

Abschätzung von ereignisbasierten
Feststoffvolumina in Schweizer Wildbächen mit
neuronalen Netzwerken

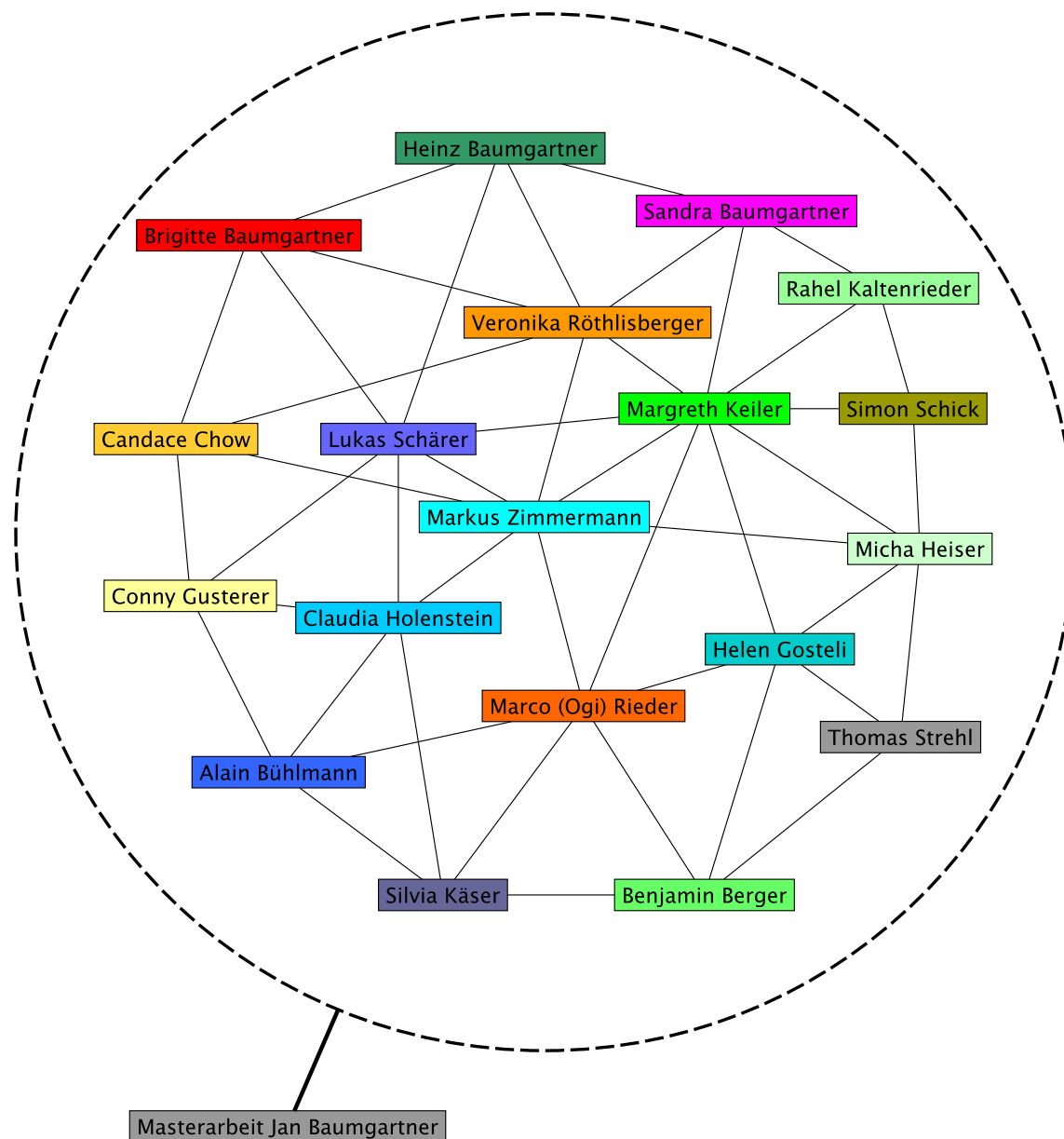
Masterarbeit
der Philosophisch naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Bern

vorgelegt von
Jan Baumgartner
2016

Leitung der Arbeit
PD. Dr. Margreth Keiler
Geographisches Institut der Universität Bern
überarbeitete Version

Danksagung

Für das Gelingen dieser Masterarbeit mussten viele Steine in Rollen gebracht werden. Ausgelöst wurden diese durch:



Vielen Dank!

