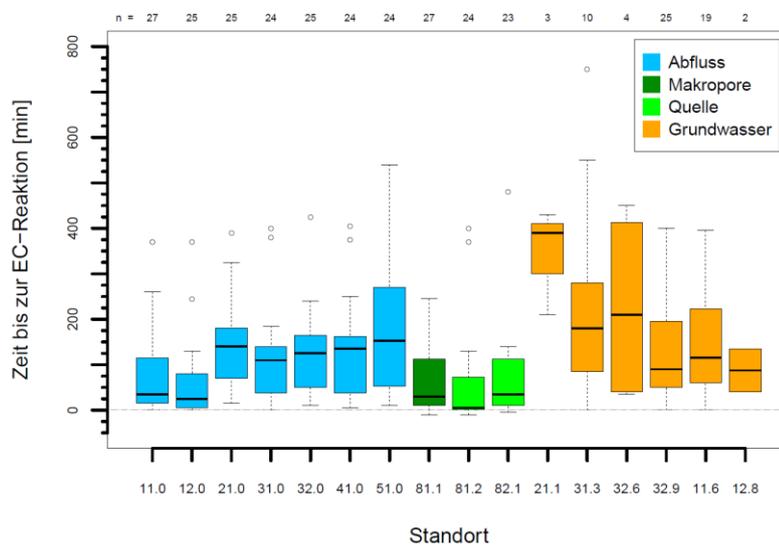
**Abb. 16.** Boxplots der händisch bestimmten Zeit [min] vom Niederschlagsbeginn bis zur Reaktion der Gerinneabfluss- (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0, 51.0) (blau), Quell- (81.2, 81.1) (hellgrün), Makroporen- (81.1) (dunkelgrün) und Grundwasserstandorte (11.6, 12.8, 21.1, 31.3, 32.6, 32.9) (orange) (Daten: Beobachtungszeitraum vom 27.06.2013 bis 03.11.2013; Whiskers: definiert als 1.5- fache des IQA; Ausreisser: nicht geplottet).

**Tab. 5.** Statistische Kenngrößen der händisch bestimmten Zeit [min] vom Niederschlagsbeginn bis zur Reaktion der Gerinneabfluss- (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0, 51.0) (blau), Quell- (81.2, 81.1) (hellgrün), Makroporen- (81.1) (dunkelgrün) und Grundwasserstandorte (11.6, 12.8, 21.1, 31.3, 32.6, 32.9) (orange) (Daten vom Beobachtungszeitraum: 27.06.2013 bis 03.11.2013).

Standort	11.0	12.0	21.0	31.0	32.0	41.0	51.0	81.1	81.2	82.1	21.1	31.3	32.6	32.9	11.6	12.8
Minimum	-25	-45	-30	-30	-30	-30	-30	-15	-15	-40	0	-5	-10	-10	0	0
Unteres Quartil	5	5	5	0	0	0	5	5	0	0	45	30	5	5	5	0
Median	70	90	70	75	25	75	100	75	50	55	120	85	20	20	30	15
Mittelwert	75	100	78	77	64	77	87	81	78	67	149	111	67	67	55	41
Oberes Quartil	110	130	120	120	120	120	125	110	110	105	160	130	110	110	95	90
Maximum	250	295	145	260	260	260	295	235	235	165	325	170	250	250	150	165
Anzahl n	27	25	25	25	25	25	25	27	26	23	25	26	25	25	27	21

### 4.1.3 Reaktionszeiten der elektrischen Leitfähigkeit

Die Zeiten vom Einsetzen des Niederschlags bis zum Eintreten der Verdünnung der elektrischen Leitfähigkeit sind nicht mehr so ähnlich zwischen den einzelnen Standorten wie die des Anstiegs des Wasserstands. Der Median für alle Gerinneabflussstationen schwankt von 25 bis 150 min, der IQA von 75 bis 220 min. Der Abflussstandort 51.0 weist den höchsten Median und Mittelwert mit 150 resp. 188 min auf. Der IQA ist zudem fast doppelt so gross wie jener der restlichen Abflussmessstationen (75 bis 180 min). Die Quellstandorte und der Makroporenstandort reagieren am schnellsten. Die Mediane sowie der IQA der Quell- (Median: 5 resp. 35 min; IQA: 70 resp. 100 min) und dem Makroporenstandort (Median: 30 min; IQA: 100 min) sind deutlich geringer als die der Gerinneabflussstandorten. Die längste Dauer bis zur Reaktion sowie die grösste Spannweite der Reaktionszeiten weisen die Grundwasserstandorte auf (Median: 90 bis 390 min; IQA: 110 bis 380 min). Die Standorte 21.1, 31.3, 32.6 und 12.8 reagieren nur bei wenigen Ereignissen (3, 4, 10 resp. 2 Mal) (s. Abb. 17 und Tab. 6).



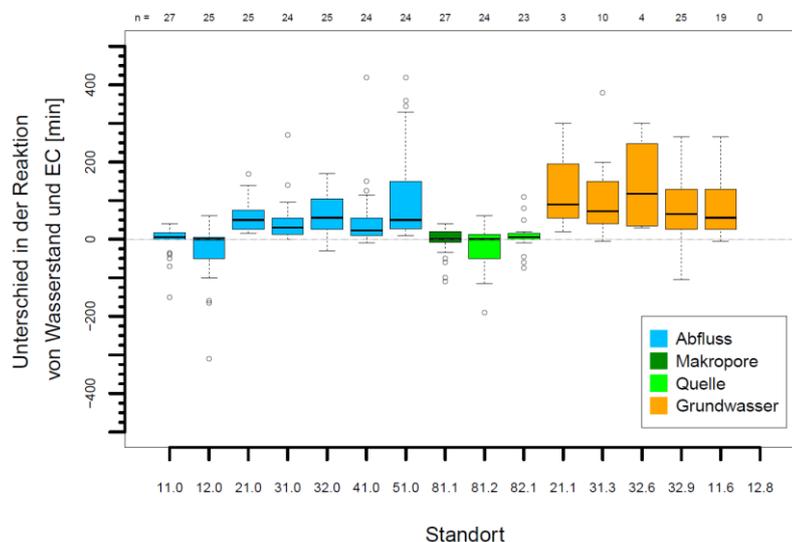
**Abb. 17.** Boxplots der händisch bestimmten Zeit [min] vom Niederschlagsbeginn bis zur EC-Reaktion der Gerinneabfluss- (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0, 51.0) (blau), Quell- (81.2, 81.1) (hellgrün), Makroporen- (81.1) (dunkelgrün) und Grundwasserstandorte (11.6, 12.8, 21.1, 31.3, 32.6, 32.9) (orange) (Daten: Beobachtungszeitraum vom 27.06.2013 bis 03.11.2013; Whiskers: definiert als 1.5- fache des IQA; Ausreisser: nicht geplottet).

**Tab. 6.** Statistische Kenngrössen der händisch bestimmten Zeit [min] vom Niederschlagsbeginn bis zur EC-Reaktion der Gerinneabfluss- (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0, 51.0) (blau), Quell- (81.2, 81.1) (hellgrün), Makroporen- (81.1) (dunkelgrün) und Grundwasserstandorte (11.6, 12.8, 21.1, 31.3, 32.6, 32.9) (orange) (Daten vom Beobachtungszeitraum: 27.06.2013 bis 03.11.2013).

Standort	11.0	12.0	21.0	31.0	32.0	41.0	51.0	81.1	81.2	82.1	21.1	31.3	32.6	32.9	11.6	12.8
Minimum	0	0	15	0	10	5	10	-10	-10	-5	210	0	35	0	0	NA
Unteres Quartil	15	5	70	35	50	35	50	10	0	10	300	85	40	50	60	NA
Median	35	25	140	110	125	135	150	30	5	35	390	180	210	90	130	NA
Mittelwert	73	64	134	116	126	136	188	115	59	74	343	241	226	148	177	NA
Oberes Quartil	115	80	180	140	165	160	270	110	70	110	410	280	410	195	270	NA
Maximum	260	130	325	185	240	250	540	245	130	140	430	550	450	400	505	NA
Anzahl n	27	25	25	24	25	24	24	27	24	23	3	10	4	25	20	2

#### 4.1.4 Differenz der Reaktionszeiten zwischen Wasserstand und EC

Beim Gegenüberstellen der Reaktion der elektrischen Leitfähigkeit mit jener des Abflusses kann festgestellt werden, mit welcher Verspätung die Verdünnung durch Niederschlagswasser nach dem Anstieg des Abflusses einsetzt. Aus der Abbildung 18 ist zu erkennen, dass die Verdünnung durch Niederschlagswasser bei den Grundwasserstandorten tendenziell deutlich später eintritt als der Anstieg des Wasserstandes und dass die Differenz der Reaktionszeiten zwischen Wasserstand und EC eine grössere Variabilität aufweist als die der Abflusstationen. Die Quellstandorte und der Makroporenstandort sowie die Abflusstationen mit kleinen EZG (11.0, 12.0) lassen eine zeitgleiche Reaktion des Abflusses und der EC beobachten (Median: 0 min). Die erwähnten vier Standorte weisen zum Teil negative Werte auf. Dies bedeutet, dass die Verdünnung vor dem Anstieg der Abflusskurve erfolgen soll, was nicht plausibel ist. Die negativen Werte habe ich in den Messreihen überprüft, sie resultieren daraus, dass die Änderungen im Wasserstand deutlich geringer und dadurch schwieriger und ungenauer zu detektieren sind als die der EC. Hinzu kommt, dass der Wasserstand Schwankungen durch Rauschen von 1 bis 2 cm aufweist, welche in Kombination mit den geringen Änderungen des Wasserstands aufgrund geringer Wasserführung zu unscharfem Detektieren des Anstiegs des Abflusses führen. Aus diesem Grund kann es passieren, dass die Verdünnung der EC vor dem Anstieg des Wasserstandes bestimmt wird. Bei den Standorten 12.0 und 81.2 sind die Änderungen des Wasserstandes am geringsten und somit die negativen Werte am deutlichsten. Für den Grundwasserstandort 12.8 konnte für kein Niederschlagsereignis eine Abfluss- sowie EC-Reaktion bestimmt werden.



**Abb. 18.** Boxplots der Unterschiede in der Reaktion von Wasserstand und EC der Gerinneabfluss- (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0, 51.0) (blau), Quell- (81.2, 81.1) (dunkelgrün), Makroporen- (81.1) (hellgrün) und Grundwasserstandorte (11.6, 12.8, 21.1, 31.3, 32.6, 32.9). Positive Werte bedeuten, dass die Verdünnung durch Niederschlagswasser später eintritt als der Anstieg des Wasserstandes. Negative Werte bedeuten, dass die Verdünnung durch Niederschlagswasser vor dem Anstieg des Wasserstandes eintritt (Daten: Beobachtungszeitraum vom 27.06.2013 bis 03.11.2013; Whiskers: definiert als 1.5- fache des IQA; Ausreisser: nicht geplottet).

## 4.2 Methodenvergleich: Bestimmung der Reaktionszeiten

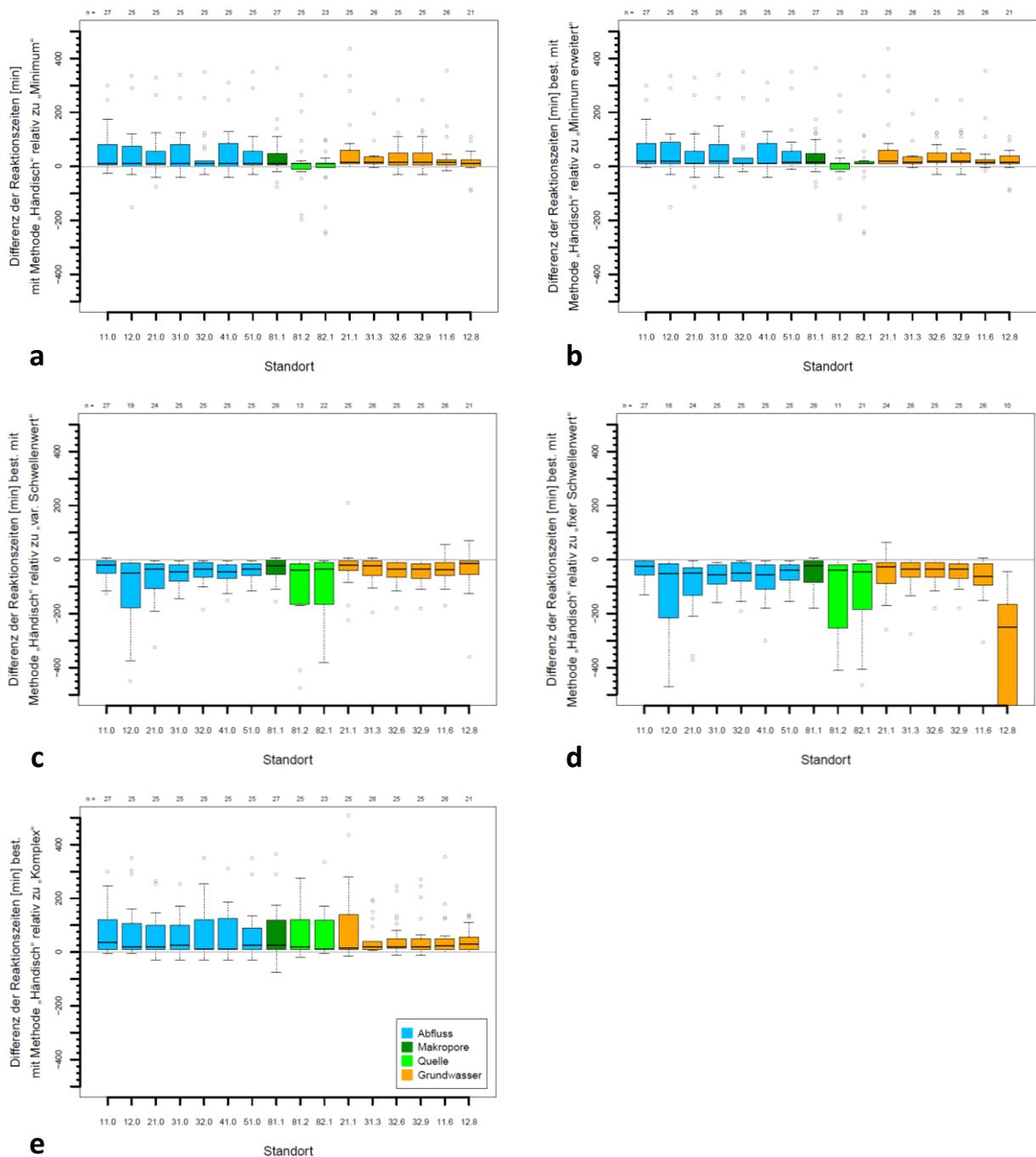
### 4.2.1 Bestimmung des Zeitpunktes des Wasserstandanstiegs

Die fünf automatisierten Methoden „Minimum“, „Minimum erweitert“, „variabler Schwellenwert“, „fixer Schwellenwert“ und „Komplex“ wurden anhand der Abfluss-, Quell-, Makroporen- und Grundwasserdaten getestet. Von den Grundwasserdaten wurden nur jene der Standorte mit installiertem STS Logger (11.6, 12.8, 21.1, 31.3, 32.6 und 32.9) verwendet. Die Unterschiede der Reaktionszeiten der einzelnen Methoden lagen im Vergleich zur händischen Methode im Median bei bis zu 100 Minuten, der IQA bei bis zu 200 min und sind damit grösser, als von mir erwartet (s. Abb. 19).

Die Resultate der Methoden „Minimum“ und „Minimum erweitert“ für die Abfluss- und Grundwasserdaten unterscheiden sich nur wenig voneinander. Methodenbedingt waren nur die unteren Quartile und unteren Whisker unterschiedlich. Für die „Minimum“ Methode sind die unteren Quartile bei allen Standorten 0 min (ausser 81.2, 21.1 und 31.3), also gleich dem Niederschlagsbeginn. Für „Minimum erweitert“ ist das untere Quartil bei allen ausser vier Standorten (12.0, 81.2, 21.1 und 31.3) negativ (Minimum bei -25 min), die unteren Whisker sind alle negativ (Minimum bei -40 min). Negative Reaktionszeiten, also ein Anstieg des Abflusses vor dem gemessenen Niederschlagsbeginn, sind nur insofern zu erklären, als dass das Untersuchungsgebiet ungleichmässig überregnet wurde. Die Mediane des Anstiegszeitpunktes für „Minimum“ und „Minimum erweitert“ liegen zwischen 5 und 55 min und der IQA zwischen 0 und 110 min. Ausreisser gibt es beim Abflussstandort 12.0, den Quell- (81.2 und 82.1) und den Grundwasserstandorten mit einem TWI < 3 (21.1 und 31.3).

Die umfangreichste Methode „Komplex“ bestimmt die Reaktion des Wasserstandes der Gerinneabflussstandorte im Median bei 0 min, ausser 11.0 bei -10 min und 51.0 bei 5 min, die Quellstandorte bei -5 (81.2) resp. -15 min (82.1) und die Grundwasserstandorte bei 0 min, mit Ausnahme von 21.1 und 31.3 bei 45 resp. 35 min. Somit detektiert die Methode „Komplex“ die Zeitpunkte der Wasserstandsreaktionen im Mittel noch früher als die Methoden „Minimum“. Der IQA variiert zwischen 20 min (11.0, 32.0) und 75 min (12.0) für den Gerinneabflussstandorte, zwischen 40 min (82.1) und 80 min (81.2) für die Quellstandorte und zwischen 20 min (11.6, 12.8) und 90 min (21.1 und 31.3) für die Grundwasserstandorte. Die grössten Zeitspannen zwischen dem unteren und oberen Whisker liegen bei dem Quellstandort 81.2 und dem Grundwasserstandort 21.1 mit 200 resp. 220 min. Kurvenanstiege später als 200 min nach Niederschlagsbeginn treten nur bei den Gerinneabflussstandorten 12.0, 31.0 und dem Grundwasserstandort 31.3 auf. Insgesamt weist die komplexeste Methode die kleinsten Schwankungen in der Bestimmung der Zeit bis zur Abflussreaktion im Vergleich zu den restlichen Methoden auf, ist jedoch zwischen den Gerinnestandorten sehr variabel.

Die einfachsten zwei Methoden („variabler Schwellenwert“ und „fixer Schwellenwert“), die auf Schwellenwerten basieren, detektieren den Wasserstandanstieg als einzige Methoden später als die händische Methode. Die Mediane der Reaktionszeiten der Gerinneabflussstandorte liegen bei 100 bis 135 min, der Quellstandorte bei 125 min, der Makropore bei 110 min und der Grundwasserstandorte bei 75 bis 135 min. Der Unterschied der Mediane zwischen der Methode „variabler Schwellenwert“ und „fixer Schwellenwert“ ist zwischen 0 und 15 min für alle Standorte ausser den Grundwasserstandorten 11.6 und 12.8 (35 resp. 210 min). Das 25 % Quartil liegt nicht wie bei der Bestimmung von Hand bei 0 min, sondern bei 50 bis 100 min. Der IQA ist bis auf die Standorte 32.0, 81.1, 81.2, 21.1, 11.6 und 12.8 grösser als 120 min. Die Streuung der Resultate ist im Vergleich zu den anderen Methoden am grössten, die Zeitspannen zwischen dem unteren und oberen Whisker liegen bei 10 Standorten über



**Abb. 19.** Boxplots der Unterschiede in der Reaktion des Wasserstands der händisch bestimmten Zeit und der Methode (a) „Komplex“, (b) „Minimum“, (c) „Minimum erweitert“, (d) „variabler Schwellenwert“ und (e) „fixer Schwellenwert“ für die Gerinneabfluss- (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0, 51.0) (blau), Quell- (81.2, 81.1) (dunkelgrün), Makroporen- (81.1) (hellgrün) und Grundwasserstandorte (11.6, 12.8, 21.1, 31.3, 32.6, 32.9) (orange) [min] (Daten: Beobachtungszeitraum vom 27.06.2013 bis 03.11.2013; Whiskers: definiert als 1.5- fache des IQA; Ausreisser: nicht geplottet).

