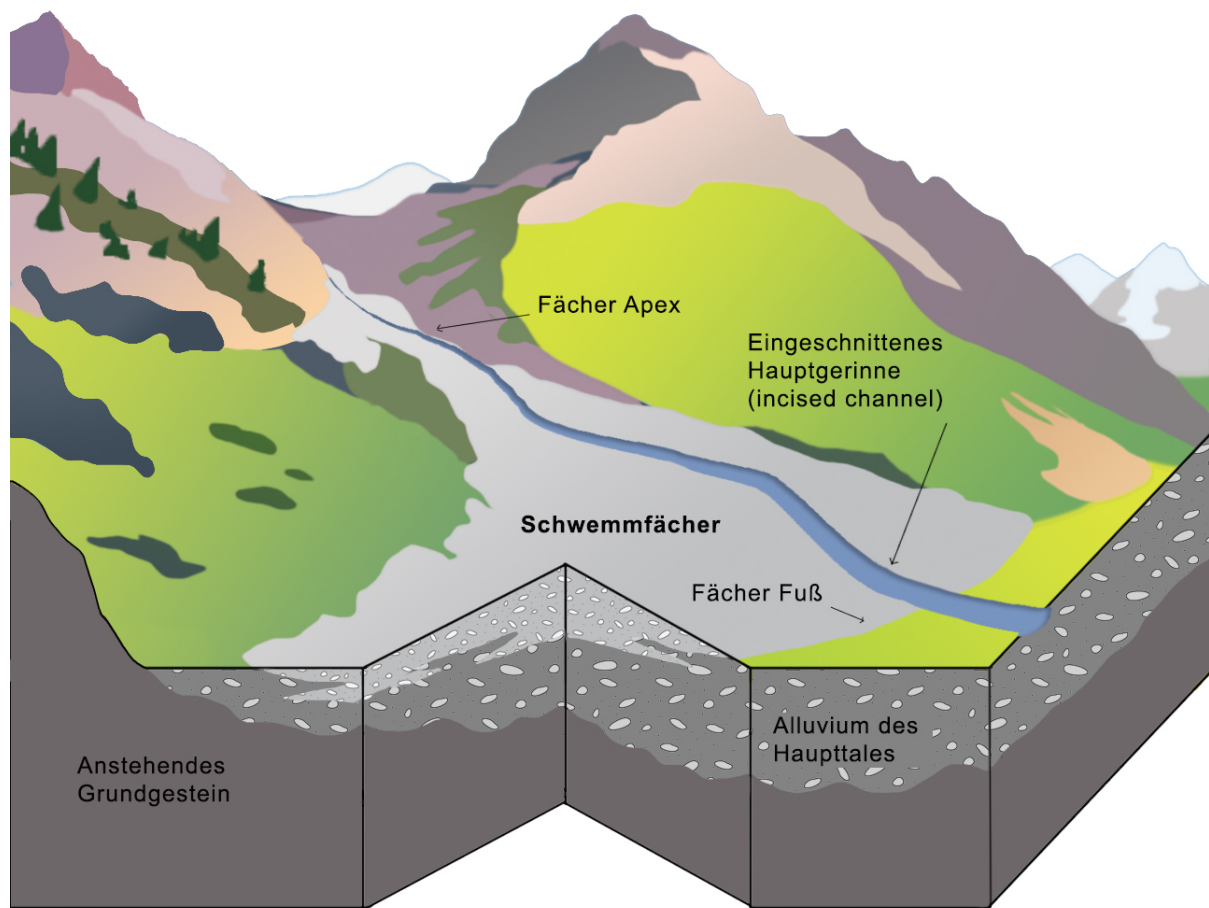


Joscha Feuerstein

**Potenzial von Schwemmfächern zum
Niedrigwassermanagement in voralpinen
Flussgebieten**



Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg i. Br., Juli 2015

Professur für Hydrologie
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Joscha Feuerstein

**Potenzial von Schwemmfächern zum
Niedrigwassermanagement in voralpinen
Flussgebieten**

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler

Korreferent: Prof. Dr. Philip Brunner

Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg i. Br., Juli 2015

VORWORT

Ich möchte mich sehr herzlich bei Herrn Prof. Dr. Markus Weiler für die Themenfindung, Betreuung und Unterstützung bei meiner Masterarbeit bedanken.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. Philip Brunner für seine Unterstützung und die Annahme des Korreferates.

Claire Carlier und Michael Stölzle danke ich für die interessanten Anregungen und hilfreichen Gespräche.

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

TABELLENVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG

SUMMARY

1	EINLEITUNG.....	1
2	PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	6
2	UNTERSUCHUNGSGEBIET	8
2.1	Auswahl des Untersuchungsgebietes	8
2.2	Untersuchungsgebiet allgemein	12
2.3	Beschreibung der Schwemmfächer	12
3	UNTERSUCHUNGSMETHODIK	17
3.1	Allgemeine Vorgehensweise	17
3.2	Gis Analysen	17
3.2.1	Datengrundlage und Aufarbeitung	17
3.2.2	GIS gestützte Berechnung der Schwemmfächer Sedimentvolumina	19
3.3	Entwicklung einer direkten Methode zur Berechnung der Schwemmfächer Volumina.....	20
3.4	Berechnung der Talaquifer Volumina.....	23
3.5	Theoretischer Hintergrund der Abflussmessungen und Tracerrückhalteranalysen	24
3.5.1	Nettobilanz ($Net\Delta Q$).....	26
3.5.2	Brutto Zu- und Abflüsse (Q_{GAIN} und Q_{LOSS}).....	27
3.6	Praktische Durchführung.....	29
3.6.1	Probemessungen und Festlegung der Messpunkte	30
3.6.2	Durchführung der Tracerversuche.....	34
3.6.3	Auswertung	37
3.6.4	Messdaten Korrektur.....	37
3.7	Unsicherheitsanalyse	39
3.8	Pegelmessungen	40
4	ERGEBNISSE	42

4.1 Schwemmfächer Volumen und Talaquifervolumen.....	42
4.2 Hydrologische Netto- Verluste und- Gewinne	46
4.3 Zusammenhang zwischen Abflusshöhe und Nettoveränderung	50
4.4 Hydrologische Brutto- Gewinne und- Verluste	51
4.5 Relative Brutto- Gewinne und- Verluste	54
4.6 Einordnung in das Abflussgeschehen	57
5 DISKUSSION	59
5.1 Diskussion der Ergebnisse.....	59
5.2 Schlussfolgerung.....	66
5.3 Ausblick.....	66
LITERATURVERZEICHNIS	

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1: Anschnitt und Aufbau eines Schwemmfächers. Eigene Grafik, Bildidee: Spektrum der Wissenschaft (Spektrum, 2011). Inhalte: (vergl. Bull, 1977; Blair und McPherson, 1994a, b; Ahnert, 2003)

Abbildung 2.1: Übersichtskarte der Untersuchungsgebiete und Lage der Schwemmfächer. (Datengrundlage Bundesamt für Landestopografie, 2015; Kanton Bern 2015)

Abbildung 2.2: Wässerigfächer

Abbildung 2.3: Flühbachfächer

Abbildung 2.4: Holxmattfächer

Abbildung 2.5: Dieboldsbachfächer. Oben rechts und unten rechts, oberer Messabschnitt; oben links und oben Mitte, unterer Messabschnitt.

Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der GIS-basierten Volumen Berechnung (verändert nach ArcGis Help, 2015).

Abbildung 3.2 : Schematische Darstellung eines longitudinalen Schwemmfächer Anschnittes und dessen Gemeinsamkeiten mit der Kegelgeometrie.

Abbildung 3.3: Lage, Bezeichnung und Ausdehnung der Schwemmfächer sowie des Talaquifers im Untersuchungsgebiet „Emme“.

Abbildung 3.4: Lage, Bezeichnung und Ausdehnung der Schwemmfächer sowie des Talaquifers im Untersuchungsgebiet „Röthebach“.

Abbildung 3.5: Integrationsmethode bzw. Salzverdünnungsmethode (vergl. Spreafico und Gees, 1994; LFU, 2002 und Rieckermann et al., 2005)

Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der Tracerversuche für die Ermittlung der Nettobilanz ($\text{Net}\Delta Q$) sowie der Bruttogewinne und -verluste (Q_{GAIN} , Q_{LOSS}) (vergl. Payn et al., 2009).

Abbildung 3.7: Messtage und Niederschlags Tagessummen im Untersuchungszeitraum Oktober 2014 – Juni 2015 (Niederschlagsdaten MeteoSweiz, 2015).

Abbildung 3.8: Lage der Mess- und Injektionspunkte des Flühbachfächers.

Abbildung 3.9: Beispiel für eine Eichbeziehung zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Salzkonzentration nach Subtraktion der Hintergrundleitfähigkeit am Bach „Wässerig“.

Abbildung 3.11: Grafische Ermittlung der Parameter der Potenzfunktion für die P/Q-Beziehung

Abbildung 3.10: Messpegel der Bäche „Wässerig“ (A), „Flühbach“ (B) und „Holxmatt“ (C).

Abbildung 4.1 Exemplarische 3D-Darstellung der Volumenberechnung. Die Schwemmfächer sind hierbei mehrfach überhöht und nicht maßstabsgetreu abgebildet. „Flühbach“: DGM Rasterdatensatz; „Wässerig“: TIN-Oberfläche.

Abbildung 4.2: Vergleich Ergebnisse $V_{\text{GEOMETRIE}}$ und V_{GIS} . Dargestellt ist die Über- und Unterschätzung der $V_{\text{GEOMETRIE}}$ Werte in Bezug auf die zugehörigen V_{GIS} Werte der einzelnen Schwemmfächer. Diese sind nach Volumen, absteigend von links nach rechts, angeordnet. Die Schwemmfächer Bezeichnung ist ober- und unterhalb der jeweiligen Werte dargestellt.

Abbildung 4.3 Hydrologische Netto- Verluste und- Gewinne ($\text{Net}\Delta Q$). Dargestellt sind die $\text{Net}\Delta Q$ Werte und der Abfluss Q_U aller Schwemmfächer an den Messtagen eins bis neun (A- F). Die Mittelwerte von $\text{Net}\Delta Q$ und Q_U der einzelnen Fächer sind in Teilabbildung G abgebildet. Die jeweiligen Fächer sind mit ihren Anfangsbuchstaben abgekürzt (W, F, H, D).

Abbildung 4.4: Zusammenhang zwischen Abflusshöhe und Nettoveränderung. Dargestellt ist $Q_D - Q_U$ gegen den Abfluss Q_U der Schwemmfächer „Wässerig“, „Holxmatt“ und „Flühbach“ der einzelnen Messtage.

Abbildung 4.5: Hydrologische Brutto- Gewinne und- Verluste (Q_{GAIN} (+), Q_{LOSS} (-)). Dargestellt sind die Q_{LOSS} und Q_{GAIN} - Werte und der Abfluss Q_U aller Schwemmfächer an den Messtagen eins bis neun (A – F). Die Mittelwerte von Q_{LOSS} , Q_{GAIN} und Q_U der einzelnen Fächer sind in Teilabbildung G abgebildet. Die jeweiligen Fächer sind mit ihren Anfangsbuchstaben abgekürzt (W, F, H, D).

Abbildung 4.6: Relative Brutto- Gewinne und- Verluste (Q_{GAIN} / Q_U , Q_{LOSS} / Q_U). Dargestellt sind die relativen Bruttowerte Q_{GAIN} / Q_U und Q_{LOSS} / Q_U aller Schwemmfächer an den Messtagen eins bis neun (A – F). Die Mittelwerte von Q_{GAIN} / Q_U und Q_{LOSS} / Q_U der einzelnen Fächer sind in Teilabbildung G abgebildet. Die jeweiligen Fächer sind mit ihren Anfangsbuchstaben abgekürzt (W, F, H, D).

Abbildung 4.7: Einordnung der Messtage in das Abflussgeschehen am Beispiel „Holxmatt“. Dargestellt sind: Messtage (M1 – M9), Niederschlags Tagessummen (MeteoSwiss, 2015), Q_U und täglicher Q_{PEGEL} .

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle im Text

Tabelle 4.1: Ergebnisse der GIS und Geometrie basierten Schwemmfächer Volumina

Tabelle im Anhang

Tabelle A1 : Ergebnisse der Abflussmessungen und Tracerrückhaltsanalysen

ZUSAMMENFASSUNG

In Niedrigwasserperioden wird der Großteil des Abflusses durch das Grundwasser gespeist. Für ein erfolgreiches Niedrigwassermanagement ist daher die Bestimmung und Quantifizierung von Grundwasserspeichern von großer Bedeutung. Einen in diesem Zusammenhang bislang wenig untersuchten potenziellen Speicher könnten die Sedimentkörper von alluvialen Fächern darstellen. Daher soll in dieser Arbeit das Potenzial von Schwemmfächern zum Niedrigwassermanagement in voralpinen Flussgebieten untersucht werden. Um das Speicherpotenzial von Schwemmfächern in voralpinen Flussgebieten abzuschätzen, wurde eine Methode entwickelt, deren Sedimentvolumina einfach und direkt für ein großes Gebiet bestimmen zu können. Die Ergebnisse von 38 Untersuchten Schwemmfächern zeigen, dass Schwemmfächer Sedimentkörper, in Niedrigwasserperioden eine relevante Größe für das Abflussgeschehen während Trockenzeiten darstellen können.

Anhand von Abflussmessungen und Tracerrückhaltsanalysen wurden zudem die Abflussänderungen von vier ausgewählten, unterschiedlich anthropogen überprägten Schwemmfächer Gerinnen quantifiziert und die In- und Exfiltrationsverhältnisse entlang der untersuchten Flussabschnitte charakterisiert. So konnte gezeigt werden, dass die Gerinne der Schwemmfächer maßgeblich zur lokalen Grundwasserneubildung beitragen. Diese aber mit zunehmender Überprägung abnimmt. Für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement könnten demnach durch geeignete Renaturierungsmaßnahmen von stark anthropogen überprägten Schwemmfächern die Restwassermenge in Niedrigwasserperioden erhöht und die Dauer des Niedrigwasserabflusses während der Trockenperiode verkürzt werden und sich somit positiv auf die Ökologie und Ökonomie des Schwemmfächergebietes und den Flussunterlauf auswirken.

SUMMARY

During low flow periods, the majority of water discharge is supplied by ground water. Therefore a sustainable low water management is needed in order to quantify possible ground water aquifers. Until now less examined sediment storages of alluvial fans could represent such Potenzial reservoirs. So this study aims to investigate and quantify the Potenzial of alluvial fans for an efficient low water management in pre-alpine river basins.

In order to estimate the storage Potenzial of alluvial fans in pre-alpine river basins, a calculation method was developed. This easy and direct method enabled the sediment volume quantification of a large area. So the capacity of 38 alluvial fans was calculated and their belonging storage Potenzial determined. Results could show that fluvial sediments play an important role for the runoff behaviour during low water periods.

Independent tracer releases, dilution gauging, and mass recovery analyses were subsequently used to estimate discharge, gross losses, and gross gains in 4 of the 38 alluvial fans. Those selected fans differed in their anthropogenic influences, from natural to highly cultivated and thus served to estimate the impacts of anthropogenic influences on the overall water recharge. It could be determined that up to 44 % runoff which was delivered to the study reaches was absorbed by the alluvial fans demonstrating that fans can serve as significant hydrologic buffers. This in turn indicates that the increased fan channels significantly contribute to the local ground water recharge. The comparison between natural and anthropogenic influenced alluvial fans additionally indicated that the recharge by the channel water is decreasing with an increasing anthropogenic impact. Renaturation processes in combination with elevated permeability of the fan channels could be part of an efficient low water management. Thus a sustainable low water management would certainly have a stabilizing effect on the streamflow regime, in particular by enhancing the base flow and by shortening the duration of runoff minima during the dry period. This would have a positive effect on the ecology and economy of the fan area during low flow conditions.

STICHWORTE

Schwemmfächer, alluviale Fächer, Grundwasserneubildung, Grundwasserspeicher, Niedrigwasserabfluss, Niedrigwassermanagement, voralpine Flussgebiete

1 EINLEITUNG

Dürren sind extreme und über einen längeren Zeitraum andauernde Wetterperioden, in denen nur geringe Mengen an Wasser oder Niederschlag verfügbar sind. Diese Trockenperioden führen zu einem temporären Wasserdefizit und können erhebliche Auswirkungen auf die verfügbaren Wasserressourcen einer Region haben. So sinken Wasserstände in Oberflächengewässern und im Grundwasser aufgrund länger andauernder hoher Temperaturen und damit verbundenen geringen Niederschlägen und wirken sich negativ auf die vorhandenen Ökosysteme und das menschliche Wohlbefinden aus. Die Auswirkungen der Extremwetterlage im Jahr 2003 zeigten, dass auch die wasserreichen Alpen von Trockenperioden und Dürren betroffen sein können (Kruse et al., 2010). Dieser außergewöhnliche Witterungsverlauf führte trotz des vorherrschenden Wasserreichtums der Schweiz zu einem starken Abschmelzen der Gletscher, landwirtschaftlichen Bewässerungsproblemen und einem unverhältnismäßig hohen Fischsterben. Die Schweizer Klimahistorie seit dem 16. Jahrhundert belegt zudem ein wiederholtes Auftreten von temporärer Wasserknappheit im sogenannten „Wasserturm Europas“ (Pfister und Rutishauser, 2000). Der zurzeit vorherrschende globale Klimawandel wird das Auftreten von Trockenperioden in den kommenden Jahrzehnten begünstigen (CH2014 Impacts, 2014) und erfordert daher schon heute ein schnelles und effizientes Management der Grundwasser- und Niedrigwasserverhältnisse in der Schweiz, um die negativen Auswirkungen auf die Wasserressourcen und die Wasserqualität zu verringern.

In der Schweiz werden 83 % des Trinkwassers aus dem Grundwasser bezogen; somit stellt das Grundwasser die wichtigste Quelle für die Schweizer Trinkwasserressourcen dar (Sinreich et al., 2012). In Trockenzeiten werden Flüsse zum großen Teil von Grundwasser gespeist. Dabei reagieren unterschiedliche Grundwassersysteme auf verschiedene Weise, was für den Basisabfluss und die Mindestabflussgarantien für die Gewässerökologie, die Wasserwirtschaft und insbesondere die Trinkwasserversorgung aus dem Grundwasser von großer Relevanz ist. Die beiden Systeme Grundwasser und Oberflächenwasser sind miteinander verbunden und beeinflussen sich in ihrer Menge und Beschaffenheit. Ihre Interaktionen hängen dabei von den geomorphologischen, geologischen und hydrogeologischen Flussbetteigenschaften und der jeweiligen Umgebung ab.

Die Wasserspeicher Bodenfeuchte, Grundwasser, Schnee und Eis beeinflussen das hydrologische System einer Landschaft vor allem während einer länger anhaltenden Trockenheit in vielerlei Hinsicht. Die Trockenheitsdynamik der Abflüsse hängt dabei hauptsächlich von den Wasserspeichern, deren Füllstand und Entleerungsdynamik ab (Seneviratne et al., 2013). Das Verständnis der vorhandenen Grundwasserspeicher und des grundwasserbürtigen Abflusses, welcher in Niedrigwasserperioden für die Speisung der Flüsse verantwortlich ist, sowie die Identifizierung neuer Wasserspeicher sind daher für ein effektives Niedrigwassermanagement von zentraler Bedeutung. Einen potenzieller Grundwasserspeicher könnten sogenannte Schwemmfächer an den Übergängen von Neben- zu Haupttälern bilden. Diese alluvialen Fächer fanden bislang in der Literatur in Hinblick auf Grundwasserspeicherung nur wenig Beachtung, könnten aber eine weitere trockenheitsrelevante Größe für das Niedrigwassermanagement voralpinen Flussgebieten darstellen. Schwemmfächer oder auch alluviale Fächer bezeichnen den Ablagerungsbereich von zerkleinertem Gestein, welches von einem Fließgewässer mitgeführt wird. Diese Fluvialakkumulation entsteht an Stellen, an denen der jeweilige Fluss an Gefälle verliert und somit die Geschwindigkeit und damit die Transportkraft nachlässt, beispielsweise beim Übertritt vom Gebirge in eine ebene Landschaftsform. Daher bilden sich Schwemmfächer vor allem bei plötzlichen Querschnittserweiterungen oder Gefälleverminderungen eines Geröllführenden Fließgewässers. Ihre Entstehung wird zudem begünstigt, wenn Flüsse eine große Menge an Geröllfracht mit sich führen. Laut Ahnert (2003) kommen Schwemmfächer in allen durch fluviale Prozesse gestalteten Regionen der Erde vor. Sie sind jedoch gehäuft in Einzugsgebieten, in denen bedingt durch mechanische Verwitterung eine große Menge an Grobfracht erzeugt und transportiert wird, zu finden. In Gebieten mit höherem Relief, beispielsweise Hügelland oder Gebirge, verringert sich die Fließgeschwindigkeit vor allen dann sehr schnell, wenn ein Fluss oder Bach mit hohem Längsgefälle im Haupttal auf seinen Vorfluter mit niedrigerem Gefälle trifft. Am Austrittspunkt vom Neben- zum Haupttal ist das Gewässer nicht mehr in seiner Ausbreitung eingeschränkt und bildet die durch den Ablagerungsprozess gesteuerte, typische Fächerform aus (Abbildung 1.1). Der Sedimentkörper des Schwemmfächers weist im Längsprofil eine konkave und im Querprofil eine konvexe Form auf (Bull, 1977; Blair und McPherson, 1994a). Mit dem höchsten Punkt am Talausgang des Nebentals (Fächer Apex) und mit einem halbkreisförmigen Übergang in die Talsohle erinnert diese Aufschüttungsform an ein Kegelsegment. Das Hauptgerinne der Schwemmfächer schneidet sich häufig in den Sedimentkörper ein (Ahnert, 2003) (Abbildung 1.1). Alluviale Fächer mit ausgeprägtem Relief entstehen am Fuß von Gebirgsstöcken oder

periglazialen Gebieten. Bei Schwemmfächerformen mit großer, flächiger Ausdehnung und geringer Hangneigung besteht der Schwemmfächerkörper vorwiegend aus Material kleinerer Korngrößen. Allgemein gilt, dass das Gefälle eines alluvialen Fächers mit steigender Korngröße der Sedimentfracht zunimmt und gleichzeitig mit steigendem Abfluss abnimmt (Ahnert, 2003). Die flächige Ausdehnung von Schwemmfächern ist nach Bull (1964) annähernd proportional zur Größe des Einzugsgebietes. Hierbei ergeben sich Unterschiede durch lokale Faktoren wie vorherrschende Gesteinsarten, Relief und meteorologischen Gegebenheiten.

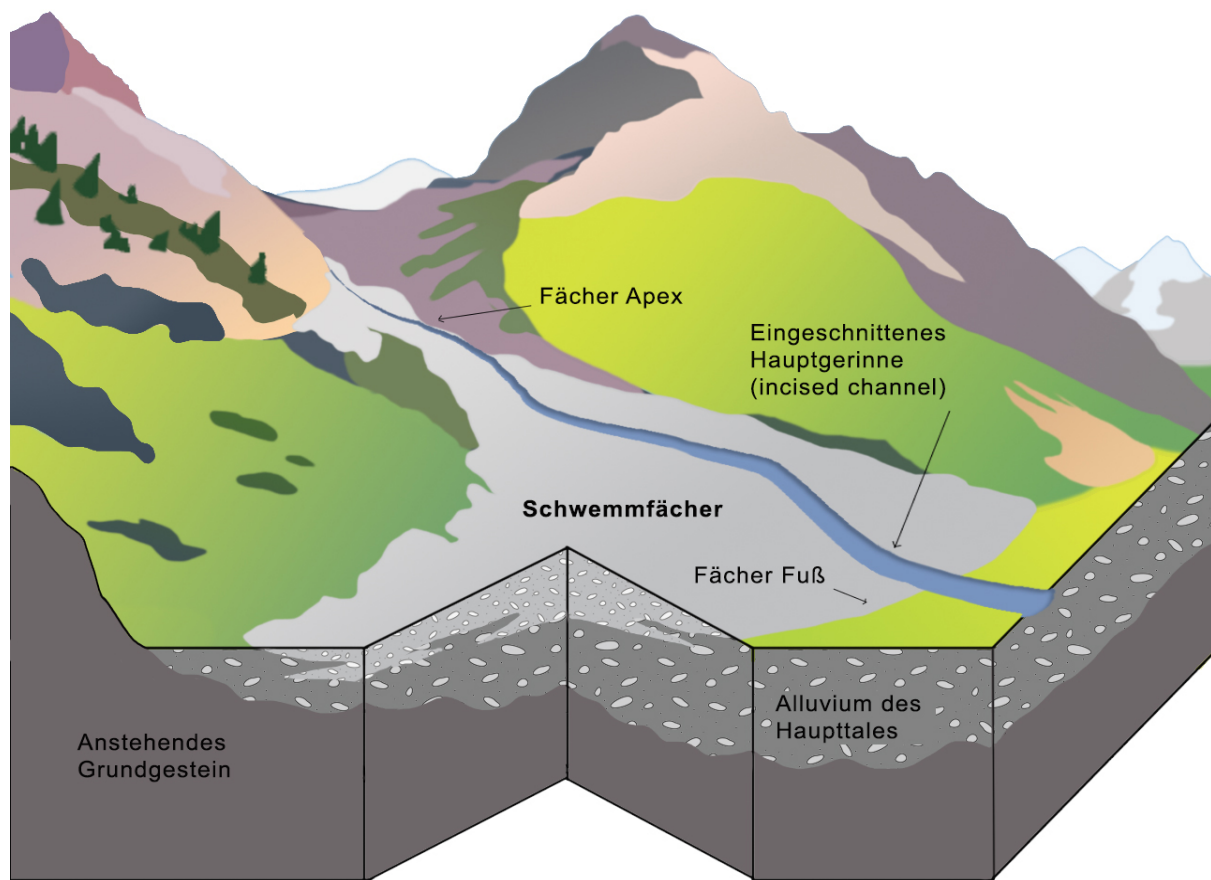


Abbildung 1.1: Anschnitt und Aufbau eines Schwemmfächers. (Eigene Grafik; Bildidee Spektrum, 2011; Inhalte vergl. Bull, 1977; Blair und McPherson, 1994a, b; Ahnert, 2003)

Erste wissenschaftliche Untersuchungen zu alluvialen Fächern wurden im ariden bis semiariden Südwesten, beispielsweise im Death Valley Gebiet, der USA vorgenommen (Denny 1965, Hooke 1967 und Bull 1977). Die hier vorherrschende geringe Vegetationsbedeckung vereinfachte die geologische und geomorphologische Grundlagenforschung. Studien nach Denny (1967), Bull (1977) und Lecce (1990) legen nahe, dass Schwemmfächer aufgrund unterschiedlicher Formen und Prozesse differenziert

werden können. Daher beschränkte sich die frühe Schwemmfächer Forschung vor allem auf die Fächertypisierung sowie deren geomorphologischen und geologischen Aufbau. Das gewonnene Wissen über den Grundaufbau eines alluvialen Fächers kann ebenso wie Studien zur Beschreibung der Schwemmfächergröße (Bull, 1964; Blair und McPherson, 1994a, b; Allen und Horvius, 1998), für die hier vorliegende Arbeit genutzt werden. Studien zur Schwemmfächer Genese (Hooke, 1967) sind hingegen für die folgende Arbeit weniger relevant.