Jan Baumgartner

Zusammenfassung

In alpinen Wildbacheinzugsgebieten kommt es infolge von Feststofftransport periodisch zu Schäden an Mensch, Tieren und Sachwerten. Um diese Schäden zu verhindern, werden transportierte Feststoffvolumina von Grossereignissen mithilfe von empirischen Verfahren abgeschätzt. Untersuchungen zeigen Abweichungen von mehreren Grössenordnungen zwischen den geschätzten und den beobachteten Feststoffvolumina. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines neuen Ansatzes für die Abschätzung der transportierten Feststoffvolumina von Grossereignissen mithilfe künstlicher neuronaler Netze (KNN). Für die Modellanpassung werden Messungen und Schätzungen von Feststoffvolumina sowie Einzugsgebiets- und Gerinneparametern von 100 Schweizer Wildbächen verwendet. Die Erhebung der Parameter erfolgt mit einem GIS-Tool, welches im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wird. Das sogenannte „EZG/GP-Tool“ ermöglicht eine systematische und effiziente Erhebung von Einzugsgebiets- und Gerinneparametern. Für die Modellgenerierung werden neben einer statistischen Analyse des Datensatzes unterschiedliche Methoden zur Reduktion der Modellparameter sowie der Bestimmung der optimalen Konfigurierungsmöglichkeit von KNN verwendet. Die statistische Voruntersuchung des Datensatzes zeigt lineare Zusammenhänge zwischen Einzugsgebiets- und Gerinneparametern und Feststoffvolumina von Grossereignissen, welche in empirischen Ansätzen nicht berücksichtigt werden. Die Analyse des Datensatzes mit KNN zeigt, dass kein Modell abgeleitet werden kann, welches die Feststoffvolumina von Grossereignissen mit einer verbesserten Güte gegenüber herkömmlichen Ansätzen schätzt. Die Arbeit umfasst eine ausführliche Diskussion der Gründe für die Abweichung zwischen den erstellten Modelle und den damit einhergehenden Beobachtungen.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Zusammenfassung	II
Inhaltsverzeichnis	III
Glossar	V
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Forschung	3
2 Hypothesen und Forschungsfragen	18
3 Daten und Methoden	19
3.1 Datengrundlage Wildbäche	20
3.2 Datengrundlage Geodaten	21
3.3 Erhebung der Einzugsgebiets- Gerinneparameter	26
3.4 Deskriptive Statistik	29
3.5 Künstliche Neuronale Netze	30
3.5.1 Grundlagen KNN	32
3.5.2 Modellansätze	37
3.5.3 Technische Umsetzung der künstlichen neuronalen Netze	46
4 Ergebnisse	47
4.1 Datenerhebung	47
4.1.1 Datengrundlage Wildbäche	47
4.1.2 Erhebung Einzugsgebiets-und Gerinneparameter	50
4.2 Deskriptive Statistik	56
4.3 Künstliche neuronale Netze (KNN)	72
4.3.1 Modell „Volumen“	72
4.3.2 Modell „Klassen“	80
5 Diskussion	86

5.1	EZG/GP-Tool.....	86
5.2	Deskriptive Statistik.....	87
5.2.1	Modell „Volumen“	90
5.2.2	Modell „Klassen“.....	93
5.3	Synthesediskussion künstliche neuronale Netze	94
6	Schlussfolgerung.....	97
7	Ausblick.....	99
8	Literaturverzeichnis	101
9	Anhang.....	109

Glossar

Bei der Verwendung von Abkürzungen und englischen Fachbegriffen wird aufgrund des Schriftbildes bewusst auf Anführungszeichen oder eine kursive Schreibweise verzichtet.

DTM	Digital Terrain Modell. Die Einheit des DTMs entspricht der Höhe über Meer.
EZG	Wildbacheinzugsgebiet.
Geodaten	Der Begriff beschreibt GIS-Daten, welche Vektor und Rasterdaten umfassen und georeferenziert sind.
GIS	Geoinformationssystem
GP	Gerinneparameter
HADES	Hydrologischer Atlas der Schweiz
KNN	Künstliche neuronale Netze
Parameter	Unter dem Begriff werden charakteristische Kenngrößen des Wildbaches, wie zum Beispiel Einzugsgebietgrößen, Neigung des Hauptgerinne, verstanden.
QGIS	Quantum GIS umfangreiche Open Source GIS Software.
R	Programmiersprache, welche für statistische Anwendungen geeignet ist.
SAGA	Open Source GIS Software, speziell für Rasterverarbeitung geeignet.
swissTLM^{3D}	Im Text wird häufig nur TLM3D verwendet. Der Begriff steht für Topografisches Landschaftsmodell der Schweiz.
Vector25	Digitales Landschaftsmodell der Schweiz