300 min, bei den Restlichen sind es zwischen 180 und 260 min (11.0, 32.0, 81.1, 81.2, 11.6 und 12.8). Zudem weisen alle Standorte ausser 32.6 und 32.9 Ausreisser auf. Die Methode mit dem für jeden Standort individuell festgelegten Schwellenwert ist besser, da sie für fünf Standorte (12.0, 81.2, 82.1, 21.1 und 12.8) 1 bis 15 Kurvenanstiege mehr (richtig) detektieren konnte und generell die Zeiten bis zum Anstieg aufgrund des angepassten Schwellenwertes im Vergleich zur händischen Bestimmung etwas kürzer ausfallen.

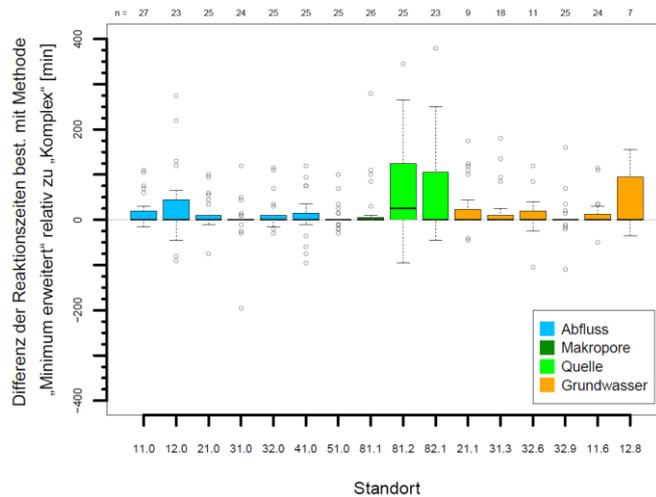
Wenn die Unterschiede der Reaktionszeiten des Wasserstandes der händisch bestimmten Zeit und der einzelnen Methoden betrachtet werden, sprich die Reaktionszeiten voneinander subtrahiert werden, ist festzustellen, dass der Zeitunterschied des Kurvenanstiegs zwischen der „Minimum“ Methode und der händischen Bestimmung mit einem Median von 10 bis 15 min (früher) am kleinsten ist, gefolgt von der Methode „Minimum erweitert“ mit 10 bis 20 min und der Methode „Komplex“ mit 10 bis 35 min früher als die Referenz. Die Methoden „variabler Schwellenwert“ und „fixer Schwellenwert“ schneiden am schlechtesten ab, da sie die grössten Differenzen zur händisch bestimmten Zeit aufweisen. Die Methode „variabler Schwellenwert“ bestimmt die Reaktion im Median 15 bis 50 min und „fixer Schwellenwert“ 25 bis 60 min später als die händische Methode (Abb. 19).

Der IQA der Differenz zwischen den händisch bestimmten Reaktionszeiten und den automatisch bestimmten Reaktionszeiten variiert zwischen den getesteten Methoden. Er ist ein Mass für die Streuung der Unterschiede der Reaktionszeiten der einzelnen Methoden zur Referenzmethode. In anderen Worten, je kleiner der IQA desto ähnlicher sind die bestimmten Reaktionszeiten der verglichenen Methoden.

Die Methoden „Minimum“ und „Minimum erweitert“ weisen die kleinsten IQA auf, gefolgt von den Methoden „variabler Schwellenwert“ und fixer Schwellenwert“, wobei der IQA der Standorte 12.0, 81.2 und 82.1 stark von den restlichen Standorten abweicht. Möglicherweise ist dies in der geringeren Anzahl detektierten Anstiege (13 bis 22) begründet. Für den Standort 12.8 können ebenfalls nur wenige der Kurvenanstiege mit der Methode „fixen Schwellenwert“ bestimmt werden (nur 10 Anstiege von 25 mit der Methode „variablen Schwellenwert“), was sich in einer Differenz (Verspätung) zur händischen Bestimmung von 250 min im Median äussert, da der fixe Schwellenwert den Grundwasseranstieg zu spät, also erst kurz vor dem Maximum des Niederschlagsereignisses, detektiert.

Die grössten IQA hat die Methode „Komplex“, jedoch nur für die Gerinneabfluss-, und Quellstandorte sowie den Makroporenstandort. Die Reaktionszeiten der Grundwasserstandorte haben nur eine geringe Differenz zur Methode „händisch“, wobei die Zeiten der Methode „Minimum“ noch näher bei der Referenzmethode liegen.

Wenn die Unterschiede der Methoden „Minimum erweitert“ und „Komplex“, welche die Reaktion des Wasserstands am ähnlichsten zur Referenzmethode detektieren, betrachtet werden (die Methode „Minimum“ darf nicht direkt mit der Methode „Komplex“ verglichen werden, da die Methode keine Reaktion vor den eigentlichen Niederschlagsbeginn erlaubt), ist festzustellen, dass der Unterschied im Median, bis auf 81.2 (25 min), für alle Standorte gleich 0 min ist. Die Methode „Komplex“ hat jedoch die Tendenz den Anstieg etwas früher zu bestimmen (mehr als 75 % aller Reaktionen), nur vereinzelt wird der Anstieg später als wie mit der Methode „Minimum erweitert“ detektiert. Das 25 % Quartil der Unterschiede zwischen diesen Methoden ist bei 0 min, das 75 % Quartil bei 20 min. Die Ausnahmen bilden 12.0 (45 min), die beiden Quellstandorte 81.2 und 82.1 (125 resp. 105 min) sowie 12.8 (95 min) (s. Abb. 20).



**Abb. 20.** Boxplots der Unterschiede in der Reaktion des Wasserstands der Methode „Minimum erweitert“ und „Komplex“ für die Gerinneabfluss- (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0, 51.0) (blau), Quell- (81.2, 81.1) (dunkelgrün), Makroporen- (81.1) (hellgrün) und Grundwasserstandorte (11.6, 12.8, 21.1, 31.3, 32.6, 32.9) (orange) [min] (Daten: Beobachtungszeitraum vom 27.06.2013 bis 03.11.2013; Whiskers: definiert als 1.5- fache des IQA; Ausreisser: nicht geplottet).

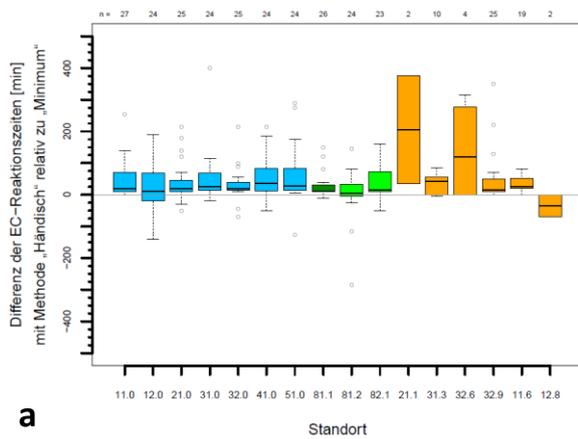
#### 4.2.1 Bestimmung des Zeitpunkts der Reaktion der elektrischen Leitfähigkeit

Die Unterschiede in der Bestimmung der EC- Reaktionszeit zwischen den einzelnen Methoden ist im Vergleich zu den Reaktionszeiten der Wasserstände kleiner, mit Ausnahme der Grundwasserstandorte (21.1, 31.3, 32.6 und 12.8). Der Grund dieser grossen Variation der Reaktionszeiten bei den Grundwasserstandorten liegt in der geringen Schwankung der EC- Ganglinie. Bei diesen Standorten werden mit den automatisierten Methoden fälschlicherweise mehr als doppelt so viele EC- Reaktionen detektiert wie bei der händischen Bestimmung. Im Vergleich dazu für die Gerinne- und Quellstandorte sowie den Makroporenstandort sind es bei 23 bis 27 händisch bestimmten EC- Reaktionen nicht mehr als plus minus zwei detektierte Reaktionen für die automatisierten Methoden. Auf die grossen Schwankungen der Reaktionszeiten dieser Grundwasserstandorte wird in der Analyse nicht mehr explizit eingegangen.

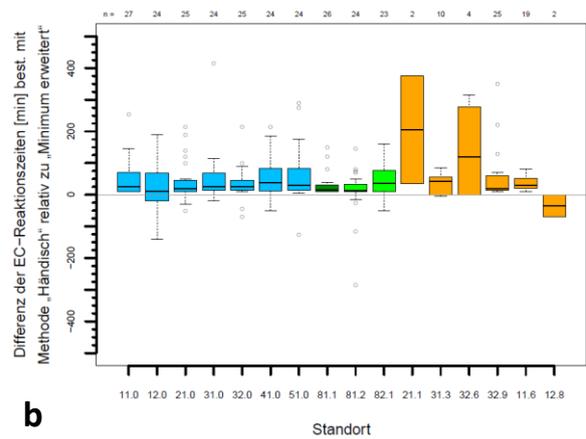
Die EC- Reaktionszeiten der einzelnen Standorte sind für die verschiedenen Methoden sehr ähnlich. Das Reaktionsmuster des Standortes bleibt bei allen Methoden ersichtlich. In anderen Worten, die Mediane und die IQA der Reaktionszeiten unterscheiden sich mehr zwischen den Standorten einer Methode als zwischen den Methoden. Auf das Reaktionsmuster der einzelnen Standorte wurde im Kapitel 4.1.2, Reaktionszeiten der Wasserstände, vertieft eingegangen.

Im Folgenden werden die Unterschiede der einzelnen Methoden zu der händischen Methode hervorgehoben (s. Abb. 21).

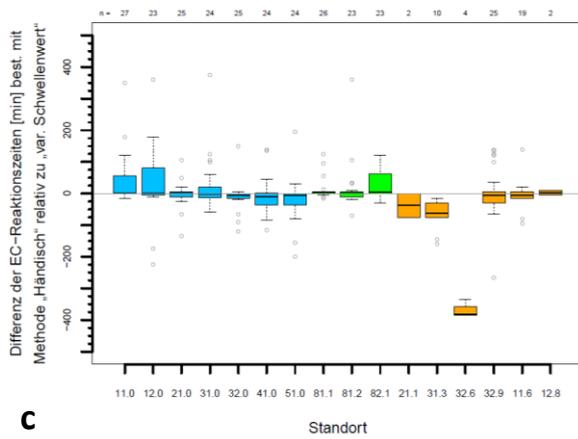
Die Methoden mit den kleinsten Abweichungen zur Methode „händisch“ sind die Methoden „variabler Schwellenwert“ und „fixer Schwellenwert“ (s. Abb. 21 c, d). Wie auch bei den Reaktionen des Wasserstandes ist die Methode „variablen Schwellenwert“ besser als die Methode „fixer Schwellenwert“, wobei die Unterschiede nur klein sind. Die Methode „variabler Schwellenwert“ detektiert die EC-Reaktion relativ zur händischen Methode im Median zwischen 10 min zu früh und 5 min zu spät. Bei den Standorten 11.0, 12.0 und 82.1 setzt die Verdünnung in der Tendenz eher vor der händischen Bestimmung ein, bei 41.0,



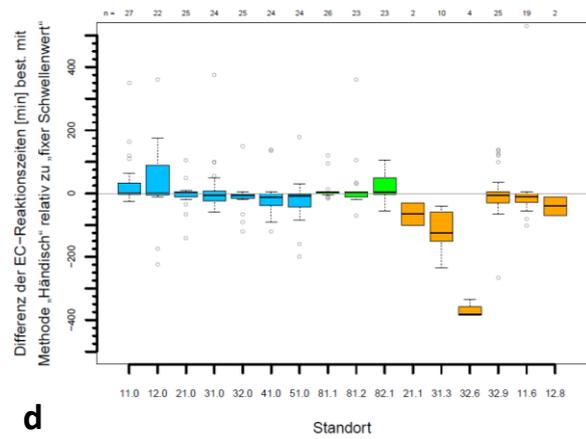
a



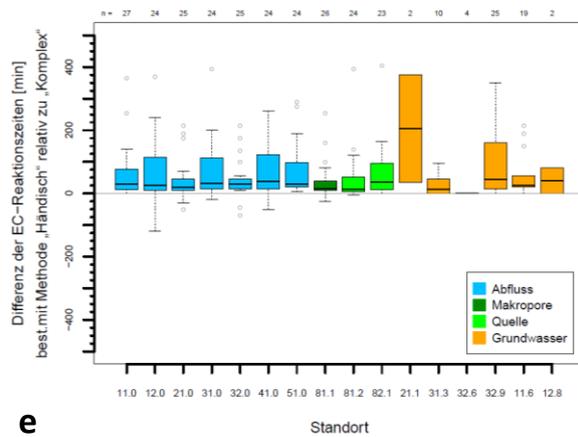
b



c



d



e

**Abb. 21.** Boxplots der Unterschiede in der EC- Reaktion der händisch bestimmten Zeit und der Methode (a) „Komplex“, (b) „Minimum“, (c) „Minimum erweitert“, (d) „variabler Schwellenwert“ und (e) „fixer Schwellenwert“ für die Gerinneabfluss- (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0, 51.0) (blau), Quell- (81.2, 81.1) (dunkelgrün), Makroporen- (81.1) (hellgrün) und Grundwasserstandorte (11.6, 12.8, 21.1, 31.3, 32.6, 32.9) (orange) [min] (Daten: Beobachtungszeitraum vom 27.06.2013 bis 03.11.2013; Whiskers: definiert als 1.5- fache des IQA; Ausreisser: nicht geplottet).

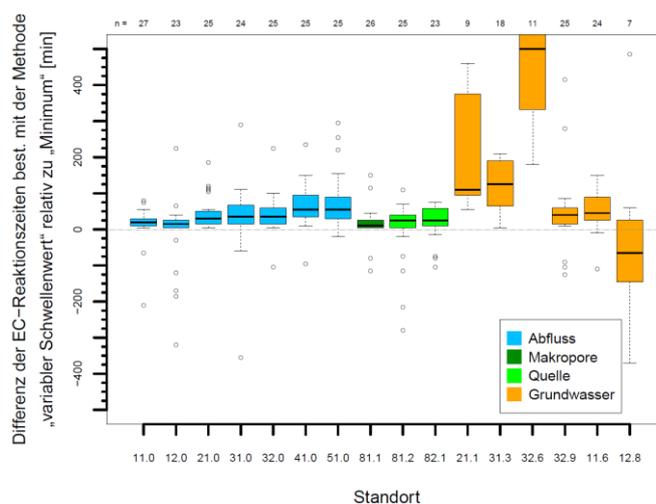
51.0 und 32.9 eher danach. Diese Standorte weisen zudem die grössten Schwankungen der Differenzen (IQA zwischen 35 und 85 min) auf. Die Unterschiede der Reaktionszeiten der übrigen Standorte (21.0, 31.0, 32.0, 81.1, 81.2, 11.6) werden mehr oder weniger gleichzeitig wie bei der händischen Methode detektiert (IQA zwischen 5 und 15 min). Der Abflussstandort 12.0 mit 85 min IQA weist die

höchsten Schwankungen der Unterschiede auf, wobei keine andere Methode die Abflussreaktion dieses Standorts genauer bestimmen kann. Für den Makroporenstandort 81.1 werden mehr als 50 % der Kurvenabstiege mit einer Differenz zur händischen Bestimmung von unter 5 min, weitere 25 % unter 10 min detektiert. Im Median reagiert 81.1 5 min später als die händische Bestimmung. Die EC- Reaktionen der Grundwasserstandorte werden mit der Methode „variabler Schwellenwert“ und „fixer Schwellenwert“ in mehr als 75 % der Fälle nach der händisch Bestimmten Reaktionszeit bestimmt, die Methoden „Minimum“, „Minimum erweitert“ und „Komplex“ detektieren die EC- Reaktionen der Grundwasserstandorte alle davor.

Die Methoden „Minimum“ und „Minimum erweitert“ detektieren die EC- Reaktion ebenfalls früher als die Referenzmethode, jedoch mit einem etwas höheren Median (5 bis 35 min) und einem grösseren IQA (10 bis 90 min) als die Methoden „variabler Schwellenwert“ bzw. „fixer Schwellenwert“ (s. Abb. 21 a, b).

Die Methode mit den grössten Abweichungen zur Methode „händisch“ ist die Methode „Komplex“ (s. Abb. 21 e). Die EC- Reaktion wird zu mehr als 75 % zu früh detektiert. Der Median der Differenzen schwankt zwischen 15 und 45 min, der IQA zwischen 30 und 145 min. Die Differenzen der EC- Reaktionen der Standorte 11.0, 21.0, 32.0, 51.0, 81.1 und 81.2 werden im Median nur wenig früher (10 bis 30 min) als die der restlichen Methoden detektiert. Jedoch sind im Vergleich die Differenzen der Reaktionszeiten der Standorte 12.0, 31.0, 41.0, 82.1, 11.6 (Median 25 bis 35 min; IQA 85 bis 105 min) und vor allem 32.9 (Median 45 min; IQA 145 min) wesentlich länger.

Beim Betrachten des Unterschiedes der EC- Reaktion zwischen der Methode „variabler Schwellenwert“ und der Methode „Minimum“, die die EC-Reaktion am nächsten im Vergleich zur Referenzmethode bestimmen, wird aufgezeigt, dass die „Minimum“ Methode die Verdünnung mehrheitlich vor der „variablen Schwellenwert“ Methode bestimmt. Der Median der Unterschiede liegt zwischen 5 und 55 min, der IQA zwischen 15 und 65 min. Die Standorte 11.0, 12.0, 81.1 und 81.2 werden ziemlich identisch detektiert (Median bei 5 min). Es ist ein Trend festzustellen, dass bei den Abflussstandorten der Unterschied der beiden Methoden mit der Grösse der EZG zunimmt (s. Abb. 22).



**Abb. 22.** Boxplots der Unterschiede in der EC- Reaktion der Methode „variabler Schwellenwert“ und der Methode „Minimum“ für die Gerinneabfluss - (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0, 51.0) (blau), Quell- (81.2, 81.1) (dunkelgrün), Makroporen- (81.1) (hellgrün) und Grundwasserstandorte (11.6, 12.8, 21.1, 31.3, 32.6, 32.9) (orange) [min] (Daten: Beobachtungszeitraum vom 27.06.2013 bis 03.11.2013; Whiskers: definiert als 1.5-fache des IQA; Ausreisser: nicht geplottet).

## 4.1 Rangkorrelation

### 4.1.1 Abflussmenge

In Anbetracht der grossen Unsicherheit in der Bestimmung der Einzugsgebietsfläche für die Quellstandorte sowie den Makroporenstandort, aufgrund der kleinen EZG Fläche sowie des unbekanntem unterirdischen EZG, wurden zusätzlich die Rangkorrelationen mit der Zielvariable ohne diese drei Standorte (81.1, 81.2, 82.1), also nur mit den Gerinneabflussdaten der einzelnen Subeinzugsgebiete (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0 und 51.0), berechnet. Im Folgenden wird die reduzierte Zielvariable mit einem Zusatz „<sub>Q</sub>“ bezeichnet.

Die Zielvariable Median Abfluss [l/s] ist mit über der Hälfte der topographischen Prädiktorvariablen korreliert (s. Tab. 7). Der Abfluss weist eine Korrelation von mehr als 0.93 mit den Prädiktoren Fläche EZG, mittlere Krümmung EZG und TWI Standort auf, wobei die Korrelationskoeffizienten für den Median höher sind als für die Mittelwerte des Abflusses. Keine der gewählten Zielvariablen korrelieren mit den Prädiktoren mittlere Hangneigung des EZG und Hangneigung am Standort.