Sobald in Relief geprägten Gebieten, Zuflüsse aus Nebentälern über den Schwemmfächer Sedimentkörper fließen, geben sie Wasser in das Grundwasser ab. Die Exfiltration aus dem jeweiligen Gerinne in den Grundwasserleiter ist dabei für die lokale Grundwasserneubildung des Schwemmfächer Aquifere von zentraler Bedeutung. Für aride Regionen wurde dieser Prozess hinlänglich dokumentiert (Houston, 2002), Blainey und Pelletier, 2008.). Auf gemäßigte Klimazonen angewandt, ist dies vor allem interessant, da sich Bäche und Flüsse in niederschlagsreichen Regionen meist influent verhalten und daher vom Grundwasser gespeist werden (Sophocleous, 2002). Der hydraulische Gradient von Bächen, die über- bzw. durch einen Schwemmfächerkörper fließen, verhält sich jedoch invers hierzu und führt zu einer Exfiltration von Bachwasser in den Grundwasserleiter. Hierfür muss der Grundwasserspiegel allerdings niedriger als der Gerinnepegel liegen, was nach Blair und McPherson (1994b) in den meisten Schwemmfächer Systemen gegeben ist. Dies wurde bereits durch Studien von Shimada et al. (1993) und Woods et al. (2006) auch für humide beziehungsweise gemäßigte Klimate bestätigt. Da es auf Schwemmfächern demnach häufig zu einer Grundwasserneubildung durch eine Infiltration von Bachwasser kommt, könnten diese Systeme als Zwischenspeicher für Niederschlags- und Abflussarme Perioden dienen. Insgesamt ist der diskontinuierliche Prozess der Grundwasserneubildung auf alluvialen Fächern durch die Heterogenität der Sedimentstruktur und das komplexe Fließverhalten jedoch schwer zu lokalisieren und für eine Evaluation der Grundwasser Ressourcen nur erschwert zu quantifizieren (Weissmann et al., 2002; Winfield, 2006; Blainey und Pelletier, 2008). Die meisten Studien beschränken sich hierbei auf die qualitative Beschreibung der Grundwasserneubildungsprozesse, der von Schwemmfächer Systemen ausgehenden Grundwasserneubildungsrate oder generell auf das Schwemmfächer Speicher Potenzial. So haben Untersuchungen von Shimada et al. (1993) durch stabile Isotopen Analysen und Tracer Versuche nachgewiesen, dass das Schwemmfächer Aquifer zum größten Teil durch das Hauptgerinne des Fächers gespeist wird. Die entsprechende Menge wurde jedoch nicht

untersucht. Arbeiten von Hsu et al. (2013) beschäftigten sich mittels Grundwasserganglinien- und Isotopen Analysen mit den Auswirkungen von Wasser Entnahmen aus einem Schwemmfächer Aquifer für die landwirtschaftliche Bewässerung und mit der Quantifizierung der zugehörigen Grundwasserneubildungsrate. Aufgrund der enormen Fächergröße von mehreren zehn Quadratkilometern sind diese Untersuchungen aber für diese Arbeit weniger interessant. Eine der wenigen wissenschaftlichen Arbeiten, in welchen quantitative Aussagen zum potenziellem Speichervermögen beziehungsweise der Pufferung von Schwemmfächern gemacht werden, sind die Untersuchungen von Herron und Wilson (2001). Hier wird über den Ansatz einer Wasserbilanz ein Pufferungs-Potenzial von 20 % bis 100 % des vom Einzugsgebiet des Schwemmfächers gelieferten Oberflächenabflusses für das System nachgewiesen. Um das potenzielle Speichervermögen von alluvialen Schwemmfächer Körpern quantifizieren zu können, muss die Interaktion von grundwasserbildendem Oberflächengewässer und dem Grundwasserleiter des Schwemmfächer Körpers erfasst werden. Hierfür eignet sich unter anderem die jeweilige Wasserbilanz, um den Austausch zwischen Fluss und Grundwasser zu erfassen und zu quantifizieren. Eine entsprechende Methode beinhaltet die Abflussmessungen in aufeinanderfolgenden Querschnitten innerhalb des Gerinnes. Durch die Differenz der Abflussmengen zweier Querschnitte kann anschließend festgestellt werden, ob eine Grundwasser In- oder Exfiltration stattfindet (Zellweger et al., 1989; Kalbus und Reinstorf, 2006). Weitere Studien, die mittels Abflussmessungen den Austausch zwischen Grundwasser und Flusswasser untersuchten, wurden von Harvey und Wagner (2000), Ruehl et al. (2006) Covino und McGlynn (2007) und Payn et al. (2009) durchgeführt. Viele Arbeiten zur Wasserbilanzierung finden zwar nicht explizit auf Schwemmfächern statt, könnten von ihrer Grundidee jedoch für die Untersuchung der Interaktion von Oberflächengewässer und Schwemmfächer verwendet werden.

Diese Masterarbeit stellt einen Teil des internationalen Forschungsprojekts „Auswirkungen der Klimaänderung auf das Grundwasser und Niedrigwasserverhältnisse in der Schweiz“ dar. Ziel dieses Projekts ist die Untersuchung von Auswirkungen der Klimaänderung auf das Grundwasser und die Niedrigwasserverhältnisse in der Schweiz. Hierdurch sollen Informationen und Werkzeuge zur Verwaltung von Wasserressourcen in der Schweiz im Hinblick auf Trockensituationen gewonnen werden. Das Projekt wird vom BAFU, dem Bundesamt für Umwelt (CH) finanziert und stellt eine Kooperationen der Universität Neuchâtel in Zusammenarbeit mit Jan Seibert, Philip Brunner und Daniel Hunkeler sowie der Universität Freiburg, (DE), in Zusammenarbeit mit Markus Weiler und Kerstin Stahl dar.

2 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Durch den globalen Klimawandel und den damit einhergehenden Trockenwetterlagen kommt es auch in den sonst wasserreichen Gebieten der Schweiz häufiger zu Trockenheit und Niedrigwasserperioden, welche unter anderem große Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben. Um negative Auswirkungen von Trockensituationen zu minimieren, besteht daher ein erhöhter Forschungsbedarf zu den natürlichen Wasserressourcen der Schweiz. Hierfür bedarf es der Evaluation und Quantifizierung von (neuen) Grundwasserressourcen. Für diese Untersuchungen könnten alluviale Schwemmfächer eine Rolle spielen, da deren Zuflüsse möglicherweise zur natürlichen lokalen Grundwasserneubildung beitragen und deren Sedimentkörper potenziell einen Teil des Grundwasserspeichers in voralpinen Flussgebieten darstellen. Die Grundwasserneubildung auf alluvialen Fächern, deren Möglichkeiten Wasser aus abflussreichen Perioden für Trockenzeiten zwischen zu speichern und das Potenzial somit zum Niedrigwassermanagement bei zu tragen, ist jedoch wenig erforscht.

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, das Speicherpotenzial von Schwemmfächern in voralpinen Flussgebieten der Schweiz zu untersuchen. Hierfür sollen die Sedimentvolumina von 38 Schwemmfächern zweier unterschiedlicher Untersuchungsgebiete bestimmt und die Interaktion zwischen dem Gerinne und dem Schwemmfächer für vier ausgewählte Fächer untersucht werden. Hieraus soll anschließend das gesamte Speicherpotenzial der Schwemmfächer abgeschätzt und bewertet werden.

Durch Hochwasserschutzmaßnahmen wurden in letzter Zeit immer mehr Zuflüsse der Schwemmfächer in alpinen Flussgebieten anthropogen überprägt (Begradigung, Verdichtung der Sohle). Diese Maßnahmen könnten zu einer Reduzierung der Grundwasserneubildung und Verringerung der natürlichen Speicherwirkung der Schwemmfächer Sedimentkörper führen. Zudem könnte es zu einer Reduzierung des grundwasserbürtigen Abflusses während Niedrigwasserperioden kommen. Daher ist die Untersuchung der Interaktion zwischen Schwemmfächer Gerinne und Schwemmfächer Körper in Hinblick auf Unterschiede in der anthropogenen Überprägung ein weiteres Ziel dieser Masterarbeit. Um dies zu untersuchen, sollen die In- und Exfiltrationen des Bachwassers in vier alluvialen Fächern und deren

unterschiedlichen stark anthropogen überprägten Gerinnen quantifiziert werden. Zusammengefasst ergeben sich hieraus folgende Fragen:

- Besitzen Schwemmfächer in voralpinen Flussgebieten ein relevantes Speicherpotenzial zum Abflussbeitrag während Niedrigwasserperioden?
- Kann eine einfache und direkte Methode entwickelt werden, um das potenzielle Speichervolumen von Schwemmfächern abzuschätzen?
- Haben unterschiedliche anthropogene Überprägungen Schwemmfächer und Gerinne eine Auswirkung auf die Grundwasserneubildung?
- Welches Potenzial haben Schwemmfächer für das Niedrigwassermanagement in voralpinen Flussgebieten?

2 **UNTERSUCHUNGSGEBIET**

2.1 Auswahl des Untersuchungsgebietes

Im Vorfeld dieser Arbeit musste ein geeignetes Untersuchungsgebiet gefunden werden. Mit Hilfe von Karten und Satellitenbildern der Schweiz wurde daher nach einem gut erschlossenen und erreichbaren Gebiet mit einer hohen Schwemmfächer Dichte gesucht. Zudem sollten die im Untersuchungsgebiet liegenden Schwemmfächer folgende Kriterien erfüllen:

- Gute Zuwegung und Begehrbarkeit
- Ähnliche Ausdehnung
- Ähnliche Abflussgrößen
- Unterschiedlich starke anthropogene Überprägung
- Ganzjährig Wasser führende Zuflüsse

Eine gute Zuwegung und Begehrbarkeit des Schwemmfächers ist als Grundvoraussetzung für eine durchführbare Abflussmessung anzusehen und mussten vor Ort überprüft werden. Um Abflussmessungen über einen längeren Zeitraum durchführen zu können, sollten die Zuflüsse der Schwemmfächer zudem ganzjährig Wasser führen.

Um die Auswirkungen von verschieden starker anthropogener Überprägung auf die Interaktion zwischen Schwemmfächer Körper und Fließgewässer zu untersuchen, sollten die gewählten Schwemmfächer eine ähnliche Ausdehnung und die beteiligten Bäche ähnliche Abflussgrößen aufweisen. Dies ermöglichte eine Gegenüberstellung der einzelnen Schwemmfächer und gewährleistete somit die Messergebnisse mehrerer Schwemmfächer zu vergleichen und zu kombinieren.

Bei meiner Suche nach einem geeigneten Untersuchungsgebiet habe ich mich daher auf Haupttäler in alpinen Gebieten mit einer möglichst großen Anzahl lateraler Zuflüsse konzentriert. Dabei wurde ich durch die Annahme gestützt, dass Zuflüsse aus Nebentälern durch eine drastische Fließgeschwindigkeitsreduzierung möglichst viele Schwemmfächer ausbilden. Nach eingehender Untersuchung fiel die Wahl für das Untersuchungsgebiet

schließlich auf das obere Walis, nördlich von Brig, in der Zentralschweiz. Die Erkundung vor Ort bestätigte viele ausgeprägte alluviale Fächer, welche in kürzeren Fahrzeiten mit dem PKW untereinander erreichbar waren. Die einzelnen Schwemmfächer waren zudem teilweise naturbelassen, durch Hochwasserschutzmaßnahmen verändert, oder durch Siedlungen auf dem Schwemmfächer stark anthropogen überprägt. Eine sichere Unterscheidung zwischen alten Hangrutschungen, überwachsenen alten Murenabgängen und rein alluvial gestalteten Fächern gestaltete sich jedoch sehr schwierig. Zudem wiesen viele der zunächst vielversprechenden Schwemmfächer keine Hauptgerinne oder Hauptgerinne, welche kein Wasser (mehr) führten, auf. Teilweise verband sich der eingeschnittene Hauptkanal auch vor dem distalen Ende des Kegels mit der Fächeroberfläche, was dazu führte, dass der Abfluss nicht mehr gebündelt, sondern auf der Oberfläche des Schwemmfächers stattfand. Ein weiteres Problem stellte die inhomogene Ausprägung der Schwemmfächer, bedingt durch unterschiedliche Fächergrößen, Abflussgrößen der zugehörigen Bäche und unterschiedlichem Bewuchs dar. Da häufig nur eine Talseite aufgrund von selten überquerbaren Vorflutern im Haupttal zugänglich war, die Bäche ein steiles Relief und teilweise einen extrem starken Abfluss aufwiesen, gestaltete sich auch die Begehrbarkeit der zu untersuchenden Fächer als nicht gegeben.

Insgesamt betrachtet stellte sich daher das Gebiet am oberen Walis leider als ungeeignet für die geplanten Messvorhaben heraus. Ermöglicht durch die enge Kooperation zwischen dem Hydrologischen Institut Freiburg und der Universität Neuchâtel an dem internationalen Forschungsprojekt „Auswirkungen der Klimaänderung auf das Grundwasser und Niedrigwasserverhältnisse in der Schweiz“ wurde anschließend ein weiteres mögliches Untersuchungsgebiet in Betracht gezogen. Dieses liegt im Alpenvorland bei Eggiwil, am Zusammenfluss von „Röthebach“ und „Emme“, circa 30 km von Bern entfernt. Durch die dort vorherrschende Geologie bedingt, versprach ich mir hier viele Schwemmfächer auf engerem Raum. Bei einer ersten Voruntersuchung konnten mehr als 30 Schwemmfächer Formen rund um den Zusammenfluss von „Emme“ und „Röthebach“ identifiziert werden. Näher betrachtet zeigte sich jedoch auch hier, dass einige der kleineren Fächer nicht ganzjährig an das Gewässernetz angeschlossen waren. Durch die starke landwirtschaftliche Nutzung in der Region Emmental kam es zudem häufig zu Verdohlungen und unterirdischen Ableitungen des Gerinnes. Eine gute und gefahrlose Begehrbarkeit war ebenfalls durch steile Böschungen, dichten Bewuchs oder Einzäunungen nur bedingt gewährleistet, was solide und vergleichbare Abflussmessungen erschwerte. Insgesamt betrachtet konnte das Gebiet aber

deutlich mehr potenziell geeignete Schwemmfächer und eine bessere Begehrbarkeit verglichen mit dem Alpinen Gebiet aufweisen. Die nähere Wahl fiel zunächst auf sechs Schwemmfächer und basierte auf folgenden Fächereigenschaften:

- Der Schwemmfächer war auf seiner gesamten Länge gut und gefahrlos begehbar.
- Abflussmessungen waren an unterschiedlichen Stellen auf dem Schwemmfächer möglich.
- Der Schwemmfächer war bei ähnlicher Ausdehnung und ähnlichem Abfluss unterschiedlich anthropogen überprägt.
- Ein nicht laminarer Fluss, welcher eine gute Durchmischung des Salztracers für die Abflussmessung nach der Salzverdünnungsmethode verspricht.
- Kleinere Überfälle in der Durchmischungsstrecke, welche die erforderliche Durchmischung des Tracers mit dem Wasser erhöhen .

Für die geplanten Messungen wurde schließlich ein 3 km² großes Gebiet mit dem „Röthebach“ als Vorfluter und ein 2 km² großes Gebiet mit der „Emme“ als Vorfluter gewählt. Insgesamt weisen beide Gebiete 38 alluviale Fächer auf von denen in jedem Untersuchungsgebiet zwei Schwemmfächer näher untersucht werden sollten. Im Untersuchungsgebiet „Emme“ handelt es sich hierbei um die Bäche „Dieboldsbach“ und „Holxbach“; im Untersuchungsgebiet „Röthebach“ um die Bäche „Wässerig“ und „Flühbach“ (Abbildung 2.1).

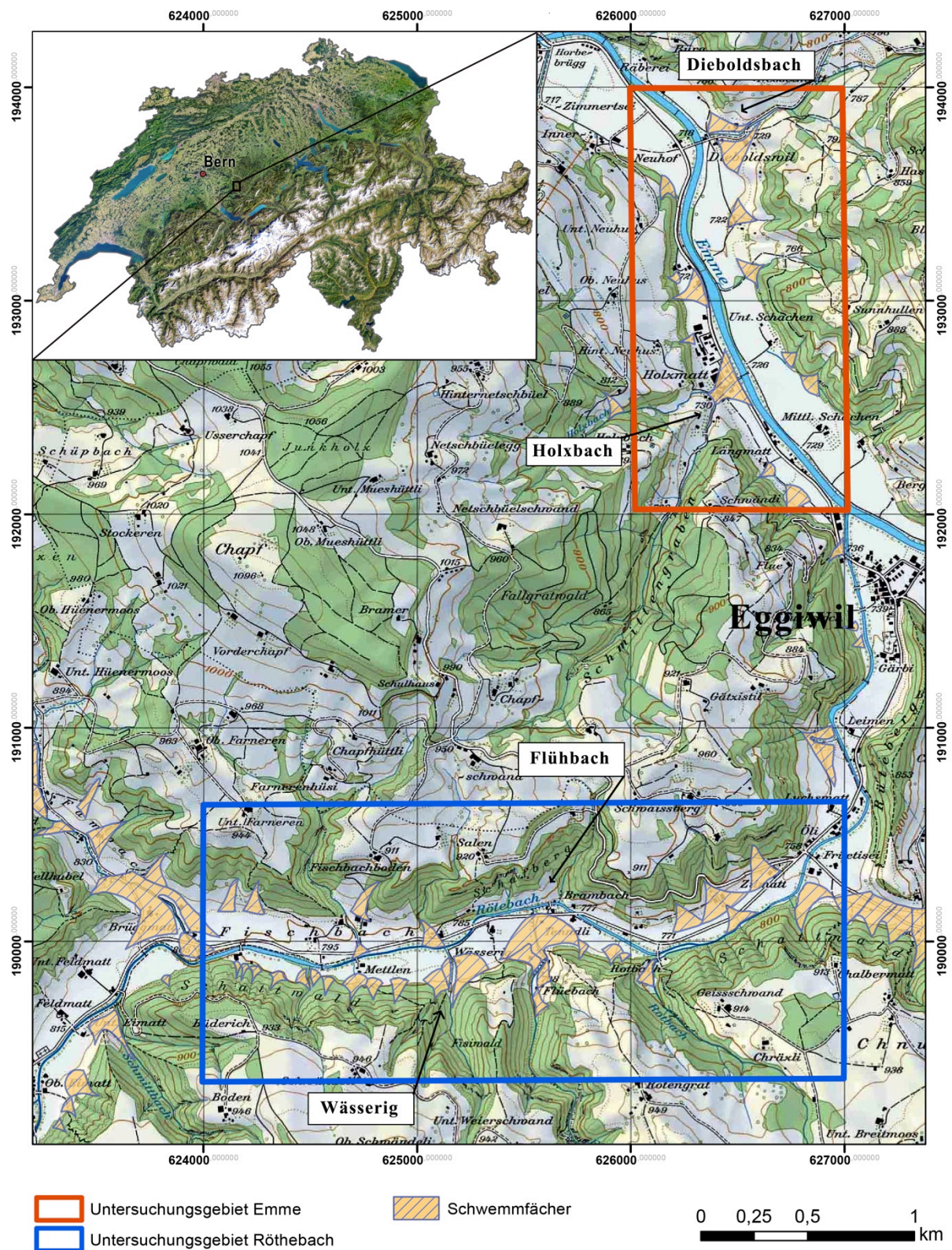


Abbildung 2.1: Übersichtskarte der Untersuchungsgebiete und Lage der Schwemmflächen.
(Datengrundlage Bundesamt für Landestopografie, 2015; Kanton Bern 2015)

2.2 Untersuchungsgebiet allgemein

Die Einzugsgebiete der Vorfluter in den Untersuchungsgebieten „Emme“ und „Röthebach“ (Abbildung 2.1) liegen im Übergangsbereich der Alpen zum Mittelland (ca. 30 km südöstlich von Bern entfernt) und sind geologisch durch die mittelländische Molasse geprägt. Die Molasse bildet auf weite Strecken den undurchlässigen Grundwasserstauer. Als typische Gesteinsarten treten Mergel, Mergel Sandsteine, Kalksandsteine, Sandsteine und polymikte Nagelfluh in Wechsellagerung auf (WEA, 1975). Der Nagelfluh ist ein möglicher Grund für das häufige Auftreten von Schwemmfächern im Untersuchungsgebiet. Die Vorfluter „Emme“ und „Röthebach“ werden bei der Gemeinde Eggiwil dem Abflussregime nivo-pluvial-préalpin zugerechnet. Das Einzugsgebiet der „Emme“ umfasst 127 km² mit einer durchschnittlichen Höhe von 1285 m (min. 743 m, max. 2216 m) und weist einen durchschnittlichen Jahressummen Niederschlag von 1559 mm a⁻¹ auf. Das Einzugsgebiet des Röthebachs umfasst 54,1 km² mit einer durchschnittlichen Höhe von 991 m (min. 731 m, max. 1542 m) und einem durchschnittlichen Jahressummen Niederschlag von 1099 mm a⁻¹ (Seeger und Weiler 2014). Bei Eggiwil betrug in den Jahren 1999 bis 2004 der mittlere Abfluss der „Emme“ 4,15 m³ s⁻¹, der des Röthebachs hingegen betrug 0,95 m³ s⁻¹. Die Täler des Röthebachs und der „Emme“ sind glazial vertieft und danach bis zu ihrem heutigen Stand mit Sediment aufgefüllt worden. Diese Lockergesteine stellen häufig gute Grundwasserspeicher dar. Den Hauptanteil der Talfüllung bilden spätwürmeiszeitliche bis postglazialen Schotter (WEA, 1975), welche im Untersuchungsgebiet eine mittlere Mächtigkeit von vier und zehn Metern aufweisen (Kanton Bern, 2015)

2.3 Beschreibung der Schwemmfächer

Im Folgenden werden die vier ausgewählten Schwemmfächer beschrieben und bezüglich ihrer anthropogenen Überprägung unterschieden.

- Wässerigfächer : naturbelassen
- Flühbachfächer : mäßig überprägt
- Holxmattfächer: stark überprägt
- Dieboldsbachfächer: stark überprägter Oberlauf , mäßig überprägter Unterlauf

Einen ersten Überblick geben Luftaufnahmen, welche mit einem Quadrokopter des Herstellers Horizon Modell Blade 350 QX3 und einer adaptierten Kamera der Firma Gopro erstellt wurden (Abbildung 2.2 – 2.4).

2.3.1 Wässerigfächer

Der Wässerig Fächer und das Hauptgerinn „Wässerig“ sind weitestgehend naturbelassen und werden daher als am geringsten anthropogen überprägt eingestuft. Der Schwemmfächer Körper ist bis auf einen kleinen zur Zeit der Messungen nicht bewirtschafteten Kuhstall unbebaut und weist keine Versiegelung auf. Das Hauptgerinne ist mit einer bis zu sieben Meter hohen Böschung stark eingeschnitten. Das durchgehend unbegradigte Bachbett hat keine künstliche Uferbefestigung. Kurz vor dem Schwemmfächer Fuß gibt es vier kleinere Rundholzstufen (< 20 cm), ansonsten ist die Sohle naturbelassen. Im oberen Teil konnte ein meandrierender Bachverlauf beobachtet werden (Abbildung 2.2).



Abbildung 2.2: Wässerigfächer.

2.3.2 Flühbachfächer

Der Flühbachfächer wurde aufgrund seiner Größe in zwei Messabschnitte („Flühbach“ 1 und „Flühbach“ 2) unterteilt (vergl. Kapitel Messabschnitte). Beide Abschnitte unterscheiden sich nur sehr gering und werden daher bei der folgenden Beschreibung nicht unterschieden. Der Fächer und sein Hauptgerinne „Flühbach“ weisen naturbelassene und anthropogen überprägte Abschnitte auf; er wird daher als mäßig überprägt eingestuft. Der Schwemmfächer Körper ist mit vier Wohnhäusern, einem Stall sowie einer asphaltierten Straße bebaut. Das Fächerland ist zu ca. 20 % versiegelt und zu ca. 30 % durch Ackerbau genutzt. Die restlichen 50 % sind Weideflächen. Die Sohle des Hauptgerinnes hat eine durchschnittliche Breite von zwei Metern. Im Bach gibt es sechs Betonstufen mit Höhen von 60- 100 cm und einem betonierte Tosbecken von drei bis vier Metern Länge. Zehn weitere kleinere Stufen werden teilweise durch Felsquader und teilweise durch Rundhölzer gebildet. Unabhängig davon ist die Sohle relativ naturbelassen. Die Böschung ist auf einer Fließstrecke von ca. 70 % mit großen Felsquadern befestigt und der Bachverlauf begradigt (Abbildung 2.3).



Abbildung 2.3: Flühbachfächer

2.3.3 Holxmattfächer

Der Bach des „Holxmatt“ Fächers weist keine natürlichen Abschnitte auf und wird daher als stark anthropogen überprägt eingestuft. Auf dem Schwemmfächer befindet sich eine große Maschinenbauliche Fertigungshalle, welche nahezu die gesamte Schwemmfächer Fläche bedeckt. Die Restfläche ist mit asphaltierten Straßen und mehreren Wohnhäusern bebaut. Somit ergeben sich eine Versiegelung von 90 % und eine Nutzung als Weideland von nur 10 %. Die Böschung des Baches ist auf einer Fließstrecke von ca. 80 % mit einer Betonwand und auf den restlichen 20 % durch große Steinquader befestigt. Der Bach weist mehrere bis zu 60 cm hohe künstliche Felsstufen auf. Die Bachsohle ist auf einer Fließstrecke von ca. 50 % betoniert. Auf den anderen 50 % macht sie einen stark kolmatierten Eindruck. An zwei Stellen konnten bis zu 150 cm tiefe Kolke beobachtet werden (Abbildung 2.4)



Abbildung 2.4: Holxmattfächer

2.3.4 Dieboldsbachfächer

Das Gerinne des Dieboldsbachfächers ist ähnlich dem des Flühbachfächers in zwei Abschnitte unterteilt (Dieboldsbach 1 und Dieboldsbach 2). In diesem Fall unterscheiden sich diese Bachabschnitte jedoch stark voneinander. So kann der untere Bachabschnitt als relativ naturbelassen, der obere Teil als stark überprägt eingeschätzt werden. Insgesamt befinden sich auf dem Schwemmfächer drei Bauernhöfe und eine asphaltierte Straße. Die Schwemmfächer Oberfläche weist eine zehn prozentige Versiegelung und eine 90 prozentige Weidelandnutzung auf. Der untere Teil des Baches ist relativ naturbelassen und weist nur wenige Abschnitte mit befestigter Böschung auf. Dennoch befinden sich auf einer relativ kurzen Strecke zehn Rundholzüberfälle mit einer Höhe von 30 – 70 cm. Der Bachverlauf ist nicht begradigt. Die starke Überprägung des oberen Abschnittes ist durch einen begradigten Verlauf und eine durchgehend befestigte Böschung bedingt, wobei sich Rundhölzer, Felsquader und Beton abwechseln. Etwa 30 % des Bachabschnittes weisen eine betonierte Sohle auf. Auch hier sieht die Sohle in den unbetonierten Abschnitten stark kolmatiert aus. Zudem konnten vier Betonstufen mit einer Höhe von bis zu 100 cm und sechs kleinere rundholzstufen beobachtet werden (Abbildung 2.5).



Abbildung 2.5: Dieboldsbachfächer. Oben rechts und unten rechts, oberer Messabschnitt; oben links und oben Mitte, unterer Messabschnitt.

3 UNTERSUCHUNGSMETHODIK

3.1 Allgemeine Vorgehensweise

Um das Speicherpotenzial von Schwemmfächern in voralpinen Flussgebieten abzuschätzen, wurde eine Methode entwickelt, deren Sedimentvolumina einfach und schnell für ein großes Gebiet bestimmen zu können. Die neu entwickelte Methode wurde mit einer Gis-gestützten Methode zur Volumenberechnung verglichen und auf alle 38 Schwemmfächer in den Untersuchungsgebieten angewandt. Zusätzlich wurden Abflussmessungen und Tracerrückhaltsanalysen auf den vier unterschiedlich anthropogen überprägten Schwemmfächer Gerinnen durchgeführt und deren Abflussänderungen quantifiziert und die In- und Exfiltrationsverhältnisse entlang der untersuchten Flussabschnitte charakterisiert. Dieses soll Aufschluss über die Möglichkeiten zur Grundwasserneubildung und der Interaktion zwischen gerinne und dem Schwemmfächerspeicher unter verschiedenen Bedingungen geben. Die angewandten Methoden sind im Folgenden genauer beschrieben.