1 Einleitung

Nach intensiven Niederschlägen löste sich in der Nacht vom 22. auf den 23. August 2005 ein Erdbeben im Einzugsgebiet des Glyssibaches in Brienz. Anschliessend kam es zu einem Transport von rund 70'000 m³ Schuttmasse in besiedeltes Gebiet (vgl. Abbildung 1-1). Bei diesem Ereignis kamen zwei Menschen ums Leben und 28 Häuser wurden zerstört (PLANAT 2016). In derselben Nacht führten weitere geschiebeführende Hochwasser und Murgänge in Schweizer Wildbacheinzugsgebieten zu Schäden (Gertsch 2009).



Abbildung 1-1: Ablagerungen von Schuttmassen nach dem Murgangereignis vom 23. August 2005 im Glyssibach (Brienz) (Foto: Schweizer Luftwaffe)

Solche Wildbachereignisse verursachen einen erheblichen Teil der Unwetterschäden in der Schweiz (Hegg, Rickenmann & Forster 2001). Die Schäden durch Murgänge und geschiebeführende Hochwasser wird durch die mechanische Einwirkung auf Gebäude und Ablagerungen von Feststoffen im Siedlungsraum verursacht. Um diese Schäden zu verhindern, werden technische oder raumplanerische Massnahmen geplant und umgesetzt, welche im Ereignisfall Mensch und Infrastruktur schützen. Für die Planung solcher Massnahmen werden im Rahmen der Wildbachforschung das Verhalten und die Prozessabläufe von Wildbächen untersucht. Für die Dimensionierung der technischen Massnahmen ist speziell eine Abschätzung des Feststoffvolumens, welches bei Ereignissen transportiert werden könnte, von Bedeutung. Weil die Feststoffe, die Schaden verursachen aus den Wildbacheinzugsgebieten transportiert werden, werden für die Abschätzung der potentiellen Volumen die geomorphologischen Prozesse in den Wildbacheinzugsgebieten untersucht. Prozesse wie Steinschläge, Hangerosionen oder Rutschungen führen zur Verlagerung von Feststoffen ins Wildbachgerinne. Durch weitere Prozesse wie Murgänge oder Geschiebetransporte werden die Feststoffe im

Wildbachgerinne oder auf dem Wildbachkegel transportiert. Diese Prozesse treten aufgrund der für Wildbächen typischen Gegebenheiten wie zum Beispiel der Geologie, Meteorologie oder der Neigungsverhältnisse auf (Kienholz 1998:11ff). Um das Zusammenspiel dieser Prozesse, welche räumlich und zeitlich gekoppelt auftreten, diskutieren zu können werden im Rahmen dieser Arbeit systemtheoretische Ansätze verwendet. In diesem Zusammenhang werden systemtheoretische Grundlagen vorgestellt. Weiter werden existierende Ansätze für die Abschätzung von Feststoffvolumina von Grossereignissen erklärt und aufgrund ihrer Charakteristik in drei Gruppen unterteilt. Die erste Gruppe umfasst Ansätze, welche die Geschiebetransportrate von Gerinnen schätzen. Für die Berechnung von Feststoffvolumina von Grossereignissen weisen diese Ansätze allerdings wesentliche Nachteile auf, die im folgenden Kapitel noch ausführlich diskutiert werden. Einen grösseren zeitlichen Aufwand sowie Erfahrungs- und Fachwissen erfordert die Anwendungen der Methoden, die mithilfe von Feldbegehungen die Feststoffvolumina von Grossereignissen schätzen. Die dritte Gruppe von Ansätzen für die Schätzung von Feststoffvolumina umfasst sogenannte empirische Schätzformeln, welche mithilfe von charakteristischen Kenngrössen des Einzugsgebietes, respektive des Gerinnes, wie zum Beispiel der Fläche oder der Gerinneneigung, die Feststoffvolumina von Grossereignissen schätzen (Bertschi, Hunziker & Kienholz 2008). Bei der Anwendung solcher Ansätze zeigt sich teilweise eine grosse Abweichung zwischen den prognostizierten und beobachteten Feststoffvolumina von Grossereignissen. Diese Ansätze eignen sich somit lediglich für die Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte (Rickenmann 2014:75). Eine detaillierte Abschätzung des Feststoffvolumens für die Dimensionierung von technischen Massnahmen ist somit nicht möglich. In der vorliegenden Arbeit werden unterschiedliche Schwächen und damit zusammenhängend das Verbesserungspotential dieser Ansätze vorgestellt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird ein neuer Ansatz zur Schätzung der Feststoffvolumina von Grossereignissen entwickelt, welcher dieses Verbesserungspotential berücksichtigt.