Die höchsten Korrelationen zeigt der Median Abfluss mit der EZG Fläche ( $r_s$ : 0.95) (s. Abb. 23 a), dem TWI am Standort ( $r_s$ : 0.95) (s. Abb. 23 b) sowie mit der mittlere Krümmung des EZG ( $r_s$ : -0.93) (s. Abb. 23 c) auf. Zudem korreliert der Median Abfluss mit der Krümmung am Standort ( $r_s$ : 0.65), jedoch ist kein klarer funktionaler Zusammenhang in der Verteilung der Datenpunkte zu erkennen (s. Abb. 23 e). Die signifikanten  $r_s$  des Mittelwerts Abfluss sind nur wenig tiefer als jene der Mediane (EZG Fläche  $r_s$ : 0.94, TWI Standort  $r_s$ : 0.94 und mittlere Krümmung EZG  $r_s$ : -0.9). Die  $r_s$  des Wasserstandes [cm] sind hingegen für den Mittelwert für alle Prädiktoren geringfügig besser als die für den Median, die Differenz des  $r_s$  zwischen Median Abfluss bzw. mittlerem Abfluss und den topographischen Prädiktoren beträgt zwischen 0.01 und 0.09.

Der Median bzw. Mittelwert des spezifischen Abflusses [l/(s·km<sup>2</sup>)] ist mit keinem der topographischen Prädiktoren korreliert, wenn alle Gerinneabfluss, Quell- und Makroporenabflussdaten berücksichtigt wurden (s. Tab. 7). Im Streudiagramm des Prädiktors EZG Fläche sind eindeutig die Quellstandorte und der Makroporenstandort als Ausreisser zu erkennen (s. Abb. 23 f).

**Tab. 7.** Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen dem Median bzw. Mittelwert des Abflusses, Wasserstandes und spezifischen Abflusses für alle Abflussstandorte (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0, 51.0, 81.1, 81.2, 82.1) und den verschiedenen topographischen Einzugsgebietseigenschaften. Die Höhe der Signifikanz ist für jeden Korrelationskoeffizienten angegeben.

Prädiktoren	Median			Mittelwert		
	Abfluss [l/s]	Wasserstand [cm]	spez. Abfluss [l/(s·km <sup>2</sup> )]	Abfluss [l/s]	Wasserstand [cm]	spez. Abfluss [l/(s·km <sup>2</sup> )]
mittlere Hangneigung EZG	-0.48	-0.43	0.12	-0.53	-0.52	-0.03
mittlere Krümmung EZG	-0.93 <sup>c</sup>	-0.8 <sup>b</sup>	0.012	-0.9 <sup>c</sup>	-0.83 <sup>b</sup>	0.21
Fläche EZG	0.95 <sup>c</sup>	0.82 <sup>b</sup>	-0.055	0.94 <sup>c</sup>	0.85 <sup>b</sup>	0.63
TWI Standort	0.95 <sup>c</sup>	0.82 <sup>b</sup>	-0.055	0.94 <sup>c</sup>	0.85 <sup>b</sup>	0.63
Hangneigung Standort	-0.54	-0.47	0.2	-0.56	-0.52	0.24
Krümmung Standort	-0.65 <sup>a</sup>	-0.48	0.25	-0.62	-0.49	0.45

schwarz =  $p > 0.05$ , gelb<sup>a</sup> =  $p < 0.05$ , orange<sup>b</sup> =  $p < 0.01$ , rot<sup>c</sup> =  $p < 0.001$ .

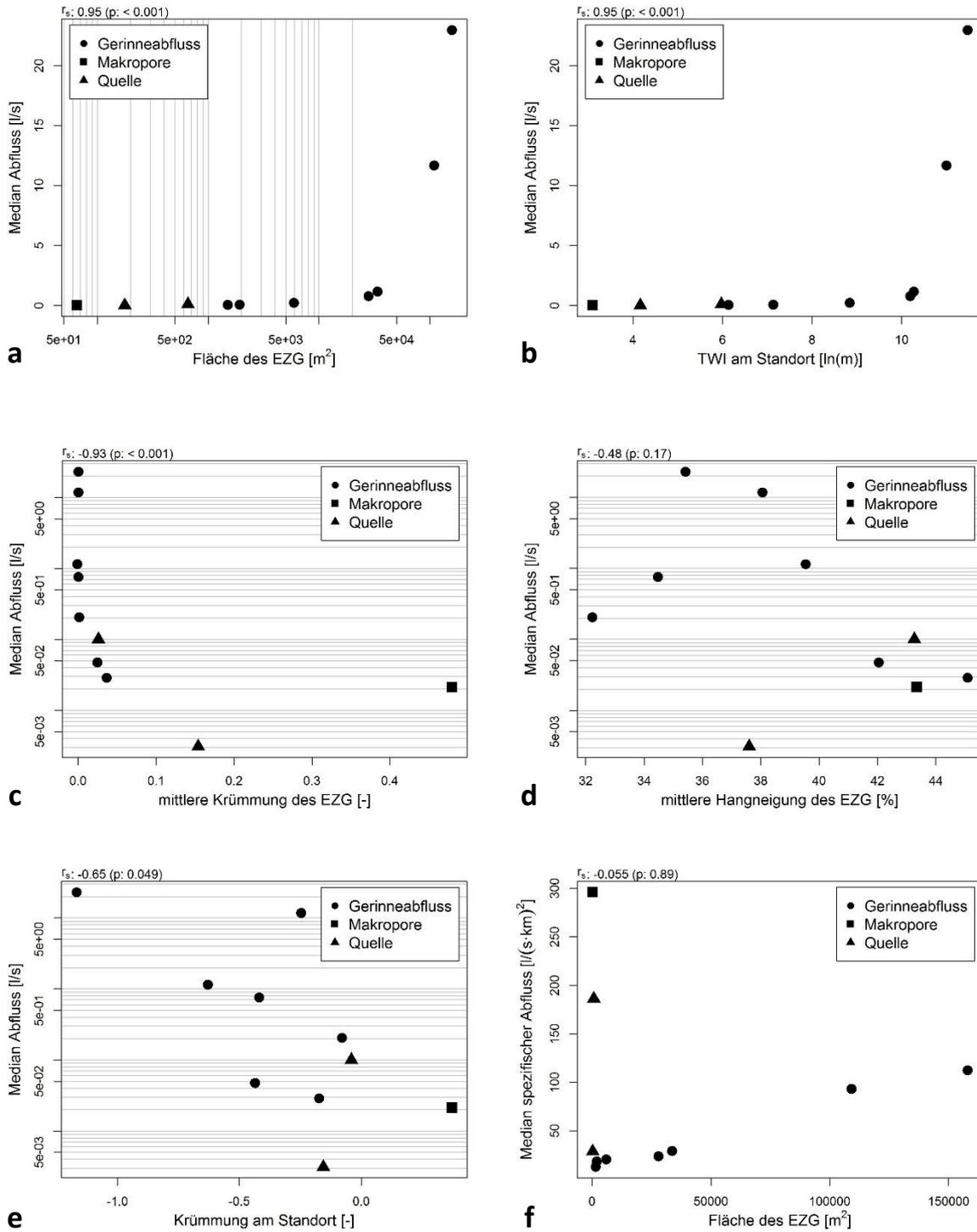
**Tab. 8.** Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen dem Median bzw. Mittelwert des Abflusses, Wasserstandes und des spezifischen Abflusses für die Gerinneabflussmessstandorte (Abfluss<sub>Q</sub> - Messstandorte: 11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0 und 51.0) und den verschiedenen topographischen Einzugsgebieteigenschaften. Die Höhe der Signifikanz ist für jeden Korrelationskoeffizienten angegeben.

Prädiktoren	Median <sub>Q</sub>			Mittelwert <sub>Q</sub>		
	Abfluss [l/s]	Wasserstand [cm]	spez. Abfluss [l/(s·km <sup>2</sup> )]	Abfluss [l/s]	Wasserstand [cm]	spez. Abfluss [l/(s·km <sup>2</sup> )]
mittlere Hangneigung EZG	-0.43	-0.54	-0.43	-0.54	-0.54	-0.71
mittlere Krümmung EZG	-0.86 <sup>a</sup>	-0.77 <sup>a</sup>	-0.86 <sup>a</sup>	-0.77 <sup>a</sup>	-0.77 <sup>a</sup>	-0.58
Fläche EZG	1 <sup>c</sup>	0.96 <sup>b</sup>	1 <sup>c</sup>	0.96 <sup>b</sup>	0.96 <sup>b</sup>	0.86 <sup>b</sup>
TWI Standort	1 <sup>c</sup>	0.96 <sup>b</sup>	1 <sup>c</sup>	0.96 <sup>b</sup>	0.96 <sup>b</sup>	0.86 <sup>b</sup>
Hangneigung Standort	-0.036	-0.11	-0.036	-0.11	-0.11	-0.11
Krümmung Standort	-0.57	-0.5	-0.57	-0.5	-0.5	-0.21

schwarz =  $p > 0.05$ , gelb<sup>a</sup> =  $p < 0.05$ , orange<sup>b</sup> =  $p < 0.01$ , rot<sup>c</sup> =  $p < 0.001$ .

Es stellt sich heraus, dass die Zielvariable Abfluss<sub>Q</sub> mit denselben Prädiktorvariablen wie Abfluss korreliert ist und die Korrelationskoeffizienten sogar zum Teil höher sind. Die Ausnahme ist der Prädiktor mittlere Krümmung des EZG (s. Tab. 8). Eine signifikante Korrelation weist wiederum der Median Abfluss<sub>Q</sub> mit der EZG Fläche ( $r_s: 1$ ) (beachte Symbole in Abb. 23 a) und den TWI am Standort ( $r_s: 1$ ) (beachte Symbole in Abb. 23 b) und der mittleren Krümmung des EZG ( $r_s: -0.86$ ) (beachte Symbole in Abb. 23 c) auf. Anders als zuvor, korreliert der spezifische Abfluss<sub>Q</sub> auch mit den Prädiktoren EZG Fläche ( $r_s: 1$ ) und der TWI am Standort ( $r_s: 1$ ) und mit der mittleren Krümmung des EZG ( $r_s: -0.86$ ).

Der Median des spezifischen Abfluss<sub>Q</sub> weist höhere Korrelationen mit den topographischen Prädiktoren auf wie die Mittelwerte des spezifischen Abfluss<sub>Q</sub>. Der mittlere spezifische Abfluss<sub>Q</sub> ist korreliert mit der EZG Fläche ( $r_s: 0.96$ ), dem TWI am Standort ( $r_s: 0.96$ ) und mit der mittleren Krümmung des EZG ( $r_s: -0.77$ ).



**Abb. 23.** Median Abfluss [l/s] als eine Funktion der Prädiktoren (a) EZG Fläche [m<sup>2</sup>], (b) TWI am Standort [ln(m)], (c) mittlere Krümmung des EZG [-], (d) mittlere Hangneigung des EZG [%], (e) Krümmung am Standort [-] und (f) Median spezifischer Abfluss [l/(s·km<sup>2</sup>)] als eine Funktion des Prädiktors EZG Fläche [m<sup>2</sup>] ( $r_s$ : Korrelationskoeffizient nach Spearman mit zugehörigem p-Wert).

#### 4.1.2 Reaktionszeit

Die Reaktionszeit des Abflusses ist mit keiner der topographischen Einzugsgebietseigenschaften korreliert, die EC- Reaktionszeit mit den Prädiktoren Fläche des EZG, TWI am Standort und mittleren Krümmung des EZG (s. Tab. 9).

**Tab. 8.** Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen median und mittlerer Reaktionszeit des Abflusses bzw. der EC und verschiedenen, topographischen Prädiktoren. Für die Bestimmung der Reaktionszeiten wurde jeweils die Methode „Händisch“ sowie die jeweils beste automatisierte Methode ausgewählt. Für die Bestimmung der Reaktionszeit des Abflusses ist dies die Methode „Minimum“, für die Bestimmung der EC-Reaktionszeit die Methode „variabler Schwellenwert“. Die Höhe der Signifikanz ist für jeden Korrelationskoeffizienten angegeben.

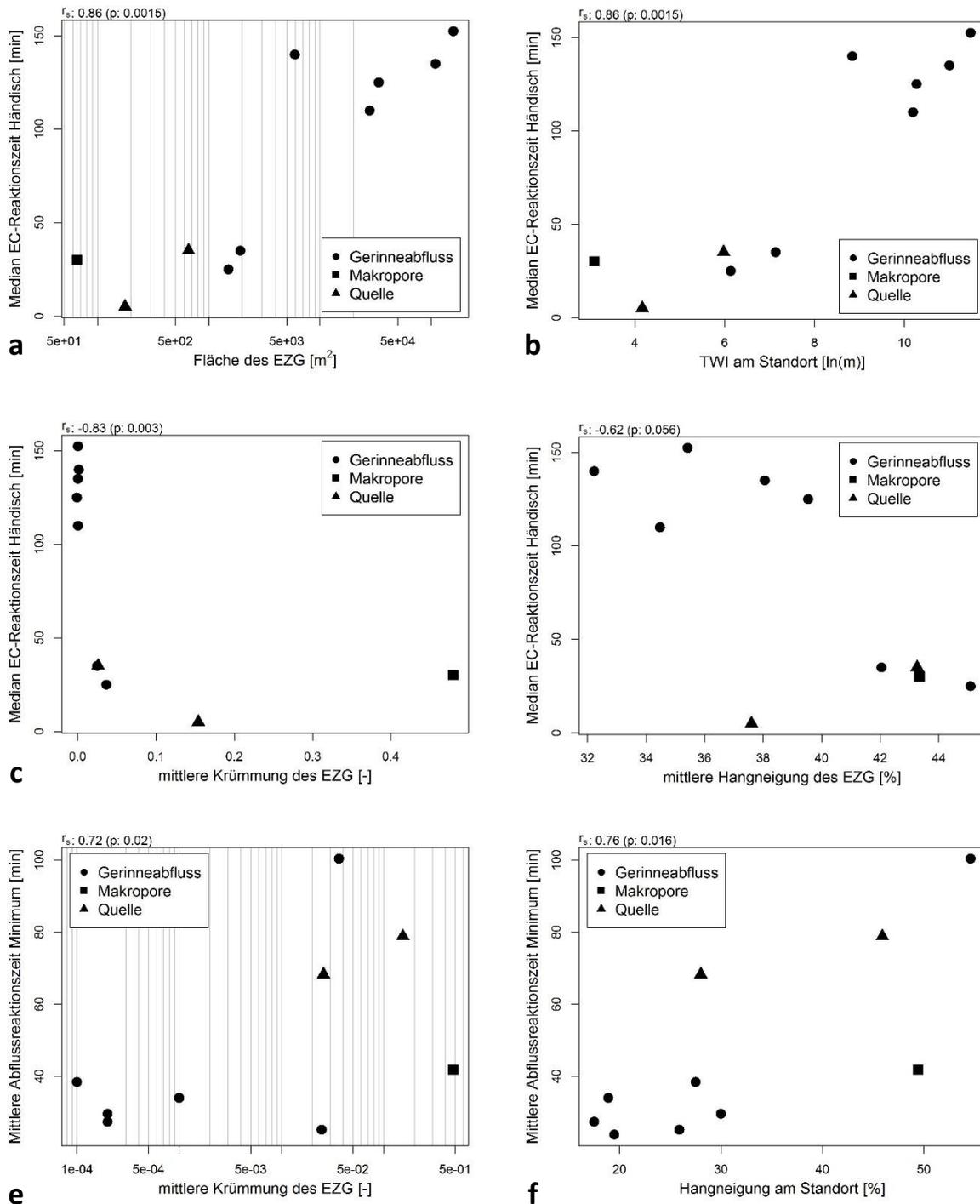
Prädiktoren	Reaktionszeit Abfluss				Reaktionszeit elektrische Leitfähigkeit			
	Median		Mittelwert		Median		Mittelwert	
	Händisch	Minimum	Händisch	Minimum	Händisch	var. Schwellenwert	Händisch	var. Schwellenwert
Mittlere Hangneigung EZG	0.04	-0.01	-0.04	0.36	-0.62	-0.61	-0.53	0.05
Mittlere Krümmung EZG	-0.03	0.55	0.35	0.72 <sup>a</sup>	-0.83 <sup>b</sup>	-0.82 <sup>b</sup>	-0.75 <sup>a</sup>	0.47
Fläche EZG	0.28	-0.49	-0.10	-0.59	0.86 <sup>b</sup>	0.80 <sup>b</sup>	0.81 <sup>b</sup>	-0.33
TWI Standort	0.28	-0.49	-0.10	-0.59	0.86 <sup>b</sup>	0.80 <sup>b</sup>	0.81 <sup>b</sup>	-0.33
Hangneigung Standort	0.25	0.43	0.52	0.76 <sup>a</sup>	-0.63	-0.57	-0.45	0.47
Krümmung Standort	-0.16	0.59	0.18	0.59	-0.48	-0.42	-0.38	0.47

schwarz =  $p > 0.05$ , gelb<sup>a</sup> =  $p < 0.05$ , orange<sup>b</sup> =  $p < 0.01$ , rot<sup>c</sup> =  $p < 0.001$ .

Die Zielvariable Reaktionszeit des Abflusses hat keine signifikante Korrelation mit den Prädiktoren ergeben, bis auf den mittlere Reaktionszeit der besten automatischen Bestimmungsmethode, „Minimum“, für die mittlere Krümmung des EZG ( $r_s$ : 0.72) und die mittlere Hangneigung am Standort ( $r_s$ : 0.76). Diese Korrelationen machen jedoch keinen Sinn, da kein klarer funktionaler Zusammenhang in der Verteilung der Datenpunkte zu erkennen ist (s. Abb. 24 e, f) sowie die händische Referenzmethode keine signifikante Korrelation aufweist. Die  $r_s$  der Reaktionszeiten des Abflusses der Methode „Minimum“ sind teilweise höher als die der Referenzmethode und weisen wie zum Beispiel bei Prädiktor EZG Fläche („Händisch“  $r_s$ : 0.28, „Minimum“  $r_s$ : -0.49) oder Krümmung am Standort („Händisch“  $r_s$ : -0.16, „Minimum“  $r_s$ : -0.59) unterschiedliche Vorzeichen auf. Die händische Bestimmung der Reaktionszeit des Abflusses<sub>Q</sub> weist für den Median sowie den Mittelwert ebenfalls keine signifikanten Korrelationen auf. Für die Reaktionszeit des Abflusses<sub>Q</sub> sind keine Muster zu erkennen.

Die höchsten Korrelationen weist der Median der händisch bestimmten EC- Reaktionszeit mit der EZG Fläche ( $r_s$ : 0.86) und dem TWI am Standort ( $r_s$ : 0.86) auf (s. Abb. 24 a, b). Zudem korreliert für dieselbe Zielvariable die mittlere Krümmung des EZG ( $r_s$ : -0.83) (s. Abb. Xc). Die mittlere Hangneigung des EZG korreliert nicht mit einem p-Wert von 0.056 ( $r_s$ : -.62) (s. Abb. Xd). Der Mittelwert der händisch bestimmten EC- Reaktionszeit korreliert mit denselben Prädiktoren, jedoch schwächer im Vergleich zum Median (Fläche EZG  $r_s$ : 0.81, TWI am Standort  $r_s$ : 0.81 und mittlere Krümmung des EZG  $r_s$ : -0.75). Die Zielvariable mittlere händisch bestimmte EC- Reaktionszeit des Abflusses<sub>Q</sub> weist für die Prädiktoren EZG Fläche und TWI am Standort eine höhere Korrelation ( $r_s$ : 0.89,  $p$ : 0.012) als die für die des Abfluss<sub>Q</sub>.

$s_M$  auf ( $r_s: 0.81, p = 0.008$ ), allerdings ist die Korrelation weniger signifikant. Die beste automatische Bestimmungsmethode für die EC- Reaktionszeit, „variabler Schwellenwert“, korreliert ebenfalls mit der Fläche des EZG ( $r_s: 0.80$ ), dem TWI am Standort ( $r_s: 0.80$ ) und der mittleren Krümmung des EZG ( $r_s: -0.82$ ), jedoch sind die Korrelationskoeffizienten für alle Prädiktoren leicht tiefer. Für die Zielvariable mittlere EC- Reaktionszeit der Bestimmungsmethode „variabler Schwellenwert“ korreliert kein Prädiktor.