3.2 Gis Analysen

3.2.1 Datengrundlage und Aufarbeitung

Für die Analysen und die Darstellung raumbezogener Geodaten wurde die Programme ArcMap 10.2.2 und ArcScene 10.2.2 des Softwarepaketes ArcGis der Firma ESRI sowie das open-source Geoinformationssystem QGIS 2.4.0 verwendet.

Der GIS gestützten Analyse der Schwemmfächer und deren Einzugsgebieten im Untersuchungsgebiet liegt ein Digitales Geländemodell (DGM) zu Grunde. Das verwendete DGM wurde vom Bundesamt für Landestopografie der Schweiz bereitgestellt und liegt in einer Rasterauflösung von 2 x 2 m vor. Der Download der Daten erfolgte über das Internetportal Swisstopo der Landestopografie (Swisstopo, 2015). Über dieses Portal wurden auch weitere raumbezogene Geodaten bezogen, wie: topografische Karten in unterschiedlichen Maßstäben, Gewässernetz und Daten über die Ausdehnung des Schotteraquifers im Röthebachtal und Emmental.

Die Lage und Ausdehnung der alluvialen Fächer wurde dem Kartenmaterial der Publikationsplattform für Geoinformationen der bernischen Kantonsverwaltung (Kanton

Bern, 2015) entnommen. Die Datengrundlage hierfür bildet die Geologische Grundlagenkarte des Amtes für Wasser und Abfall (AWA). Es handelt sich dabei um Informationen aus hydrologischen, geologischen und geophysikalischen Untersuchungen. Ausdehnung und Lage der Schwemmfächer konnten zum Teil auch aus Swistopo Daten entnommen werden. Diese lagen in dem ArcGIS kompatiblen Fileformat .shp vor. Da die Umrisse der Schwemmfächer teilweise nur in Form von Linien und nicht in der für spätere Flächen- und Volumenberechnung nötigen Polygon-Feature-Class vorlagen, mussten diese umgewandelt und den Daten des Kantons Bern angeglichen werden. Nach einem Vergleich beider Datensätze wurden fehlende Informationen manuell nachdigitalisiert. Die Flächen der Schwemmfächer wurden anhand Polygonumfänge berechnet und deren Ausdehnung und Lage visuell anhand von einer topografischen Karte überprüft.

Die Abgrenzung der zu den Schwemmfächern gehörenden Einzugsgebiete erfolgte nach dem gängigen Vorgehen für die GIS basierte Erstellung von Einzugsgebieten aus einem Geländemodell. Eine detaillierte Arbeitsanleitung ist beispielsweise auf der Homepage der Universität Washington (washington.edu, 2015) zu finden und soll daher hier nicht weiter ausgeführt werden. Die Hangneigung der unterschiedlichen Schwemmfächer wurde im GIS mit einer zonalen Statistik aus dem DGM berechnet.

Die heruntergeladenen Höhendaten liegen in Form von geographischen Koordinaten vor. Geographische Koordinaten beziehen sich auf die Oberfläche eines kugeligen bzw. ellipsoiden Körpers, in diesem Fall der WGS84 Rotationsellipsoid, und sind somit nicht projiziert. Um das DGM winkeltreu darzustellen sowie Flächen- und Volumenberechnungen durchführen zu können, musste der Datensatz zunächst in ein Koordinatensystem konvertiert werden. Da bis auf die Rasterdaten alle anderen Geodaten in den Schweizer Landeskoordinaten CH1903 vorliegen, wurden diese als Hauptkoordinatensystem festgelegt und für die Umprojektion verwendet. CH1903 ist das klassische Referenzsystem der Schweiz und wird auch bei amtlichen Vermessungen mit dem Referenzrahmen LV03 in den meisten Kantonen verwendet (Bundesamt für Landestopografie, 2008). Die ellipsoiden WGS84 Koordinaten können mit Hilfe einer Näherungsformel und einer Genauigkeit von ca. einem Meter direkt auf die Schweizer Projektionskoordinaten umgerechnet werden (Bundesamt für Landestopografie, 2008). Die Umrechnung erfolgte in ArcGis.

3.2.2 GIS gestützte Berechnung der Schwemmfächer Sedimentvolumina

Bisherige Studien beziehen sich bei der Beschreibung der Schwemmfächer Größe auf die Fläche und die Größe der Einzugsgebiete (u.a Bull, 1964; Denny, 1965; Blair und McPherson, 1994a; Allen und Horvius, 1998). Um eine Aussage über das Speicher Potenzial von Schwemmfächern treffen zu können, reicht eine Betrachtung der Fläche jedoch nicht aus. Hierfür muss die Mächtigkeit des Fächers als zweite Dimension hinzugezogen werden, um eine Aussage über ihren Speicher unter Zuhilfenahme ihres Volumens treffen zu können. Für diese Arbeit wurden zwei verschiedene Methoden zur Berechnung der Schwemmfächer Volumina angewandt. Im Folgenden wird die Durchführung der GIS-basierten Volumenmodellierung beschrieben.

Für die quantitative Bestimmung des Schwemmfächer Sedimentvolumens wurde das aufbereitete digitale Höhenmodell (Kapitel 3.2.1) verwendet und mittels ArcMap analysiert. Um in ArcMap das Volumen innerhalb eines Rasterdatensets zu bestimmen, wurde das Werkzeug „Oberflächenvolumen“ des Toolsets „Oberflächenfunktionen“ aus der Toolbox „3D Analyst“ verwendet. Mit Hilfe dieses Werkzeuges konnte das Volumen einer Rasteroberfläche in Bezug auf eine frei wählbare Basishöhe oder eine gegebene Referenzebene berechnet werden (Abbildung 3.1)

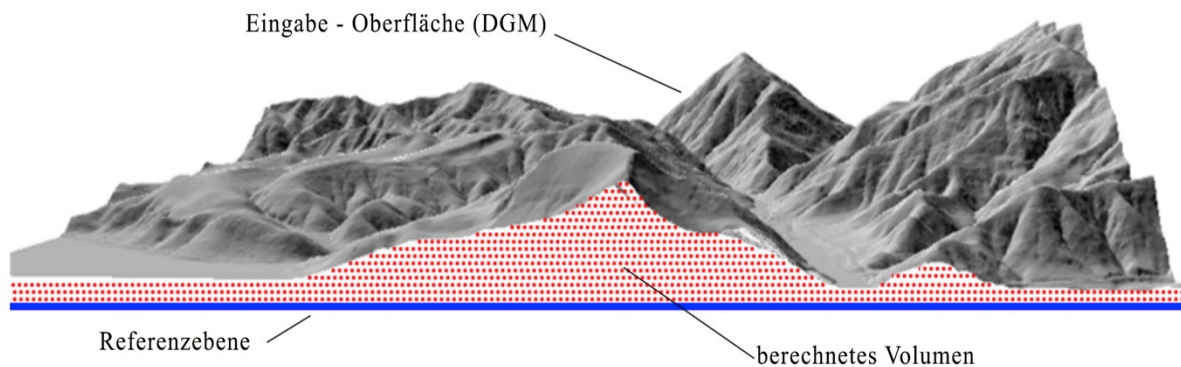


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der GIS- basierten Volumen Berechnung (verändert nach ArcGis Help, 2015).

Bei einer Eingabe- Oberfläche- wie dem hier verwendeten DGM -, welche aus Rasterdaten besteht, musste zunächst eine Dreiecksvermaschung erstellt werden. Hierbei werden die Zellmittelpunkte der Raster zu Dreiecken verbunden und ein so genanntes TIN (Triangulated

Irregular Network) erstellt. Anschließend wird für jedes Dreieck der Anteil am Volumen über der Referenzebene bestimmt (ArcGis Help, 2015). Diese wurde vorher für jeden einzelnen Schwemmfächer erstellt. Hierfür konnte der niedrigste Punkt des Schwemmfächers (Schwemmfächer Fuß) als Bezugshöhe (Z_Factor) verwendet werden. Durch die Wahl des niedrigsten Schwemmfächer Punktes wurde festgelegt, dass sich die Referenzebene unterhalb der Schwemmfächer Oberfläche befindet. Die Ausgabe der berechneten Werte erfolgte in einer Textdatei und enthält folgende Informationen:

- Plane_Height
- Reference
- Z_Factor
- Area_2D, Area_3D
- Volume.

Damit sichergestellt werden konnte, dass ausschließlich das Schwemmfächer Volumen berechnet wird, musste jeder Schwemmfächer einzeln aus dem DGM ausgeschnitten und als eigenständiges DGM gespeichert werden. Hierfür wurde das Clip-Werkzeug des Toolsets „Raster“ aus der Toolbox „Data Management“ verwendet. Als Vorlage für das Ausschneiden konnten die in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Schwemmfächer Polygone genutzt werden.

Um das gesamte SpeicherPotenzial der Schwemmfächer in den beiden Untersuchungsgebieten abzuschätzen, wurden die Volumina nicht nur für die in dieser Arbeit näher untersuchten Fächer „Wässerig“, „Flühbach“ und „Dieboldsbach“ berechnet, sondern auch für alle 27 weiteren Fächer des 3 km² großen Untersuchungsgebietes „Röthebach“ und alle 11 Fächer des Untersuchungsgebietes „Emme“ bestimmt. Die Lage und Bezeichnung der Schwemmfächer kann den Abbildungen 3.3 und 3.4 im folgenden Kapitel entnommen werden

3.3 Entwicklung einer direkten Methode zur Berechnung der Schwemmfächer Volumina

Da für jeden Schwemmfächer eine andere Bezugshöhe gilt, muss jeder Fächer einzeln aus dem DEM Datensatz extrahiert und zusätzlich auch für jeden Fächer eine eigene Referenzebene erstellt werden. Die vorgestellte Gis-basierte Berechnung der Schwemmfächer Volumen ist daher aufwendig und in ihrer Durchführung sehr zeitintensiv. Für größere Gebiete erfordert sie außerdem einen sehr großen Datensatz. Für die Abschätzung der

Schwemmfächer Volumen wurde daher im Rahmen dieser Arbeit nach einer einfacheren Methode gesucht, deren Durchführung eventuell auch ohne DGM möglich ist.

Die typische Aufschüttungsform eines Schwemmfächers erinnert an einen Halbkegel (vergl. Kapitel 1) und legt daher die Volumenberechnung aufgrund der Kegelgeometrie nahe. Die mathematische Formel für das Volumen eines Kegels mit einer vollen Kreisfläche lautet:

$$V_{Kegel} = \frac{1}{3} * \pi r^2 * h \quad (1)$$

Wird der Schwemmfächer der Länge nach visuell angeschnitten, so sind die geometrischen Zusammenhänge wie in Abbildung 3.2 zu erkennen. Hierbei wird ersichtlich, dass „r“ für die Schwemmfächer Länge und „h“ für die Differenz zwischen dem Schwemmfächer Fuß und dem Schwemmfächer Apex verwendet werden können.

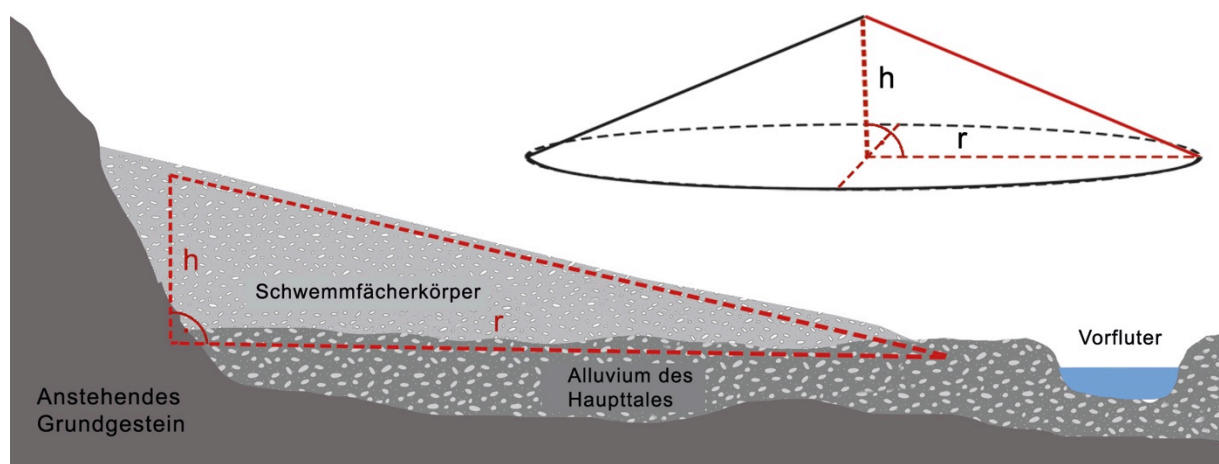


Abbildung 3.2 : Schematische Darstellung eines longitudinalen Schwemmfächer Anschnittes und dessen Gemeinsamkeiten mit der Kegelgeometrie.

Ein „optimaler“ Schwemmfächer beschreibe die Form eines Halbkegels und sein Volumen könnte daher leicht mit Hilfe der $\frac{1}{2} V_{Kegel}$ Formel berechnet werden. Schwemmfächer weisen jedoch selten eine halbkreisförmige Grundfläche auf und zeigen viel häufiger eine große Variation zwischen einem Halbkreis und sehr schmalen Kreissegmenten. Daher musste die

Formel für die Kegelberechnung auf den jeweiligen Winkel innerhalb der geometrischen Schenkel auf $1/x \cdot V_{\text{Kegel}}$ reduziert werden (x = Kreissegment). Daraus folgt:

$$V_{\text{GEOMETRIE}} = 1/x \cdot V_{\text{Kegel}} \quad (2)$$

$V_{\text{GEOMETRIE}}$ bezeichnet hierbei das über die Kegelgeometrie berechnete Volumen der unterschiedlichen Schwemmfächer. Als Grundlage hierfür diente eine optische Abschätzung der Schwemmfächer Teilsegmente anhand der folgenden Karten (Abbildung 3.3 und 3.4). Zur Vereinfachung konnten die Werte für die Schwemmfächer Länge und Höhe aus den DGM-Daten ausgelesen werden; hierfür könnte aber auch eine topografische Karte mit kleinem Maßstab herangezogen werden. Die visuelle Abschätzung der Kreissegmente ist in Tabelle 4.1 (Kapitel 4.1) aufgeführt. Hierbei wurden die einzelnen Schwemmfächer für die geometrische Volumenbestimmung durchnummeriert (vergl. Abbildung 3.3). Die so berechneten Volumina ($V_{\text{GEOMETRIE}}$) werden im Ergebnisteil hinsichtlich ihrer Genauigkeit mit den mittels Gis berechneten Volumina (V_{GIS}) verglichen und somit geprüft.

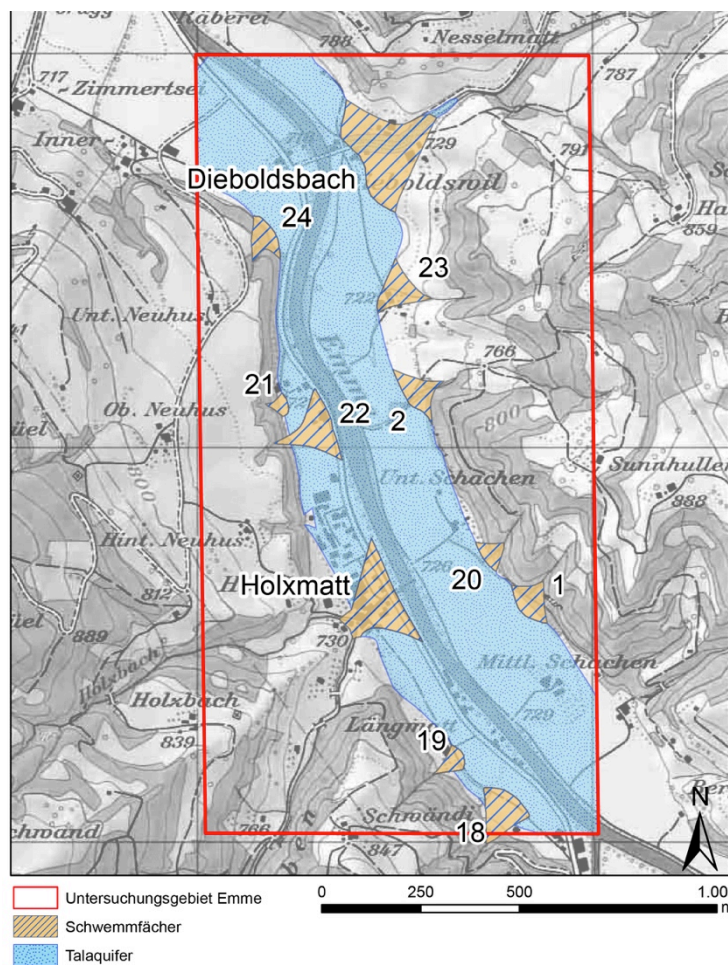


Abbildung 3.3: Lage, Bezeichnung und Ausdehnung der Schwemmfächer sowie des Talaquifers im Untersuchungsgebiet Emme.

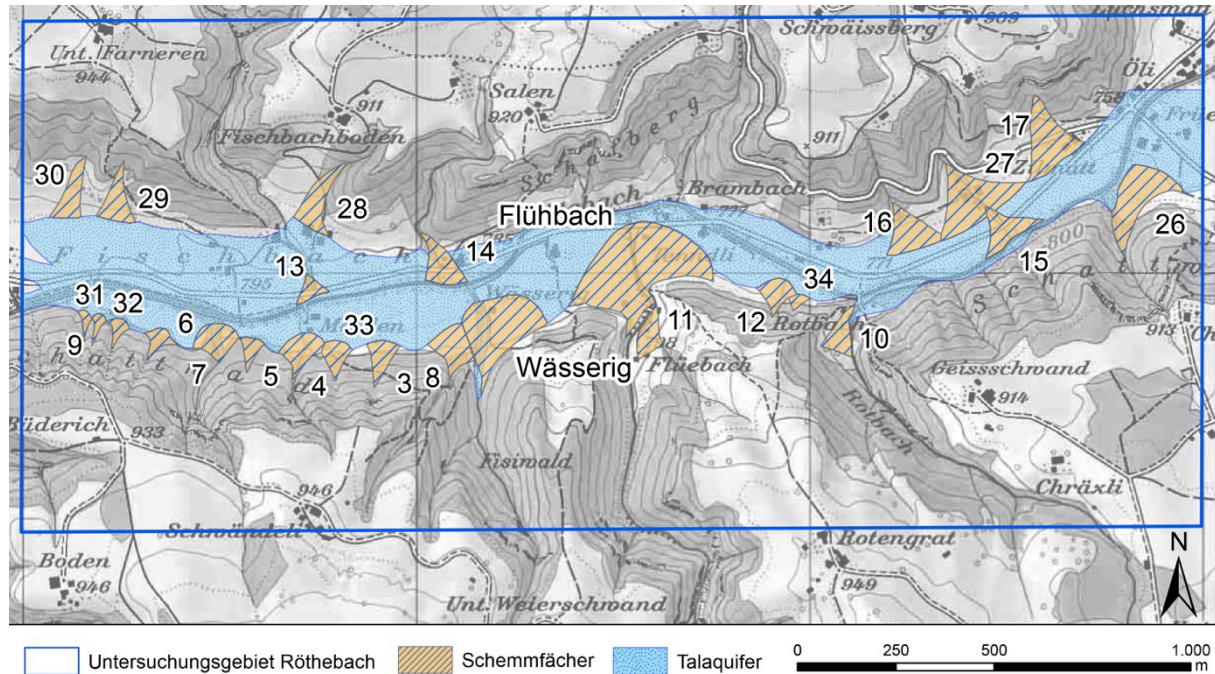


Abbildung 3.4: Lage, Bezeichnung und Ausdehnung der Schwemmfächer sowie des Talaquifers im Untersuchungsgebiet Rötthbach.

3.4 Berechnung der Talaquifer Volumina

Um einen Eindruck zu gewinnen, welche Relevanz der Gesamtspeicher aller Schwemmfächer im Vergleich zum Talaquifer hat, wurde zusätzlich zum Schwemmfächer Volumen auch das Volumen der Talaquifere in den beiden Untersuchungsgebieten berechnet. Die Ausdehnung der Talaquifere kann der Abbildung 3.3 und 3.4 entnommen werden. Als Datengrundlage dienten hierbei die in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Talaquiferpolygone. Deren Fläche wurde in ArcMap über den Polygonumfang bestimmt. Für die durchschnittliche Mächtigkeit des Alluviums der beiden Untersuchungsgebiete wurden vier Meter für das Untersuchungsgebiet „Rötthbach“ und zehn Meter für das Untersuchungsgebiet „Emme“ angenommen (Kapitel 2.2).

3.5 Theoretischer Hintergrund der Abflussmessungen und Tracerrückhaltanalysen

Für die Abflussmessungen, die als Grundlage für die Quantifizierung der Interaktion zwischen Schwemmfächer Gerinne und Schwemmfächer Sedimentkörper sowie der lokalen Grundwasserneubildung dienen sollen, wurde die von Allen und Taylor (1923) entwickelte Salzverdünnungsmethode angewandt. Hierbei wurde eine definierte Menge Salz als Markierungsstoff (Tracer) an einer Injektionsstelle in das Gewässer gegeben und anschließend deren Verdünnung nach dem Durchfließen einer bestimmten Messtrecke bestimmt (Abbildung 3.5). Bei einem puls- oder schwallartigen Eintragen des Tracers handelt es sich um die sogenannte Integrationsmethode. Diese Messmethode wird häufig bei einem nicht laminarem Fließverhalten des Gewässers und unregelmäßigen Durchflussquerschnitten verwendet. Bei der Durchführung und Auswertung der Abflussmessungen habe ich mich an der Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst Baden- Württemberg (LFU, 2002) und dem Handbuch für Abflussmengenbestimmung der Landeshydrologie- und Geologie der Schweiz (Spreafico und Gees, 1994) sowie an Untersuchungen von Rieckermann et al. (2005) und Payn et al. (2009) orientiert.

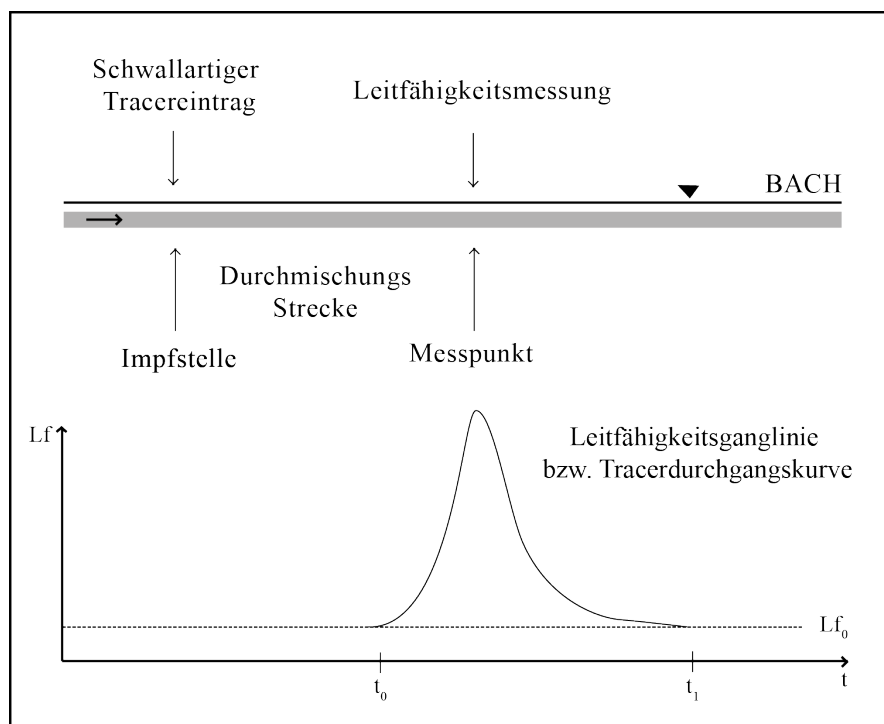


Abbildung 3.5: Integrationsmethode bzw. Salzverdünnungsmethode (vergl. Spreafico und Gees, 1994; LFU, 2002 und Rieckermann et al., 2005)

Für die durchgeführten Abflussmessungen wurde handelsübliche Kochsalzlösung (NaCl-Lösung) als Tracer verwendet weshalb die Methode im Folgenden auch als Salzverdünnungsmethode bezeichnet wird. Natriumchlorid ist der am häufigsten genutzte Salztracer, da er preiswert, leicht zu handhaben, einfach messbar und toxikologisch unbedenklich ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich NaCl nahezu ideal verhält und als konservativer Tracer weder der Sorption, noch dem photolytischen Abbau unterliegt. Nachteilig kann jedoch unter Umständen die hohe Hintergrundbelastung an gelösten Salzen im Gewässer sein, welche den Einsatz sehr große Tracer Mengen erfordern kann. Geringe NaCl Mengen würden ansonsten unterhalb der Nachweisgrenze liegen (Leibundgut et al., 2011). Dies konnte bei den untersuchten Bächen auf Grund der geringen Abflussmengen vernachlässigt werden. Der Salzverdünnungsmethode liegt die Tatsache zugrunde, dass sich die Verdünnung der eingespeisten Tracer Menge proportional zum Abfluss verhält (LFU, 2002). Dies gilt jedoch nur bei einer vollständigen Durchmischung des Markierungsstoffes mit dem fließenden Wasser. Die Verdünnung der Tracer Konzentration wird nicht direkt über die Salzkonzentration, sondern indirekt über die elektrische Leitfähigkeit gemessen. Anschließend kann über die gemessene elektrische Leitfähigkeit die resultierende Durchgangskurve für die Abflussbestimmung integriert werden.

Um eine vollständige Durchmischung zu gewährleisten, sollte eine geeignete Durchmischungsstrecke (Abbildung 3.5) zwischen der Impfstelle und dem Messwertgeber eingehalten und ein möglichst turbulenter Gewässerabschnitt gewählt werden. Die Länge der Durchmischungsstrecke hängt dabei von den vorherrschenden Fließbedingungen ab. Generell gilt, dass sich die Durchmischung mit zunehmender Durchmischungsstrecke verbessert. Eine lange Durchmischungsstrecke birgt aber auch das Risiko eines zu starken Tracer Verlustes, was die Genauigkeit der Messung negativ beeinflussen kann.