1.1 Stand der Forschung

„Wildbäche sind oberirdische Gewässer mit zumindest streckenweise grossem Gefälle, rasch und stark wechselndem Abfluss und zeitweise hoher Feststoffführung.“ (DIN 19663:3).

Diese Definition des Begriffes „Wildbach“ impliziert mit Begriffen wie „stark wechselndem Abfluss“ und „zeitweise hoher Feststoffführung“, dass Wildbäche von einer grossen Dynamik geprägt sind. Ein Ausdruck dieser Dynamik ist die Feststoffführung von Wildbächen, welche im Fokus dieser Arbeit steht. „Unter dem Begriff Feststoff wird die Gesamtheit der festen Stoffe verstanden, welche im Wasser transportiert werden. Feststoffe sind also Geschiebe, Feststoffe, Schwebstoffe, Geschwemmsel und Eis“ (Spreafico et al. 2005). Um die Frage nach dem Grund für die hohe Feststoffführung zu beantworten, müssen Wildbäche genauer betrachtet werden. Wildbäche sind sehr unterschiedlich ausgeprägt, weisen jedoch oft sehr ähnliche Prozessabläufe auf. Aufgrund ähnlicher Prozessabläufe in Wildbächen lassen sich funktionale und räumliche Komponenten unterscheiden, welche in sämtlichen Wildbächen präsent sind. Die funktionalen Komponenten beinhalten die Aufbereitung, Verlagerung und Ablagerung der Feststoffe. Bei den räumlichen Komponenten können in sämtlichen Wildbacheinzugsgebieten das Gerinnesystem vom Schwemmkegel und von den Hängen abgegrenzt werden. Für die Feststoffführung sind zahlreiche Prozesse im Einzugsgebiet eines Wildbaches verantwortlich. Diese Prozesse können auf folgende drei Vorgänge reduziert werden: Mobilisierung, Verlagerung und Ablagerung von Feststoffen (Kienholz 1998:11ff). Diese Prozessgruppen, umschreiben ähnlich wie die funktionalen Komponenten, zentrale Funktionen des Feststoffhaushaltes des Wildbaches. In der werden die für die Feststoffführung zentralen Prozesse aufgelistet (blau). Dabei wird deutlich, in welche räumliche Komponenten (Hang oder Gerinne, gelb) sowie in welche Prozessgruppen (Mobilisierung, Verlagerung, grün) die Prozesse eingeteilt werden können. Der Ablagerungsprozess wird nach Kienholz (1998:11ff) nicht in weitere Prozesse unterteilt. Aus diesem Grund ist dieser in der Abbildung 1-1 nicht dargestellt.