**Abb. 24.** Median der händisch bestimmten EC- Reaktionszeit [min] als eine Funktion der Prädiktoren (a) EZG Fläche [m<sup>2</sup>], (b) TWI am Standort [ln(m)], (c) mittlere Krümmung des EZG [-], (d) mittlere Hangneigung des EZG [%] und mittlere Reaktionszeit des Abflusses der Methode „Minimum“ als eine Funktion der Prädiktoren (e) mittlere Krümmung des EZG, (f) Hangneigung am Standort [%] ( $r_s$ : Korrelationskoeffizient nach Spearman mit zugehörigem p-Wert).

### 4.1.3 Prädiktoren

Die Rangkorrelation zwischen den verschiedenen topographischen Prädiktoren ist mittel bis hoch, die Hälfte der Korrelationen sind signifikant (s. Tab. 10). Die Prädiktoren EZG Fläche und TWI am Standort weisen die höchste Inter-Korrelation ( $r_s: 1$ ) auf. Dieser hohe Rangkorrelationskoeffizient besteht, da die Berechnung des TWI die EZG Fläche beinhaltet. Die Folge ist, dass diese beiden Prädiktoren dieselben Korrelationen mit den anderen Prädiktoren aufweisen. Weiter korreliert die mittlere Krümmung des EZG mit allen Prädiktoren, ausser der mittleren Hangneigung des EZG. Die EZG Fläche und somit auch der TWI am Standort weisen dabei die höchste Korrelation mit der mittleren Krümmung des EZG auf ( $r_s: -0.94$ ). Die Krümmung am Standort korreliert zusätzlich zur mittleren Krümmung des EZG auch mit der EZG Fläche und dem TWI ( $r_s: -0.79$ ). Der Prädiktor mittlere Hangneigung des EZG korreliert abgesehen von dem Prädiktor Hangneigung am Standort ( $r_s: 0.71$ ) mit keinem anderen Prädiktor.

**Tab. 9.** Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen den einzelnen topographischen Einzugsgebiet-Prädiktoren. Die Höhe der Signifikanz ist für jeden Korrelationskoeffizienten angegeben.

Prädiktoren	Mittlere Hangneigung EZG	Mittlere Krümmung EZG	Fläche EZG	TWI Standort	Hangneigung Standort	Krümmung Standort
Mittlere Hangneigung EZG	1	0.52	-0.53	-0.53	0.71 <sup>a</sup>	0.29
Mittlere Krümmung EZG		1	-0.94 <sup>c</sup>	-0.94 <sup>c</sup>	0.69 <sup>a</sup>	0.79 <sup>b</sup>
Fläche EZG			1	1 <sup>c</sup>	-0.53	-0.79 <sup>b</sup>
TWI Standort				1	-0.53	-0.79 <sup>b</sup>
Hangneigung Standort					1	0.43
Krümmung Standort						1

schwarz =  $p > 0.05$ , gelb <sup>a</sup> =  $p < 0.05$ , orange <sup>b</sup> =  $p < 0.01$ , rot <sup>c</sup> =  $p < 0.001$ .

## 4.2 Random Forest

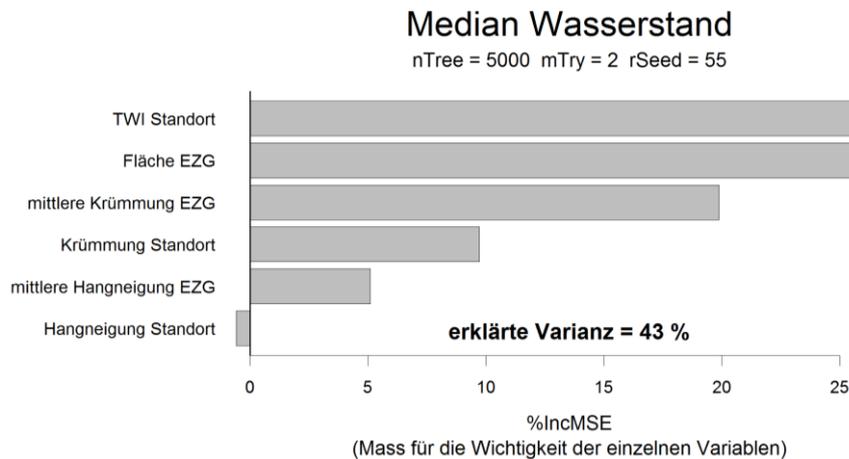
Zusätzlich zur bivariaten Analyse, welche den Einfluss auf die Zielvariable für jeden Prädiktor einzeln analysiert, möchte ich mit der Anwendung des Random Forest Ansatzes die multivariaten Interaktionen der Prädiktoren berücksichtigen.

Der Random Forest Ansatz wurde für die Abflussmenge mit den Zielvariablen mittlerer und median Abfluss, Wasserstand und spezifischer Abfluss, für das Abflusstiming mit den Zielvariablen mittlere und median Reaktionszeit des Abflusses sowie der EC für die Methode „händisch“ und für die jeweils beste automatische Methode, „Minimum“ resp. „variabler Schwellenwert“, berechnet.

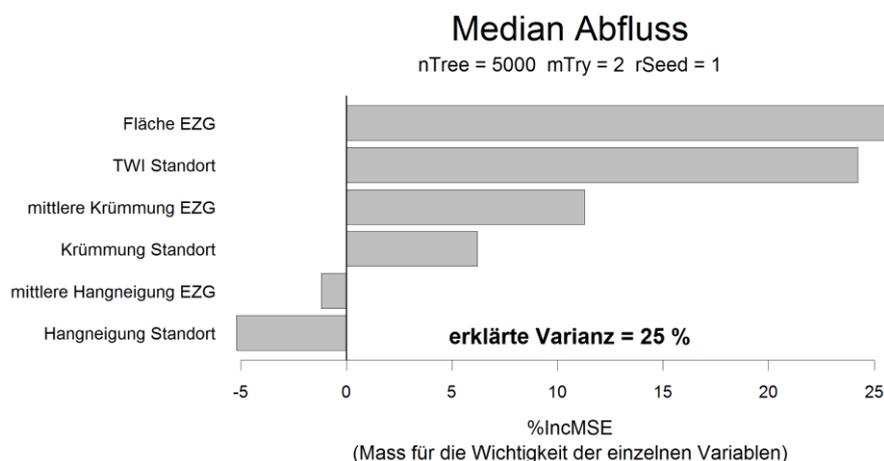
Nur die Zielvariablen mittlerer und median Wasserstand, mittlerer und median Abfluss sowie mittlere und median EC- Reaktionszeit der Methoden „händisch“ und „variabler Schwellenwert“ haben für die Random Forest Berechnungen plausible Ergebnisse erzielt, wobei der Median leicht besser war als der Mittelwert. Im Folgenden wird ausschliesslich auf diese Zielvariablen eingegangen.

#### 4.2.1 Wasserstand und Abflussmenge

Die Modellgüte der verschiedenen Durchläufe des Random Forest Ansatzes für die Abflussmenge war schwach bis mittel mit einer maximalen erklärten Varianz für die Zielvariable Median Wasserstand von 43 % (min. = 39 %) (s. Abb. 25). Die höchste erklärte Varianz des Median Abfluss lag bei 25 % (min. = 19 %) (s. Abb. 26).



**Abb. 25.** Wichtigkeit verschiedener, topographischer Prädiktorvariablen für den Median Wasserstand (Zielvariable) bestimmt mit dem Random Forest Ansatz. Auf der x - Achse ist %IncMSE [-], der standardisierte, prozentuale Anstieg des mittleren quadratischen Fehlers bei zufälliger Permutierung der Daten dieses Prädiktors aufgetragen (%IncMSE ist ein Mass für die Wichtigkeit der einzelnen Prädiktoren relativ zueinander). Negative %IncMSE bedeuten, dass die zufällige Permutation dieser Variablen eine bessere Vorhersage ermöglicht und somit der Prädiktor keinen Einfluss auf die Zielvariable ausübt. Der Prozentsatz der erklärten Varianz zeigt die Modellgüte des RF an; nTree: Gesamtzahl der Regressionsbäume, mTry: Anzahl zufällig vorselektierten Prädiktoren für jede Aufspaltung, rSeed: Anfangswerte des Pseudozufallsgenerators.



**Abb. 26.** Wichtigkeit verschiedener, topographischer Prädiktorvariablen für den Median Abfluss (Zielvariable) bestimmt mit dem Random Forest Ansatz. Auf der x - Achse ist %IncMSE [-], der standardisierte, prozentuale Anstieg des mittleren quadratischen Fehlers bei zufälliger Permutierung der Daten dieses Prädiktors aufgetragen (%IncMSE ist ein Mass für die Wichtigkeit der einzelnen Prädiktoren relativ zueinander). Negative %IncMSE bedeuten, dass die zufällige Permutation dieser Variablen eine bessere Vorhersage ermöglicht und somit der Prädiktor keinen Einfluss auf die Zielvariable ausübt. Der Prozentsatz der erklärten Varianz zeigt die Modellgüte des RF an; nTree: Gesamtzahl der Regressionsbäume, mTry: Anzahl zufällig vorselektierten Prädiktoren für jede Aufspaltung, rSeed: Anfangswerte des Pseudozufallsgenerators.

Die Wichtigkeit der einzelnen Prädiktoren variierten zwischen den beiden Zielvariablen nur in den ersten beiden Rängen. Der wichtigste Prädiktor für den Median Wasserstand ist der TWI am Standort, der zweitwichtigste die EZG Fläche. Für den Median Abfluss ist es umgekehrt. Hierzu muss angefügt werden, dass für beide Zielvariablen (Abfluss sowie Wasserstand) die Prädiktoren EZG Fläche und TWI am Standort innerhalb der 30 Durchläufe den ersten und zweiten Rang miteinander tauschten. Beim Median Wasserstand war die EZG Fläche in  $\frac{1}{3}$  der Durchläufe die wichtigste Variable, hingegen beim Median Abfluss der TWI Standort nur drei Mal. Diese Rangverschiebungen der EZG Fläche und dem TWI Standort treten auf, da der Random Forest Ansatz für beide Variablen sehr ähnliche Wichtigkeiten errechnet resp. der %IncMSE um etwa gleich viel steigt, wenn diese Variablen zufällig gewählt werden. Die Instabilität des Random Forest ist zudem gegeben, da die Modellgüte eher gering ist. Die restlichen Ränge waren für die beiden Zielvariablen für alle 30 Durchläufe identisch, mit der mittleren Krümmung des EZG an dritter, der Krümmung am Standort an vierter, der mittleren Hangneigung des EZG am fünfter und der Hangneigung am Standort an letzter Stelle.

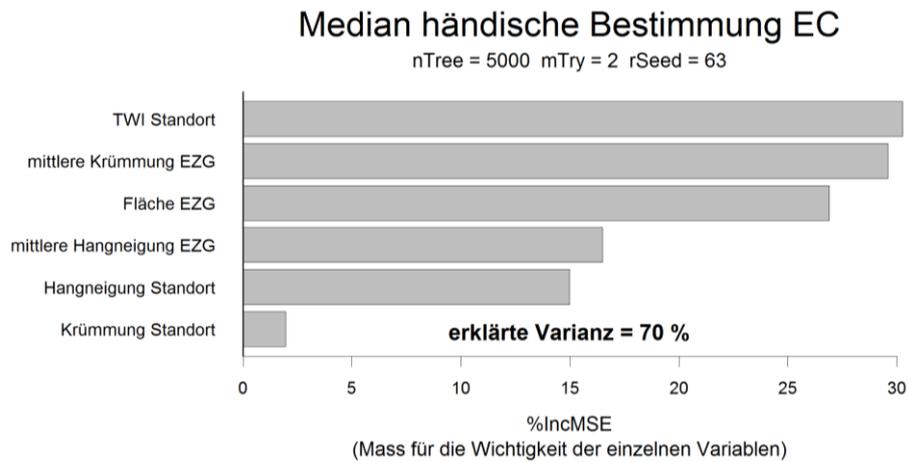
Nach der Signifikanzdefinition nach Strobl et al. (2009) (s. Kapitel 3.2.2) sind für den Median Wasserstand alle Prädiktoren ausser die Hangneigung am Standort signifikant, beim Median Abfluss sind es die EZG Fläche, TWI am Standort, mittlere Krümmung des EZG und Krümmung am Standort. Die nicht signifikanten Prädiktoren weisen eine negative %IncMSE auf. Dies bedeutet per Definition, dass die zufällige Permutation dieser Variablen eine bessere Vorhersage ermöglicht und somit der Prädiktor keinen Einfluss auf die Zielvariable ausübt.

#### 4.2.2 Reaktionszeit

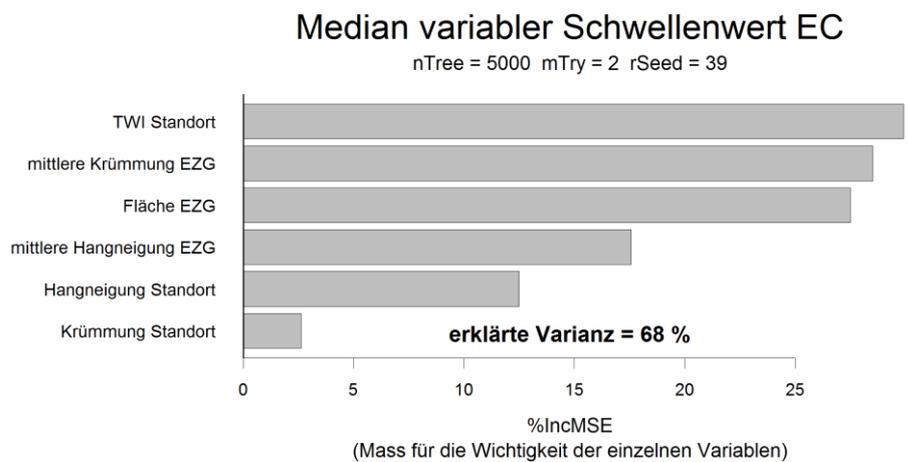
Die besten Resultate des Random Forest ergaben die Zielvariablen Median händische Bestimmung der EC- Reaktionszeit mit einer erklärten Varianz von 70 % (min. = 67 %) (s. Abb. 27) und die beste automatische Bestimmungsmethode für die EC-Reaktionszeit, „variabler Schwellenwert“, mit einer erklärten Varianz von 68 % (min. = 65 %) (s. Abb. 28).

Wie bereits bei der Rangkorrelation gesehen, korreliert die Zielvariable Median Reaktionszeit des Abflusses der händischen Bestimmung nicht mit den einzelnen Prädiktoren. Der Random Forest Ansatz bestätigt dieses Resultat. Die verschiedenen Random Forest Modelle erreichten für die Zielvariablen händische Bestimmung der Abflussreaktionszeit sowie für die beste automatische Bestimmungsmethode der Abflussreaktionszeit, „Minimum“, keine aussagekräftigen Ergebnisse.

Die Reihenfolge der Wichtigkeit der einzelnen Prädiktoren für die Beschreibung der EC-Reaktionszeit ist für die Methode „händisch“ und die Methode „variabler Schwellenwert“ identisch. Die beste erklärende Variable für die EC- Reaktionszeit ist der TWI am Standort gefolgt von der mittleren Krümmung des EZG, der Fläche des EZG, der mittleren Hangneigung der EZG, der Hangneigung am Standort und der Krümmung am Standort als Prädiktor mit der geringsten Wichtigkeit. Innerhalb der 30 RF Durchläufe gibt es kaum Änderungen in der Reihenfolge der Wichtigkeit der Prädiktoren, die Random Forest Regression ist für die EC-Reaktionszeit sehr stabil. Der Prädiktor TWI am Standort bleibt in 27 Fällen für die Methode „händisch“ resp. 26 Fällen für die Methode „variabler Schwellenwert“ auf dem ersten Rang. Der Prädiktor EZG Fläche tauscht für beide Zielvariablen in zwei Fällen den Rang mit dem Prädiktor mittlere Krümmung des EZG.



**Abb. 27.** Wichtigkeit verschiedener, topographischer Prädiktorvariablen für den Median der händischen Bestimmung der EC- Reaktionszeit (Zielvariable) bestimmt mit dem Random Forest Ansatz. Auf der x - Achse ist %IncMSE [-], der standardisierte, prozentuale Anstieg des mittleren quadratischen Fehlers bei zufälliger Permutierung der Daten dieses Prädiktors aufgetragen (%IncMSE ist ein Mass für die Wichtigkeit der einzelnen Prädiktoren relativ zueinander). Negative %IncMSE bedeuten, dass die zufällige Permutation dieser Variablen eine bessere Vorhersage ermöglicht und somit der Prädiktor keinen Einfluss auf die Zielvariable ausübt. Der Prozentsatz der erklärten Varianz zeigt die Modellgüte des RF an; nTree: Gesamtzahl der Regressionsbäume, mTry: Anzahl zufällig vorselektierten Prädiktoren für jede Aufspaltung, rSeed: Anfangswerte des Pseudozufallsgenerators.



**Abb. 28.** Wichtigkeit verschiedener, topographischer Prädiktorvariablen für den Median der besten automatischen Bestimmungsmethode der EC- Reaktionszeit (Zielvariable) bestimmt mit dem Random Forest Ansatz. Auf der x - Achse ist %IncMSE [-], der standardisierte, prozentuale Anstieg des mittleren quadratischen Fehlers bei zufälliger Permutierung der Daten dieses Prädiktors aufgetragen (%IncMSE ist ein Mass für die Wichtigkeit der einzelnen Prädiktoren relativ zueinander). Negative %IncMSE bedeuten, dass die zufällige Permutation dieser Variablen eine bessere Vorhersage ermöglicht und somit der Prädiktor keinen Einfluss auf die Zielvariable ausübt. Der Prozentsatz der erklärten Varianz zeigt die Modellgüte des RF an; nTree: Gesamtzahl der Regressionsbäume, mTry: Anzahl zufällig vorselektierten Prädiktoren für jede Aufspaltung, rSeed: Anfangswerte des Pseudozufallsgenerators.

## 5 Diskussion

Die Diskussion gliedert sich anhand der drei in der Einleitung formulierten Forschungsfragen. Die Forschungsfragen und die aufgestellten Hypothesen werden einzeln aufgegriffen, mit den Resultaten verglichen und im hydrologischen Kontext diskutiert. In einem weiteren Abschnitt wird auf die in den Resultaten bereits vorgestellten Messergebnisse zum Abfluss und dem Timing eingegangen und versucht, grundlegende Gesetzmässigkeiten der hydrologischen Prozesse für den Studibach und allgemein für steile, voralpine EZG aufzustellen. Abschliessend werden die gewonnenen Erkenntnisse dieser Masterarbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftig potentielle Forschungsschwerpunkte gegeben.

### 5.1 Forschungsfrage 1 - Methodenvergleich: Bestimmung der Reaktionszeiten

- **Methodenvergleich Abflussreaktion**

Wie gross ist der Unterschied verschiedener Methoden in der Bestimmung der Abfluss- resp. EC- Reaktionszeiten? Generieren einfache Methoden ähnlich gute Resultate, im Vergleich zu komplexen Methoden, die mehrere Kriterien berücksichtigen können, und zur händischen Bestimmung? In anderen Worten, welches einfache automatische Verfahren zur Bestimmung der Abfluss- resp. EC- Reaktionszeiten hat im Mittel bzw. Median die geringste Abweichung zur händischen Bestimmung resp. zu einer komplexen Methode?

Die beste automatische Methode um die Abflussreaktion des Abflusses zu bestimmen, ist die Methode „Minimum“ und die sich nur wenig von „Minimum“ unterscheidende Methode „Minimum erweitert“. Für die Bestimmung der Abflussreaktion der elektrischen Leitfähigkeit, haben die Analysen ergeben, dass die Methode „variabler Schwellenwert“ sich am besten eignet, um das Einsetzten der Verdünnung zu bestimmen. Anhand der statistischen Untersuchungen im Rahmen dieser Masterarbeit konnte festgestellt werden, dass mit den Reaktionszeiten der besten automatischen Bestimmungsmethoden die gleichen Resultate generiert wurden, wie mit den Reaktionszeiten der händischen Bestimmung. Für die Analyse der Zielvariable median EC- Reaktionszeit mit den verschiedenen topographischen EZG Eigenschaften waren die Korrelationen der Rangkorrelation nach Spearman sowie die erklärte Varianz der Random Forest Analyse nur geringfügig tiefer.