Eine Eichgerade ermöglicht den Rückschluss von der gemessenen Leitfähigkeit auf die vorliegende Salzkonzentration. Dabei wird die Steigung der Eichgerade als Eichkoeffizient (α) bei der Umrechnung der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit in Salzkonzentrationen verwendet. Für die Erstellung der Eichgrade wird dem Bach ein definiertes Eichvolumen entnommen und die Hintergrundleitfähigkeit mit dem verwendeten Leitfähigkeitsmessgerät gemessen. Anschließend wird durch die schrittweise Zugabe einer bestimmten Menge NaCl-Lösung die Ionenkonzentration und damit die elektrische Leitfähigkeit erhöht. Ist der Eichkoeffizient und damit der Zusammenhang zwischen

Leitfähigkeit und Salzkonzentration bekannt, kann mit der Einspeisung des Tracers und der Aufzeichnung der Durchgangskurve begonnen werden. Wichtig ist hierbei den gesamten Tracer Durchgang zu erfassen, um die Auswertung aufgrund der Massenerhaltung nicht zu verfälschen. Der Messdurchgang sollte daher erst dann beendet werden, wenn sich die Hintergrundkonzentration des Gewässers erneut eingestellt hat und die eingespeiste Salzmenge vollständig die Messstelle passiert hat. Sobald sich dieser Wert an der Messsonde eingestellt hat, kann der Abflusswert durch das Integrieren der Tracer Durchgangskurve und des Mischungsverhältnis zwischen Salz und Wasser, wie folgt ermittelt werden:

$$Q = \frac{M}{\alpha \int_{t_0}^{t_1} (Lf_1 - LF_0) * dt} \quad (3)$$

mit: Q_i : Abflusswert aufgrund der Messergebnisse der Sonde i [l s^{-1}]
 M : eingespeiste Salzmenge [mg]
 α : Steigung der Eichgeraden
 t_0 : Zeit zu Beginn des Tracerdurchganges
 t_1 : Zeit am Ende des Tracerdurchganges
 Lf_1 : Leitfähigkeit des Wassers nach der Salzeingabe [$\mu\text{S cm}^{-1}$]
 Lf_0 : Hintergrundleitfähigkeit [$\mu\text{S cm}^{-1}$]
 dt : Messintervall [s]

Durch die Durchführung der Integrationsmethode an zwei Messpunkten eines Bachabschnittes, können die so gewonnenen Abflusswerte anschließend genutzt werden, um eine Nettobilanz zu berechnen.

3.5.1 Nettobilanz (Net ΔQ)

Für die Erstellung einer Nettobilanz eines Bach- oder Flussabschnittes wird mit Hilfe der Salzverdünnungsmethode an dem Messpunkten (P_U) am oberen Ende des Abschnittes und P_D am unteren Ende des Abschnittes der Abfluss bestimmt (u.a Ruehl et al., 2006; Covino und McGlynn 2007; Payn et al. 2009). Hierfür wird jeweils wie schon erläutert eine definierte Menge Salz oben M_U und unten M_D eingespeist. Die obere Sonde registrierte hierbei den Tracer Durchgang $C_U(t)$ am oberen Messpunkt P_U . Die untere Sonde am Messpunkt P_D zeichnete die Durchgangskurve $C_D(t)$ von der Einspeisung M_D unten auf (Abbildung 3.6).

Die Nettoänderung (Net ΔQ) kann danach über die Differenz des am Punkt P_U ermittelten Abfluss Q_U und dem an Punkt P_D ermittelten Abfluss Q_D berechnet werden:

$$Net\Delta Q = Q_D - Q_U \quad (4)$$

So kann Bestimmt werden, ob der Abfluss an der stromabwärts gelegenen Messstelle gegen über der oberen Messstelle zu oder abnimmt. Über die Nettobilanz kann somit eine Aussage getroffen werden, ob zu dem Zeitpunkt der Messungen, innerhalb des Messabschnittes, effluente oder influente Bedingungen vorherrschen.

Die Interaktion zwischen Gerinne und Umgebung (in diesem Fall dem Schwemmfächer Körper) kann aber nicht als in eine Richtung ablaufend angesehen werden. Die Infiltrations- und Exfiltrationsprozesse laufen bidirektional ab (*Payn et al., 2009*). Es gibt Punkte innerhalb der Messtrecke in denen Wasser exfiltriert aber gleichzeitig gibt es Stellen an denen Wasser infiltriert. Es kann also sein, dass die Net ΔQ annähernd 0 ist und somit auf eine geringen Austausch zu schließen wäre aber eigentlich deutliche Exfiltrationsprozesse stattfinden die an ander Stelle durch Infiltration wieder ausgeglichen werden. Diese hydrologischen brutto Gewinne und Verlust werden im Folgend als Q_{GAIN} und Q_{LOSS} bezeichnet (wobei Q_{GAIN} positiv und Q_{LOSS} negativ ist). Die Nettoänderung ergibt sich demnach über die Summe von Q_{GAIN} und Q_{LOSS} :

$$Net\Delta Q = Q_D - Q_U = Q_{GAIN} + Q_{LOSS} \quad (5)$$

3.5.2 Brutto Zu- und Abflüsse (Q_{GAIN} und Q_{LOSS})

Die Hydrologischen Brutto Veränderungen Q_{GAIN} und Q_{LOSS} können über den Tracerverlust (M_{LOSS}) quantifiziert werden der sich zwischen P_U und P_D einstellt. Für diese Analyse muss am Unteren Messpunkt zusätzlich zu der Durchgangskurve $C_U(t)$ auch die Durchgangskurve $C_{UD}(t)$ des oben eingespeisten Tracer Menge M_U aufgezeichnet werden (Abbildung 3.6).

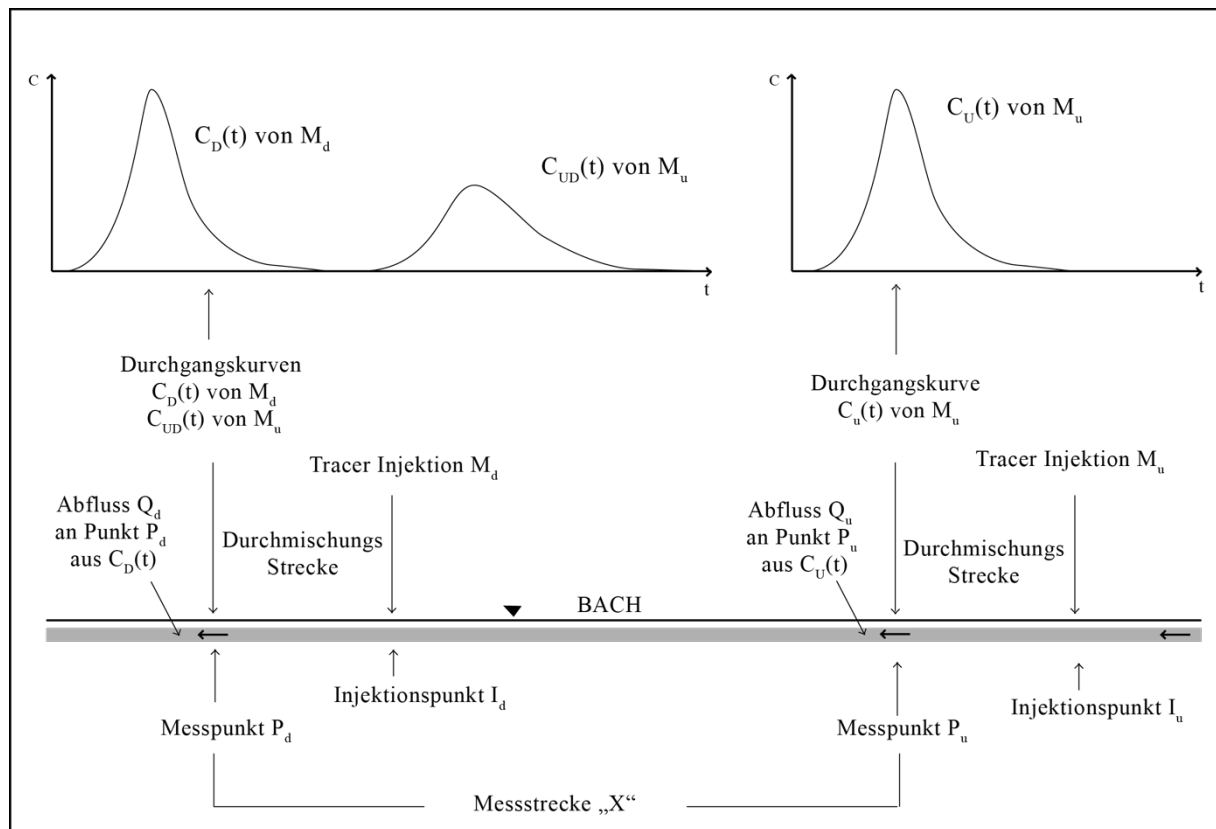


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der Tracerversuche für die Ermittlung der Nettobilanz ($\text{Net}\Delta Q$) sowie der Bruttogewinne und -verluste (Q_{GAIN} , Q_{LOSS}) (vergl. Payn et al., 2009).

Um M_{LOSS} bestimmen zu können, muss zunächst der Rückerhalt (M_{REC}) des eingespeisten Salzes ermittelt werden. M_{REC} errechnet sich aus dem Integral der Tracerdurchgangskurve $C_{UD}(t)$, multipliziert mit dem Abfluss Q_D (Unter der Annahme, dass Q_D über den Messzeitraum Konstant ist):

$$M_{\text{REC}} = Q_D \int_{t_0}^{t_1} C_{UD}(t) dt \quad (6)$$

Der Salzverlust (M_{LOSS}) berechnet sich aus der Subtraktion der eingespeisten Salzmenge (M_U) und des zuvor berechneten Rückerhalts (M_{REC}):

$$M_{\text{LOSS}} = M_{\text{REC}} - M_U = Q_D \int_{t_0}^{t_1} C_{UD}(t) dt - M_U \quad (7)$$

Der hydrologische Bruttoverlust Q_{LOSS} ist mit dem prozentualen Anteil Salzverlust ($\% \text{Loss}$) von M_U gleich zu setzen. Um $\% \text{Loss}$ zu erhalten, kann M_{LOSS} durch M_U dividiert werden. Anschließend kann der Hydrologische Bruttogewinn (Q_{GAIN}) auf Grundlage der Massenerhaltung folgendermaßen berechnet werden:

$$Q_{\text{Gain}} = \text{Net}\Delta Q - Q_{\text{Loss}} \quad (8)$$

(vergl. Zellweger et al., 1989; Rieckermann et al., 2005; Payn et al., 2009)

3.6 Praktische Durchführung

Um eine möglichst lange Zeitspanne abzudecken, wurden die Messungen für diese Arbeit zwischen November 2014 und Juni 2015 durchgeführt (Abbildung 3.7). Dabei habe ich versucht bei einem Teil der Messtage die Messzeitpunkte so zu wählen, dass ihnen eine Niedrigwasserperiode vorrausgeht. Dies sollte gewährleisten, dass ausschließlich Grundwasser- bezogene und keine Oberflächenwasser -bezogene Zuflüsse gemessen werden. Da für die zu untersuchenden Bäche keine Pegelinformationen zur Verfügung standen, habe ich mich hierfür an aktuellen Niederschlagsdaten des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie der Schweiz (MeteoSchweiz, 2015) orientiert.

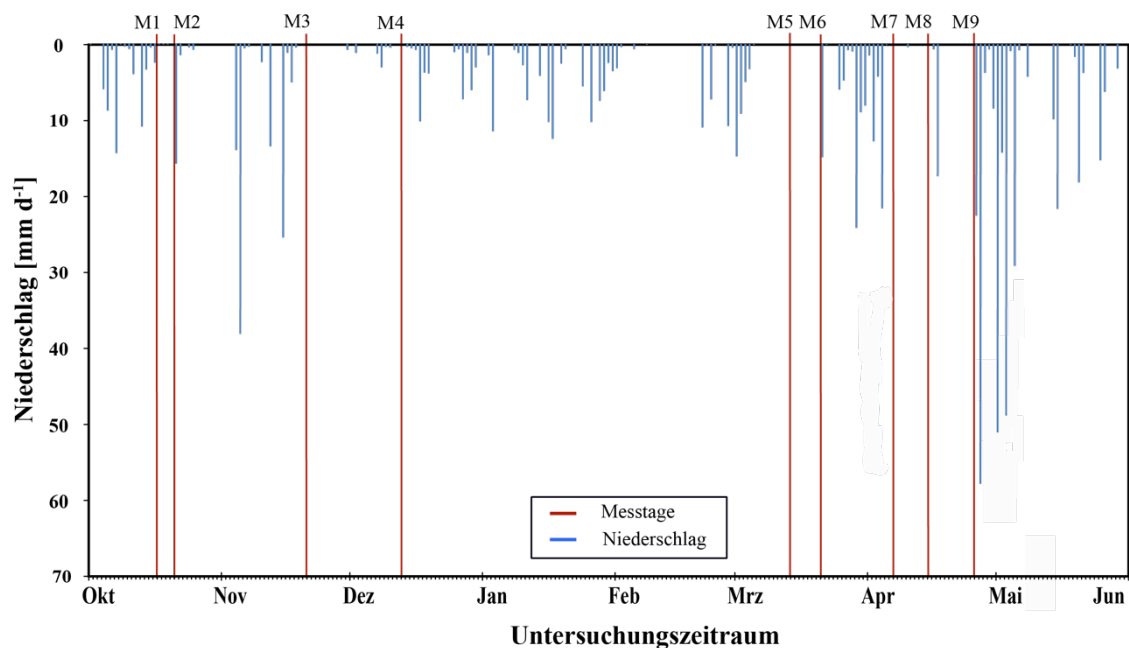


Abbildung 3.7: Messtage und Niederschlags Tagessummen im Untersuchungszeitraum Oktober 2014 – Juni 2015 (Niederschlagsdaten MeteoSweiz, 2015).

Zusätzlich zu den Messungen bei Niedrigwasserbedingungen habe ich zudem Messungen bei unterschiedlichen Abflussereignissen durchgeführt um generelle Aussagen über Zuflüsse und Versickerung treffen zu können. Da die gewählte Untersuchungsmethode bei Niederschlägen nicht durchführbar ist, war zudem eine genaue Planung der Feldmesskampagnen mit Hilfe von verlässlichen Wettervorhersagediensten (z.B. Meteoblue.com) eine wichtige Voraussetzung für einen erfolgreichen Messtag. Eigentlich waren auch Messungen während der Wintermonate geplant. Diese Messungen konnten jedoch nicht durchgeführt werden, da eine andauernde hohe Schneedecke den Zugang zu den Messabschnitten und somit auch die Messungen unmöglich machte. Daher wurden zwischen Mitte Dezember und Mitte März keine Feldversuche durchgeführt. Die meteorologischen Bedingungen an den jeweiligen Messtagen wie Lufttemperatur, Bewölkung, Schneebedeckung und geschätzte Vorfeuchte des Bodens können den Metadaten der Messergebnisse entnommen werden und werden demnach hier nicht weiter aufgeführt.

3.6.1 Probemessungen und Festlegung der Messpunkte

Vor der ersten Messung wurden, folgende Punkte anhand einer ausgiebigen Geländeerkundung und Probemessung festgelegt:

- Auswahl der Messgeräte
- Messpunkte
- Durchmischungsstrecke
- Tracer Menge
- Messintervall

Auswahl der Messgeräte

Für die Leitfähigkeitsmessungen standen zwei verschiedene Systeme zur Verfügung:

1. System bestehend aus zwei unabhängig voneinander verwendbaren MultiLine® Multi 3410 IDS Geräten der Firma WTW mit TetraCon25 Leitfähigkeitssonden.
2. System TQ Tracer der Firma Sommer, bestehend aus zwei mit Sendern versehenen Leitfähigkeitssonden. Die Messwerte können hier direkt per Bluetooth auf einen

Rechner übertragen und mit der zugehörigen Software der Firma Sommer live analysiert werden.

Bei vorliegender Sichtverbindung ermöglicht das zweite System für die Leitfähigkeitsmessungen eine Verbindungsreichweite von bis zu 100 m. Da diese Sichtverbindung jedoch durch Bewuchs, Bebauung oder tief in den Schwemmfächer eingeschnittenes Gerinne nicht immer gegeben war, habe ich mich für das MultiLine System entschieden. Dieses besitzt einen internen, programmierbaren Datenlogger und erlaubt so eine automatische Datendokumentation. Nachteilig hierbei ist jedoch, dass die Abflusswerte nicht sofort vorliegen, sondern erst am PC ohne dazugehörige Software berechnet werden müssen. Vorteile der Multigeräte sind ihre Handlichkeit sowie leichte Installation im Feld und eignen sich daher für die portable Leitfähigkeitsmessung unter allen Bedingungen im Freiland.

Messpunkte:

Die jeweiligen Messpunkte wurden so gewählt, dass ein Messpunkt im distalen Schwemmfächer Bereich und ein anderer so nahe wie möglich am Fächerapex liegt. Bei den beiden kleineren Fächern „Wässerig“ und „Holxmatt“ ergab sich daraus eine Messtrecke von ca. 100 m. Um eine Vergleichbarkeit der einzelnen Fächer zu gewährleisten, wurde diese Strecke dann für alle anderen Fächer übernommen. Die beiden anderen Fächer wurden auf Grund ihrer Größe in jeweils zwei Messabschnitte bzw. Bachabschnitte unterteilt: beim Flühbachfächer diente der obere Messpunkt des unteren Messabschnittes gleichzeitig als Endpunkt des oberen Bachabschnittes (Abbildung 3.8). Der Fächer des Dieboldbaches wurde hingegen in zwei räumlich getrennte Messabschnitte unterteilt, da ansonsten keine gute Zugänglichkeit aller Messpunkte gegeben war. Die Längen der einzelnen Abschnitte zwischen den Messpunkten wurden mit einem Maßband vermessen. Um eine spätere Reproduzierbarkeit der Abflussmessungen zu gewährleisten, wurden zusätzlich sowohl die Messpunkte als auch die Durchmischungsstrecken mit Hilfe eines GPS- Gerätes der Firma Garmin (eTrex Vista HCx) eingemessen. Mit Hilfe des Programmes „DNRGPS“ des Minnesota Department of Natural Resources konnten die aufgezeichneten GPS- Koordinaten in ArcGis importiert werden.

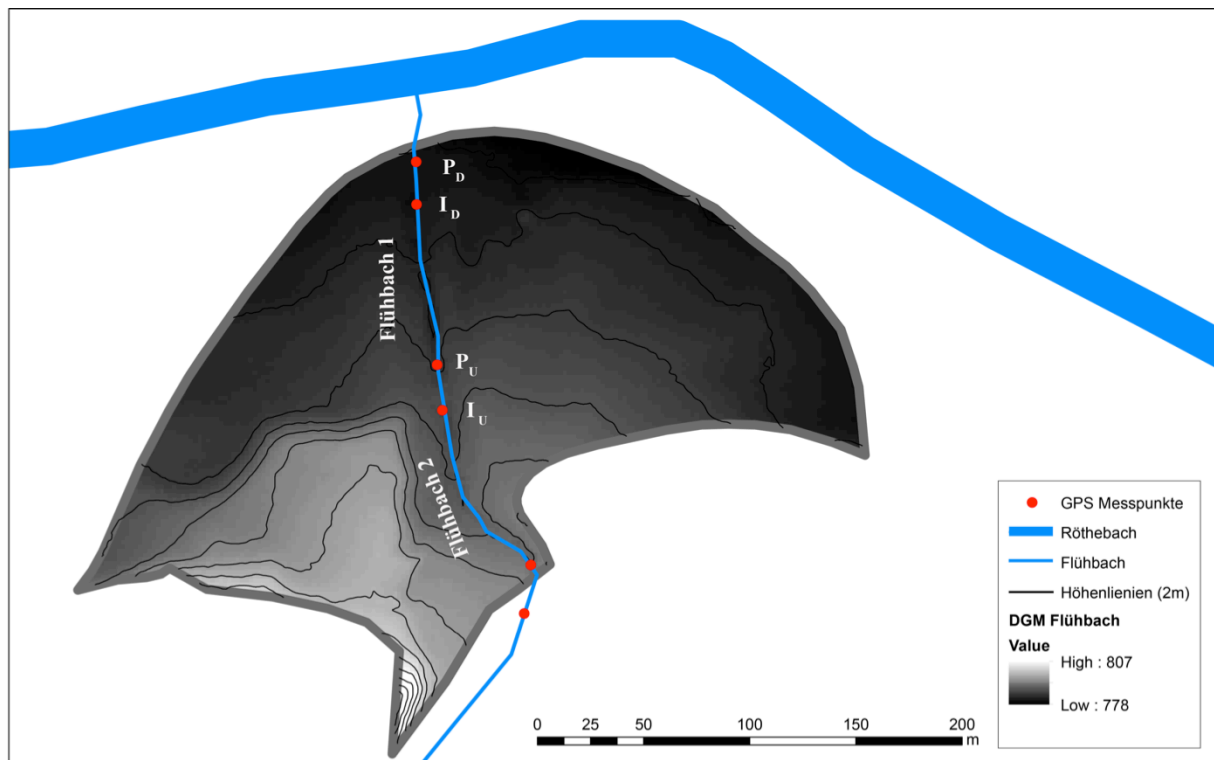


Abbildung 3.8: Lage der Mess- und Injektionspunkte des Flühbachfächers.

Durchmischungsstrecken:

Die Fließgewässerlänge zwischen der Tracer Injektionsstelle und der Messstelle der Leitfähigkeitssonde ist die sogenannte Durchmischungsstrecke. Um Fehler in der Abflussmessung, die durch eine unvollständige Durchmischung des Tracers mit dem Bachwasser entstehen können, zu vermeiden, ist es daher wichtig, eine ausreichend lange Durchmischungsstrecke festzulegen. Generell gilt hierbei: je länger und turbulenter die Durchmischungsstrecke, desto besser die Durchmischung, sowie: je höher der Abfluss, desto länger der Fließweg bis zur vollständigen Durchmischung. Bei kleinen, turbulenten Abflüssen in unregelmäßig geformten Gerinnen wird somit eine vollständige Durchmischung nach einer relativ kurzen Strecke erreicht. Zudem sollte gewährleistet sein, dass ein möglichst 100 prozentiger Tracer Rückhalt vorliegt und die Verluste durch exfiltrierendes Wasser innerhalb der Durchmischungsstrecke im Verhältnis zum Messabschnitt vernachlässigbar gering sind. Daher entspricht die Länge der Durchmischungsstrecke nur einem sehr viel kleineren Teil der Länge der Messtrecke. Zusätzlich hätte eine lange Durchmischungsstrecke einen geringeren Maximalanstieg der Durchgangskurve, einen längeren Tracer Durchgang und somit längere Messzeiten zur Folge. Dies würde eine Messkampagne innerhalb eines Messtages zeitlich

unmöglich machen. Für jeden Messpunkt wurde daher eine kurze Durchmischungsstrecke, die trotzdem in ihrer Gesamtlänge alle Notwendigkeiten erfüllte, gewählt. Die allgemeine Bachstruktur (Stufen, Überhänge etc.) bestimmt ebenfalls die Durchmischung des eingesetzten Tracers, indem turbulente Strömungen die Durchmischung positiv beeinflussen. Die Längen der Durchmischungsstrecken wurden somit abhängig von der Struktur des Baches gewählt. Dabei habe ich darauf geachtet, dass, wenn möglich, jede Durchmischungsstrecke mindestens einen Überfall enthielt und gleichzeitig sich verzweigende Fließarme vermieden, um damit ein Aufteilen der Tracer Wolke zu unterbinden. Ebenso wurden keine Totwasserbereiche mit einbezogen, da es hier zu ungewollten Tracer Verlusten kommen könnte. Aus den obigen Ausführungen geht hervor, dass die Voraussage der optimalen Durchmischungsstrecke sehr schwierig ist (Spreafico und Gees, 1994). Daher wurden zur besseren Einschätzung der vorherrschenden Bedingungen, Probemessungen mit unterschiedlich langen Durchmischungsstecken durchgeführt.

Tracer Menge:

In jedem Bach wurden Probemessungen zur Abschätzung der zu verwendenden Tracer Menge durchgeführt. Bei der Anwendung der Salzverdünnungsmethode muss beachtet werden, dass ein Gewässer bereits ohne Salzzugabe eine elektrische Leitfähigkeit aufweist. Diese sogenannte Hintergrundleitfähigkeit entsteht durch die Gewässermineralisierung. Damit die Tracer Durchgangskurve dennoch vollständig und richtig messbar ist, sollte sich die Leitfähigkeit im Maximum der Kurve um mindestens $100 \mu\text{S m}^{-1}$ erhöhen und sich somit deutlich von der Hintergrundleitfähigkeit abheben. Bei den anfänglichen Probemessungen zeigte sich, dass die Hintergrundleitfähigkeit am oberen Schwemmfächer Teil im Gegensatz zum unteren Fächerbereich um bis zu $2 \mu\text{S cm}^{-1}$ höher war und während des Tracer Durchganges in der Zeit von Einspeisung bis Wiedererreichen der Hintergrundleitfähigkeit um $\pm 2 \mu\text{S cm}^{-1}$ schwankte. Um diese Schwankungen auszugleichen, habe ich daher etwas höhere Tracer Mengen eingesetzt, als sie für einen Anstieg um $100 \mu\text{S cm}^{-1}$ notwendig gewesen wären. So wählte ich für den „Dieboldsbach“ aufgrund seines größeren Abfluss 400 g NaCl und für die anderen Bäche 200 g NaCl als passende Tracer Menge.

Messintervall:

Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, ist es für die spätere Auswertung notwendig, den gesamten Tracer Durchgang zu erfassen. Dazu gehört auch die korrekte Aufzeichnung des Maximalanstieges der Durchgangskurve. In welcher Geschwindigkeit eine Durchgangskurve ansteigt und wieder abfällt, hängt von der Menge des eingespeisten Tracers sowie dem Abfluss und der Fließgeschwindigkeit des Baches ab. Daher können je nach Gegebenheiten unterschiedlich große Messintervalle notwendig sein, um das Maximum der Kurve sicher aufzuzeichnen. Bei den durchgeführten Probemessungen zeigte sich, dass hierfür ein Messintervall von fünf Sekunden ausreicht. Aufgrund des begrenzten Speicherplatzes hätte ein kürzeres Messintervall die Auslesung der Daten im Feld erfordert.

3.6.2 Durchführung der Tracerversuche

Die Messungen für jeden Messabschnitt wurden an jedem Messtag nach folgendem Schema durchgeführt:

- Vorbereitung und Abwiegen der Tracer Mengen im Labor
- Feldeichung- Erstellung der Eichbeziehung, gleichzeitiges Lösen des Tracers in 1,5 l Bachwasser
- Positionierung des ersten Messgerätes inklusive Leitfähigkeitssonde am unteren Messpunkt (P_D)
- Einspeisung des gelösten Salzes (M_D) vor der unteren Durchmischungsstrecke am Injektionspunkt I_D
- Erneutes Lösen des Tracers in 1,5 l Bachwasser
- Positionierung des zweiten Messgerätes inklusive Leitfähigkeitssonde am oberen Messpunkt (P_U)
- Einspeisung des gelösten Salzes (M_U) vor der oberen Durchmischungsstrecke am Injektionspunkt I_U

Die obere Sonde registrierte hierbei den Tracer Durchgang $C_U(t)$ am oberen Messpunkt P_U . Die untere Sonde am Messpunkt P_D zeichnete die Durchgangskurven $C_D(t)$ und $C_{UD}(t)$ von der Einspeisung M_D unten und der Einspeisung M_U oben auf (Abbildung 3.6; Kapitel 3.5)

Dabei kam es zu keinen Überlagerungen der Durchgangskurven von unterer und oberer Einspeisung, da die Durchmischungsstrecke der unteren Einspeisung nur einen kleinen Teil der Gesamtfließstrecke, welche die Tracer Wolke von der oberen Einspeisung bis zum Erreichen der unteren Messstelle zurücklegen muss, darstellt.

Normaler Weise werden die Messungen erst beendet, wenn die Leitfähigkeitsganglinie wieder den Hintergrundwert Lf_0 erreicht hat. Um die Durchführung aller Messungen an einem Tag zu gewährleisten, war jedoch eine Zeitersparnis bei der Aufzeichnung der Durchgangskurven notwendig. Deshalb wurden die Sonden aus dem Wasser genommen, bevor die gesamte Tracer Menge die Sonde passieren konnte. Dadurch wurde der exponentielle Rückgang (Tailing) der Tracer Durchgangskurve nicht vollständig aufgezeichnet und musste dementsprechend nachberechnet werden. Diese Nachberechnungen sind in Kapitel 3.6.4 erläutert.