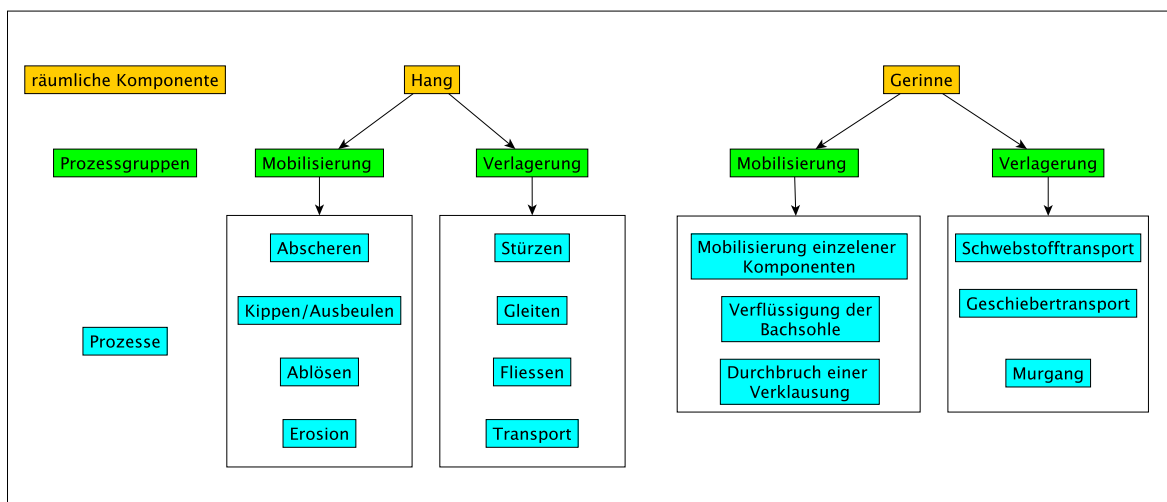


Abbildung 1-2: Übersicht der zentralen Prozesse der Feststoffführung in Wildbächen. Die Prozesse können zeitlich gekoppelt auftreten. Weiter kommt es zwischen den Prozessen zu Interaktionen (verändert nach Kienholz 1998:11ff).

Die Hangprozesse führen zur Feststoffaufbereitung und verlagern die Feststoffe in das Gerinne. Nach der Mobilisierung der Feststoffe im Gerinne werden durch diverse Massenverlagerungsprozesse wie Schwebstofftransport, Geschiebetransport und Murgang (vgl.) die Feststoffe im Gerinne transportiert und teilweise auf dem Schwemmkegel abgelagert. Zu der Ablagerung kommt es durch die Abnahme der Fliesstiefe (aufgrund der Verbreiterung der Gerinnesohle) oder der Abnahme der Fließ-, respektive Transportgeschwindigkeit infolge einer Verflachung.

Beim Schwebstofftransport findet keine Interaktion zwischen den bewegten Massenpartikeln und der Gerinnesohle statt. Welche Korndurchmesser als Schwebstoffe transportiert werden, ist von der Turbulenz im Gerinne und somit von den Abflussverhältnissen abhängig (Zimmermann 1989). Im Gegensatz zum Schwebstofftransport hat beim Geschiebetransport die Gerinnesohle einen Einfluss auf den Massentransport. Die Feststoffe bewegen sich dabei springend oder rollend über die Sohle (Kienholz 1998:11ff). In BUWAL (1998) wird zwischen normalem Geschiebetransport und schwerem Geschiebetransport unterschieden. Beim normalen Geschiebetransport findet ein kontinuierlicher Geschiebetransport statt, wobei eine klare Trennung zwischen einer sohlennahen, wenig mächtigen Geschiebetransportschicht und einer schwebstoffführenden Wasserschicht möglich ist. Diese Transportart findet in wenig steilen Bächen und Flüssen statt, während der schwere Geschiebetransport bei Grossereignissen in Wildbächen zu beobachten ist. Die Geschiebetransportschicht kann dabei eine mehrfache Mächtigkeit des mittleren Geschiebekorndurchmessers aufweisen. Murgänge stellen einen weiteren Transportprozess in Wildbachgerinnen dar. Murgang wird definiert als:

„Schnell fliessendes Gemisch von Wasser und Feststoffen mit einem hohen Feststoffanteil von ca. 30 % bis 60 %; oft schubartig in Wildbächen oder Murfurchen erfolgend. Typisch sind grosse Dichte, z.T. hohe Fließgeschwindigkeiten, hohe Transportkapazität (Blöcke vom mehreren m³ Volumen) und grosse umgesetzte Feststoffvolumina.“ (BUWAL 1998:31)

Murgänge werden durch Hangrutschungen oder Gerinnedestabilisierungen ausgelöst. Dabei muss der Hang, respektive das Gerinne, mindestens ein Gefälle von 25% - 30% aufweisen. Die Entstehung von Murgängen bei geringeren Neigungsverhältnissen ist möglich, wenn zum Beispiel Engstellen im Gerinne vorhanden sind (Rickenmann 2007). Das Abflussverhalten von Murgängen ist im Gegensatz zu Reinwasserabfluss durch wellenförmige Bewegungen geprägt (Rickenmann 1996). Durch die hohe Erosionsleistung hinterlassen Murgänge charakteristische Spuren im Gelände, wie Levées, unsortierte Ablagerungen, scharfe Begrenzung der Ablagerungen sowie einen U-förmigen Erosionsquerschnitt (Rickenmann 1996, zit. nach Rickenmann 2014)