Wie anhand meiner Untersuchung aufgezeigt wurde, gibt es keine „beste“ einfache automatische Bestimmungsmethode. Die Unterschiede der Gangliniencharakteristiken zwischen Grundwasser, Abfluss und der EC sind zu gross, zudem wird die Ganglinie durch die standortbedingten Dynamiken (Amplitude und Steigung) sowie dem Rauschen aufgrund der angewandten Messtechnik beeinflusst.

Die grössten Schwankungen weisen die Abflussganglinien auf. Diese werden im Vergleich zu den Grundwasserganglinien, die eher ruhig verlaufen, nicht durch den Fluss im Boden abgedämpft und weisen häufig keine eindeutig identifizierbaren Reaktionen auf. Die Ganglinien der elektrischen Leitfähigkeit sind bestimmt durch starke Einbrüche aufgrund der Verdünnung durch Niederschlagswasser. Das Rauschen in den Daten ist ein sehr grosser Unsicherheitsfaktor in der Bestimmung der Reaktion

der Ganglinie. Vor allem die Abflussganglinien, speziell solche mit tiefem Abfluss, unterliegen verhältnismässig einem starken Rauschen, welches durch die Messung des von den STS Loggern gemessenen Drucks, sowie der Umrechnung des Drucks in den Wasserstand entsteht. Die grössten Fehlerquellen der Druckmessung sind der Tagesgang der Lufttemperatur sowie abrupte Temperaturänderungen, beispielsweise vor einem Niederschlagsereignis, die, vor allem bei Messstandorten mit geringem Abfluss, nur ungenügend von einem in den STS Loggern installierten Temperaturkompensator ausgeglichen werden können.

Diese die Ganglinie beeinflussenden Faktoren wirken sich unterschiedlich auf die einzelnen Methoden aus. Die Methode „Komplex“, die ursprünglich für die Grundwasserreaktionsbestimmung implementiert wurde, detektiert die Abfluss- sowie die EC- Reaktion mehrheitlich zu früh. Schon die kleinsten Schwankungen nach Niederschlagsbeginn werden als Reaktion identifiziert. Für die Bestimmung der Reaktion der glatten und häufig sanft steigenden und sinkenden Grundwasserganglinie ist die Methode jedoch sehr genau. Die Methoden „Minimum“ und „Minimum erweitert“ haben eine ähnlich gute Bestimmung der Grundwasserreaktion erzielt, in der Tendenz leicht später als die Methode „Komplex“. Die Bestimmung des Minimums als Reaktionszeitpunkt eignet sich jedoch am besten für die Abflussganglinie, deren grosse Schwankungen und das Rauschen von den anderen Methoden nicht so gut berücksichtigt werden können. Für die Bestimmung der EC- Reaktion eignen sich die „Minimum“ und „Minimum erweitert“ Methoden ebenfalls, jedoch wird im Median die EC- Reaktion etwas genauer von der „variablen Schwellenwert“ Methode bestimmt. Da häufig die Verdünnung durch Niederschlagswasser nicht beim höchsten Punkt der EC- Ganglinie eintritt, sondern wenig verzögert, sowie eine abrupte Leitfähigkeitsänderung aufweist, kann mit einem Schwellenwert die EC- Reaktion relativ genau bestimmt werden. Für die Bestimmung der Abfluss- sowie Grundwasserreaktion ist eine Methode basierend auf dem Schwellenwertprinzip ungeeignet. Aufgrund des Rauschens der Abflussganglinie kann der Schwellenwert für die Methode „variabler Schwellenwert“ nicht optimal an die standortbedingten Abflusss dynamiken angepasst werden, welches sich in einer verspäteten Bestimmung der Reaktion äussert. Eine verspätete Bestimmung der Reaktion tritt auch bei der Grundwasserganglinie auf, da die Pegel nach Niederschlagsbeginn nicht sofort ansteigen. Eine Verbesserung der Genauigkeit (v.a. geringere Variabilität) in der Bestimmung der Reaktionszeiten, aufgrund des manuell angepassten Schwellenwerts der Methode „variabler Schwellenwert“, im Vergleich zu der fix definierten der Methode „fixer Schwellenwert“, konnte anhand der Abfluss- sowie Grundwasserganglinien deutlich aufgezeigt werden. Die EC- Reaktion der Grundwasserstandorte konnte von keiner automatischen Methode zufriedenstellend detektiert werden. Für die häufig sehr sanft steigenden und sinkenden EC- Ganglinien wurden für zwei Drittel der Standorte, für vier bis neun Ereignisse, fälschlicherweise Reaktionen bestimmt.

Meine Hypothese, dass die beste einfache automatische Bestimmungsmethode sich nur minimal von einer Komplexen resp. der händischen Bestimmung unterscheidet, jedoch grosse Unterschiede in der Bestimmung zu den restlichen einfachen Methoden aufweist, hat sich bestätigt. Es konnte aufgezeigt werden, dass eine einfache Methode für die Bestimmung der Abflussreaktion des Abflusses sowie der elektrischen Leitfähigkeit besser sein kann als eine komplexe.

Der Methodenvergleich hat zudem aufgezeigt, dass bei der Wahl der Methode für die automatische Bestimmung der Reaktionszeit Vorsicht geboten ist. Wegen den grossen Zeitunterschieden der einzelnen Methoden in der Bestimmung der Reaktion, die zu Fehlinterpretationen und falschen Einschätzungen der hydrologischen Prozesse führen können, empfiehlt es sich, einerseits die verwendete

Methode genau zu prüfen und andererseits die Methode, deren Funktionsweise und Limitierungen in den Publikationen darzustellen. In den wenigen durchgeführten Studien zur Abfluss-, Grundwasser oder EC- Reaktionszeit wurden die verwendeten Bestimmungsmethoden lediglich am Rande erwähnt, jedoch nicht weiter diskutiert (e.g. McGlynn et al., 2004; Penna et al., 2011).

Da die Verwendung von zwei verschiedenen automatisierten Methoden für Bestimmung der Abfluss- resp. EC- Reaktion, nicht zweckmässig ist, empfehle ich für zukünftige Untersuchungen der Reaktionszeiten eine Methode basierend auf dem Minimumansatz der Methode „Minimum“ oder „Minimum erweitert“ zu verwenden. Diese Methoden haben die besten Resultate für die Abflussreaktion erzielt sowie nur geringe Unterschiede zur besten EC- Reaktionsbestimmungsmethode, „variabler Schwellenwert“, aufgezeigt. Eine Möglichkeit wäre die Anwendung einer angepassten Variante der Methode „Minimum erweitert“. Die Anpassung würde zusätzlich einen verzögerten Anstieg nach dem detektieren Minimum berücksichtigen, in anderen Worten, wenn nach dem von der Methode „Minimum erweitert“ bestimmten Minimum keine sofortige Reaktion erfolgt, würde ein darauffolgendes Minimum als Zeitpunkt der Reaktion definiert werden, welches in einer tolerierten Zeitspanne und einem toleriertem Anstieg der Ganglinie vom Minimum der „Minimum erweitert“ Methode zu liegen käme. Somit könnte der beobachteten zu frühen Bestimmung der Reaktion der Methode „Minimum erweitert“ aufgrund des Rauschens der Ganglinie, entgegen gewirkt werden.

Die von mir vorgeschlagene Methode kann nicht mehr als einfache automatische Bestimmungsmethode angesehen werden, jedoch ist es meiner Meinung nach nicht möglich, die unterschiedlichen Dynamiken der Ganglinien von Grundwasser, Abfluss und EC, sowie das Rauschen der Ganglinie, mit einer einfachen Methode vollumfänglich zu berücksichtigen.

## 5.2 Forschungsfrage 2 – Abflussmenge

- Welche topographischen Einzugsgebietseigenschaften beeinflussen massgeblich die Abflussmenge in einem steilen, voralpinen EZG mit wenig durchlässigen Böden? Im Speziellen, wie verändert sich die mittlere bzw. mediane Abflussmenge an den Messstandorten in Abhängigkeit von topographischen Steuerfaktoren?

Die bi- sowie die multivariate Statistik identifizierten dieselben topographischen Steuerfaktoren, nämlich die Fläche des EZG, den TWI am Standort und die mittlere Krümmung des EZG. Die höchsten Rangkorrelationen wurden für den mediane Abfluss und die zuvor genannten topographischen Prädiktoren erreicht. Die höchste erklärte Varianz bei der Anwendung des RF- Ansatzes wurde hingegen für die Zielvariable Median Wasserstand erreicht. Ein Grund könnte die Unsicherheit in der P-Q-Beziehung sein, die anhand von Salzverdünnungsmessungen erstellt wurde, die sich nicht durch Standorteigenschaften erklären lässt.

Die Ergebnisse der Rangkorrelationsanalyse sind hydrologisch mehrheitlich plausibel. Die EZG Fläche als Steuerfaktor ist intuitiv verständlich. Je grösser das EZG, desto grösser ist die ins Gerinne entwässernde Fläche. Ich nehme an, dass diese Gegebenheit durch das Vorhandensein von wenig durchlässigen Böden im EZG unterstützt wird, da durch diese nur eine geringe Menge an Niederschlagswasser

versickert. Eine signifikante Korrelation der Abflussmenge mit der Einzugsgebietsgrösse wurde ebenfalls von Kuras et al. (2008) in einem von Schnee dominierten EZG aufgezeigt. Der Median Abfluss ist vermutlich nur deshalb mit dem TWI am Standort, der ein Indikator für die lokale Bodenfeuchte darstellt, korreliert, da der TWI eine Funktion der EZG Fläche ist. Wie in Kapitel 4.3.1 erläutert wird, weist die EZG Fläche und der TWI am Standort eine Inter-Korrelation von  $r_s = 1$  auf. Die mittlere Krümmung des EZG als Mass für die konvergierende oder divergierende Richtung der Fliesslinien im EZG erscheint als dominanter Steuerfaktor jedoch nicht plausibel. Je mehr die Fliesslinien im EZG konvergieren, desto tiefer sollte der Abfluss sein. Der Grund für die Korrelation der mittleren Krümmung des EZG mit der Abflussmenge ist in der hohen negativen Inter-Korrelation zwischen der EZG Fläche und der mittleren Krümmung des EZG zu finden ( $r_s: -0.94$ ). Mit steigender Grösse der EZG Fläche der Messstandorte nimmt die mittlere Krümmung ab, oder in anderen Worten, gleichen sich die konvergierenden resp. divergierenden Hänge aufgrund der Mittelung der EZG Krümmung aus, wobei die Abflussmenge zunimmt. Der von der Rangkorrelation aufgezeigte steuernde Einfluss der mittleren Krümmung des EZG auf die Abflussmenge ist somit nicht gegeben. Ich nehme an, dass durch die Berechnung des Mittelwerts der Krümmung über das EZG sich die einzelnen konvergierenden und divergierenden Gebiete im EZG, mit steigender EZG Fläche, zunehmend ausgleichen und somit eine Korrelation mit der Abflussmenge zustande kommen kann. Die mittlere Hangneigung des EZG, als Mass für den mittleren, hydraulischen Gradienten des EZG oder in anderen Worten ausgedrückt als Mass für das mittlere Grundwassergefälle des EZG, wurde von den beiden statistischen Analysen als ein nicht dominierender Faktor eingestuft. Ich spekuliere, dass die Abflussmenge mit steigender mittleren Hangneigung in der Tendenz aufgrund der Gravitationskraft zunimmt. Die Rangkorrelationsanalyse weist jedoch eine negative Korrelation auf ( $r_s: -0.48$ ), was bedeutet, dass der Abfluss mit sinkender mittleren Hangneigung des EZG zunimmt. Dies macht nur wenig Sinn, da so der höchste Abfluss bei einer planaren Fläche des EZG zustande kommen müsste. Da diese Beziehung nicht signifikant ist, kann sie verworfen werden. Die Rangkorrelationsanalyse bestätigt, dass die Krümmung am Standort, ein Mass für die lokalen konvergierenden oder divergierenden Fliesslinien und die Hangneigung am Standort, ein Mass für den lokalen hydraulischen Gradienten, keine Rolle für die Abflussmenge spielt, da die Prozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration oberhalb des Messstandortes stattfinden.

Die Random Forest Analyse, welche zusätzlich die Interaktionen der Prädiktoren berücksichtigt, zeigt dasselbe Resultat auf, die Fläche des EZG, der TWI am Standort sowie die mittlere Krümmung des EZG als wichtigste erklärende Variablen für die Abflussmenge. Nicht zu erkennen ist aus der Random Forest Analyse, dass die Wichtigkeit der mittleren Krümmung des EZG, wie bereits begründet wurde, nur aufgrund der Berechnung des Mittelwertes über das EZG und nicht aufgrund hydrologisch plausiblen Einflüssen, gegeben ist.

Meine Hypothese, dass topographischen Steuerfaktoren des EZG die Abflussmenge massgeblich beeinflussen, die lokalen topographischen Steuerfaktoren hingegen nicht, hat sich nur zum Teil bestätigt. Für die Abflussmenge konnte einzig die EZG Fläche und der TWI am Standort als massgeblich beeinflussender topographischer Steuerfaktor des EZG identifiziert werden, wobei die Beeinflussung des TWI am Standort hauptsächlich durch die im TWI beinhaltende EZG Fläche gegeben ist. Die mittlere Krümmung des EZG und die mittlere Hangneigung des EZG sowie die lokalen topographischen Eigenschaften Krümmung am Standort und Hangneigung am Standort weisen am Studibach keinen steuernden Einfluss auf die Abflussmenge auf.

Die Ergebnisse zeigen auf, dass aufgrund des starken Zusammenhangs zwischen der Abflussmenge und der EZG Fläche und dem TWI am Standort, für Standorte in steilen Einzugsgebieten mit wenig durchlässigen Böden, der Median Abfluss mit der EZG Fläche oder dem TWI am Standort vorhergesagt werden kann. Diese Erkenntnis kann sehr wahrscheinlich nicht als allgemeingültig angesehen werden, da für diesen Zusammenhang die Voraussetzung von wenig durchlässigen Böden im EZG gegeben sein muss. Ich nehme an, dass diese wenig durchlässigen Böden dazu führen, dass nur eine geringe Tiefensickerung stattfindet, und folglich das meiste Niederschlagswasser in den Abfluss gelangt. Für Gebiete mit durchlässigen Böden müssten für eine Vorhersage der Abflussmenge noch weitere topographische sowie andere Steuerfaktoren, wie beispielsweise die Untergrundtopographie, geologische Gegebenheiten, Bodeneigenschaften, Vegetation oder Niederschlagscharakteristiken berücksichtigt werden. Bachmair und Weiler (2012) zeigen beispielsweise bei ihren Untersuchungen auf durchlässigen Böden auf, dass für die Beeinflussung der Abflussmenge die Oberflächentopographie eine untergeordnete Rolle, hingegen die Untergrundtopographie eine wesentlich wichtigere Rolle einnimmt. Wetzel (2003) zeigt auf unverfestigtem Sedimentgestein auf, dass die Vegetationsdichte die Abflussmenge reduziert. Kuras et al. (2008) betonen, dass neben der Einzugsgebietsgröße noch weitere geomorphologische Parameter die raum - zeitliche Variabilität der Abflussbildung beeinflussen.

### 5.3 Forschungsfrage 3 - Abflussdynamik

- Welche topographischen Einzugsgebietseigenschaften beeinflussen massgeblich die Abfluss- resp. EC- Reaktionszeiten in einem steilen, voralpinen EZG mit wenig durchlässigen Böden. Im Speziellen, wie verändern sich die mittleren bzw. median Abfluss- resp. EC- Reaktionszeiten an den Messstandorten in Abhängigkeit von topographischen Steuerfaktoren?

Für die Abflussreaktion weisen die topographischen EZG Eigenschaften keine steuernde Wirkung auf. Hingegen für die Abflussreaktion der elektrischen Leitfähigkeit konnten die topographischen EZG Eigenschaften, TWI am Standort, mittlere Krümmung des EZG und Fläche des EZG als massgebliche Steuerfaktoren identifiziert werden. Die Beeinflussung der EC- Reaktionszeit durch diese drei topographischen Einzugsgebietseigenschaften wurden anhand beider statistischen Analysen, der Rangkorrelationsanalyse nach Spearman sowie dem Random Forest Ansatz bestätigt.

Die Zeit bis die Abflussganglinie ansteigt kann aufgrund meiner statistischen Analysen mit keiner topographischen Einzugsgebietseigenschaft erklärt werden. Dies könnte damit zusammenhängen, dass die Abflussreaktion durch Wasser verursacht wird, dass bereits nahe des Beobachtungspunktes ist und nicht erst durch Fliessprozesse im oberliegenden EZG an den Punkt gelangen muss. Wenn dies so wäre, könnte erwartet werden, dass die Rangkorrelationskoeffizienten mit den lokalen Standorteigenschaften höher wären. Da diese jedoch keinen Unterschied zu den Eigenschaften des EZG aufweisen und generell die Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Bestimmungsmethode ziemlich unterschiedlich sind, teilweise sogar mit unterschiedlichem Vorzeichen, schliesse ich daraus, dass die Art wie die Abflussreaktion bestimmt wird, einen massgeblichen Einfluss auf das Korrelationsergebnis ausübt. Somit kann nicht abschliessend gesagt werden, dass die Topographie keinen Einfluss auf die Abflussreaktion ausübt. Der Einfluss der Methoden müsste noch genauer untersucht werden, um zu sehen, ob wirklich

kein Zusammenhang gegeben ist. Für eine erneute Untersuchung des Abflusstimings wäre es zu empfehlen, keine STS Drucklogger, sondern einfache Odyssey Logger zu verwenden. Das durch die Messtechnik verursachte Rauschen der STS Logger überlagert, vor allem für Abflussstandorte mit geringer Wasserführung, die effektiven Abflussschwankungen und führen zu verfälschten Ergebnissen.

Für die Reaktion der EC hat die Rangkorrelationsanalyse die EZG Fläche als steuernden Faktor identifiziert. Je grösser die EZG Fläche des Standorts, desto länger braucht es, bis die Verdünnung durch Niederschlagswasser einsetzt. Das Ereigniswasser muss somit zuerst über die EZG Fläche konzentriert werden, um am Beobachtungspunkt eine Reaktion auslösen zu können. Ich spekuliere, dass mit steigender Grösse des EZG der Beitrag zum Abfluss vermehrt aus den gerinnenahen Flächen mit hohem Grundwasserspiegel stammen, bei denen der Piston Flow der dominierende Abflussprozess darstellt. Der TWI am Standort, ein Indikator für die Bodenfeuchte am Standort, wird ebenfalls als massgeblich beeinflussenden Faktor der EC- Reaktion bestimmt. Wie bereits bei der Diskussion der Forschungsfrage 2 zur Abflussmenge erläutert (s. Kap. 5.2), beinhaltet der TWI am Standort die EZG Fläche (Inter- Korrelation von  $r_s$ : 1). Trotz diesem Zusammenhang der beiden Prädiktoren, kann die Korrelation der EC- Reaktionszeit mit dem TWI am Standort hydrologisch erklärt werden. Das Streudiagramm dieser Variablen zeigt auf, dass je feuchter ein Standort (höherer TWI) ist, desto länger dauert es, bis Niederschlagswasser zum Abfluss gelangt. Ich kann mir vorstellen, dass der Piston Flow Prozesses, bei welchem zuerst Vorereigniswasser und erst verspätet Niederschlagswasser zum Abfluss gelangt, eine massgeblichere Rolle einnimmt, je feuchter ein Standort ist, da bei gefüllten Speichervolumen der Böden aufgrund des Verdrängungsprozesses von Vorereigniswasser ein grösserer Niederschlagsinput benötigt wird, sodass Ereigniswasser zum Abfluss gelangt. Die Krümmung des EZG als Steuerfaktor für die EC- Reaktionszeit ist wie bereits erläutert negativ korreliert ( $r_s = -0.83$ ) und nur aufgrund der Inter- Korrelation mit der EZG Fläche ( $r_s$ : -0.93), die wegen der ausgleichenden Wirkung der Mittelung der EZG Krümmung besteht, gegeben ist (s. Kap 5.2). Die mittlere Hangneigung des EZG, als Indikator für den hydraulischen Gradienten, ist nicht korreliert mit der EC- Reaktionszeit. Ich hätte mir jedoch vorstellen können, dass die mittlere Hangneigung des EZG einen Einfluss auf die EC- Reaktionszeit ausübt. Beispielsweise eine höhere Hangneigung resp. ein höherer hydraulischer Gradient könnte bei gesättigten Böden ein schnelleres Fliesen durch durchlässige Schichten ermöglichen und bei ungesättigten Böden wäre ein schnelleres präferentielles Fliesen durch Makroporen möglich, was zur Folge hätte, dass das Niederschlagswasser schneller zum Abfluss gelangt. Die Krümmung am Standort, ein Mass für die lokalen konvergierenden oder divergierenden Fließlinien und die Hangneigung am Standort, ein Mass für den lokalen hydraulischen Gradienten, haben keinen steuernden Einfluss auf die EC- Reaktionszeit. Ich nehme an, dass die Prozesse, die das Timing des zum Abfluss gelangenden Niederschlags beeinflussen, oberhalb des Messstandortes stattfinden.