Da der obere Messabschnitt und der untere Messabschnitt des Flühbaches direkt miteinander verbunden ist, konnte bei den Messungen des Flühbaches die untere Sonde nach der Aufzeichnung der Durchgangskurve nach oben versetzt werden. Die obere Sonde des ersten Messabschnittes wurde somit die untere Sonde des zweiten Messabschnittes und musste nicht neu programmiert werden. Im Folgenden werden die einzelnen Punkte des Messablaufes noch einmal ausführlich erläutert.

Vorbereitung im Labor :

Der jeweiligen Feldarbeit ging eine kurze Vorbereitung im Labor voraus. Hierbei wurden die entsprechenden Tracer Mengen (200 g) abgewogen und in kleine Plastiksäcke verpackt. Gleichzeitig wurde eine Eichlösung mit 10 gNaCl in 1 l destilliertem Wasser mit Hilfe einer Feinwaage erstellt.

Erstellen der Eichbeziehung:

Bevor die Leitfähigkeitssonden an ihren Messstandorten installiert werden konnten, wurde für jedes Messgerät eine Eichbeziehung erstellt. Hierfür wurden exakt fünf Liter Bachwasser entnommen und die NaCl- Konzentration und damit auch die Leitfähigkeit durch die

schrittweise Zugabe von 2,5 ml einer zuvor im Labor angefertigten NaCl- Lösung mit einer Konzentration von 10 g l^{-1} erhöht. Dieser Vorgang wurde solange wiederholt, bis der für die Folgemessung angenommene Maximalanstieg der Durchgangskurve erreicht war. Bei 2,5 ml Schritten war dies meistens nach acht bis zehn Wiederholungen der Fall. Bei späteren Messungen zeigte sich, dass der Umstieg auf 5 ml Schritte eine deutliche Zeitersparnis ohne Genauigkeitsverlust mit sich brachte. Schließlich konnten die Eichfaktoren durch eine lineare Regression zwischen Leitfähigkeit und Konzentration von NaCl im Wasser für jedes Messgerät ermittelt werden. Der Volumenfehler durch die hinzugegebene Menge an Eichlösung in das Eichvolumen war aufgrund des Verhältnisses von Eichvolumen zu geringem Eichlösungsvolumen zu vernachlässigen. Exemplarisch für die Erstellung aller Eichgeraden ist die Eichgerade des Loggers 2 am 13.03.2015 abgebildet (Abbildung 3.9). Da sich die Leitfähigkeit je nach Abflussbedingungen, Mineralisierungsprozessen, Stoffeintrag und anderen Faktoren ändert, musste die Erstellung der Eichbeziehung für alle Bäche und an jedem Messtag erneut durchgeführt werden.

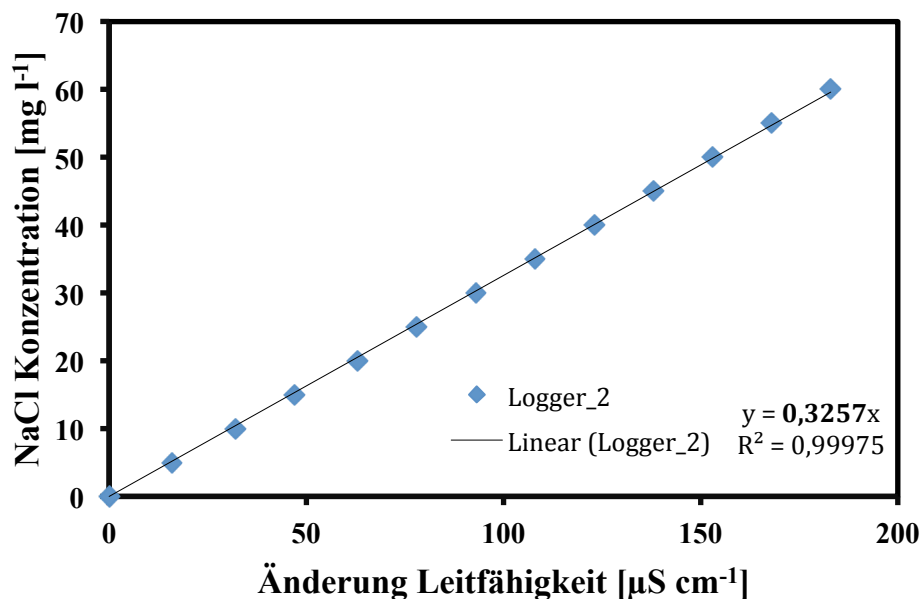


Abbildung 3.9: Beispiel für eine Eichbeziehung zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Salzkonzentration nach Subtraktion der Hintergrundleitfähigkeit am Bach „Wässerig“.

Positionierung der Leitfähigkeitssonden:

Ausgehend von einer vollständigen Durchmischung des Salzes mit dem Bachwasser, spielt die Positionierung der Messsonde im Messquerschnitt keine Rolle. Die Messdauer verkürzt

sich jedoch, sobald die Leitfähigkeitssonde in dem Bereich mit der höchsten Fließgeschwindigkeit positioniert wird. Bei der korrekten Positionierung sollte darauf geachtet werden, die Sonde gut umströmt und nicht in Luft durchsetzten Bereichen zu platzieren. Blätter, Wasserpflanzen und Luftblasen könnten zudem zu Leitfähigkeitsschwankungen führen. Dementsprechend wurden die Sonden an einer geeigneten Stelle mit Kabelbindern an einem Stock fest im Bachbett fixiert.

Salzeinspeisung:

Die gewählte Salzmenge wurde in einem Kunststoffeimer mit Bachwasser vollständig aufgelöst. Hierbei wurden aufgrund der Salzlöslichkeit von $\sim 300 \text{ g l}^{-1}$ immer 1,5 l Bachwasser verwendet. Anschließend wurde die Salzlösung möglichst schnell (Dirac'scher Stoss) dem Gewässer vollständig beigegeben und dabei, soweit möglich, eine Engstelle des Baches gewählt.

3.6.3 Auswertung

Die Auswertung der Leitfähigkeitsganglinien wurde basierend auf den Formeln: 3 – 8 mit Microsoft Excel durchgeführt. Notwendige Korrekturen der Messdaten wurden mit „R“ ausgeführt und werden im nächsten Kapitel genauer erläutert. Auf eine Normierung der Abflussmessungen wurde aufgrund der gleichen Messabschnittlänge von 100 m verzichtet.

3.6.4 Messdaten Korrektur

Durch Schwankungen der Hintergrundleitfähigkeit während der Aufzeichnung der Leitfähigkeitsganglinie und auf Grund von vorzeitigem Messabbruch musste Korrekturen der gewonnenen Messdaten durchgeführt werden. Diese Korrekturen sind im Folgenden näher erläutert.

Schwankungen der Hintergrundleitfähigkeit:

Wenn die Sonde im Bachoberlauf eine Schwankung der Hintergrundleitfähigkeit registrierte während die Sonde im unteren Teil die Durchgangskurve für die Brutto Veränderungen aufzeichnete, so wurden die Daten der Durchgangskurve im Nachhinein über die Fließgeschwindigkeit korrigiert. Fließgeschwindigkeiten lassen sich über die Fließzeit des Tracers für die jeweilige Strecke und die Länge der jeweiligen Strecke berechnen. Die Fließzeit kann hierbei auf zwei Arten bestimmt werden: $V_{\max}$ beschreibt hierbei die erste signifikante Änderung ($> 3 \text{ mg l}^{-1} \text{ (t)}$) der NaCl- Konzentration an der Sonde, V_{mean} hingegen ermittelt die Fließzeit des Tracers über den Zeitpunkt (T_{50}), an dem 50 % der Tracer Menge die Sonde passiert haben (Lange et al., 2011). Unter der Annahme, dass die Leitfähigkeitsänderung äquivalent zur mittleren Fließgeschwindigkeit nach unten weitergegeben wird, wurde über die Fließgeschwindigkeit die Zeitspanne abgeschätzt, in welcher die Leitfähigkeitsschwankung auch die untere Sonde erreicht. Somit konnten die Messwerte mit dem Zeitversatz analog zur oberen Messsonde kompensiert werden. Für die Bestimmung von V_{mean} ist es wichtig, dass die Durchgangskurve nur einen Messhöhepunkt enthält und der komplette Durchgang erfasst wird. Da dies nicht immer der Fall war, wurde die Fließzeit häufig mittels $V_{\max}$ ermittelt.

Nachberechnung der Auslaufkurve bei vorzeitigem Messabbruch:

Geplante, vorzeitige Messabbrüche führten dazu, dass die Leitfähigkeitsganglinie den Hintergrundwert Lf_0 nicht erreichte. Dies hatte zur Folge, dass der durch Messungen nicht belegte Teil des exponentiellen Rückgangs (Tailing) der Tracer Durchgangskurve nachträglich berechnet werden musste. Die Exponentialfunktion des Tailings nach Abbrechen der Messung hat folgende Form:

$$(Lf - Lf_0) = (Lf_E - Lf_0) \frac{1}{a} \quad (9)$$

Lf_1 : Leitfähigkeit des Wassers nach der Salzeingabe [$\mu\text{S cm}^{-1}$]

Lf_0 : Hintergrundleitfähigkeit [$\mu\text{S cm}^{-1}$]

Lf_E : Leitfähigkeit bei Beendigung der Messung [$\mu\text{S cm}^{-1}$]

Faktor a ergibt sich hierbei aus der Berechnung der Exponentialfunktion der Auslaufkurve im durch Messungen belegten Bereich (LFU 2002). Berechnet wurden die fehlenden Informationen mit „R“ um dann in die Excel Vorlage eingepflegt zu werden.

3.7 Unsicherheitsanalyse

Die Literatur basierten Angaben zur Höhe der Unsicherheiten für die Abflussmessung mit der Salzmethode sind sehr unterschiedlich. So liegt die Unsicherheit nach Day (1976) bei 4 - 7 %, kann aber auch auf 10 - 20% ansteigen. Harvey et al. (2003) dagegen schätzt die Unsicherheit auf 10 %, beruhend auf Fehlern erster Art und unter Berücksichtigung der Modellparameter Sensitivität. Aktuellere Untersuchungen von Schmadel et al., 2010 wiederum schätzen den Fehler auf 8,4 %, wobei sie allein 8,3 % auf die Tracer Durchmischung zurückführen. Hier zeigt sich, dass unterschiedlich aufgebaute Gerinne eine unterschiedliche Unsicherheit aufweisen, und diese bei turbulenten Fließgewässern abnimmt (Schmadel et al., 2010). Für die vorgenommenen Messungen könnten folgende Punkte als Fehlerquellen dienen:

- Eine zu kurze Durchmischungsstrecke
- Retentionsräume, sowie Zu- und Abflüsse in der Durchmischungsstrecke
- Ungenauigkeiten bei der Erstellung der Eichbeziehung, beim Abwiegen und Erstellen der Eichlösung, beim Abmessen des Eichvolumens und Abwiegen des Tracers (eventuell bedingt durch unterschiedliche Feuchtestadien des Salzes)
- Tracer Rückstände im Einspeisungsgefäß
- Ungenauigkeiten der Leitfähigkeitssonden

Zudem ist es schwierig Fehlerangaben für einzelne Teilprozesse der Messungen zu machen. Schließlich sind bei der Salzverdünnungsmethode auch systematische Fehler schwer zu quantifizieren, können jedoch durch sorgfältiges Arbeiten auf ein Minimum reduziert werden (Weiler et al., 2005). Durch die Auswahl der geeigneten Durchmischungsstrecke war es mir unter Beachtung all dieser Fehlerquellen möglich, viele dieser Unsicherheiten zu verringern beziehungsweise zu vermeiden. Die turbulenten Fließbedingungen in den Mischungsstrecken waren hierbei zusätzlich von Vorteil und die Vermeidung systematischer Fehler besonders wichtig. Bei der Herstellung der Eichlösung und dem Abwiegen der einzuspeisenden Salzmenge im Labor wurde das dafür verwendete Salz sehr sorgfältig mittels einer Feinwaage abgewogen und so die Unsicherheit auf die Hersteller- definierte Messungenauigkeit von 0,1 g reduziert. Auch das Eichvolumen wurde Millimeter genau abgemessen und der Tracer stets in klimatisierten Räumen gelagert, um einen konstanten Feuchtegehalt und somit ein konstantes Gewicht zu gewährleisten. Für die Messungen wurde stets die gleiche Eichung verwendet und die gleiche Salzmenge eingespeist. Zusammenfassend kann daher von einer Unsicherheit von unter 4 % ausgegangen werden.

3.8 Pegelmessungen

Wie in Kapitel 6.3 bereits erwähnt, lagen für die zu untersuchenden Bäche keine kontinuierlichen Abflussdaten vor. Um dennoch die jeweiligen Messtage einer bestimmten Abflusssituation zuzuordnen, wurde mit Hilfe einer Wasserstands/Abflussbeziehung eine Ganglinie des Abflusses für die jeweiligen Bäche erstellt. Eine P/Q-Beziehung ist eine Funktion, die den Wasserständen die zugehörigen Abflusswerte an einem festgelegten Punkt im Gewässer zuordnet. Die benötigten Abflusswerte konnten mittels der ohnehin durchgeführten Abflussmessungen ermittelt werden. Für die Erhebung der Wasserstände hingegen sind kontinuierliche Messungen des Gerinnepegels notwendig. Da Wasserstands Höhen schwierig direkt zu messen sind, wurden diese indirekt mit Hilfe zweier Kapazitative-Pegelsonden der Firma „ODYSSEY“ und einem Paar Drucksonden (CTD -Diver der Firma „Schlumberger Water Services“) ermittelt. Hierfür wurden die Pegelsonden in den Bächen „Wässerig“ und „Flühbach“ jeweils am Schwemmfächer Fuß in der Nähe der Messpunkte P_D frei hängend und in einem perforierten PVC-Rohr installiert (Abbildung 3.10 A und B).

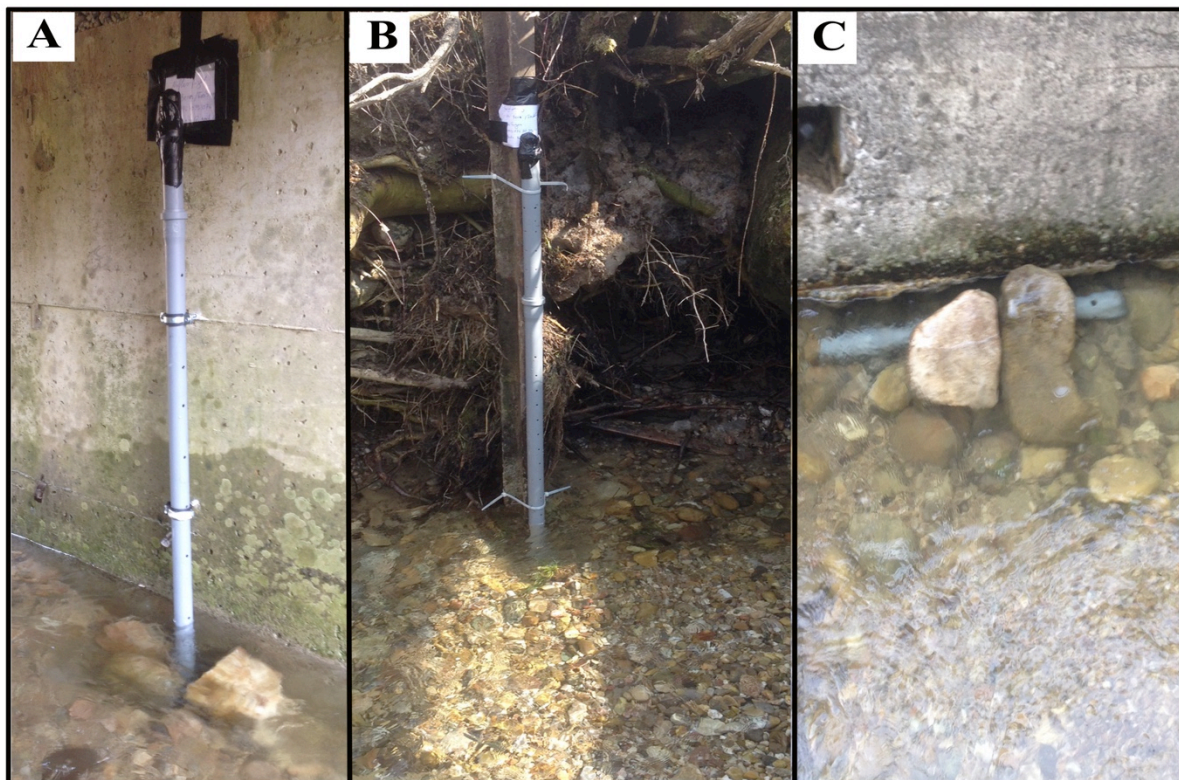


Abbildung 3.10: Messpegel der Bäche Wässerig (A), „Flühbach“ (B) und „Holxmatt“ (C).

Das Rohr wurde dabei so befestigt, dass sich das untere Ende stets unter dem Wasserspiegel befand. In der senkrecht stehenden PVC- Röhre stellte sich daraufhin ein dem

Bachwasserstand identischer Wasserstand ein. Die Pegelmessungen wurden mit einem zehn minütigen Messintervall in einem zwei ein halb Monatigem Messzeitraum vom 20.03.2015 bis 06.06.2015 durchgeführt. Innerhalb dieses Zeitraumes wurde regelmäßig kontrolliert, ob die PVC- Röhre in Höhe der Sonden frei, d.h. nicht zu sedimentiert, war. Bei der Verwendung der CTD- Diver wurde der Wasserstand über die Variation der auf der Drucksonde stehenden Wassersäule ermittelt. Da diese auch vom Umgebungsdruck der Luft beeinflusst wird, mussten die Daten des Wasserdruckes mit Hilfe einer zweiten (in der Nähe angebrachten) Drucksonde und dem aufgezeichneten Luftdruck kompensiert werden. Im Gegensatz zu den frei hängend installierten Pegelsonden, konnten die Drucksonden waagrecht in einem schweren, perforierten Eisenrohr installiert werden (Abbildung 3.10 C). Bei der Erstellung der P/Q- Beziehung aus den ermittelten Abflusswerten und den Wasserstandshöhen der Pegelmessstationen wurde davon ausgegangen, dass sich die analytische Form der P/Q- Beziehung grundsätzlich als Potenzfunktion darstellen lässt. Diese Potenzfunktion lautet nach Dyck und Peschke (1995) wie folgt:

$$Q = a * P^n \quad (10)$$

mit: Q: Abflusswert aus Salzverdünnungsmethode [l s^{-1}]
P: Wasserstandshöhe [cm]
a, b: Parameter der Potenzfunktion.

Um die Parameter der Potenzfunktion zu ermitteln, können P und Q logarithmiert gegeneinander aufgetragen und durch eine Gerade verbunden werden. Aus dieser Geraden wurden die Parameter a und b für die Potenzfunktion bestimmt. (Abbildung 3.11).

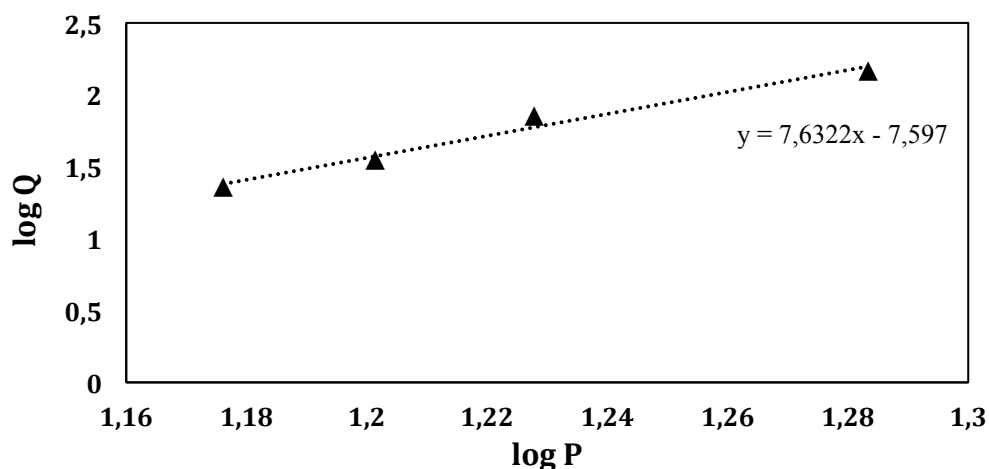


Abbildung 3.11: Grafische Ermittlung der Parameter der Potenzfunktion für die P/Q – Beziehung

4 ERGEBNISSE

4.1 Schwemmfächer Volumen und Talaquifervolumen

Die Berechnung des Volumens kann als Grundlage zur Abschätzung der potenziellen Speicherkapazität der einzelnen Schwemmfächer und deren Speicheranteil im Untersuchungsgebiet dienen. Diese Volumenberechnung wurden anhand der eigens entwickelten Geometriemethode und der GIS-basierten Methode durchgeführt. Die hier aufgeführten Volumina stellen noch kein Maß für die potenzielle Wasserspeicherfähigkeit der Schwemmfächer dar. Hierfür müssten noch Angaben über die nutzbare Porosität hinzugezogen werden. Da diese Angaben jedoch nicht vorlagen, wird in der Diskussion eine, aus den Schotteraquiferen abgeleitete, nutzbare Porosität verwendet um die potenzielle Wasserspeicherfähigkeit zu diskutieren.

Um die GIS-basierten Berechnungen der Schwemmfächer Sedimentvolumina grafisch darzustellen, wurden exemplarisch die DGM-Clips der Fächer Wässerig und „Flühbach“ aufbereitet, sodass sie mittels ArcView in einer 3D-Ansicht dargestellt werden können (Abbildung 4.1). Zur Verdeutlichung der virtuellen Referenzebene wurde zusätzlich eine Ebene in der Ausdehnung der Fächerfläche erstellt und dargestellt. Die Darstellung der Schwemmfächer ist hierbei um ein vielfaches überhöht und zudem nicht maßstabsgetreu. Die Farbverläufe dienen der besseren Visualisierung, weshalb auf eine zusätzliche Legende verzichtet wurde. Der Flühbachfächer zeigt die hochaufgelösten Rasterdaten des DGMs. Am Beispiel des Wässerigfächers wurde die für die Volumenberechnung benötigte, automatische Umrechnung von Rasterdaten in eine Dreiecksvermaschung (TIN) durch die manuelle grobmaschige Umrechnung der Rasterdaten in eine Tin- Oberfläche dargestellt.

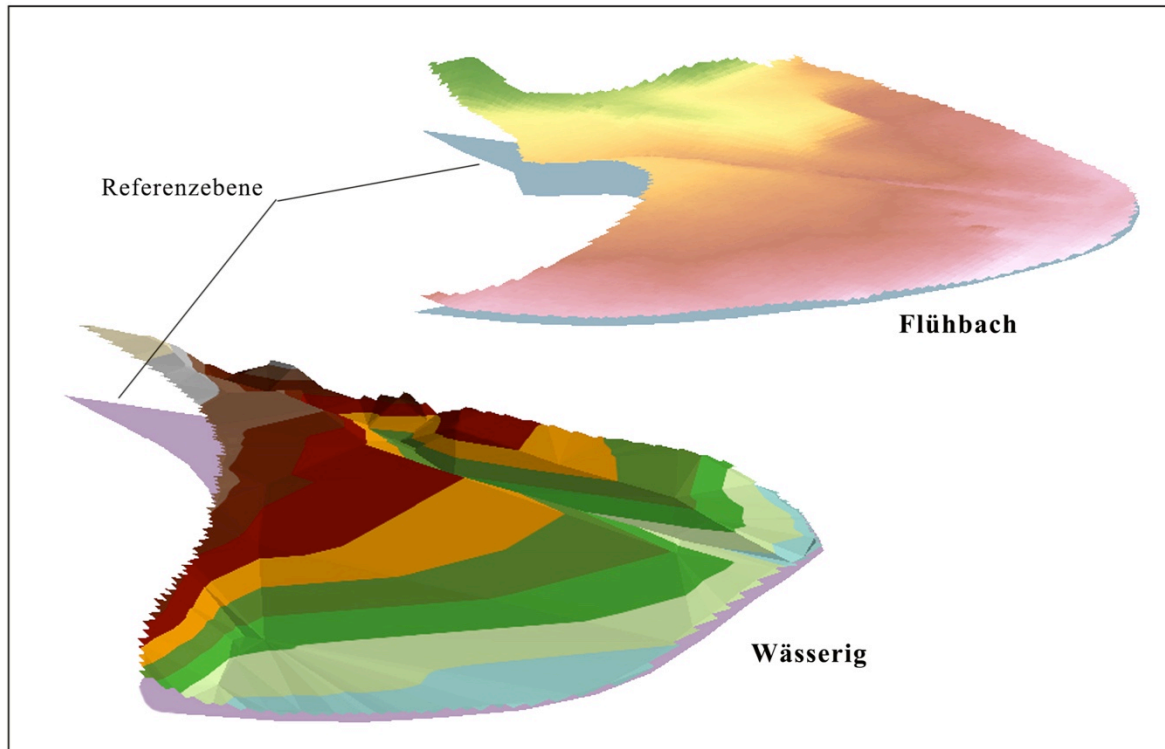


Abbildung 4.1 Exemplarische 3D-Darstellung der Volumenberechnung. Die Schwemmfächer sind hierbei mehrfach überhöht und nicht maßstabsgetreu abgebildet. „Flühbach“: DGM Rasterdatensatz; Wässerig: TIN-Oberfläche.

Die Ergebnisse der in Kapitel 3.2.2 vorgestellten GIS-gestützten Volumenberechnungen aller Schwemmfächer (V_{GIS}) für die Untersuchungsgebiete „Emme“ und „Röthebach“ sind gemeinsam mit den Ergebnissen aus dem in Kapitel 3.3 vorgestellten geometrischen Berechnungsansatz ($V_{GEOMETRIE}$) in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Die in dieser Arbeit näher untersuchten Schwemmfächer sind hierbei mit Ihren Anfangsbuchstaben bezeichnet, die restlichen im Untersuchungsgebiet liegenden Fächer mit Zahlen von 1 bis 34 durchnummeriert. Außerdem ist die für den geometrischen Berechnungsansatz benötigte Differenz (h) zwischen dem Fuß und dem Apex des Schwemmfächers, die längste Ausdehnung (r) und das geschätzte Kreissegment vermerkt.

Tabelle 4.1: Ergebnisse der GIS und Geometrie basierten Schwemmfächer Volumina

Schwemmfächer Bezeichnung	Segment geschätzt	Länge (r) [m]	Höhe (h) [m]	V_{GEOMETRIE} [m ³]	V_{GIS} [m ³]
D	1/4	218	20	248835	355124
W	1/4	220	17	215409	199574
H	1/4	162	12	82448	79601
F	1/2	220	13	329448	338333
1	1/4	91	17	36855	21007
2	1/4	100	22	57596	51839
3	1/8	110	50	79194	77873
4	1/16	114	20	45365	50016
5	1/18	82	31	27285	26007
6	1/8	81	42	36071	28916
7	1/3	94	15	46265	49031
8	1/6	133	21	64834	66526
9	1/16	73	38	13254	8682
10	1/12	134	36	56410	57766
11	1/8	74	17	12186	31116
12	1/8	98	26	33730	24495
13	1/4	54	5	3817	5854
14	1/12	151	21	41785	37456
15	1/4	104	9	25485	29365
16	1/8	135	26	62027	63082
17	1/8	184	60	265904	214897
18	1/8	142	21	49270	48610
19	1/6	90	36	19085	11058
20	1/4	66	24	27370	20981
21	1/8	59	32	14581	9261
22	1/8	140	18	46181	24484
23	1/8	123	20	39608	57107
24	1/3	71	26	45751	50452
25	1/8	155	57	179257	221937
26	1/4	200	28	146608	161906
27	1/4	170	25	189150	180671
28	1/16	190	49	115774	90435
29	1/12	154	61	126246	104627
30	1/16	167	39	71188	8245nn6
31	1/16	82	47	20684	13743
32	1/16	81	37	15888	16381
33	1/8	101	35	46736	44975
34	1/4	46	16	4432	4190
Σ Gesamt	-	-	-	2942011	2959832
Σ „Röthebach“	-	-	-	2274432	2230309
Σ „Emme“	-	-	-	667580	729523

Die mit ArcGIS ermittelten Volumina (V_{GIS}) erstrecken sich von ca. 4000 m³ des Fächers Nr. 34 bis auf ca. 35.000 m³ des Dieboldsbachfächers (Tabelle 4.1). Die mittels der vereinfachten Volumenberechnungsmethode gewonnenen Volumina ($V_{GEOMETRIE}$) der 38 untersuchten Schwemmfächer belaufen sich auf Werte von ca. 3800 m³ bis 330.000 m³. Das Gesamtvolumen aller untersuchten Schwemmfächer (V_{GIS}) beträgt 2.959.832 m³. Das Untersuchungsgebiet des Röthebachs weist dabei ein Schwemmfächer Gesamtvolumen von 2.230.309 m³ und das der „Emme“ ein Gesamtvolumen von 729.523 m³ auf. Hingegen beträgt das mit Hilfe der einfachen Berechnungsmethode ermittelte Gesamtvolumen 2.942.011 m³ (Tabelle 4.1).