Die Verlagerungsprozesse können sich je nach den Gegebenheiten im Gerinne abwechseln. So kann sich ein erhöhter Geschiebetransport zu einem Murgang entwickeln oder umgekehrt (Zimmerman & Lehmann 1999). Ebenso kann ein Sturzprozess in einen Gleitprozess (z.B. durch die Veränderung der Neigungsverhältnisse) übergehen. Nicht nur Verlagerungsprozesse treten gekoppelt auf, es findet auch eine Kopplung von Mobilisierungsprozessen und Verlagerungsprozessen statt. So folgt ein Verlagerungsprozess in der Regel auf einen Mobilisierungsprozess (Kienholz 1998:15). Neben der Kopplung der Prozesse kann es auch zu Interaktionen der Prozesse kommen. So

beeinflusst eine Verflüssigung der Sohle den Prozessablauf des Geschiebetransportes. Aufgrund dieses hohen Grades an Verknüpfungen bietet sich eine systemtheoretische Betrachtung von Wildbächen an (vgl. Ueblagger (1989); Kirkby (1990), zit. nach Kienholz (1998:37)).

Als System wird dabei ein Verbund von Komponenten verstanden, welche durch sogenannte Funktionalbeziehungen (auch Relationen) miteinander verbunden sind. In der Geomorphologie können die Komponenten

- Formen (Flusstäler, Bruchstufen, Nehrungen)
- Formeigenschaften (Hangneigungen, Krümmung von Fluss)
- Materialarten (Klüftung des Gesteins, Korngrößen, Durchlässigkeit)
- Prozesse (Verwitterung, Rutschungen, Flusserosion)

repräsentieren. Die Funktionalbeziehungen beschreiben die Art der Verknüpfung der eben genannten Komponenten. Die Verknüpfung kann dabei einer einseitigen Kausalbeziehung, einer wechselseitigen-funktionalen Beziehung oder einer indirekten Beziehung zwischen zwei oder mehreren Komponenten entsprechen (Ahnert 2009:23ff). Es gibt unterschiedliche Typisierungsmöglichkeiten von Systemen. Nach dem Cynefin-Framework (Snowden & Boone 2007) können vier unterschiedliche Systemtypen definiert werden (vgl. Abbildung 1-3). Dabei werden die Systemtypen anhand der Anzahl an Komponenten und der Unterschiedlichkeit der Relationen der Komponenten unterschieden. Diese vier Systemtypen unterscheiden sich somit stark im Systemverhalten. Diese Unterteilung hilft für eine erste Reflexion der zu untersuchenden Systeme.



Abbildung 1-3: Systemtypen nach dem Cynefin-Framework (nach Friedrichsen (2015))

Chorley & Kennedy (1971) wenden die Grundzüge der allgemeinen Systemtheorie des Biologen Bertalanffy (1951) auf die Geomorphologie an. Neben einer funktionalen Unterscheidung in isolierte, geschlossene und offene Systeme wird der Fokus auf eine strukturelle Unterscheidung gelegt. Wird nach funktionalen Kriterien unterschieden, werden die Systeme aufgrund ihres äusseren Effektes definiert. Bei offenen Systemen

findet ein Massen- und Energieaustausch statt, währenddem in geschlossenen Systemen nur ein Energieaustausch mit der Umgebung stattfindet. Bei isolierten Systemen kann keinerlei Austausch festgestellt werden. Die strukturelle Charakterisierung stellt den Aufbau der Systeme in den Vordergrund, wobei beispielsweise Chorley & Kennedy (1971) unter anderem „morphological systems“, „cascading systems“ und „process-response systems“ unterscheiden. Dabei gibt es einen hierarchischen Zusammenhang bezüglich der steigenden Komplexität dieser Systeme. Somit weist die Typisierung Ähnlichkeiten mit der Kategorisierung des Cynefin-Framework auf. Klug & Lang (1983) übersetzen die drei Systemtypen nach Chorley & Kennedy (1971) in Korrelations-, Prozess- und Prozess-Reaktionssysteme. Im Folgenden werden diese drei Systemtypen charakterisiert:

- **Korrelationssysteme:**
Korrelationssysteme stellen in der Regel Subsysteme von Geosystemen dar. Diese Subsysteme können jedoch als eigene Geosysteme betrachtet werden. Sie bestehen aus einer Auswahl von Systemelementen (auch Komponenten) und den Abhängigkeitsrelationen (auch Funktionalbeziehungen).
- **Prozesssysteme:**
In Prozesssystemen steht der Stoff-, respektive Energietransfer eines Systems im Vordergrund. Die Elemente eines Prozesssystems beschreiben dabei die Input-Output-Relation dieser Flüsse. Elemente eines Prozesssystems sind Speicher und Regler.
- **Prozess-Reaktionssysteme:**
Durch die Integration von Korrelationssystemen und Prozesssystemen entstehen Prozess-Reaktionssysteme.