Die Random Forest Analyse weist für die Median EC- Reaktionszeit und die sechs topographischen Einzugsgebietseigenschaften mit 70 % eine sehr hohe erklärte Varianz auf. Bachmair und Weiler (2012b) beispielsweise konnten im Vergleich eine Maximale erklärte Varianz von 50 % für ihre Untersuchungen zu den Beziehungen zwischen der Variabilität der Grundwasserpegeldynamiken und verschiedenen Hangcharakteristiken aufzeigen. Die Variablen TWI am Standort, mittlere Krümmung des EZG und EZG Fläche können zusammen einen sehr hohen Anteil der Varianz erklären. Bei einer zufälligen Permutation einer dieser Variablen würde der %IncMSE zwischen 27 und 30 % steigen. Das Resultat der Random Forest Analyse besagt, dass diese drei Prädiktoren wichtige Steuerfaktoren der EC- Reaktionszeit darstellen, speziell, wenn die Interaktionen der Prädiktoren mitberücksichtigt werden. Interessant zu

sehen ist, dass der TWI am Standort die Streuung der Daten besser erklären kann als die EZG Fläche, obwohl die EZG Fläche im TWI enthalten ist. Dies kann nur damit zusammenhängen, dass der TWI am Standort zusätzliche Interaktionen berücksichtigt, die nicht mit der EZG Fläche erklärt werden können. Der steuernde Einfluss der mittleren Hangneigung des EZG, behaupte ich, ist wie bei der Forschungsfrage 2 begründet, aufgrund der Daten und nicht aufgrund hydrologischer Prozesse gegeben.

Meine Hypothese, dass die topographischen Steuerfaktoren des EZG die Abfluss- sowie EC- Reaktionszeit massgeblich beeinflussen, die lokalen topographischen Steuerfaktoren hingegen nicht, hat sich für die EC- Reaktionszeit bestätigt, hingegen für die Abflussreaktionszeit nicht. Für die EC- Reaktionszeit konnte die EZG Fläche und der TWI am Standort als massgeblich beeinflussender topographischer Steuerfaktor des EZG identifiziert werden. Die mittlere Krümmung des EZG und die mittlere Hangneigung des EZG sowie die lokalen topographischen Eigenschaften Krümmung am Standort und Hangneigung am Standort weisen am Studibach keinen steuernden Einfluss auf die EC- Reaktionszeit auf.

Die Ergebnisse zeigen auf, dass aufgrund des starken Zusammenhangs zwischen der EC- Reaktionszeit und der EZG Fläche und dem TWI am Standort, für Standorte in steilen Einzugsgebieten mit wenig durchlässigen Böden, die Median EC- Reaktionszeit mit der EZG Fläche oder dem TWI am Standort vorhergesagt werden kann. Es müsste geprüft werden, ob diese Zusammenhänge auch auf EZG mit anderen Einzugsgebietscharakteristiken angewendet werden können.

## 5.4 Abflussdynamik und steuernde Prozesse

### 5.4.1 Abflussmenge

Der Abfluss der einzelnen Messstandorte nimmt mit steigender Grösse des EZG zu, in anderen Worten, je grösser das EZG ist, desto mehr Niederschlag kommt zum Abfluss. Dies macht für steile EZG mit wenig durchlässigen Böden Sinn, da ich annehme, dass die Tiefensickerung oder tiefgründige Grundwasserzuflüsse aus dem Festgestein eine untergeordnete Rolle spielen. Obwohl die Abflussstandorte 11.0 und 12.0 vergleichbar grosse EZG aufweisen, hat der Standort 11.0 im Median einen um  $\frac{1}{2}$  höheren und fast doppelt so variablen spezifischen Abfluss. Ein Indiz für diesen höheren spezifischen Abfluss ist der noch höhere spezifische Abfluss des sich im EZG 11 befindenden Quellstandortes 81.2. Da das EZG der Quelle, infolge hoher Hangneigung und mehrheitlich toniger Böden mit karger Vegetation, wenig Versickerung in den Boden und geringe Niederschlagsaufnahme durch die Vegetation aufweist, wird der Niederschlag somit direkt in den Abfluss geleitet. Die höhere Variabilität wird auf die Niederschlagsintensität, die Niederschlagsdauer und die Vorfeuchtebedingungen zurück zu führen sein, da das Speichervermögen des EZG 11 aufgrund geringer Bodenmächtigkeit und vielen steilen Hängen deutlich geringer zu sein scheint.

Sehr interessant sind die Abflussstandorte 31.0 und 32.0, die ebenfalls ähnliche EZG Grössen aufweisen. Der spezifische Abfluss von 32.0 ist leicht höher (ebenfalls leicht höhere EZG Fläche), jedoch der von 31.0 ist viel variabler. Ich nehme an, dass die hohe Variabilität mit dem grösseren Speichervermögen des EZG 32 (zahlreiche Hochmoore) in Zusammenhang steht (vertiefte Diskussion s. folgende Seiten). Aus demselben Grund vermute ich, weist das EZG 41, welches u.a. das EZG 32 beinhaltet, die grösste Variabilität aller EZG aufweist.

Erstaunlich finde ich, dass der Abfluss der Makropore 81.1 grösser ist als der der Quelle 81.2. Ich hätte gedacht, dass die Quelle 81.1 aufgrund ihres unterirdischen EZG eine grössere Wasserschüttung aufweist als die Makropore, die zwischen den Niederschlagsereignissen trocken fällt. Der Abfluss der Makropore 81.1 ist im Mittelwert und Median eher vergleichbar mit dem EZG 12. Daraus schliesse ich, dass die Makropore an ein sehr ausgeprägtes und weitverzweigtes System von Makroporen, welche zumindest während eines Niederschlagsereignisses verbunden sind, angeschlossen ist.

#### 5.4.2 Reaktionszeit

##### **Reaktion Abfluss**

Die Dauer bis die Abflusskurve in 50% aller Fälle (Median) ansteigt, ist für alle Abflussstandorte etwa gleich, die Ausnahme ist der Standort 32.0. Der Abfluss an diesem Standort reagiert in 50% aller Fälle (Median) innerhalb 25 min nach Niederschlagsbeginn, der Abfluss der restlichen Standorte reagiert 70 bis 100 min nach Niederschlagsbeginn. Ein Grund für diese vergleichsweise schnelle Abflussreaktion sehe ich in den flacheren und häufig sehr feuchten Gebieten (Hochmoor) im unteren Teil dieses EZG. Ich nehme an, dass wegen den hohen hängenden Grundwasserspiegel sowie der hohen hydraulischen Leitfähigkeit des Oberbodens, welcher aus porösen, gut durchwurzelten Torfboden besteht, nur ein geringer Grundwasseranstieg benötigt wird, sodass aufgrund des hydraulischen Gradienten, sehr schnell Wasser zum Abfluss gelangt (Piston Flow). Zudem konnte ich bei den Feldarbeiten beobachten, dass diese gesättigten Böden teils Oberflächenabfluss aufweisen (Sättigungsflächenabfluss). Der angestiegene Grundwasserspiegel und die wechselnde Topographie bewirkten höchstwahrscheinlich den Rückfluss des Zwischenabflusses an die Oberfläche (Return Flow).

Die Reaktionszeit der Makropore ist sehr ähnlich wie die des EZG 11, wobei nur einen kleinen Unterschied zu den restlichen EZG auszumachen ist (Ausnahme 32.0). Dies ist erstaunlich, da ich gedacht hätte, dass die Makropore, aufgrund des dominanten präferentiellen Fliessens durch den Oberboden, eher vor dem Gerinne reagieren würde. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass die für die Makropore relevanten Abflussprozesse im Oberboden auch für das EZG 11 sowie die rechtlichen Standorte relevant sein könnte.

Weiter ist interessant, dass die beiden Quellstationen tendenziell früher reagieren als die Makropore oder die Gerinnestandorte, wobei nicht so früh wie das EZG 32. Für die Quelle 81.2 spielt sehr wahrscheinlich, der Oberflächenabfluss aufgrund der geringen Infiltrationskapazität eine Rolle, bei der Quelle 82.1 könnten die mehrheitlich gesättigten Böden im EZG die Ursache für die schnelle Abflussreaktion sein.

##### **Reaktion elektrische Leitfähigkeit**

Die Zeitspanne bis die Verdünnung durch Niederschlagswasser einsetzt und die EC bei der Messstation zu sinken beginnt, nimmt in der Tendenz mit der Grösse des EZG zu. Mit Abstand am schnellsten tritt die Verdünnung am Quellstandort 81.2 (5 min im Median) auf. Diese schnelle Verdünnung begründe ich mit der lehmigen und mehrheitlich vegetationslosen nahen Umgebung der Messstelle, die nur sehr wenig Infiltration und Wasserrückhalt zulässt und somit den Niederschlag direkt in den Abfluss leitet (s. Abb. 29). Die Gerinnestandorte EGZ 11 und EZG 12, der Quell- (82.1) und der Makroporenstandort (vergleichbar kleine EZG) benötigen wenig länger bis der Verdünnungseffekt einsetzt (median EC- Reaktionszeiten zwischen 30 bis 35 min nach Niederschlagsbeginn). Das EZG 21 weisst trotz der ebenfalls

kleinen EZG Fläche eine ziemlich späte EC- Reaktion auf, vergleichbar mit dem EZG 51 (im Median 140 resp. 150 min), welches eine 25 Mal so grosse EZG Fläche aufweist. Ein möglicher Grund, dass für das EZG 21 zuerst längere Zeit Vorereigniswasser in das Gerinne gelangt, könnte das feuchte Auengebiet im unteren, sowie das Hochmoor im mittleren Abschnitt des EZG sein. Die ständig hohen Grundwasserpegel und die stark durchlässigen Böden führen bei steigenden Grundwasserspiegel wahrscheinlich zu Piston Flow Prozessen im Oberboden. Das EZG 51, welches das ganze Untersuchungsgebiet umfasst, weist die längste Zeitspanne bis zur Verdünnung mit Niederschlagswasser auf, zudem variieren die Zeiten viel stärker. Der IQR der EC- Reaktionszeit des EZG 51 ist fast doppelt so gross wie die EC- Reaktionszeiten an den restlichen Gerinneabflussmessstandorten. Das obere Quartil liegt bei 270 min, wobei die längste Dauer bis zur Verdünnung bei knapp 600 min liegt. Diese langen Zeitspannen bis zur Verdünnung mit Niederschlagswasser treten wahrscheinlich bei wenig intensiven Niederschlagsereignissen und zusätzlich trockenen Vorfeuchtebedingungen auf.



**Abb. 29.** Die nahe Umgebung des Quellstandorts 81.2. Der Abfluss wird in der grauen Utz Box gemessen (Foto: Herrmann, 25.7.2013).

#### **Zeitdifferenz zwischen Abfluss- und EC- Reaktion**

Beim Vergleich der Zeiten bis zur Abflussreaktion und denen bis zum Einsetzen der Verdünnung durch Niederschlagswasser fällt auf, dass die EC- Verdünnung bei Standorten mit kleinem EZG zeitgleich (12.0, 81.1, 81.2) oder 5 min nach dem Anstieg des Wasserstands (11.0, 82.1) eintritt, also das Niederschlagswasser sehr schnell zum Abfluss gelangt. Das ist speziell für die Quellstandorte, da Quellen tendenziell vom Grundwasser gespeisen werden. Im unserem Fall jedoch scheint es, als ob das Niederschlagswasser aus der unmittelbaren Umgebung den Quellabfluss dominiert. Es wäre weiter vorstellbar, dass der direkte Niederschlag in das Gerinne die schnelle Verdünnung verursacht, da dieser aufgrund der geringen Abflussmengen einen relativ hohen Anteil am Gesamtabfluss ausmacht. Für den

Makroporenstandort 81.1 kann davon ausgegangen werden, dass dieser durch Ereigniswasser bestimmt wird. Es ist jedoch möglich, dass wenn der Gang der Makropore durch gesättigten Boden verläuft, wie dies bei der Schneeschmelze der Fall ist, das Vorereigniswasser, welches aufgrund des Auspressmechanismus durch das Niederschlagswasser zum Abfluss gebracht wird, eine Rolle spielen kann. Es ist noch anzufügen, dass beim Makroporenstandort der Verdünnungseffekt eher gering war, da durch das Makroporensystem vorrangig Ereigniswasser, jedoch kaum Vorereigniswasser fließt (EC vor Ereignis: ca. 100  $\mu\text{s/cm}$ , EC bei grösster Verdünnung ca. 40  $\mu\text{s/cm}$ , typisches EC für Vorereigniswasser: ca. 300 - 400  $\mu\text{s/cm}$ ). Eine eindeutige Reaktion konnte dennoch bestimmt werden.

Mit zunehmender Grösse des EZG ist eine spätere Einsetzung der Verdünnung und vor allem eine erhöhte Variabilität der Reaktionszeiten zu beobachten. Es wäre denkbar, dass das Vorereigniswasser am Abfluss, welches im Zusammenhang mit den verbundenen Grundwasserkörper entlang des Gerinnes stehen könnte, mit der Grösse des EZG eine dominierendere Rolle einnimmt. Die Variabilität des Verdünnungseffekts könnte aufgrund des grösseren Einflusses der Vorfeuchtebedingungen und der Niederschlagscharakteristiken, bei steigenden Fläche des EZG, erklärt werden

## 5.5 Synthese der Abflussprozesse am Studibach

Aus meiner Analyse schliesse ich, dass im Untersuchungsgebiet der Zwischenabfluss nahe der Oberfläche die Abflussbildung und Abflusskonzentration massgeblich beeinflusst. Anhand des Grundwasserstandortes, in dem mit zwei STS Loggern auf unterschiedlicher Tiefe die EC gemessen wurde, konnte aufgezeigt werden, dass der Zwischenabfluss im Oberboden eine wichtige Rolle spielen muss. Bei Niederschlagsereignissen konnte hauptsächlich für den sich im Oberboden befindenden Logger (32.9) eine Verdünnung durch Niederschlagswasser beobachtet werden. Der Logger im Mineralboden (32.6), wo im Vergleich eine deutlich geringere hydraulische Leitfähigkeit zu beobachten ist, wies lediglich minime EC Schwankungen und zudem eine verspätete EC- Reaktion auf. Daraus kann geschlossen werden, dass das Niederschlagswasser schneller im Oberboden abfliessen als in tiefere Bodenschichten sickern kann.

Es konnten zwei wesentliche Abflussprozesse im Oberboden identifiziert werden. Zum einen ist dies der Piston Flow resp. laterale Matrixfluss, der bei gesättigten Böden auftritt, typischerweise an Hängen, wo eine stark durchlässige Bodenschicht mit hoher Infiltrationskapazität sich über einer wenig durchlässigen Bodenschicht befindet (Bachmair und Weiler, 2011). Schon kleine Anstiege des Grundwasserspiegels durch infiltrierendes Wasser erhöhen den hydraulischen Gradienten und erzeugen eine Druckwelle durch die verbundenen gesättigten Böden, die einen sofortigen Abfluss am Ende des Grundwasserkörpers auslöst. Da im Boden keine Durchmischung des Wassers stattfindet, dominiert das Vorereigniswasser beim Abfluss (Bachmair und Weiler, 2011).

Zum anderen ist dies der Fluss durch hoch durchlässige Strukturen. Durch Auswaschungen von Feinmaterial entsteht über den wenig durchlässigen Substraten eine hoch durchlässige Schicht (Scherrer, 2006). Im Zusammenwirken mit präferentiellem Fließen durch Hohlräume verwester Wurzeln oder Makroporen, vermögen diese gut durchlässigen Strukturen das Wasser als Zwischenabfluss schnell durch den Boden zu leiten (Bachmair und Weiler, 2011). Dieser Fluss umgeht die Bodenmatrix und besteht, da keine Mischung mit Vorereigniswasser stattfindet, hauptsächlich aus Ereigniswasser (Bachmair und Weiler, 2011).

Ich nehme an, dass der Piston Flow eine wichtige Rolle bei Studibach spielt, da vielerorts im EZG sehr poröse, gut durchlässige Oberböden (e.g. in Mooregebieten Torfböden) über wenig durchlässigen ton- und lehmhaltig Mineralböden liegen, die häufig gesättigt oder zumindest nahe am Sättigungszustand sind. Die median Grundwasserstände im EZG sind tendenziell sehr hoch. Wenn im Untersuchungsgebiet die Böden nicht gesättigt wären, könnte kein Piston Flow zustande kommen, da zuerst der Grundwasserspiegel in den durchlässigen Oberboden steigen müsste und folglich kein Vorereigniswasser zum Abfluss käme, sondern direkt Ereigniswasser. Des Weiteren haben die Messdaten aufgezeigt, dass die Abflussreaktion kurz nach Niederschlagsbeginn eintritt. Die Abflussreaktionszeiten der händischen Methode täuschen in dieser Hinsicht, da nicht das erste Signal des Niederschlags im Abfluss bestimmt wurde, sondern in der Tendenz eher der Hauptanstieg der Ganglinie (Median Abflussreaktionszeit zwischen 25 und 90 min). Wenn jedoch die Methode „Minimum“ beigezogen wird, die den tiefsten Punkt der Ganglinie zwischen dem Niederschlagsbeginn und dem Abflussmaximum bestimmt, wird dem ersten Signal des Niederschlags im Abfluss eher Rechnung getragen. Der Median der Abflussreaktionszeit für die Gerinnestandorte der Methode „Minimum“ liegt bei zwischen 5 und 30 min. Eine solch kurze Zeitspanne bis zur Abflussreaktion kann beispielsweise einem Fliessprozess des Niederschlagswassers durch die Bodenmatrix nicht zugrunde liegen. Ein verspätetes Einsetzen der Verdünnung durch Niederschlagswasser konnte ebenfalls beobachtet werden. Bei den Standorten 21.0, 32.0 und 51.0 dominiert das Vorereigniswasser beim Abfluss im Median 50 bis 55 min nach dem Anstieg der Abflussganglinie. Wie bereits für die Standorte 21.0, 51.0 und v.a. 32.0 diskutiert, liegen in deren EZG mehrere Hochmoore und gesättigte verbundene Grundwasserkörper entlang des Gerinnes, die die erwähnten Bedingungen für das Auftreten eines Piston Flow erfüllen.

Der schnelle Fluss durch hoch durchlässige Strukturen im Oberboden kann anhand der beobachteten EC- Reaktionszeiten der Abflussstandorte mit kleinem EZG (11.0, 12.0) sowie der Quell- und dem Makroporenstandort bestätigt werden. Eine Verdünnung durch Niederschlagswasser tritt unmittelbar mit dem Anstieg der Abflussganglinie auf. Im Median weisen die Standorte eine Zeitdifferenz zwischen Abfluss- und EC- Reaktion von 0 bis 5 min auf. Es ist somit keine Durchmischung von Ereignis- und Vorereigniswasser zu beobachten. Wenn die Zeiten bis zur Abflussreaktion beigezogen werden (Methode „Minimum“), kann festgestellt werden, dass im Median das erste Niederschlagssignal beim Abfluss schon nach 5 bis 55 min zu beobachten ist. Aufgrund eines Bodenmatrixflusses wären solche schnellen Reaktionszeiten nicht zu erklären. Da die Makropore und die EZG 11 und 12 ähnliche Reaktionseigenschaften aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass die Fliessprozesse, welche bei der Makropore dominieren, auch für andere Standorte im EZG eine Rolle spielen müssen.