Grundsätzlich ähneln die vereinfachten Volumina Werte ($V_{GEOMETRIE}$) denen der GIS-basierten Berechnung (V_{GIS}). Bei genauerer Betrachtung wird jedoch deutlich, dass die über die Geometrie geschätzten Volumen der Schwemmfächer teilweise deutlich von den aus dem DGM berechneten Daten abweichen (Tabelle 4.1). So wird beispielsweise der Dieboldsbachfächer um etwa 106.000 m³ unterschätzt und der Schwemmfächer Nr. 17 um 51.000 m³ überschätzt. Bezogen auf den Dieboldsbachfächer entspricht dies einer Überschätzung von 30 % (Abbildung 4.2). Anteilig am Volumen kommt es zum Teil sogar zu Überschätzungen von mehr als 80% und Unterschätzungen von mehr als 60%. Bei der Auftragsung der Über- und Unterschätzung nach der jeweiligen Fächergröße wird deutlich, dass diese mit abnehmendem Volumen zunehmen. Kleine Schwemmfächer werden daher eher überschätzt. Diese relativ großen Abweichungen fallen allerdings in der Gesamtsumme aufgrund der geringen Schwemmfächer Volumina nur wenig ins Gewicht. So zeigt sich, dass durch die vereinfachte Berechnungsmethode die Gesamtsumme aller Fächervolumina lediglich um 17.820 m³ und damit das Volumen in der Summe nur um 1 % unterschätzt wird (Abbildung 4.2).

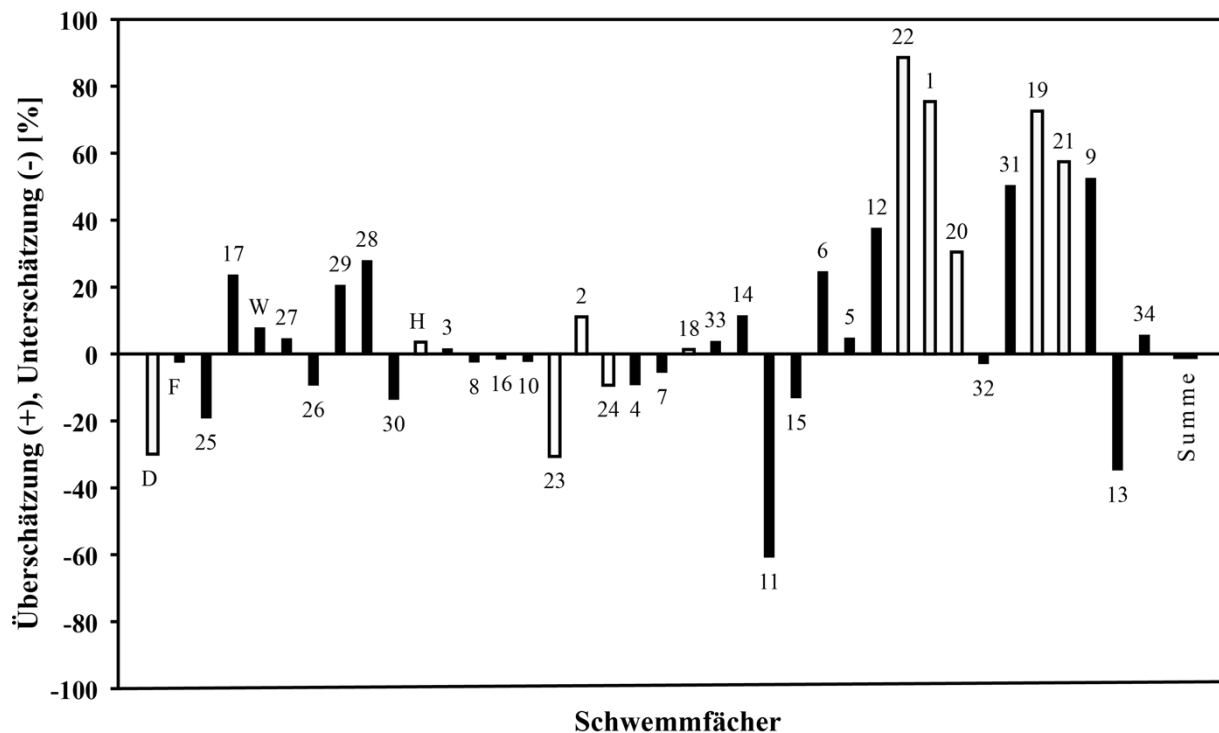


Abbildung 4.2: Vergleich Ergebnisse $V_{\text{GEOMETRIE}}$ und V_{GIS} . Dargestellt ist die Über- und Unterschätzung der $V_{\text{GEOMETRIE}}$ Werte in Bezug auf die zugehörigen V_{GIS} Werte der einzelnen Schwemmfächer. Diese sind nach Volumen, absteigend von links nach rechts, angeordnet. Die Schwemmfächer Bezeichnung ist ober- und unterhalb der jeweiligen Werte dargestellt.

4.2 Hydrologische Netto- Verluste und- Gewinne

Um die Nettoveränderungen in den Messabschnitten der unterschiedlichen Schwemmfächer zu den unterschiedlichen Messtagen und Abflussbegebenheiten zu vergleichen, wurde für alle Bachabschnitte die hydrologische Nettobilanz ermittelt und ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Netto- Gewinne sind dabei als positive Werte, Netto- Verluste als negative Werte aufgetragen. Die jeweiligen Schwemmfächer („Wässrig“, „Flühbach“, „Holxmatt“ und „Dieboldsbach“), gekennzeichnet durch die Anfangsbuchstaben W, F, H und D, sind hierbei in den Teilabbildungen A- F dargestellt und die einzelnen Messtage jeweils von eins bis neun durchnummeriert. F2 und D2 bezeichnen den jeweils zweiten, oberen Messabschnitt der Schwemmfächer „Flühbach“ und „Dieboldsbach“. Zusätzlich ist für jeden Abschnitt der zu Beginn der Messstrecke gemessene Abfluss Q_U dargestellt. Dies dient der Zuordnung der Nettobilanzen zu den eingehenden Abflüssen. Die in Abbildung 4.3 A – C beschriebenen

Schwemmfächer liegen im Untersuchungsgebiet „Röthebach“, die in Abbildung 4.3 D – F beschriebenen alluvialen Fächer gehören zum Untersuchungsgebiet „Emme“. In Abbildung 4.3 G ist die mittlere Nettobilanz $\text{Mean Net}\Delta Q$ und der über die Messtage gemittelte Abfluss $\text{Mean } Q_U$ zusammenfassend dargestellt.

Der Vergleich der hydrologischen Nettoveränderungen der einzelnen Messabschnitte und Messtage bzw. Abflussbedingungen zeigt Unterschiede zwischen den jeweiligen Messergebnissen auf. Die Nettobilanz an den unterschiedlichen Messtagen hat für alle Schwemmfächer, außer dem Fächer „Wässrig“, positive als auch negative Werte (Abbildungen 4.3 B – F). Im Gegensatz dazu zeigt der Bach mit natürlichem Bachbett des Wässrig Fächers an allen neun Messtagen eine negative Bilanz (Abbildung 4.3 A). Der Bachabschnitt auf dem stark überprägten Holxmattfächer (Abbildung 4.3 D) hingegen weist an drei von sieben Messtagen eine positive und nur an einem Messtag eine negative Nettobilanz auf. An den übrigen drei Messtagen (vier, acht und neun) mit geringem Abfluss ($22 - 35 \text{ l s}^{-1}$) konnte insgesamt keine Nettoänderung gemessen werden. An Messtag sieben, welcher für diesen Bach den höchsten gemessenen Abfluss (Q_U) von 149 l s^{-1} aufweist, wurde ein Netto- Verlust von $2,2 \text{ l s}^{-1}$ ermittelt.

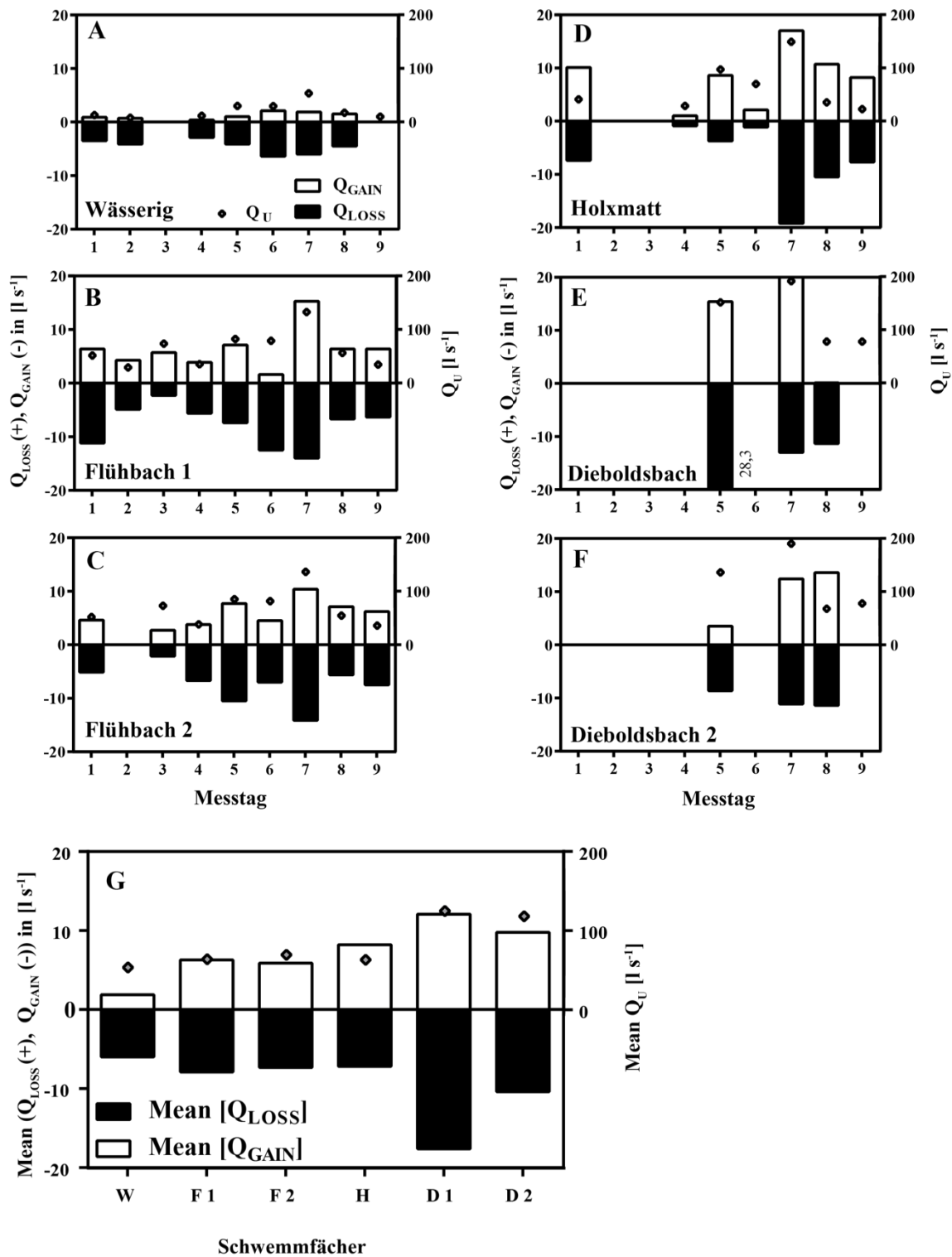


Abbildung 4.3 Hydrologische Netto- Verluste und- Gewinne (Net Δ Q). Dargestellt sind die Net Δ Q Werte und der Abfluss Q_U aller Schwemmfächer an den Messtagen eins bis neun (A – F). Die Mittelwerte von Net Δ Q und Q_U der einzelnen Fächer sind in Teilabbildung G abgebildet. Die jeweiligen Fächer sind mit ihren Anfangsbuchstaben abgekürzt (W, F, H, D).

Obwohl der Abfluss Q_U des Schwemmfächers „Wässrig“ an allen Messtagen zwischen 8 und 30 l s^{-1} variiert, zeigt sich dennoch an den unterschiedlichen Tagen ein relativ konstanter Netto- Verlust von $- 2,5$ bis $- 4,2 \text{ l s}^{-1}$. An Messtag zwei ergibt dies beispielsweise eine Exfiltration von 44 % des Abflusses. Dies steht im Gegensatz zum unteren Teil des Flühbachfächers, welcher Netto- Gewinn und- Verlustschwankungen von $-10,9$ bis $4,8 \text{ l s}^{-1}$ aufweist (Abbildung 4.3 B).

Die Salzverdünnungsmethode konnte für den „Dieboldsbach“ nur an drei Messtagen korrekt durchgeführt werden. Der Fächer zeigt an diesen Tagen, verglichen mit allen anderen Schwemmfächern, insgesamt den höchsten Abfluss und weist auch die größten positiven (7 l s^{-1}) als auch negativen ($- 15 \text{ l s}^{-1}$) Nettoveränderungen auf. Hierbei muss allerdings zwischen dem naturbelassenen Abschnitt D1 und dem stark anthropogen überprägten kanalisierten Abschnitt D2 unterschieden werden. Bei dem kanalisierten Abschnitt D2 (Abbildung 4.3 F) sind die positiven als auch negativen Nettoabflusswerte kleiner als bei dem entsprechenden naturbelassenen Abschnitt D1 (Abbildung 4.3 E). Außerdem weist Abschnitt D1 an einem von drei und Abschnitt D2 an zwei von drei Messtagen eine positive Nettobilanz auf.

Da auch der Flühbachfächer in zwei Messabschnitte unterteilt wurde, ist ein Vergleich im Verhalten der einzelnen Messabschnitte innerhalb desselben Baches bei gleichem Abfluss möglich (Abbildung 4.3 B und 4.3 C). Obwohl hier beide Abschnitte keine Unterschiede bezüglich der anthropogenen Überprägungen aufweisen, verhalten sie sich dennoch unterschiedlich in ihren Netto- Verlusten und- Gewinnen innerhalb der beiden Abschnitte. Während Abschnitt F1 an Messtag acht keine Nettoänderung zeigt, ist hingegen am gleichen Messtag im oberen Abschnitt F2 ein Netto- Gewinn zu erkennen. Anders verhält es sich an Messtag sieben, an dem F1 eine positive und F2 eine negative Bilanz aufweist. An Messtag sechs ist der Netto- Verlust des unteren Abschnittes mehr als viermal so hoch als der des oberen Abschnittes. Zusammenfassend ist der Netto- Verlust der beiden Abschnitte an verschiedenen Messtagen trotz unterschiedlichen Zu- und Abflüssen im Mittel gleich groß (Abbildung 4.3 G).

Insgesamt betrachtet treten hydrologische Netto- Gewinne deutlich seltener auf als Netto- Verluste. Lediglich der stark überprägte Holxmattfächer zeigt häufiger einen Netto- Gewinn als- Verlust und ist daher der einzige Bach, an welchem über alle Messtage gemittelt eine positive Bilanz (Mean Net ΔQ) berechnet werden kann (Abbildung 4.3 G). Der ähnlich

überprägte Abschnitt des Dieboldsbaches weist nur eine geringe negative Nettobilanz auf. Die beiden natürlichsten Bachabschnitte („Wässrig“ und unterer Abschnitt des Dieboldsbaches) zeigen dagegen im Mittel den höchsten Netto- Verlust. Somit wird ein klarer Unterschied der gemittelten Nettowerte zwischen den naturbelassenen und den anthropogen überprägten Abschnitten deutlich. Die relative Nettoänderung ($\text{Net}\Delta Q / Q_U$) in % der einzelnen Fächer beträgt $-7,8$ bis $-44,6$ für den Wässrigfächer, -7 bis $1,5$ für den Holxmattfächer. Es zeigt sich, dass die relativen Netto- Gewinne und- Verluste des Wässrigfächers im Vergleich zum Holxmattfächer deutlich erhöht sind.

Durch die zusätzliche Durchführung von Abflussmessungen auf einem reduzierten Messabschnitt von 50 m (Messtag acht) konnte in keinem der Bäche eine Aussage darüber getroffen werden, ob die ermittelten Zu- und Abflüsse punktuell auftraten. Die Ergebnisse hierzu sind der angehängten Tabelle A1 zu entnehmen.

4.3 Zusammenhang zwischen Abflusshöhe und Nettoveränderung

Aus den bisherigen Daten geht nicht hervor, ob die Höhe der hydrologischen Nettoveränderungen im gleichen Messabschnitt abhängig von der Höhe des Abflusses ist. Es zeigt sich jedoch, dass Fächer mit höherem Abfluss nicht automatisch auch höhere Nettoveränderungen in den einzelnen Abschnitten aufweisen (Abbildung 4.3).

Daher wurden in Abbildung 4.4 für die Bäche Wässrig, „Holxmatt“ und „Flühbach“ die Nettoveränderung ($Q_D - Q_U$) gegen den Abfluss am Anfang des jeweiligen Bachabschnittes (Q_U) aufgetragen und in einem Scatterplot verdeutlicht. Dies dient der Klärung, ob in den einzelnen Bachabschnitten ein linearer Zusammenhang zwischen der Nettoveränderung und der Abflusshöhe besteht. Dieser ist in Form einer linearen Regressionsgeraden und dem dazu gehörenden Bestimmtheitsmaß R^2 dargestellt (Abbildung 4.4). Der Bach des Dieboldsbachfächers wurde in diesem Zusammenhang aufgrund der geringen Messtage nicht betrachtet. Das Bestimmtheitsmaß R^2 für den Wässrigfächer beträgt $0,367$ und weist daher auf einen nur sehr geringen linearen Zusammenhang zwischen der Nettoveränderung und der Abflusshöhe hin (Abbildung 4.4 A). Bei den Schwemmfächern der Bäche „Holxmatt“ und „Flühbach“ beträgt der Determinationskoeffizient R^2 $0,032$ und $0,005$ und lässt damit auf keinerlei lineare Korrelation schließen (Abbildung 4.4 B und C).

Zusammenfassend kann daher für keinen der drei analysierten Bäche ein deutlicher linearer Zusammenhang zwischen Abflussgröße und Nettoveränderung festgestellt werden.

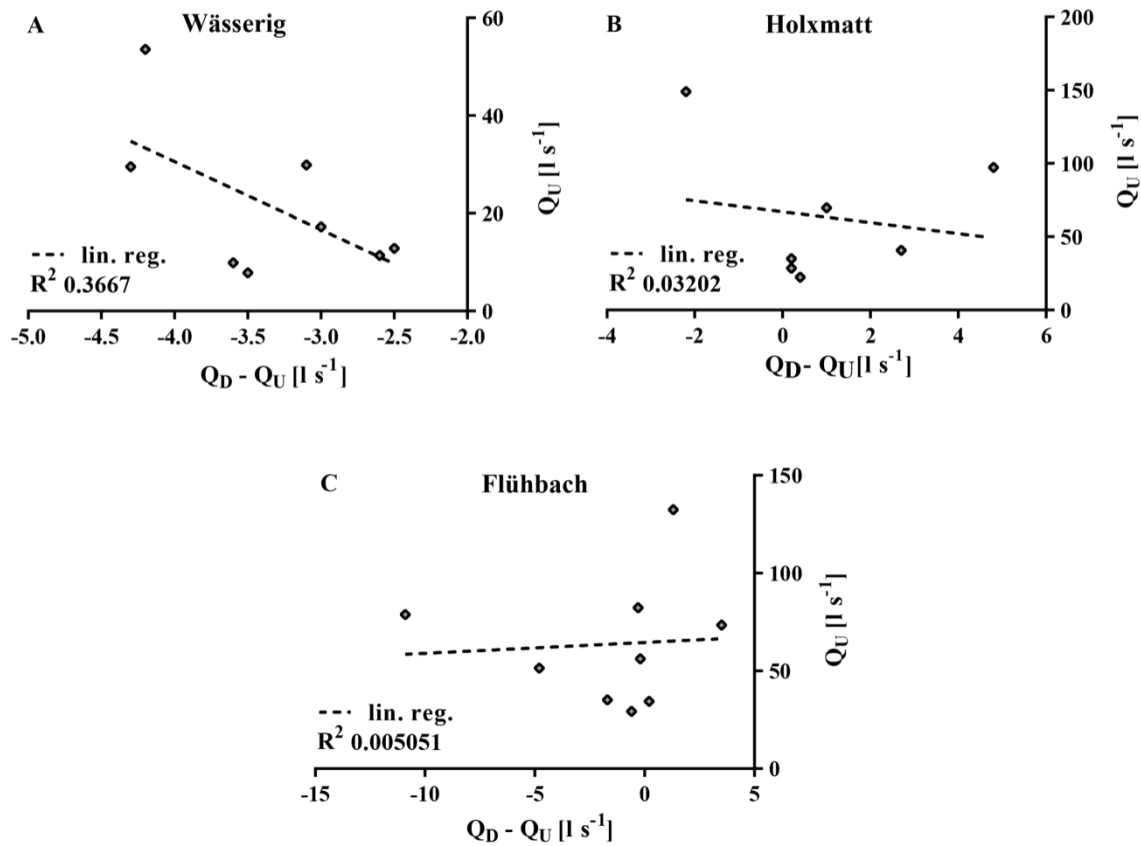


Abbildung 4.4: Zusammenhang zwischen Abflusshöhe und Nettoveränderung. Dargestellt ist $Q_D - Q_U$ gegen den Abfluss Q_U der Schwemmfächer Wässerig, „Holxmatt“ und „Flühbach“ der einzelnen Messtage.

4.4 Hydrologische Brutto- Gewinne und- Verluste

Aus der Darstellung der Nettoveränderungen der einzelnen Bachabschnitte (Abbildung 4.3 A – G) kann entnommen werden, ob in den jeweiligen Abschnitten effluente oder influente Bedingungen vorherrschten. Dennoch ist, wie bereits in Kapitel 3.5.2 beschrieben, nicht erkennbar, wie hoch die bidirektionale Interaktion zwischen Gerinne und Schwemmfächer Körper ist. Daher zeigt Abbildung 4.5 A – G die Brutto- Exfiltration (Q_{LOSS}) und Brutto- Infiltration (Q_{GAIN}) der einzelnen Messabschnitte an den jeweiligen Messtagen.

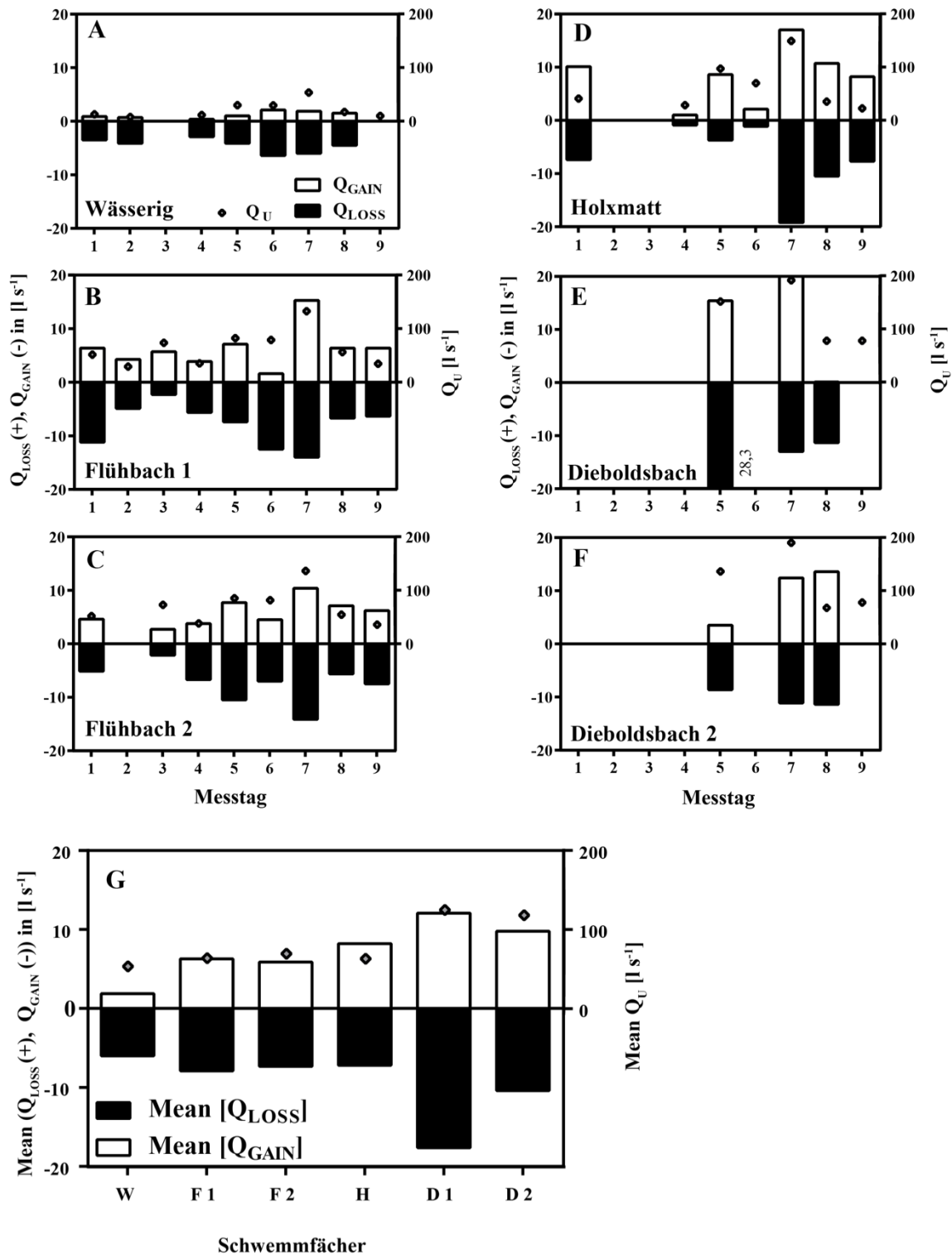


Abbildung 4.5: Hydrologische Brutto- Gewinne und- Verluste (Q_{GAIN} (+), Q_{LOSS} (-)). Dargestellt sind die Q_{LOSS} und Q_{GAIN} - Werte und der Abfluss Q_U aller Schwemmächer an den Messtagen eins bis neun (A – F). Die Mittelwerte von Q_{LOSS} , Q_{GAIN} und Q_U der einzelnen Fächer sind in Teilabbildung G abgebildet. Die jeweiligen Fächer sind mit ihren Anfangsbuchstaben abgekürzt (W, F, H, D).