Die Reflexion zu den Systemtypen hilft bei der Erstellung eines Modells. Ein System kann nur analysiert werden, wenn das System in einem Modell abgebildet wird (Kienholz 1998). Dabei wird in erster Linie ein Konzeptmodell erstellt, welches anschliessend in einem mathematischen Modell abgebildet wird (Hugget (1985:7ff), zit. nach Kienholz (1998:35f)).

Feststoffführung in Wildbächen

Kienholz (1998:11) stellt fest, dass der Charakter von Wildbächen durch die Einflussfaktoren wie Niederschlagsgeschehen, Geologie, Hydrogeologie, Relief, Bodenverhältnisse, Vegetation oder der Form des Einzugsgebietes bestimmt werden kann. Die Einflussfaktoren entsprechen dabei charakteristischen Kenngrößen des Wildbacheinzugsgebietes. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Einzugsgebiets- und Gerinneparameter (abgekürzt durch Parameter) für diese Kenngrößen verwendet. Die Parameter, welche den Niederschlag im Einzugsgebiet beschreiben, werden den Gerinneparametern zugeordnet, weil sie als Proxy für den Abfluss verwendet werden. Neben Kienholz (1998:11) zeigen zahlreiche Studien auf, dass die Feststoffführung von Wildbächen anhand von Parametern beschrieben werden kann. Der Tabelle 1-1 ist eine Zusammenstellung von Parametern, die verwendet werden um die Feststoffführung in Wildbächen zu beschreiben, zu entnehmen. Bei den Literaturhinweisen handelt es sich lediglich um eine Auswahl, wobei auf Untersuchungen im Alpenraum fokussiert wird (Ausnahme Literatur zu der Geschiebetransportrate). Die einzelnen Parametern werden in thematische Gruppen zusammengefasst.

Tabelle 1-1: Zusammenstellung zentraler Einzugsgebiets- und Gerinneparameter für die Schätzung von Feststoffvolumina. Die Tabelle umfasst den Namen, die Abkürzung und die Einheit der Parameter. Neben einer kurzen Beschreibung wird aufgelistet, welche Literatur auf den entsprechenden Parameter hinweist. Die Literaturzusammenstellung basiert auf Jäggi (2013:17ff)

Name	Beschreibung und Literatur
Morphometrische Parameter EZG	
Fläche des EZG [m ²]	Umfasst das morphologische Einzugsgebiet. D'Agostina (1996), Hampel (1980), Kronfellner-Kraus (1982), Zeller (1985)
Höhe des EZG [m.ü.M]	Hampel (1980), Zimmermann et al. (1997)
Melton-Zahl [m]	Differenz zwischen maximaler und minimaler Höhe über Meer des EZG dividiert durch die Wurzel der Fläche. Heiser (2015a), Rickenmann & Scheidl (2010), Bardou (2002)
Morphometrische Parameter Gerinne	
Gerinnelänge [m]	Länge des Hauptgerinnes wobei das Hauptgerinne dem Gerinneverlauf entspricht welcher das Haupteinzugsgebiet entwässert. Hampel (1980)
Gerinneneigung [%]	Neigung des Hauptgerinnes D'Agostina (1996), Hampel (1980), Kronfellner-Kraus (1982), Zimmermann et al. (1997), Heiser (2015a),
Makrorauheit des Gerinnes[m]	Standardabweichung der Residuen des Längsprofils. Nitsche et al. (2012)
Geologie	
Verwitterbarkeit des Gesteins	D'Agostina (1996)
Bodenbedeckung	
Prozentualer Anteil Fels im EZG [%]	Beyer & Schleiss (2000), Vente et al. (2007), Raymond Pralong et al. (2011)
Prozentualer Anteil Lockergestein im EZG [%]	Beyer & Schleiss (2000), Vente et al. (2007), Raymond Pralong et al. (2011)
Prozentualer Anteil Gletscher im EZG [%]	Meyer –Peter & Müller (1948), Schoklitsch(1934)
Prozentualer Anteil Wald im EZG [%]	Beyer & Schleiss (2000), Vente et al. (2007), Raymond Pralong et al. (2011), Zimmerman et al. (1997)
Niederschlagsstatistik	
100 jährlicher 1h-Punktniederschlag [mm]	Hampel (1980)
Abfluss	Die Niederschlagsstatistik als Proxy für den Abfluss. Abfluss wird in zahlreichen Studien als entscheidende Parameter für die Bestimmung des Abflusses betrachtet z.B. Meyer-Peter & Müller (1948); Smart & Jäggi, (1983); Ackers & White (1973); Yalin (1963), Schoklitsch, (1934)
Ereignisniederschlag	
Niederschlagsgeschehen	Kienholz (1998:11)
Abfluss	vgl. Spalte Abfluss oben