Meine Synthese der Abflussprozesse am Studibach wird grösstenteils durch die bereits gemachten Erkenntnisse im Alptal bestätigt. Beispielsweise deuteten bereits Feyen et al. (1997) auf die Dominanz von schnell fliessenden Pfaden wie Risse und Spalten oder alte Wurzelkanäle, die das Fliessen durch die Bodenmatrix umgehen, hin. Schleggi et al. (1998) spekulierten, dass der Abfluss hauptsächlich durch präferentielles Fliessen durch Makroporen entstehen solle. Anhand Tracer Injektionen bestätigten Feyen et al. (1999) die Bedeutung der Fliesswege durch das Netzwerk von Makroporen. Sie zeigten auf, dass im bewaldeten Boden das Wasser etwa 1000 Mal schneller den Gebietsabfluss erreichte, als durch die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit durch die Bodenmatrix erwartet werden konnte. Feyen (1998) zeigte zudem auf, dass trotz der unterschiedlichen Verteilung von Vegetation und Humusformen die Abflussdynamik der untersuchten Teileinzugsgebiete ähnlich ist. Daraus folgerte er, dass nicht

der Flächenanteil an Anmoor oder Rohhumus, sondern deren räumliche Anordnung und die Anwesenheit wassergesättigter Gebiete die Abflussbildung bestimmt. Im Widerspruch zu meinen Untersuchungen, behauptet Feyen (1998) jedoch, dass im Gegensatz zum präferentiellen Fließen durch Makroporen im Unterboden, im Oberboden der Fluss durch die Bodenmatrix der dominante Transportprozess sei und dass hauptsächlich Ereigniswasser zum Abfluss beitrage. Ich nehme an, Feyen (1998) ist zu diesem Schluss gekommen, weil die Grundwasserstände bei seiner kleinen Anzahl an untersuchten Niederschlagsereignissen nie bis in den Oberboden gestiegen sind, weshalb er Piston Flow und eine damit einhergehende Mobilisation von Vorereigniswasser nicht hatte beobachten können. Wetzel (2001) begründet, dass künstlich angelegte Messparzellen kein ausgeprägtes Relief mit Tiefenlinien aufweisen, in denen hohe Bodenfeuchten vorkommen und somit die Prozesse der Abflussbildung durch Verdrängung stattfinden können.

Welcher dieser zwei hervorgehobenen Prozesse die Abflussbildung und Abflusskonzentration stärker beeinflusst, kommt auf die Lage des Standorts und die Wassersättigungsbedingungen des Bodens an. Ich könnte mir vorstellen, dass in Moor- und gerinnenahen Gebieten oder allgemein beim Vorhandensein von gesättigten Böden, die als verbundene Grundwasserkörper dienen, der Piston Flow der Hauptmechanismus der Abflussprozesse darstellt. In steileren, bewaldeten Gebieten, die gut durchwurzelt sind, viele Makroporen aufweisen und häufig während längeren niederschlagsfreien Phasen trocken fallen, spielt jedoch der präferentielle Fluss entlang hoch durchlässigen Strukturen eine wichtigere Rolle. Für das Verhalten des gesamten EZG jedoch ist das Zusammenspiel dieser beiden Prozesse entscheidend. Ich nehme an, dass die verschiedenen Flächen mit hohem Grundwasserspiegel im EZG während eines Niederschlagsereignisses durch den präferentiellen Fluss entlang hoch durchlässigen Strukturen verbunden sind und so gemeinsam zum Abfluss beitragen.

Ich erwarte, dass die Abflussprozesse am Studibach, über die zwei beschriebenen Mechanismen des schnellen Zwischenabflusses im Oberboden, auch auf andere, feuchte EZG mit wenig durchlässigen Böden und oberflächennahen Grundwasserspiegeln übertragen werden können.

## 5.6 Abflussdaten und deren Unsicherheiten

Die Abflusswerte der Standorte 41.0 und 51.0 werden sehr wahrscheinlich überschätzt. Diese zwei Standorte weisen klar höhere Abflüsse auf als die restlichen Abflussmessstationen. Wenn der Median des spezifischen Abflusses für 41.0 und 51.0 beigezogen wird, der mit  $93 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$  resp.  $112 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$  ebenfalls drei bis resp. fast vier Mal höher als für die anderen Gerinnestandorte ausfällt, gehe ich davon aus, dass diese Messungen fehlerbehaftet sind. Ein höherer spezifischer Abfluss wäre nur plausibel, wenn die EZG der beiden Messstandorte eine geringere Versickerung oder Vegetationsaufnahme des Niederschlagswassers aufweisen oder tiefgründige Grundwasserzuflüsse aus dem Festgestein zum Abfluss beitragen würden, was jedoch aufgrund der Verschachtelung der EZG nicht der Fall sein kann. Ich nehme an, dass der zu hohe Abfluss eine Folge der unsicherheitsbehafteten Abflussmessmethode am natürlichen Querschnitt ist. Eine Überprüfung und Anpassung der Abfluss-Wasserstands-Beziehung müsste anhand weiteren Durchflussermittlungen mittels Salzverdünnungsmethode erfolgen. Es ist jedoch zu erwähnen, dass diese Überschätzung der Abflusswerte sich nicht wesentlich auf meine Untersuchung des topographischen Einflusses auf die Abflussmenge auswirkt, da einerseits die statistischen Analysen auf Rangreihen basieren und andererseits der Median resp. Mittelwert der Abflussmenge über den Untersuchungszeitraum analysiert wurden.

Die Plausibilität für den spezifischen Abfluss des Quellstandorts 82.1 und vor allem des Makroporenstandorts 81.1 ist nicht gegeben. Einen spezifischen Abfluss im Median von  $296 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$  für den Standort 81.1 resp.  $186 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$  für 82.1 scheint unrealistisch. Ich vermute, dass der Fehler in der Bestimmung des EZG liegt, weil einerseits die kleine EZG Fläche schwer abzugrenzen ist und andererseits beide EZG mögliche unbekannte unterirdische EZG aufweisen.

Der Minimumabfluss für die Standorte 11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 81.1, 81.2, 82.1 beträgt  $0.0 \text{ l}/\text{s}$ . Für die Standorte mit kleinem EZG kann es durchaus sein, dass kein Abfluss vorhanden ist, jedoch für 21.0 und 32.0 sehe ich dies eher als unwahrscheinlich. Der Grund liegt im Rauschen der Daten, der durch die Messung des von den STS Loggern gemessenen Drucks, sowie der Umrechnung des Drucks in den Wasserstand entsteht (s. Kapitel 2.5 - Korrektur Wasserdruck). Die grössten Fehlerquellen der Druckmessung sind der Tagesgang der Lufttemperatur sowie abrupte Temperaturänderungen, beispielsweise vor einem Niederschlagsereignis, die, vor allem bei Messstandorten mit geringem Abfluss, nur ungenügend von einem in den STS Loggern installierten Temperaturkompensator ausgeglichen werden können.

## 6 Schlussfolgerung und Ausblick

Meine Untersuchungen am Studibach haben aufgezeigt, dass die EZG Fläche und der TWI am Standort gute Prädiktoren für den median Abfluss sowie die median EC- Reaktionszeit für ein steiles, voralpines EZG mit wenig durchlässigen Böden sind. Der TWI am Standort, ein Indikator für die lokale Bodenfeuchte, war nur korreliert, da die EZG Fläche im Prädiktor enthalten ist (Inter-Korrelation von  $r_s$ : 1). Die Random Forest Ansatz hat jedoch aufgezeigt, dass der TWI am Standort die Streuung der Daten besser erklären kann als die EZG Fläche. Dies, spekuliere ich, kann nur damit zusammenhängen, dass der TWI am Standort zusätzliche Interaktionen berücksichtigt, die nicht mit der EZG Fläche erklärt werden können. Die Abflussreaktionszeit war mit keinem der topographischen EZG Eigenschaften korreliert. Generell haben die Rangkorrelationsanalyse nach Spearman sowie der Random Forest Ansatz haben dieselben Zusammenhänge aufgezeigt. Es ist anzumerken, dass die Variablenwichtigkeit aus der Random Forest Analyse nicht ohne weiteres als richtig angesehen werden darf. Es empfiehlt sich, die Zielvariable mit den einzelnen Prädiktoren in einem Streudiagramm gegenüberzustellen, da anhand der Random Forest Analyse keine Schlüsse über die Plausibilität der Wichtigkeit der einzelnen Prädiktoren gezogen werden können.

Der Methodenvergleich für die Bestimmung der Zeit vom Niederschlagsbeginn bis zur Ganglinienreaktion hat ergeben, dass die beste einfache automatische Bestimmungsmethode sich nur minimal von einer komplexen resp. der händischen Bestimmung unterscheidet, jedoch grosse Unterschiede zu den restlichen einfachen Methoden aufweist. Es konnte keine beste einfache automatische Bestimmungsmethode gefunden werden, die Unterschiede der Gangliniencharakteristiken zwischen Grundwasser, Abfluss und der EC waren zu gross, zudem wurde die Ganglinie verhältnismässig stark durch die standortbedingten Dynamiken (Amplitude und Steigung) sowie dem Rauschen aufgrund der angewandten Messtechnik beeinflusst. Die Methode „Minimum“, die den tiefsten Punkt der Ganglinie zwischen Niederschlagsbeginn und Ganglinienmaximum als Reaktion bestimmt, hat sich jedoch als einfache Bestimmungsmethode bewährt. Der Methodenvergleich hat zudem aufgezeigt, dass bei der Wahl der Methode für die automatische Bestimmung der Reaktionszeit Vorsicht geboten ist. Die grossen Zeitunterschiede der einzelnen Methoden in der Bestimmung der Ganglinienreaktion können leicht zu Fehlinterpretationen und falschen Einschätzungen der hydrologischen Prozesse führen, und unterstreicht die Wichtigkeit einer detaillierten Analyse der angewandten Methoden sowie einer genauen Validierung der gewonnenen Resultate.

Wie bereits frühere Untersuchungen im Alptal aufgezeigt haben, spielt der Zwischenabfluss eine zentrale Rolle im Alptal. Die hervorgehobene Bedeutung des präferentiellen Fliessens durch hochdurchlässige Schichten oder Makroporen im Oberboden konnte bestätigt werden. Messstandorte mit kleinen EZG sowie der Makroporenstandort wiesen kurz nach Niederschlagsbeginn eine fast gleichzeitige Abfluss- und EC- Reaktion auf. Zudem zeigten meine Messresultate auf, entgegen den Behauptungen von Feyen (1998), dass Vorereigniswasser eine bedeutende Rolle im Abfluss spielt. Die schnelle Abflussreaktion sowie der grosse zeitliche Unterschied zwischen der Abflussreaktion und dem Einsetzen der Verdünnung durch Niederschlagswasser, in Kombination mit den hohen median Grundwasserständen im EZG, lässt auf ein massgeblichen Einfluss des Piston Flow Prozesses in den gesättigten Grundwasserkörpern schliessen.

Ich nehme an, dass der Abfluss des EZG massgeblich durch diese zwei Prozesse und deren Zusammenspiel gesteuert ist. Während eines Niederschlagsereignisses verbindet der präferentielle Fluss entlang hoch durchlässigen Strukturen die einzelnen Gebiete mit hohem Grundwasserspiegel zu einem hydrologisch aktiven, verbundenen Grundwasserkörper.

Die Wichtigkeit der Topographie als Steuerfaktor für die Abflussmenge und die EC- Reaktionszeit konnte in dieser Untersuchung aufgezeigt werden. Die hohen Korrelationen der Abflussmenge und der EC- Reaktionszeit mit der EZG Fläche und dem TWI am Standort ermöglichen die Vorhersage der EZG Fläche und des TWI am Standort für einen Standort, ohne installiertes Messgerät, in einem feuchten, steilen EZG mit wenig durchlässigen Böden.

Um das Verständnis der Prozesse und Dynamik der Abflussbildung und Abflusskonzentration weiter zu vertiefen, müssten noch mehr Steuerfaktoren wie beispielsweise Vegetationsdichte, Anteil Wald, Anteil Sättigungsflächen, Bodeneigenschaften, geologische Gegebenheiten oder Niederschlagscharakteristiken berücksichtigt werden. Neben der Ganglinienreaktion wäre es sinnvoll noch zusätzliche Timing- Messgrößen, wie das erste Maximum, das Maximum oder die Rezession der Ganglinie in die Analyse mit einzubeziehen. Anstatt der Verwendung von Median und Mittelwert als Zielvariable, könnte das 25% oder 75% Quartil verwendet werden. Weiter wäre interessant eine Hydrograph Separation durchzuführen. Anhand des Anteils an Ereignis- und Vorereigniswasser am Hydrographen wäre es möglich, noch genauere Erkenntnisse und Hinweise auf die vorherrschenden Prozesse und Zusammenhänge zu erlangen. Zusätzlich wäre es sinnvoll, weitere Makroporen zu analysieren, sodass repräsentative Schlüsse über die Dynamik des präferentiellen Fließens durch ein Makroporensystem gezogen werden können.

## Literatur

- Ali, G., L'Heureux, C., Roy, A., Turmel, M., Courchesne, F. (2011). Linking spatial patterns of perched groundwater storage and stormflow generation processes in a headwater forested catchment. *Hydrological Processes*, 25(25), 3843-3857.
- Bachmair, S. und Weiler, M. (2011). New dimensions of hillslope hydrology. In *forest hydrology and biogeochemistry*, 455-481. Springer Netherlands.
- Bachmair, S., Weiler, M., Troch, P. (2012a). Intercomparing hillslope hydrological dynamics: Spatio-temporal variability and vegetation cover effects, *Water Resour. Res.*, 48(5).
- Bachmair, S. und Weiler, M. (2012b). Hillslope characteristics as controls of subsurface flow variability. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3699-3715.
- Bortz, J. (2005). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 6.Auflage. Heidelberg: Springer.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., Stone, C. (1984). *Classification and Regression Trees*, Chapman & Hall, New York.
- Breiman, L. (2001). Random forests, *Machine Learning*. 45, 5-32.
- Burch, H. (1994). Ein Rückblick auf die hydrologische Forschung der WSL im Alptal. *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich* 175: 18-33.
- Conrad, O. (2007). Entwurf, Funktionsumfang, und Anwendung eines Systems für Automatisierte Geowissenschaftliche Analysen, 221, University of Göttingen.
- Detty, J. und McGuire, K. (2010). Topographic controls on shallow groundwater dynamics: implications of hydrologic connectivity between hillslopes and riparian zones in a till mantled catchment. *Hydrol. Process.*, 24: 2222-2236.
- Development Core Team, R. (2005). *R: A language and environment for statistical computing*, Vienna.
- Feyen, H., Leuenberger, J., Papritz, A., Gysi, M., Flühler, H., Schleppei, P. (1997). *Runoff Processes in Catchments with a Small Scale Topography*. Institute of Terrestrial Ecology, ETH Zürich.
- Feyen, H. (1998). Identification of runoff processes in catchments with a small scale topography. 1- 147.
- Feyen, H., Wunderli, H., Wydler, H., Papritz, A. (1999). A tracer experiment to study flow paths of water in a forest soil. *Journal of Hydrology*, 225, 155-167.
- Genereux, D. und Hooper, R. (1998). Oxygen and hydrogen isotopes in rainfall-runoff studies. *Isotope tracers in catchment hydrology*, 319-346.
- Haight, D. und Van Meerveld, H. (2011). Spatial variation in transient water table responses: differences between an upper and lower hillslope zone. *Hydrol. Process.* 25, 3866-3877.
- Hegg, C., McArdeell, B., Badoux, A. (2006). One hundred years of mountain hydrology in Switzerland by the WSL. *Hydrol. Process.*, 20: 371-376.

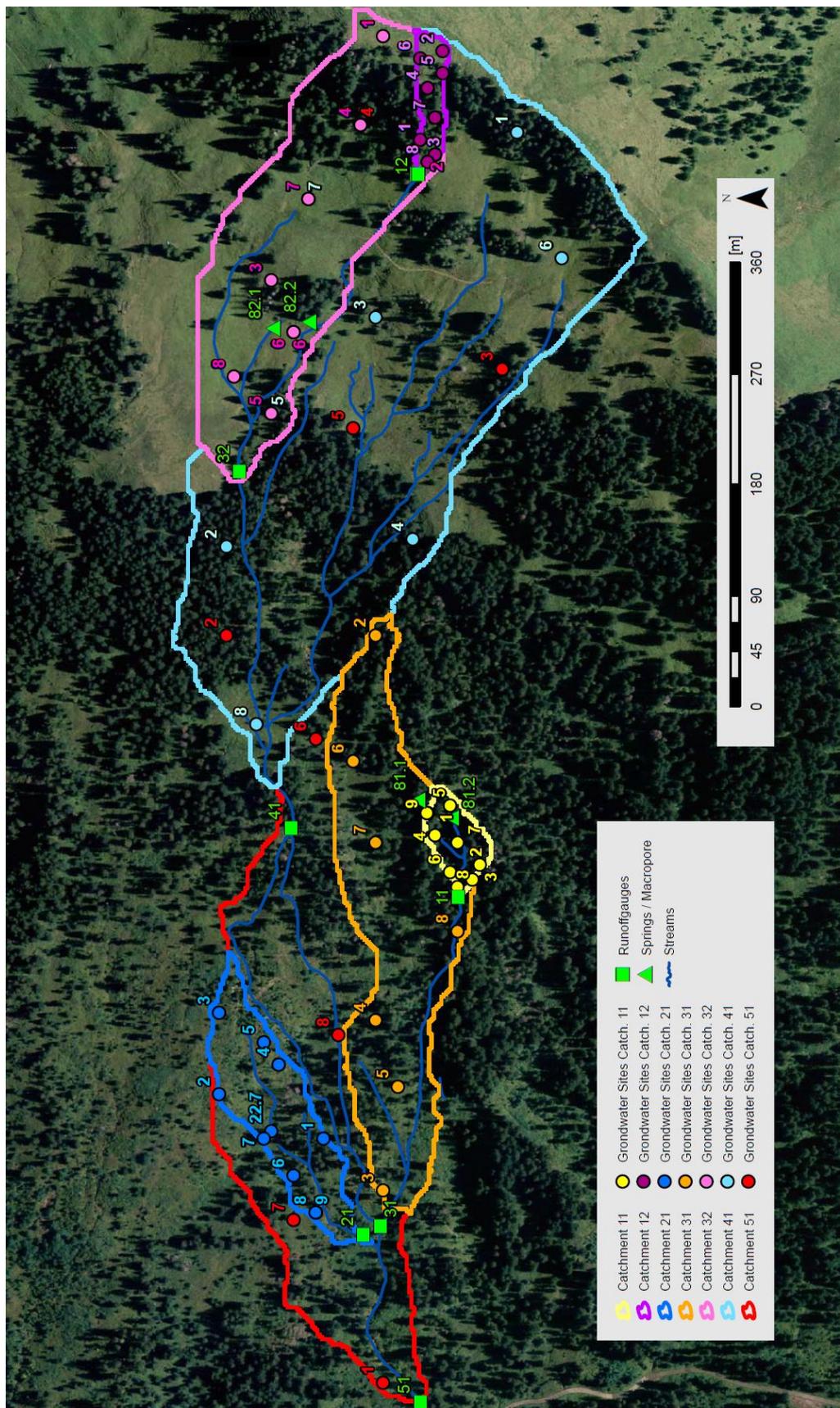
- Holden, J. (2009). Topographic controls upon soil macropore flow. *Earth Surf Process Landforms* 34(3): 345-351.
- Hooper, R., Christophersen, N., Peters, N. (1990). Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members. An application to the Panola Mountain catchment, Georgia, USA. *Journal of Hydrology*, 116(1), 321-343.
- Jencso, K. und McGlynn, B. (2011). Hierarchical controls on runoff generation: Topographically driven hydrologic connectivity, geology, and vegetation. *Water Resources Research*, 47(11).
- Jones, J., und Swanson, F. (2001). Hydrologic inferences from comparisons among small basin experiments. *Hydrological Processes*, 15(12), 2363-2366.
- Kuras, P., Weiler, M., Alila, Y. (2008). The spatiotemporal variability of runoff generation and groundwater dynamics in a snow-dominated catchment. *Journal of Hydrology*. 352, 50-66.
- Laudon, H. und Slaymaker, O. (1997). Hydrograph separation using stable isotopes, silica and electrical conductivity: an alpine example, *J. Hydrol.*, 201, 82-101.
- Leibundgut, C. und Seibert, J. (2011). Tracer Hydrology. In: Wilderer, P., (ed.) *Treatise on Water Science*, vol. 2, 215-236 Oxford: Academic Press.
- Liaw, A. und Wiener, M. (2002). Classification and Regression by random Forest. *R News* 2(3), 18-22.
- McDonnell, J. (1990). A Rationale for Old Water Discharge through Macropores in a Steep, Humid Catchment. *Water Resources Research*, 26(11), 2821-2832.
- McDonnell, J., Sivapalan, M., Vache, K., Dunn, S., Grant, G., Haggerty, R., Hinz, C., Hooper, R., Kirchner, J., Roderick, M., Selker, J., Weiler, M. (2007). Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology. *Water Resources Research*, 43(7).
- 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.
- Netzwerk Schweizer Naturzentren, NSNZ (2014). Karte der Naturzentren der Schweiz. <http://www.naturzentren.ch>, Zugriff: 11.06.1014.
- Nippgen, F., McGlynn, B., Marshall, L., Emanuel, R. (2011). Landscape structure and climate influences on hydrologic response. *Water Resources Research*, 47(12).
- Penna, D., Tromp-van Meerveld, H., Gobbi, A., Borga, M., Dalla Fontana, G. (2011). The influence of soil moisture on threshold runoff generation processes in an alpine headwater catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(3), 689-702.
- Prasad, A., Iverson, L., Liaw, A. (2006). Newer classification and regression tree techniques: bagging and random forests for ecological prediction. *Ecosystems*, 9, 181-199.
- Rickenmann, D., Turowski, J., Fritschi, B., Klaiber, A., Ludwig, A. (2012). Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers. *Earth Surf. Process. Landforms*, 37, 1000-1011.