Bis auf wenige Ausnahmen konnten bei allen Bächen an jedem Messtag sowohl hydrologische Brutto- Gewinne als auch- Verluste beobachtet werden. Diese Ausnahmen bilden der Wässerigfächer an Messtag vier und der untere Abschnitt des Dieboldsbachfächers an Messtag acht, da an diesen Abschnitten kein Q_{GAIN} ermittelt werden konnte. Insgesamt laufen somit Brutto- In- und Exfiltration meist bidirektional ab. An den Messabschnitten, an denen mehr Wasser exfiltriert als infiltriert, ist die Nettobilanz negativ (vergl. Abbildung 4.3). Dabei ist es möglich, dass der hydrologische Bruttozugewinn dennoch um ein vielfaches höher liegt als der zugehörige Nettoverlust, wenn gleichzeitig der Bruttoverlust den Bruttogewinn übersteigt. Dies zeigt sich beispielsweise beim Vergleich von Abbildung 4.3 C, Messtag sieben und Abbildung 4.5 C, Messtag sieben.

In allen Gerinnen konnten deutliche Brutto- Verluste beobachtet werden. Der Wässerigfächer weist an allen Tagen mit maximal $2,1 \text{ l s}^{-1}$ nur sehr geringe Brutto- Gewinne auf (Abbildung 4.5 A). In den anderen Gerinne Abschnitten liegen bei ähnlichem Netto- Verlust (vergl. Abbildung 4.3 A) sowohl deutlich höhere Brutto- Gewinne (Q_{GAIN}) als auch Brutto- Verluste (Q_{LOSS}) vor. Dies wird beispielsweise bei dem Vergleich der Messtage vier bis sieben des Wässerigfächers mit denselben Messtagen des oberen Messabschnittes des Flühbaches deutlich (Abbildung 4.5 A verglichen mit 4.5 C). Zudem ist die Spannweite zwischen maximalem Brutto- Verlust und gleichzeitigem Brutto- Gewinn bei letzterem (F1) höher.

Die Spannweite, d.h. die Differenz zwischen höchstem Brutto- Verlust und höchstem Brutto- Gewinn, unterscheidet sich nicht nur innerhalb der einzelnen Messabschnitte, sondern auch im selben Fächer zu den unterschiedlichen Messtagen. So zeigt sich beim Holxmattfächer an Messtag sieben eine Brutto-Infiltration von 17 l s^{-1} bei einer gleichzeitigen Exfiltration von $-19,2 \text{ l s}^{-1}$. Im Gegensatz hierzu konnte an Tag vier nur eine Brutto- Infiltration von 1 l s^{-1} bei gleichzeitiger Exfiltration von -1 l s^{-1} ermittelt werden (Abbildung 4.5 D). Die insgesamt größte Spannweite wurde am unteren Abschnitt des Dieboldsbaches ermittelt: hier beträgt der Brutto- Verlust $28,3 \text{ l s}^{-1}$ bei einer gleichzeitigen Infiltration von 15 l s^{-1} .

Der Holxmattfächer zeigt auch Tagen mit geringer Nettoveränderung große Bruttoveränderungen (vergl. Messtag sieben, Abbildung 4.3D und 4.5 D). Der alluviale Fächer Wässerig weist dagegen an allen Messtagen keine Netto- Gewinne und auch nur geringe Brutto- Gewinne auf (vergl. Abbildung 4.3A und 2A). Zwischen den drei Messtagen, an denen im Holxmattfächer keine oder nur eine geringe Nettoveränderung gemessen wurde, ist ein deutlicher Unterschied im Brutto- Infiltrations- und Exfiltrationsverhalten des

Gerinnes zu erkennen (Abbildung 4.5 D): während an den Messtagen vier und sechs nur geringe Brutto- Abflüsse und- Zuflüsse ermittelt werden konnten, sind diese an den Messtagen acht und neun etwa 5 bis 10 mal so groß. Diese Dynamik tritt hingegen in den Bachabschnitten des Flühbachfächers an den Tagen mit wenig Netto- Veränderungen nicht auf (vergl. Abbildung 4.3 B mit 4.5 B). Hier wurden bei einer niedrigen Netto- Veränderung ähnlich große Brutto- Gewinne und- Verluste ermittelt.

Zusammenfassend konnten teilweise hohe Brutto- Verluste und- Gewinne unabhängig von der Netto- Bilanz beobachtet werden. Zudem steigt der über alle Messtage gemittelte Bruttozufluss ($\text{Mean } Q_{\text{GAIN}}$) vom Wässrigfächer über den Flühbachfächer, den Holxmattfächer und schließlich den Dieboldsbachfächer an ($W < F1, F2 < H < D1, D2$). Der mittlere Brutto- Verlust ($\text{Mean } Q_{\text{LOSS}}$) ist bei den beiden Messabschnitten des Flühbaches höher als bei dem des Wässrigfächers, aber ähnlich dem des Holxmattfächers und kleiner als bei den beiden Messabschnitten des Dieboldsbaches ($W < F1, F2, H < D1, D2$) (Abbildung 4.5 G). Hierbei ist allerdings zu beachten, dass der Vergleich der gemittelten Messwerte für den Dieboldsbachfächer aufgrund der geringen Anzahl an Messungen erschwert ist.

4.5 Relative Brutto- Gewinne und- Verluste

Wie in Abbildung 4.4 bereits gezeigt, ist zwischen der Abflusshöhe und der Nettoveränderung der einzelnen Messtage kein linearer Zusammenhang zu erkennen. Bezogen auf die jeweiligen Bruttoveränderungen weisen die Bäche mit höherem Abfluss jedoch auch höhere Brutto In- und- Exfiltrationsraten auf. Um die Abhängigkeit der Bruttowerte von der Abflusshöhe zu umgehen, wurden in Abbildung 4.6 A – F die relativen Brutto- Gewinne und Verluste der einzelnen Gerinne an den jeweiligen Messtagen dargestellt (Q_{LOSS} / Q_U und Q_{GAIN} / Q_U). Dies dient dem besseren Vergleich der Schwemmfächer hinsichtlich der Interaktion zwischen Gerinne und Schwemmfächer Körper.

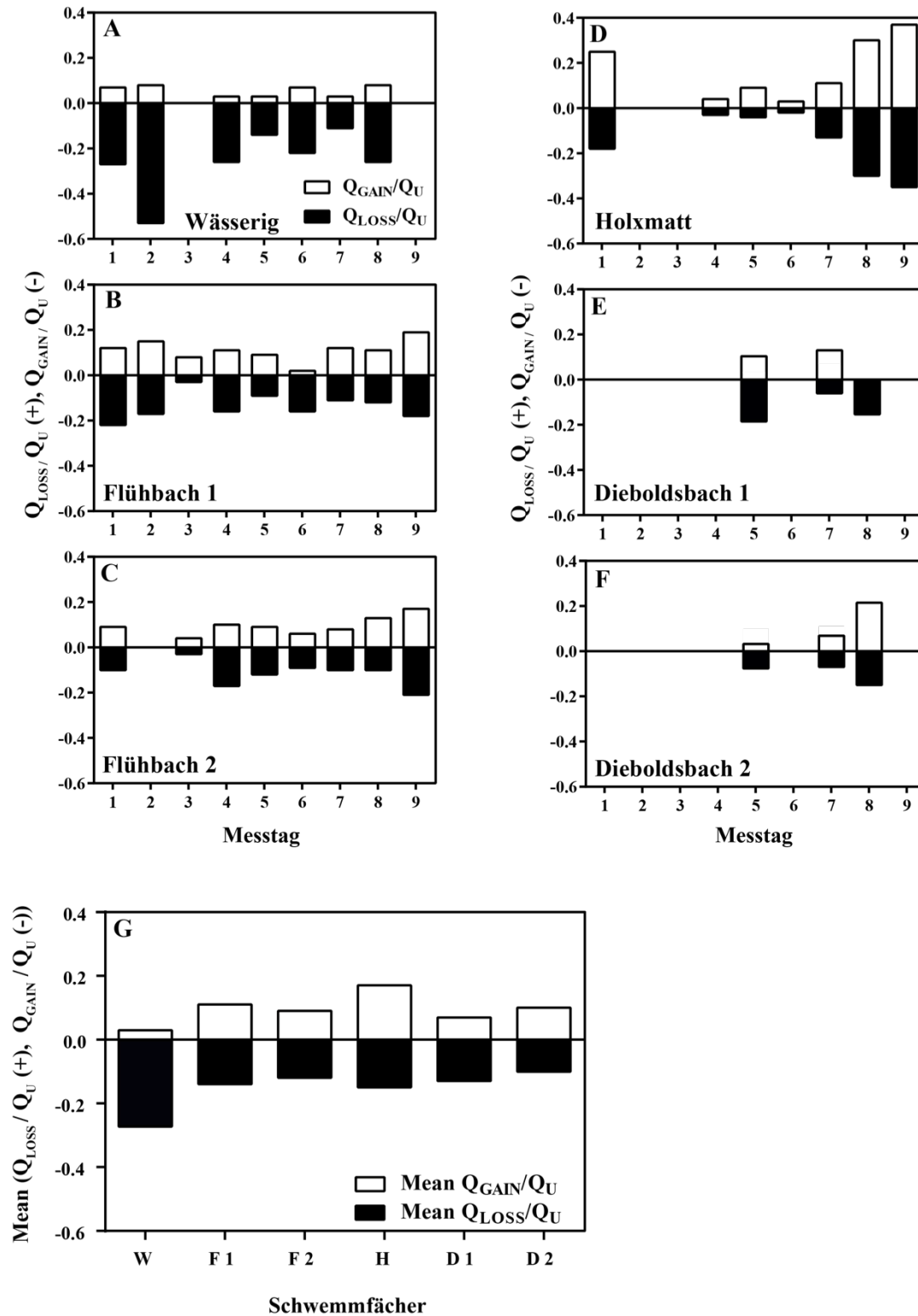


Abbildung 4.6: Relative Brutto- Gewinne und- Verluste (Q_{GAIN}/Q_U , Q_{LOSS}/Q_U). Dargestellt sind die relativen Bruttowerte Q_{GAIN}/Q_U und Q_{LOSS}/Q_U aller Schwemmfächer an den Messtagen eins bis neun (A – F). Die Mittelwerte von Q_{GAIN}/Q_U und Q_{LOSS}/Q_U der einzelnen Fächer sind in Teilabbildung G abgebildet. Die jeweiligen Fächer sind mit ihren Anfangsbuchstaben abgekürzt (W, F, H, D).

Bei dem naturbelassenen Bachabschnitt des Wässerigfächers exfiltrieren brutto bis zu 53 % des vorhandenen Abflusses (Q_U); die Exfiltrationsrate des Wässerigbaches zeigt somit die höchsten relativen Brutto- Verluste aller Schwemmfächer (Abbildung 4.6 A). Im Gegensatz dazu sind die hier ermittelten relativen Brutto- Gewinne über alle Messtage betrachtet am kleinsten (Abbildung 4.6 G). Trotz der (mit den anderen Fächern verglichenen) geringen relativen Brutto- Gewinne ist die Spannweite auf Grund der hohen relativen Exfiltrationsrate zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert ähnlich der des stark überprägten Holxmattfächers (vergl. Abbildung 4.6 A und D). Hier wurden jedoch ähnlich große relative Brutto- Gewinne und- Verluste ermittelt. Relativ zum Abfluss infiltrieren maximal bis zu 37%, Die maximale Exfiltrationsrate liegt hingegen bei 35 % der Abflusshöhe (Q_U) (Abbildung 4.6 D). Die mäßig überprägten Abschnitte des Flühbachgerinnes (F1, F2) weisen in den Extremwerten als auch in den gemittelten Werten eine geringere Spannweite als die Bäche des Wässerig- und Holxmattfächers auf. Im „Flühbach“ konnten bis auf zwei Ausnahmen (F1, Messtag drei und sechs) stets deutliche relative Brutto- Gewinne und- Verluste beobachtet werden. Während an Messtag neun keine Nettoänderung zu erkennen war (Abbildung 4.3 B), zeigt sich dennoch ein deutlicher bidirektionaler Austausch: brutto in- und exfiltrieren hier bis zu 19 % des vorherrschenden Abflusses (Abbildung 4.6 B und C). Auf die Wassermenge betrachtet, ex- und infiltriert im naturbelassenen Abschnitt D1 des Dieboldsbachfächers deutlich mehr Wasser als bei den meisten anderen Schwemmfächern (Abbildung 4.3 E). Dennoch zeigen sich relativ zum Abfluss nur geringe Unterschiede zu den Werten des Flühbachfächers (vergl. Abbildung 4.6 C und 4.6 E). Die Bäche mit den im Durchschnitt höchsten Abflüssen („Dieboldsbach“ und „Holxmatt“) weisen auch größere Brutto- Gewinne und Brutto- Verluste auf (Abbildung 4.5 G). Relativ zum Abfluss (Q_{GAIN} / Q_U , Q_{LOSS} / Q_U) ist dieser Zusammenhang jedoch nicht mehr festzustellen (Abbildung 4.6 G).

Zusammenfassend liegt bei allen Schwemmfächern ein deutlicher relativer Brutto- Verlust von über 10 % vor. Im Mittel zeigten sich beim Gerinne des Wässerigfächers die niedrigsten relativen Brutto- Gewinne und die höchsten relative Brutto- Verluste sowie beim Holxmattbach die höchsten relativen Brutto- Gewinne. Die jeweiligen relativen Bruttowerte des Flühbachfächers liegen hingegen zwischen denen des „Holxmatt“- und Wässerigfächers (Abbildung 4.6 G). Alle ermittelten Netto- und Bruttoergebnisse sind im Anhang in Tabelle A1 aufgeführt.

4.6 Einordnung in das Abflussgeschehen

Bei dem Auslesen der Kapazitätssonden aus den Bächen Wässerig und „Flühbach“ ist ein unerwarteter Fehler aufgetreten. So zeigte sich, dass eine Sonde ihre Aufzeichnung nach 20 Messpunkten beendete. Die zweite Sonde konnte trotz Testlauf vor den Messungen, nach dem dreimonatigen Messintervall, aufgrund eines defekten Speichermoduls nicht ausgelesen werden. Die aus der P/Q- Beziehung abgeleiteten Abflussdaten sind mit Q_{PEGEL} bezeichnet und in Abbildung 4.7 dargestellt.

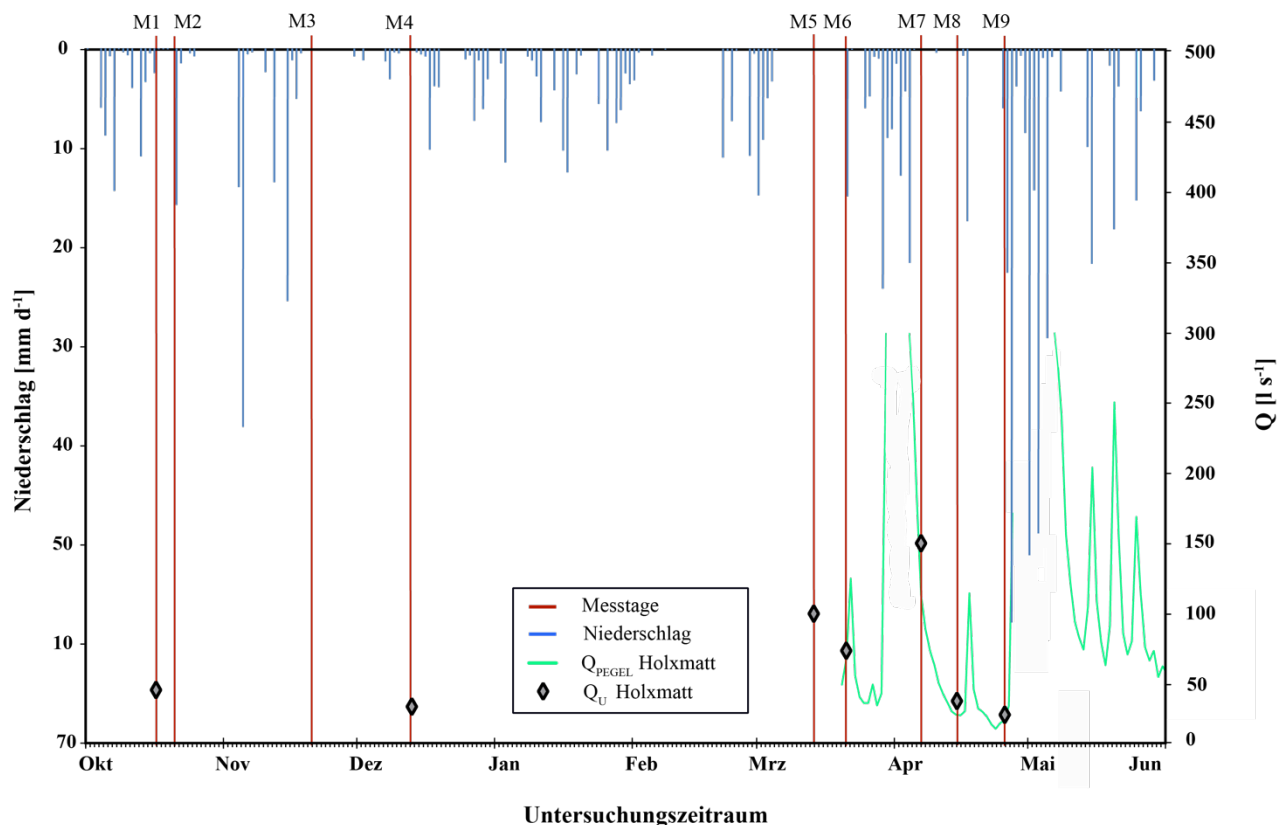


Abbildung 4.7: Einordnung der Messtage in das Abflussgeschehen am Beispiel „Holxmatt“. Dargestellt sind: Messtage (M1 – M9) Niederschlags Tagessummen (MeteoSwiss, 2015), Q_U und täglicher Q_{PEGEL} .

Die dafür angepasste Exponentialfunktion zeigt im Bereich bis zu 50 l s^{-1} eine sehr gute und bis zu 150 l s^{-1} eine gute Anpassung. Bei einer genaueren Betrachtung fällt jedoch auf, dass ab einem Abfluss von ca. 300 l s^{-1} schon kleinste Änderungen des Wasserstandes zu einer extremen Erhöhung des Abflusses führen. Die daraus resultierenden Maximalwerte des Abflusses belaufen sich auf mehrere Millionen l s^{-1} . Daher wurden die ermittelten Abflusswerte oberhalb von 300 l s^{-1} als unplausibel eingestuft und bei der Darstellung nicht berücksichtigt (Abbildung 4.7). Obwohl die kontinuierlichen Pegelmessungen erst nach der

Winterpause durchgeführt wurden, sind die unterschiedlichen Abflussereignisse der durchgeführten Feldversuche zu erkennen. Auch wenn nur ein kleiner Teil des Jahresabflussgeschehens beurteilt werden kann, gehe ich dennoch aufgrund der Niederschlagsdaten und den gewonnen Erfahrungen vor Ort davon aus, dass ein Teil der Messungen bei Niedrigwasserbedingungen stattfand.

5 DISKUSSION

5.1 Diskussion der Ergebnisse

Eine grundlegende Fragestellung dieser Arbeit bezieht darauf, ob Schwemmfächer in voralpinen Flussgebieten ein relevantes Speicherpotenzial zum Abflussbeitrag während Niedrigwasserperioden besitzen. Und kann eine einfache und direkte Methode entwickelt werden, um das potenzielle Speichervolumen von Schwemmfächern abzuschätzen? Hierfür wurde das Volumen von 38 Schwemmfächer Sedimentkörpern in den zwei Untersuchungsgebieten „Röthebach“ und „Emme“ mittels zweier Methoden bestimmt und das Volumen des Talaquifers des jeweiligen Vorfluters abgeschätzt. Die zusätzliche Abflussmessung an vier ausgewählten Schwemmfächern diente der Bilanzierung der möglichen lokalen Grundwasserneubildung sowie der In- und Exfiltrationen des Schwemmfächer Gerinnes und der des Schwemmfächer zugehörigen Grundwasserspeichers. Das ermittelte Gesamtvolumen aller 38 untersuchten Schwemmfächer beträgt 729.523 m³ im Emmetal und 2.230.309 m³ im Röthebachtal. Drei der untersuchten Schwemmfächer zeigen über alle Messtage im Mittel einen deutlichen Netto- Verlust und somit vorwiegend effluente Bedingungen. Lediglich im Hauptgerinne des Holxmattfächers herrschen vorwiegend influente Prozesse vor. Auf den untersuchten Messabschnitten zeigt sich zudem ein Netto-Verlust von bis zu 44 % des vorherrschenden Abflusses.

Die Berechnung mittels der in Kapitel 3.3 beschriebenen Geometrie-basierten Methode soll als Vereinfachung zur Volumenbestimmung der Schwemmfächer dienen. Die GIS-gestützte Berechnung kann hierbei aufgrund der hoch aufgelösten Datengrundlage (2 x 2 m Raster) als Referenz für die Abschätzung der Genauigkeit genutzt werden. Es zeigt sich, dass sich die Geometriemethode sehr gut für die Abschätzung der Schwemmfächer Volumina der beiden Untersuchungsgebiete eignet, obwohl einzelne Schwemmfächer Schätzungen deutlich von den GIS berechneten Volumina abweichen. Diese Abweichung erklärt sich unter anderem durch die naturgemäße Abweichung der Schwemmfächer Form von einem idealen Kegelsegment und lässt sich daher nur eingeschränkt anhand der mathematischen Formel zur Volumenberechnung einer Kegelgeometrie darstellen. Auch ein tief eingeschnittenes Hauptgerinne kann somit nicht berücksichtigt werden. Die berechneten Volumina zeigen zudem einen größeren relativen Fehler bei kleinen und schmalen Schwemmfächern.

Dieses resultiert unter anderem daraus, dass Kreissegmente mit kleinem Innenwinkel nur schwer geschätzt werden können. So ist der Unterschied zwischen einem halben und einem viertel Kreis relativ einfach, die Unterscheidung zwischen einem 1/12, 1/16 oder einem 1/18 Kreis jedoch deutlich schwieriger abzuschätzen. Die mittels beider Berechnungsmethoden ermittelten Gesamtvolumina weichen dennoch nur um 1% voneinander ab. Somit erlaubt die Geometrie basierte Methode eine vereinfachte und direktere Berechnung von den Schwemmfächer Volumina, unabhängig einer GIS- Software. Alle relevanten Daten können zudem aus einer topografischen Karte mit kleinem Maßstab ausgelesen werden.

Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen wurde das Schwemmfächer Volumen durch deren tiefsten Punkt (Schwemmfächer Fuß) begrenzt. Diese konstruierte Begrenzung ist in der Natur nicht zwangsläufig gegeben. Durch geologische Sondierungen müsste daher festgestellt werden, wie weit der Schwemmfächer Körper in die Schotterfüllung des Haupttales hinein ragt, mit ihr verzahnt ist oder bis zum anstehenden Grundgestein reicht. Somit könnte das reale Volumen anhand von flächendeckenden Information bezüglich der Tiefe des anstehenden Grundgesteines wie sie beispielsweise durch das transnationale Projekt GeoMol (www.geomol.eu) bereitgestellt sind noch genauer berechnet werden. Zusammenfassend ist auch die GIS- basierte Methode nur eine Näherung für die exakte Berechnung von Schwemmfächer Volumina, im Rahmen der Fragestellung dient sie aber dennoch der ausreichend genauen Abschätzung deren potenzieller Speicher.

Für die Abschätzung des potenziellen Speichervermögens ist neben dem Sedimentvolumen auch die effektive bzw. nutzbare Porosität des Sedimentkörpers eine weitere maßgebliche Größe. Leider konnten durch die des Kantons Bern zur Verfügung gestellten Bohrprofile keine Rückschlüsse über die effektive Porosität der Schwemmfächer gemacht werden, da keine der Sondierungen auf einem Schwemmfächer lokalisiert sind. Schwemmfächer bestehen aus dem erodierten Material ihrer Einzugsgebiete. Dieses besteht in den untersuchten Fächern zu einem Großteil aus dem silikatischen Grobanteil des Nagelfluhkonglomerates und ähnelt der Schotterfüllung des Haupttales. Daher kann das effektive Porenvolumen für die Berechnung der potenziellen Speicherkapazität von den Angaben des Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern (WEA, 1975) näherungsweise abgeleitet werden: für die großen Schotteraquifere der beiden Untersuchungsgebiete wird hier eine mittlere nutzbare Porosität von 17 % angegeben.

Mit dem berechneten Volumen ergibt sich daraus ein potenzielles Schwemmfächer Speichervolumen von 113.489 m^3 (Untersuchungsgebiet „Emme“) und 386.653 m^3 (Untersuchungsgebiet „Röthebach“) sowie ein Gesamtspeichervolumen von 500.142 m^3 . Das potenzielle Speichervolumen der „Röthebach“ Schwemmfächer entspricht daher 18 % des möglichen Speichervolumens der Schotterfüllung im Haupttal. Dies lässt darauf schließen, dass die Schwemmfächer einen relevanten Grundwasserspeicher darstellen könnten. Dieses Potenzial bliebe jedoch ungenutzt, solange die jeweiligen Schwemmfächer Speicher nicht auch gefüllt würden. Daher müssten die Oberflächengewässer, welche über den jeweiligen Fächer fließen, zu einer lokalen Grundwasserneubildung innerhalb des Schwemmfächers beitragen. Diese Annahme kann daraus bestätigt werden, dass drei der vier Schwemmfächer Bäche zwischen dem Schwemmfächer Apex und dem Schwemmfächer Fuß einen Netto-Verlust und somit effluente Bedingungen aufweisen. Dieser Verlust trägt, wie Untersuchungen von Shimadea et al. (1993) bereits zeigten, zum größten Teil zur Grundwasserneubildung des Fächeraquifers bei.

Laut Heron et al. (2001) können 20 – 60 % des Niederschlages im Einzugsgebiet des Schwemmfächers durch dessen Sedimentkörper zwischen gespeichert werden. Zudem schätzen Studien von Wood et al. (2006) den Abflussverlust des Schwemmfächer Gerinnes auf einer Strecke von 180 m auf 30 %. Die Abflussmessungen meiner Arbeit zeigen, dass bis zu 45 % des am Fächerapex ankommenden Abflusses in den Schwemmfächer Körper exfiltrieren. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die durchgeführten Messungen lediglich Momentaufnahmen darstellen. Um einen generellen Überblick über die Grundwasserneubildung zu bekommen, sind die zu unterschiedlichen Abflussereignissen durchgeführten Messungen von Vorteil. Die Abflussmessungen ergaben im Mittel für alle Schwemmfächer und alle Messtage eine durchschnittliche Neubildungsrate von 7 % des vorherrschenden Abflusses. Dieser Wert entspricht den Ergebnissen von Houston et al. (2002) welche die Grundwasserneubildungsrate durch den untersuchten Schwemmfächer auf 7 – 9 % des langjährigen, mittleren Einzugsgebiet Niederschlages schätzten.

Verdeutlichend soll im Folgenden eine Beispielrechnung anhand der Ergebnisse des Flühbachfächers Aufschluss darüber geben, ob die Wasserspeicherung der Schwemmfächer für eine Niedrigwasserperiode relevant ist und somit als zusätzlicher Grundwasserspeicher dienen kann.

Eine Grundwasserneubildungsrate von 7 % bei einem mittleren Abfluss von 63 l s^{-1} ergibt eine Auffüllung von ca. $4,5 \text{ l s}^{-1}$. Bei einem Sedimentvolumen von 338.333 m^3 mit einer effektiven Porosität von 17 % kann von einem potenziellen Speichervolumen von 57.500 m^3 ausgegangen werden. Mit der ermittelten Neubildungsrate von $4,5 \text{ l s}^{-1}$ würden somit 159 Tage benötigt, um den Speicher des Schwemmfächers zu füllen. Bei Annahme eines gefüllten Speichers könnte das so ermittelte Speichervolumen den „Flühbach“ über einen Zeitraum von 22 Tagen mit 30 l s^{-1} (niedrigster gemessener Abflusswert) speisen. Dies deutet darauf hin, dass der Schwemmfächer eine wichtige Rolle für den Basisabfluss seines zugehörigen Gerinnes während Niedrigwasserperioden darstellt. Zu diesem Ergebnis passt auch der Inhalt eines Gespräches mit einem in der Nähe des Flühbaches alt eingesessenen Bauern: ihm zufolge sei der untere Bereich des Flühbaches noch nie trocken gefallen und diene bereits zweimal während extremer Trockenzeiten als Zwischenlagerungsort für Fische, welche von Anglern bei Notabfischungen des austrocknenden Röthebaches durchgeführt wurden. Dies zeigt unter anderem die positive Auswirkung dieses Grundwasserspeichers für sein umgebendes Ökosystem. Der angenommene Basisabfluss von 30 l s^{-1} stellt bereits 15 % des mittleren Niedrigwasserabflusses des Röthebaches von 200 l s^{-1} (BAFU) dar. Das könnte darauf hinweisen, dass die Gesamtheit aller Schwemmfächer eine nicht zu unterschätzende Relevanz für den Abfluss eines Gebietes hat. Bei einer Weiterführung des Rechenbeispiels wird dies umso deutlicher: so reicht der potenzielle Speicher aller Schwemmfächer im Untersuchungsgebiet „Röthebach“ hypothetisch aus, um diesen über 22 Tage mit einem Basisabfluss von 200 l s^{-1} zu speisen. Somit ist der Grundwasserspeicher der Schwemmfächer nicht nur für den einzelnen Schwemmfächer Bach, sondern auch für seinen Vorfluter von Bedeutung und kann zu einer Erhöhung der Restwassermenge in Trockenzeiten führen. Diese Erhöhung kann neben positiven ökologischen Effekten auch positive ökonomische Effekte beispielsweise auf die landwirtschaftliche Nutzung und die Energiegewinnung aus Wasserkraft haben. Zusammenfassend zeigt sich deutlich das hohe Speicherpotenzial von Schwemmfächern in voralpinen Flussgebieten. Diese Speicherstrukturen spielen durch Grundwasserneubildung und Wasser- Zwischenspeicherungen eine wichtige Rolle für das Abflussgeschehen eines Gebietes während Niedrigwasserperioden.

Eine weitere wichtige Fragestellung dieser Arbeit lautet wie folgt: haben unterschiedliche anthropogene Überprägungen Schwemmfächer und Gerinne eine Auswirkung auf die Grundwasserneubildung? Hierfür wurden Abflussmessungen und Tracerrückhaltsanalysen für die Nettobilanzierung und Quantifizierung von bidirektionalen In- und Exfiltrationsprozessen auf unterschiedlich überprägten Bächen durchgeführt. Die Analyse der Bäche zeigt unabhängig von der Höhe des Abflussereignisses deutliche Unterschiede in deren In- und Exfiltrationsprozessen.

Der Untersuchung ging die Hypothese voraus, dass ein stark überprägter Bachabschnitt mit undurchlässigem Bachbett weniger Wasser an den Schwemmfächer Körper abgeben kann als ein gering überprägter Abschnitt mit durchlässigem Bachbett. Damit trüge der überprägte Bachabschnitt weniger zur Auffüllung des Schwemmfächer Speichers bei. Die Ergebnisse der Nettobilanzierung der einzelnen Messabschnitte auf den unterschiedlich stark anthropogen überprägten Schwemmfächern bestätigen diese Annahme. Obwohl es nach Shimadea et al. (1993) bei Schwemmfächer Bächen zu einer Exfiltration des Bachwassers in den Grundwasserspeicher kommen sollte, zeigt sich beim Holxmattfächer eine positive Nettobilanz und damit auch keine Grundwasserneubildung. Hierbei ist zu beachten, dass die Abflusszunahme zwischen Schwemmfächer Apex und Schwemmfächer Fuß auch durch versteckte Wassereinleitungen der sich auf dem Fächer befindenden Fabrikhallen verursacht werden könnte. Bei dem Schwemmfächer mit naturbelassenem Gerinne kommt es hingegen zu einem hohen relativen Abflussverlust und einer hohen Grundwasser Neubildungsrate. Wie zu erwarten, liegt der mäßig überprägte „Flühbach“ zwischen diesen beiden Extremen. Hier konnten, verglichen mit dem Wässrigfächer, nur geringere Exfiltrationsverluste festgestellt werden, dennoch ist auch hier die Nettobilanz im Mittel über alle Messtage negativ. Die Ergebnisse der beiden Messabschnitte des Dieboldsbaches können aufgrund der wenigen Messtage nur schlecht mit den anderen Schwemmfächern verglichen werden. Dennoch bestätigt der Vergleich des unteren, natürlichen Bachabschnittes und des oberen überprägten Bachabschnittes die Ergebnisse der andern Fächer, da auch hier im überprägten Abschnitt deutlich weniger Wasser exfiltriert, als im naturbelassenen Abschnitt. So bestätigt sich, dass die Auffüllung des Speichers durch das Schwemmfächer Gerinne mit zunehmender Überprägung abnimmt.

Payn et al. (2009) gehen davon aus, dass bei effluenten Bedingungen der Prozess der Exfiltration überwiegt, In- und Exfiltrationsprozesse aber dennoch bidirektional ablaufen. Diese Tatsache wird durch die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigt. Unabhängig von influenten oder effluenten Bedingungen, wurden, bis auf wenige Ausnahmen, gleichzeitige In- und Exfiltrationsprozesse ermittelt. Die Quantifizierung dieser Brutto Zu- und Abflüsse soll ein Maß für die Interaktionsmöglichkeiten der unterschiedlich überprägten Bäche mit dem Grundwasserspeicher darstellen. Analog zu den oben erwähnten Rückschlüssen aus der Nettobilanzierung wurde anfangs davon ausgegangen, dass die Interaktion zwischen Sedimentkörper und Schwemmfächer Gerinne mit zunehmender Überprägung abnimmt. Dies konnte jedoch nur eingeschränkt bestätigt werden. Der Vergleich der relativen Zu- und Abflüsse der Bäche „Wässerig“ und „Flühbach“ bestätigt zunächst die oben erwähnte Annahme. So dominieren beim Wässerigbach die Exfiltrationsprozesse deutlich, die Brutto Zu- und Abflüsse des Flühbaches sind dagegen ähnlich groß. Die Differenz zwischen der höchsten Infiltration und der höchsten Exfiltration des Wässeriggerinnes scheint jedoch deutlich höher als die Differenz des Flühbachgerinnes. Dies lässt darauf schließen, dass der naturbelassene Bachabschnitt stärker mit dem Schwemmfächer Körper interagiert, als der mäßig überprägte Abschnitt. Demnach sollte eigentlich beim stark überprägten „Holxmatt“ Bach nur eine geringe Interaktion stattfinden, was durch die Messergebnisse jedoch nicht bestätigt wird. Hier wurde trotz influenter Bedingungen ein relativer Bruttoverlust von bis zu 35 % ermittelt. Dieser Widerspruch muss aber nicht zwangsläufig die oben erwähnte Annahme widerlegen. So könnte die starke Interaktion mit dem Schwemmfächer Körper unter anderem mit den im Holxmattbach vorhandenen tiefen Kolken zusammen hängen, da diese Retentionsräume für den verwendeten Tracer darstellen. Hierdurch könnte es zu einer fehlerhaften Tracerrückhalteanalyse kommen, wodurch der Brutto Abfluss überschätzt würde. Dies kann jedoch ohne eine Methodenänderung, weitere Abflussmessungen und Rückhalteanalysen an ähnlich stark überprägten Schwemmfächern nicht näher geklärt werden.

Zusammenfassend legen die Ergebnisse der Abflussmessungen nahe, dass Schwemmfächer Gerinne mit zunehmender anthropogener Überprägung weniger mit ihrem zugehörigen Schwemmfächer Körper interagieren können und es somit zu einer geringeren Grundwasserneubildung kommt.

Abschließend soll die Frage geklärt werden, welches Potenzial Schwemmfächer für das Niedrigwassermanagement in voralpinen Flussgebieten haben. Für die Beantwortung können die Ergebnisse aus den vorhergehenden Fragestellungen dienen.

Es zeigt sich, dass Schwemmfächer in Niedrigwasserperioden wichtige Speicherstrukturen darstellen können, welche sich positiv auf den Niedrigwasserabfluss auswirken. Sie sind daher für die Wasserführung, die Gewässerökologie und die Wassertemperatur während Trockenperioden von hoher Relevanz. Eine Erhöhung oder auch die Stabilität der Restwassermenge kann zudem einen positiven ökonomischen Effekt auf die Landwirtschaft und die Energiegewinnung aus Wasserkraft bewirken. Eine anthropogene Überprägung der Schwemmfächer führt jedoch häufig zu einer Verminderung der Grundwasserneubildung in abflussreichen Zeiten und somit auch zu einer Abnahme des Potenzials, Wasser für Niedrigwasserperioden zwischenzuspeichern. Der Zusammenhang zwischen anthropogener Überprägung und Grundwasserneubildung auf Schwemmfächern kann somit als Angriffspunkt für ein effektives Niedrigwassermanagement dienen und unterstreicht die Relevanz von Schwemmfächern für Trockenzeiten. Durch eine gezielte Erhöhung der Grundwasserneubildung wäre teilweise eine bessere Nutzung der Speicher möglich. Hierdurch könnte es zu einer Erhöhung der Restwassermenge in den Bächen der Schwemmfächer, aber auch in deren Vorflutern kommen. Eine Steigerung der Grundwasserneubildung könnte erzielt werden, indem in anthropogen überprägten Schwemmfächer Bächen die Interaktion zwischen Gerinne und Grundwasserspeicher wieder hergestellt oder zumindest gefördert würde. Hierfür sollten gezielte Renaturierungsmaßnahmen, welche die Durchlässigkeit der Gerinne Sohle erhöhen, evaluiert und durchgeführt werden. Diese Maßnahmen könnten beispielsweise den Rückbau von Dohlen, die Lösung der Kolmatierung und die herstellen der Konnektivität zwischen Schwemmfächer, Hängen und Bächen darstellen. So zeigt sich abschließend, dass Schwemmfächer ein hohes Potenzial für das Niedrigwassermanagement in voralpinen Flussgebieten besitzen.

5.2 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse dieser Masterarbeit zeigen, dass Schwemmfächer in voralpinen Flussgebieten ein hohes Speicherpotenzial für Niedrigwasserperioden besitzen. Als Speicherstrukturen spielen sie in Trockenzeiten durch Grundwasserneubildungen und Zwischenspeicherungen eine wichtige Rolle für das Abflussgeschehen des jeweiligen Gebietes. Die in dieser Arbeit entwickelte vereinfachte Methode zur Volumenberechnung von Schwemmfächer und Sedimentkörpern dient der Abschätzung des potenziellen Speichervolumens und erlaubt somit die schnelle und direkte Quantifizierung der Speicherstrukturen innerhalb eines Untersuchungsgebietes. Zudem legen Ergebnisse aus Abflussmessungen nahe, dass Gerinne auf Schwemmfächern mit zunehmender anthropogener Überprägung weniger mit ihrem darunterliegenden Sedimentkörper interagieren können und dadurch die lokale Grundwasserneubildung absenken. Das hohe Grundwasserspeicherpotenzial von naturbelassenen Schwemmfächern unterstreicht die Möglichkeiten dieser Speicherstrukturen für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement. So könnte durch gezielte Bewirtschaftung und Renaturierungsmaßnahmen, von stark anthropogen überprägten Schwemmfächern, die Restwassermenge in Niedrigwasserperioden erhöht und die Dauer des Niedrigwasserabflusses während der Trockenperiode verkürzt werden. Dies hätte u.a. positive Auswirkungen auf die Ökologie und Ökonomie des Schwemmfächer Gebietes und den Flussunterlauf. Und zeigt, dass Schwemmfächer ein hohes Potenzial für das erfolgreiche Niedrigwassermanagement besitzen.

5.3 Ausblick

Die in dieser Arbeit verwendeten Methoden geben einen ersten Hinweis darauf, dass Schwemmfächer eine wichtige Rolle für das Niedrigwassermanagement spielen können. Um Empfehlungen für gezielte Maßnahmen im Rahmen des Niedrigwassermanagement geben zu können, müsste die Interaktion zwischen Schwemmfächer Gerinne und Schwemmfächer Körper jedoch noch besser verstanden und erforscht werden. Hierfür könnten unter anderem Grundwassermessstellen helfen, die Variabilität zwischen Abfluss und Grundwasser

aufzulösen und die potenziellen Speicherräume zu evaluieren. Für die Quantifizierung der potenziellen Auswirkungen von gezielten Niedrigwassermanagement Maßnahmen könnte mit Hilfe der experimentell ermittelten Daten ein Grundwassermodell aufgesetzt werden um Szenarien der Speicherwirkung und Basisabflusserhöhungen für unterschiedliche lokale Grundwasserneubildungsbedingungen zu simulieren.

Ein weiterer Forschungsansatz sollte die Übertragung und Verallgemeinerung der vorgestellten Ergebnisse auf weitere Einzugsgebiete sein. Die hohe Schwemmfächer Dichte des in dieser Arbeit untersuchten Gebietes stellt mit Sicherheit ein Extrembeispiel dar und kann daher nicht uneingeschränkt auf andere Gebiete übertragen werden. Außerdem ist die Infiltration und somit auch die Grundwasserneubildung nach Winfield et al. (2006) von der Permeabilität des Sedimentkörpers abhängig, welche wiederum durch Ablagerungsstrukturen, Schwemmfächer Alter, Bodenentwicklung und die Geologie des Einzugsgebietes beeinflusst wird. Daraus lässt sich ableiten, dass die Speicherverhalten von Schwemmfächern nur schwer miteinander zu vergleichen sind. Daher sollten Messkampagnen in mehreren Gebieten mit unterschiedlicher Geologie durchgeführt werden und die daraus resultierenden Ergebnisse einer allgemeinen Abschätzung der Speicherkapazitäten von Schwemmfächern innerhalb eines gesamten Flusseinzugsgebietes dienen. Die vorgestellte vereinfachte Methode zur Volumenberechnung von Schwemmfächer Körpern könnte hierbei genutzt werden, um die Speicher in größeren Gebieten direkter abschätzen zu können.

Die vorgestellten Untersuchungen und Ergebnisse zeigen, dass die Schwemmfächer Forschung in alpinen Gebieten ein viel versprechendes Thema für ein gezieltes Niedrigwassermanagement darstellt. Es würde sich daher unbedingt lohnen, weiter an deren Strukturen, Speichervermögen und Einflussmöglichkeiten zu forschen.

LITERATURVERZEICHNIS

- Ahnert, F. (2009).** Einführung in die Geomorphologie 3. Aufl. *Ulmer, Stuttgart*, 477.
- Allen, C. M., & Taylor, E. A. (1923).** *The salt velocity method of water measurement*. American Society of Mechanical Engineers.
- Blainey, J. B., & Pelletier, J. D. (2008).** Infiltration on alluvial fans in arid environments: Influence of fan morphology. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003–2012), 113(F3).
- Blair, T. C., & McPherson, J. G. (1994).** Alluvial fan processes and forms. In *Geomorphology of desert environments* (pp. 354-402). Springer Netherlands.
- Blair, T. C., & McPherson, J. G. (1994).** Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages. *Journal of sedimentary research*, 64(3).
- Bull, W. B. (1964).** Geomorphology of segmented alluvial fans in western Fresno County, California (No. 352).
- Bull, W. B. (1977).** The alluvial-fan environment. *Progress in physical geography*, 1(2), 222-270.
- Bundesamt für Landestopografie (2008).** Formeln und Konstanten für die Berechnung der Schweizerischen schiefachsigen Zylinderprojektion und der Transformation zwischen Koordinatensystemen.
- Bundesamt für Umwelt (2012).** Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz (CCHydro). *Umwelt-Wissen*, (1217).
- CH2014 Impacts (2014).** Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland, published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp. Zuletzt aufgerufen am: 12.06.2015 <http://ch2014-impacts.ch/res/files/chapter/CH2014-Impacts_report-chapter6.pdf>

-
- Buwal, B. W. G., & Meteo, S. (2004).** Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. *Schriften zur Umwelt*, (369), 1-174.
- Covino, T. P., & McGlynn, B. L. (2007).** Stream gains and losses across a mountain-to-valley transition: Impacts on watershed hydrology and stream water chemistry. *Water Resources Research*, 43(10).
- Day, T. J. (1977).** Field procedures and evaluation of a slug dilution gauging method in mountain streams. *Journal of Hydrology (New Zealand)*, 16(2).
- Denny, C. S. (1965).** Alluvial fans in the Death Valley region, California and Nevada (No. 466). US Govt. Print. Off.
- Denny, C. S. (1967).** Fans and pediments. *American Journal of Science*, 265(2), 81-105.
- Dorn, R. I. (1992).** Segmentation of alluvial fans in death valley, california: New insights from surface exposure dating and laboratory modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17(6), 557-574.
- Dyck, S., & Peschke, G. (1995).** Grundlagen der Hydrologie 3. Aufl. *Verl. Bauwesen*, Berlin 536
- Harvey, J. W., Conklin, M. H., & Koelsch, R. S. (2003).** Predicting changes in hydrologic retention in an evolving semi-arid alluvial stream. *Advances in Water Resources*, 26(9), 939-950.
- Harvey, J. W., Wagner, B. J., & Bencala, K. E. (1996).** Evaluating the reliability of the stream tracer approach to characterize stream-subsurface water exchange. *Water Resources Research*, 32(8), 2441-2451.
- Herron, N., & Wilson, C. (2001).** A water balance approach to assessing the hydrologic buffering Potenzial of an alluvial fan. *Water Resources Research*, 37(2), 341-351.
- Hooke, R. L. (1967).** Processes on arid-region alluvial fans. *Journal of Geology*, 75: 438-460.

-
- Houston, J. (2002).** Groundwater recharge through an alluvial fan in the Atacama Desert, northern Chile: mechanisms, magnitudes and causes. *Hydrological Processes*, 16(15), 3019-3035.
- Hsu, N. S., Chiang, C. J., Wang, C. H., Liu, C. W., Huang, C. L., & Liu, H. J. (2013).** Estimation of pumpage and recharge in alluvial fan topography under multiple irrigation practices. *Journal of Hydrology*, 479, 35-50.
- Hudson, R., & Fraser, J. (2005).** The mass balance (or dry injection) method. *Streamline Watershed Management Bulletin*, 9, 6-12.
- Hunkeler, D. (2009).** Research proposal- Effect of climate change on groundwaterresources. S. N. S. Foundation. Berne: 22.
- Kanton Bern (2015).** Geologische Grundlagendaten des Amtes für Wasser und Abfall (AWA) Zuletzt aufgerufen am: 12.06.2015 <<http://www.apps.be.ch>>
- Kruse, S., Seidl, I., & Stähli, M. (2010).** Informationsbedarf für die Früherkennung von Trockenheit in der Schweiz. *Die Sicht potenziell betroffener Nutzergruppen, Wasser Energie Luft*, 102(4), 301-304.
- Lange, J., Schuetz, T., Gregoire, C., Elsässer, D., Schulz, R., Passeport, E., & Tournebize, J. (2011).** Multi-tracer experiments to characterise contaminant mitigation capacities for different types of artificial wetlands. *International Journal of Environmental and Analytical Chemistry*, 91(7-8), 768-785.
- Lecce, S. A. (1990).** The alluvial fan problem. *Alluvial Fans: A Field Approach*. Wiley, Chichester, 3-24.
- Leibundgut, C., Maloszewski, P., & Külls, C. (2011).** *Tracers in hydrology*. John Wiley & Sons.
- MeteoSchweiz (2015).** Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. Zuletzt aufgerufen am: 12.06.2015 <<http://www.meteoschweiz.admin.ch>>

-
- Payn, R. A., Gooseff, M. N., McGlynn, B. L., Bencala, K. E., & Wondzell, S. M. (2009).** Channel water balance and exchange with subsurface flow along a mountain headwater stream in Montana, United States. *Water Resources Research*, 45(11).
- Pfister, C., & Rutishauser, M. (2000).** Dürresommer im Schweizer Mittelland seit 1525. In *Unterlagen zum OcCC/ProClim-Workshop vom* (Vol. 4).
- Rieckermann, J., Borsuk, M., Reichert, P., & Gujer, W. (2005).** A novel tracer method for estimating sewer exfiltration. *Water resources research*, 41(5).
- Ruehl, C., Fisher, A. T., Hatch, C., Los Huertos, M., Stemler, G., & Shennan, C. (2006).** Differential gauging and tracer tests resolve seepage fluxes in a strongly-losing stream. *Journal of Hydrology*, 330(1), 235-248.
- Schmadel, N. M., Neilson, B. T., & Stevens, D. K. (2010).** Approaches to estimate uncertainty in longitudinal channel water balances. *Journal of Hydrology*, 394(3), 357-369.
- Schorer, M. (1992).** Extreme Trockensommer in der Schweiz und ihre Folgen für Natur und Wirtschaft. Geograph. Inst. d. Univ. Bern.
- Seeger, S., & Weiler, M. (2014).** Reevaluation of transit time distributions, mean transit times and their relation to catchment topography. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12), 4751-4771.
- Seneviratne, S. I., Orth, R., Jörg-Hess, S., Kruse, S., Seidl, I., Stähli, M., ... & Weiler, M. (2013).** Trockenheit in der Schweiz: Ergebnisse des Nfp-61-Projekts Drought-Ch. *Aqua & Gas*, 93(9), 38-47.
- Shimada, J., Kayane, I., Shimano, Y., & Taniguchi, M. (1993).** Use of several environmental tracers to detect the surface-subsurface water interaction in an alluvial fan. *IAHS PUBLICATION*, 263-263.
- Sinreich, M., Kozel, R., Lützenkirchen, V., Matousek, F., Jeannin, P. Y., Löw, S., & Stauffer, F. (2012).** Grundwasserressourcen der Schweiz: Abschätzung von Kennwerten. *Aqua & Gas*, 92(9), 16-28.

Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology journal*, 10(1), 52-67.

Spektrum(2011). Zuletzt aufgerufen am: 12.06.2015
<<http://www.spektrum.de/lexikon/geographie/schwemmfacher/7102>>

Spreafico, M. (1994). *Handbuch für die Abflussmengenbestimmung mittels Verdünnungsverfahren mit Fluoreszenztracer*. Landeshydrologie und-geologie.

Swisstopo (2015). Bundesamt für Landestopografie der Schweiz. Zuletzt aufgerufen am: 12.06.2015 <<http://www.swisstopo.admin.ch>>

Weiler, M., McGuff, H., Tubilowicz, J., (2005): Evaluation of the effectiveness of tracer methods for discharge estimation. University of British Columbia. Unveröffentlicht.

Weissmann, G. S., Zhang, Y., LaBolle, E. M., & Fogg, G. E. (2002). Dispersion of groundwater age in an alluvial aquifer system. *Water Resources Research*, 38(10), 16-1.

Winfield, K. A., Nimmo, J. R., Izbicki, J. A., & Martin, P. M. (2006). Resolving structural influences on water-retention properties of alluvial deposits. *Vadose Zone Journal*, 5(2), 706-719.

Woods, S. W., MacDonald, L. H., & Westbrook, C. J. (2006). Hydrologic interactions between an alluvial fan and a slope wetland in the central Rocky Mountains, USA. *Wetlands*, 26(1), 230-243.

Washington.edu (2015). WatershedHowTo.doc. Zuletzt aufgerufen am: 12.06.2015
<<http://courses.washington.edu/geog460/finalproject/WatershedHowTo.doc>>

Zellweger, G. W., Avanzino, R. J., & Bencala, K. E. (1989). *Comparison of tracer-dilution and current-meter discharge measurements in a small gravel-bed stream, Little Lost Man Creek, California*. Department of the Interior, US Geological Survey.

ANHANG

Tabelle A1 : Ergebnisse der Abflussmessungen und Tracerrückhaltsanalysen

im	Messtag	Schwemmfächer	Abschnitt	QD [l/s]	QU [l/s]	NetΔQ [l/s]	(QLOSS) [l/s]	(QGAIN) [l/s]
6.10.14	1	Holxmatt	1	43,5	40,8	2,7	-7,4	
	1	Wässerig	1	10,3	12,8	-2,5	-3,5	
	1	Flühbach	1	46,6	51,4	-4,8	-11,2	
	1	Flühbach	2	51,4	51,9	-0,5	-5,1	
0.10.14	2	Wässerig	1	4,3	7,8	-3,5	-4,1	
	2	Flühbach	1	28,7	29,3	-0,6	-4,9	
	2	Dieboldsbach	1	**	**	**	**	
	2	Dieboldsbach	2	**	**	**	**	
0.11.14	3	Flühbach	1	76,9	73,4	3,5	-2,3	
	3	Flühbach	2	73,4	72,8	0,6	-2,1	
2.12.14	4	Holxmatt	1	28,8	28,6	0,2	-0,9	
	4	Flühbach	1	33,5	35,2	-1,7	-5,6	
	4	Flühbach	2	35,2	38,1	-2,8	-6,7	
	4	Wässerig	1	8,9	11,4	-2,6	-2,9	
3.03.15	5	Wässerig	1	26,8	29,9	-3,1	-4,1	
	5	Flühbach	1	82,0	82,3	-0,3	-7,4	
	5	Flühbach	2	82,3	85,1	-2,8	-10,5	
	5	Holxmatt	1	102,1	97,2	4,8	-3,7	
	5	Dieboldsbach	1	138,7	151,6	-12,9	-28,3	
	5	Dieboldsbach	2	131,2	136,3	-5,1	-8,6	
0.03.15	6	Holxmatt	1	70,8	69,8	1,0	-1,1	
	6	Flühbach	1	67,9	78,8	-10,9	-12,5	
	6	Flühbach	2	78,8	81,4	-2,6	-7,0	
	6	Wässerig	1	25,2	29,5	-4,3	-6,4	
6.04.15	7	Dieboldsbach	1	199,2	191,4	7,7	-13,0	
	7	Dieboldsbach	2	191,4	190,1	1,3	-11,1	
	7	Holxmatt	1	146,8	149,1	-2,2	-19,2	
	7	Flühbach	1	133,6	132,4	1,3	-14,0	
	7	Flühbach	2	132,4	136,1	-3,7	-14,1	
	7	Wässerig	1	49,4	53,6	-4,2	-6,0	
4.04.15	8	Dieboldsbach	1	66,6	77,9	-11,3	-11,3	
	8	Dieboldsbach	2	70,0	67,7	2,3	-11,4	
	8	Holxmatt	1	35,4	35,1	0,2	-10,5	
	8	Flühbach 1	1	55,9	56,2	-0,2	-6,7	
	8	Flühbach 2	2	56,2	54,6	1,5	-5,6	
	8	Flühbach 1	50m	55,8	**	**	**	

	8	Flühbach 2	150m	**	55,1	**	**
	8	Wässerig	1	14,1	17,2	-3,0	-4,5
	8	Wässerig	50m	15,3		**	**
5.04.15	9	Dieboldsbach	1	62,8	77,8	-15,0	**
	9	Holxmatt	1	22,8	22,4	0,4	-7,7
	9	Wässerig	1	6,3	9,9	-3,6	**
	9	Flühbach 1	1	34,6	34,4	0,2	-6,3
	9	Flühbach 2	2	34,4	35,7	-1,3	-7,5

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

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

Ort, Datum

Unterschrift