- Rinderer, M., Tromp-van Meerveld, H., Seibert, J. (2014). Topographic controls on shallow groundwater levels in a steep, pre-alpine catchment – When is the steady state assumption valid. Department of Geography, University of Zurich.
- Rinderer, M., Tromp-van Meerveld, H., Seibert, J. (in preparation). Spatial variation in groundwater response timing: the role of topographic controls and rainfall event characteristics. Department of Geography, University of Zurich.
- Scherrer, S. (2006). Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz. Oppenheim.
- Scherrer S. (1997). Abflussbildung bei Starkniederschlägen - Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 147.
- Schleppi, P., Muller, N., Feyen, H. (1998). Nitrogen budgets of two small experimental forested catchments at Alptal, Switzerland. *Forest Ecology and Management*, 127, 177-185.
- Seibert, J., und McGlynn, B. (2007). A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models, *Water Resour. Res.*, 43(4).
- Shih, S. (2011). *Random Forests for Classification Trees and Categorical Dependent Variables: an informal Quick Start R Guide*. Stanford University | University of California, Berkeley.
- Sivapalan, M. (2005). Pattern, Process and Function: Elements of a Unified Theory of Hydrology at the Catchment Scale. In: Anderson, M. und McDonnell, J. Eds. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Chichester: Wiley, 193-219.
- Smith, R., Moore, R., Weiler, M., Jost, G. (2014). Spatial controls on groundwater response dynamics in a snowmelt-dominated montane catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(5), 1835-1856.
- Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *Journal of Psychology*, 15, 72-101.
- Sörensen, R., Zinko, U., Seibert, J. (2005). On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2, 1807-1834.
- Strobl, C., Boulesteix, A., Kneib, Th., Augustin, Th., Zeileis, A. (2008). Conditional variable importance for random forests. *BMC Bioinformatics*. 9: 307.
- Strobl, C., Malley, J., Tutz, G. (2009). An Introduction to Recursive Partitioning: Rational, Application, and Characteristics of Classification and Regression Trees, Bagging, and Random Forests. *Psychological Methods*. 14(4): 323-348.
- Ho, T.K. (1995). Random Decision Forests, *Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition*, Montreal, Canada, August 14-18, 1995. 278-282.
- Tarboton, D. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resour. Res.*, 33(2), 309-319.

- Troch, P., Paniconi, C., Van Loon, E. (2003). Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1. Formulation and characteristic response. *Water Resour. Res* 39(11): 1316.
- Tromp-van Meerveld H. und McDonnell, J. (2006). Threshold relations in subsurface stormflow: 2. The fill and spill hypothesis. *Water Resources Research*, 42(2), 1-11.
- Tromp-van Meerveld, I. und Weiler, M. (2008). Hillslope dynamics modeled with increasing complexity. *Journal of Hydrology*, 361(1-2), 24-40.
- Uchida, T., Kosugi, K., Mizuyama, T. (2002). Effects of pipe flow and bedrock groundwater on runoff generation in a steep headwater catchment in Ashiu, central Japan. *Water Resources Research*, 38(7), 24-1.
- UVEK (2008). Synthesebericht zur Ereignisanalyse Hochwasser 2005 in der Schweiz. 1-24.
- U. S. Department of the Interior (2001). *Water Measurement Manual 3rd*. Washington, DC.
- Weiler, M., McDonnell, J., Meerveld, I., Uchida, T. (2005). Subsurface Stormflow. In *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. 1-14.
- Wetzel, K. (2001). Die Prozesse der Abflussbildung in kleinen Hangeinzugsgebieten der nördlichen Kalkalpen bei unterschiedlichen Niederschlägen. *Die Erde* 132, 361-379.
- Wetzel, K. (2003). Runoff production processes in small alpine catchments within the unconsolidated Pleistocene sediments of the Lainbach area (Upper Bavaria). *Hydrological Processes*. 17, 2462-2483.
- WSL (2011). Hydrologische Forschung im Alptal (SZ). [http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/testgebiet\\_alptal/index](http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/testgebiet_alptal/index). Zugriff: 16.06.2014.
- Yu, B., Rose, C., Ciesiolka, C., Cakurs, U. (2000). The relationship between runoff rate and lag time and the effects of surface treatments at the plot scale. *Hydrological sciences journal*, 45(5), 709-726.
- Zabaleta, A. und Antigüedad, I. (2012). Streamflow response of a small forested catchment on different timescales. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 211-223.
- Zehe, E. und Flüßler, H. (2001). Slope scale variation of flow patterns in soil profiles. *J. Hydrol.*, 247 (1-2): 116-132.

# Anhang

## Anhang A Situationsplan Abfluss-Grundwasser-Monitoring-Netzwerk



**Abb. 30.** Situationsplan des Abfluss- und Grundwasser-Monitoring-Netzwerk am Studibach (Alptal, SZ). Dargestellt sind die ineinander geschachtelten Teil-EZG mit den räumlich verteilten Grundwasserstandorten (durchnummeriert von 1 bis 9 in jedem Teil-EZG) sowie die Abflussmessstandorte in grün (Gerinneabfluss: Quadrat, Quelle/Makropore: Dreieck) (eigene Darstellung).

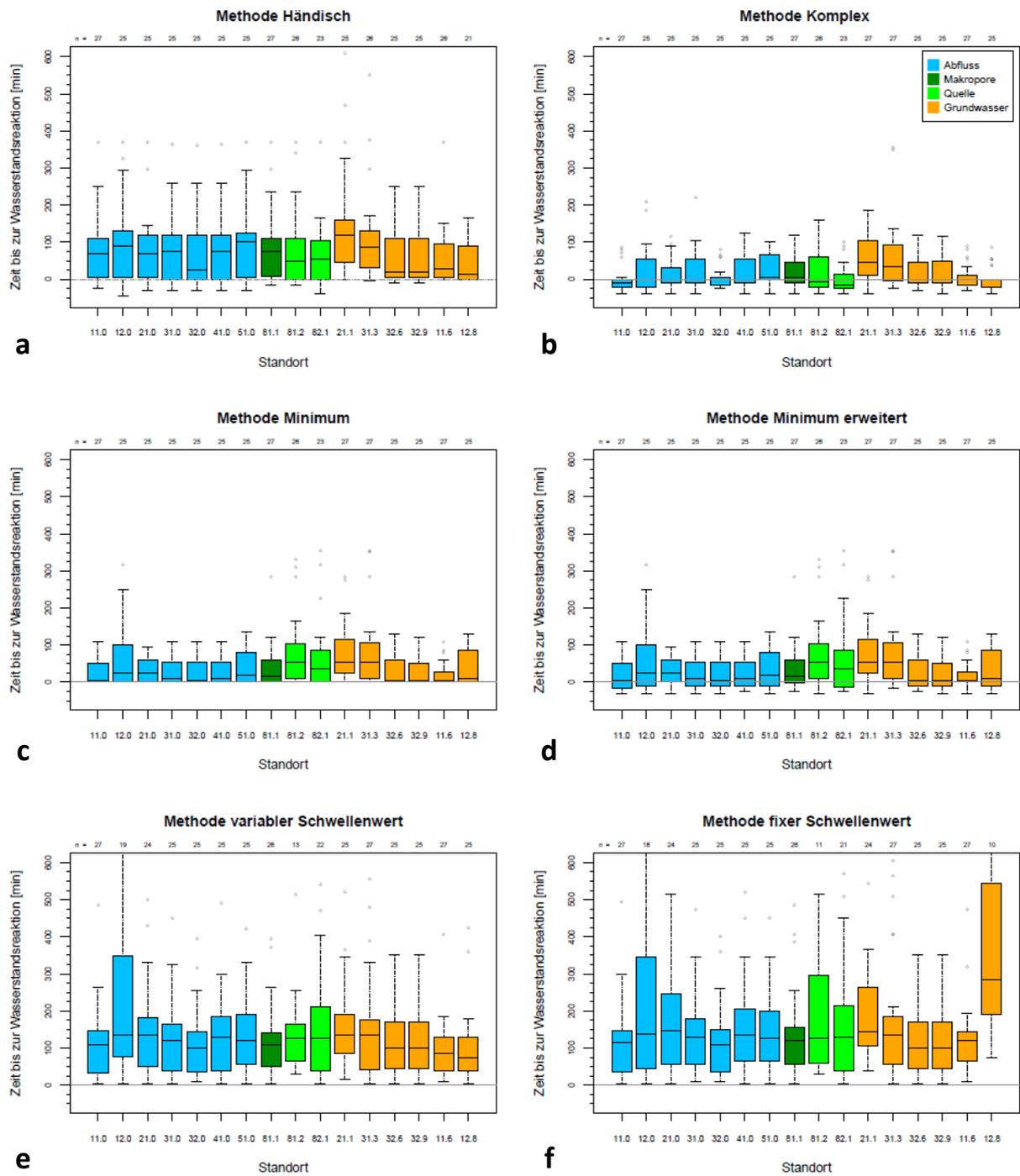
## Anhang B Niederschlagsereignisse

Für unsere Analyse verwendete ich eine Auswahl von 27 Niederschlagsereignissen (Niederschlagsmaximum über 1.4 mm/ 10 min und Niederschlagssumme höher als 6 mm) im Zeitraum vom 27. Juni bis zum 3. November 2013. Das niederschlagsreichste Ereignis zwei mit 62.3 mm und einer Dauer von 15.8 h hat am 29. Juni stattgefunden. Die höchste Niederschlagsintensität verzeichnete das Ereignis acht am 24. August mit 9.6 mm/ 10 min und einem Mittel 1.33 mm/ 10 min über eine Dauer von 2.2 h.

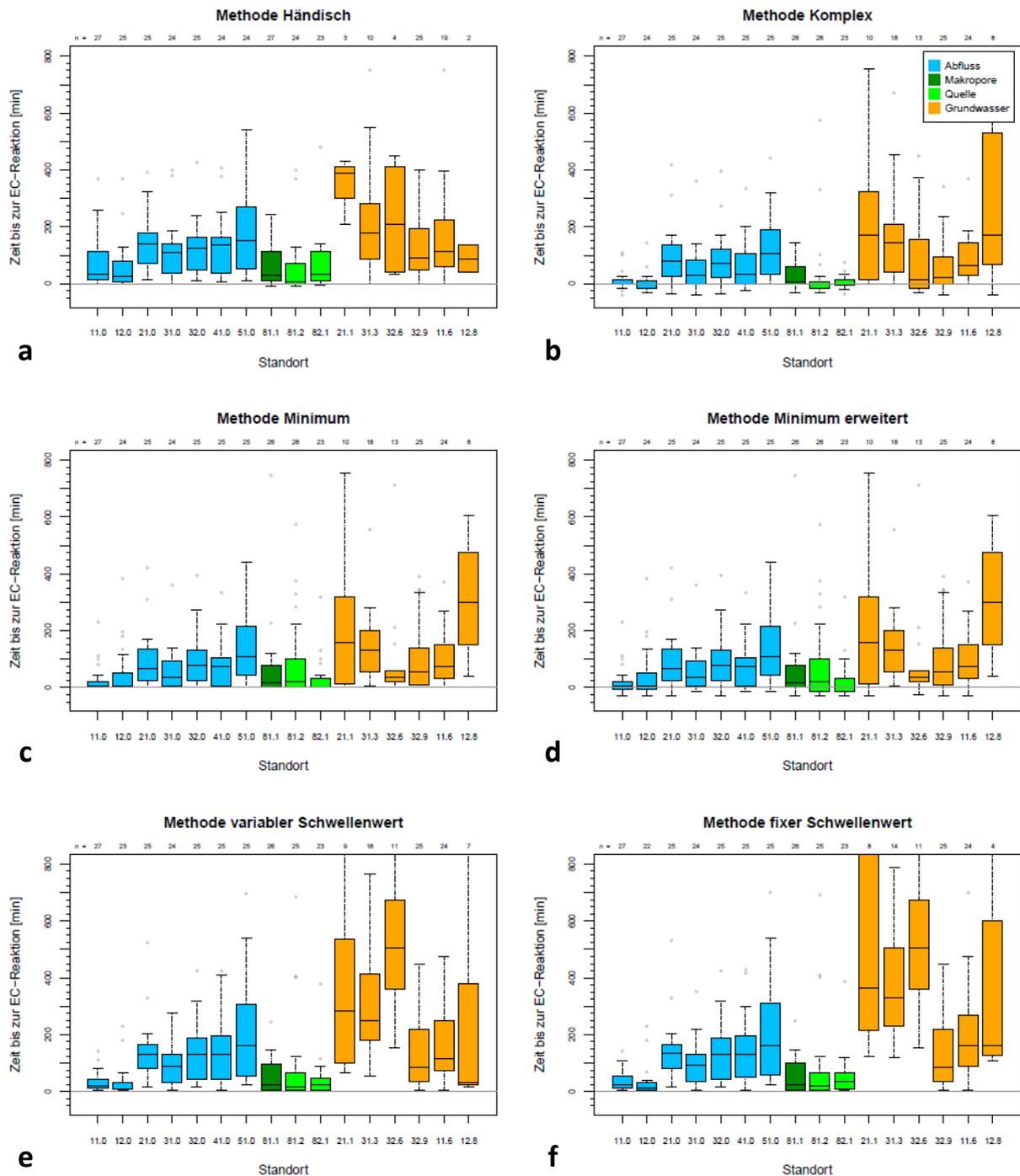
**Tab. 11.** Statistik der Niederschlagsereignisse für den Untersuchungsraum vom 27.07.2013 bis 03.11.2013.

Ereignis	Beginn	Maximum [mm/10min]	Summe [mm]	Mittelwert [mm/10min]	Median [mm/10min]	Dauer [h]
1	25.07.2013 18:40	4.9	7.9	0.61	0.1	2
2	29.07.2013 01:20	4.6	62.3	0.65	0.5	15.8
3	30.07.2013 04:20	1.5	6.0	0.67	0.6	1.3
4	08.08.2013 05:10	1.4	22.3	0.41	0.3	9
5	09.08.2013 06:10	2.8	30.9	0.39	0.3	13
6	18.08.2013 17:30	5.2	10.7	0.51	0.2	3.3
7	19.08.2013 13:30	3.5	14.8	0.41	0	5.8
8	24.08.2013 13:10	9.6	18.6	1.33	0.25	2.2
9	25.08.2013 01:40	2.5	6.1	0.23	0	4.3
10	27.08.2013 10:10	2.9	16	0.84	0.3	3
11	27.08.2013 16:20	2.2	29.6	0.26	0.1	18.7
12	28.08.2013 13:40	2.3	7.6	0.76	0.65	1.5
13	01.09.2013 13:00	5.3	7.8	0.35	0	3.5
14	08.09.2013 10:00	2.5	55.2	0.41	0.3	22.2
15	10.09.2013 07:40	1.4	26.8	0.23	0.1	19.3
16	11.09.2013 20:00	0.9	21.1	0.24	0.1	14.5
17	15.09.2013 01:20	5.3	8.7	0.46	0.1	3
18	15.09.2013 16:10	1.6	13.3	0.42	0.3	5.2
19	16.09.2013 09:30	2.5	40.3	0.3	0.2	22.2
20	17.09.2013 22:00	0.8	13.5	0.19	0.1	11.7
21	18.09.2013 17:30	3.1	48.2	0.53	0.3	15
22	26.09.2013 21:10	4.6	11.7	1.06	0.2	1.7
23	10.10.2013 10:00	2.1	21.2	0.48	0.4	7.2
24	15.10.2013 17:40	1.8	34.8	0.5	0.3	11.3
25	23.10.2013 11:20	0.8	9.1	0.13	0.1	11.3
26	03.11.2013 01:50	1.8	12	0.55	0.35	3.5
27	03.11.2013 08:20	1.8	17.8	0.74	0.8	3.8
<b>Mittelwert</b>		<b>3.0</b>	<b>21.3</b>	<b>0.5</b>	<b>0.3</b>	<b>8.7</b>

## Anhang C Boxplots Methodenvergleich



**Abb. 31.** Boxplots der Zeit vom Niederschlagsbeginn bis zur Wasserstandsreaktion [min] der Methode (a) „Händisch“, (b) „Komplex“, (c) „Minimum“, (d) „Minimum erweitert“, (e) „variabler Schwellenwert“ und (f) „fixer Schwellenwert“ der Gerinneabfluss- (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0, 51.0) (blau), Quell- (81.2, 81.1) (hellgrün), Makroporen- (81.1) (dunkelgrün) und Grundwasserstandorte (11.6, 12.8, 21.1, 31.3, 32.6, 32.9) (orange) (Daten: Beobachtungszeitraum vom 27.06.2013 bis 03.11.2013; Whiskers: definiert als 1.5- fache des IQA; Ausreisser: nicht geplottet).



**Abb. 32.** Boxplots der Zeit vom Niederschlagsbeginn bis zur EC-Reaktion [min] der Methode (a) „Händisch“, (b) „Komplex“, (c) „Minimum“, (d) „Minimum erweitert“, (e) „variabler Schwellenwert“ und (f) „fixer Schwellenwert“ der Gerinneabfluss- (11.0, 12.0, 21.0, 31.0, 32.0, 41.0, 51.0) (blau), Quell- (81.2, 81.1) (hellgrün), Makroporen- (81.1) (dunkelgrün) und Grundwasserstandorte (11.6, 12.8, 21.1, 31.3, 32.6, 32.9) (orange) (Daten: Beobachtungszeitraum vom 27.06.2013 bis 03.11.2013; Whiskers: definiert als 1.5- fache des IQA; Ausreisser: nicht geplottet).



# Eigenständigkeitserklärung

Persönliche Erklärung:

„Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.“

Peter Herrmann

Zürich, 30. Juni 2014