Die Feststoffführung ist Folge der Prozesse in einem Wildbach (vgl. Tabelle 1-1). Wird die Feststoffführung direkt von Parametern (charakteristische Kenngrößen) abgeleitet, ist die Annahme vorausgesetzt, dass die Ausprägungen der Wildbachprozesse durch Einzugsgebietsparameter determiniert werden. Aufgrund des hohen Grades an Verknüpfung der Prozesse der Feststoffführung darf vermutet werden, dass die Parameter, welche die Prozesse repräsentieren, ebenfalls verknüpft sein müssen.

Für die Analyse eines Systems muss ein Konzeptmodell des Systems erstellt werden (vgl. Hugget (1985:7ff); nach Kienholz (1998:35f)). Das der Arbeit zugrundeliegende Konzeptmodell des Wildbaches kann gemäss Abbildung 1-4 dargestellt werden. Das Konzeptmodell fokussiert auf die Feststoffvolumina, welche durch Ereignisse auf den Schwemmkegel transportiert werden. Die einzelnen Komponenten des Konzeptmodells entsprechen den thematischen Gruppen von Parametern (charakteristischen Kenngrössen des Systems). Das Modell orientiert sich an der Konzeption von Korrelations-, und Prozesssystemen.



Abbildung 1-4: Konzeptmodell für die Abbildung der Feststoffführung in Wildbächen.

Feststoffführung – Relevanz und Abschätzung

Der Transport von Feststoffvolumen führt auf besiedelten Schwemmkegeln zu Schadensfällen. In der Periode von 1972 bis 2011 verursachten Feststoffe in der Schweiz insgesamt finanzielle Schäden in der Höhe von 4.3 bis 5.1 Milliarden Schweizer Franken (Badoux, Andres & Turowski 2014). Während hohe Mengen von Feststoffen Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen verursachen, führt ein Geschiebedefizit zu gewässerökologischen Problemen (Schälchli & Krichhofer 2012:12). Damit Schäden minimiert werden können, sind technische Hilfsmittel unabdingbar, die zum Ziel haben,

Feststoffe zurückzuhalten, um- oder durchzuleiten. Bei der Planung und Umsetzung von technischen Massnahmen muss ein Kompromiss zwischen Schutz, Ökologie und Ökonomie gefunden werden. Während eine Rückhaltemassnahme eine hohe Schutzwirkung für Mensch und Infrastruktur mit sich bringt, entstehen andererseits durch die Ausbaggerungen der Ablagerungen hohe Kosten. Weiter kommt es im Unterlauf zu Geschiebedefiziten welche zu Erosion der Sohle führen kann (Käser 2016). Damit die Gratwanderung zwischen Rückhalt und Geschiebfluss in der Praxis möglichst erfolgreich umgesetzt werden kann, sind Abschätzungen und Prognosen von Feststoff- und Geschiebefrachten von Grossereignissen von zentraler Bedeutung. Ein Grossereignis ist hierbei gleichbedeutend mit einem Ereignis, welches eine Jährlichkeit grösser als 100 Jahre aufweist und somit im Durchschnitt nur alle 100 Jahre oder seltener zu erwarten ist (Gertsch 2009). In der vorliegenden Arbeit werden die Begriffe „Ereignis“ und „Grossereignis“ synonym verwendet.

Für die Abschätzung von Feststofffrachten von Ereignissen unterscheiden Zimmermann & Lehmann (1999) zwei Gruppen von Ansätzen: Zum einen existieren Ansätze, welche eine Geschiebetransportrate eines Gerinnequerschnittes abschätzen. Zum anderen gibt es Verfahren, welche direkt die Feststofffracht eines einzelnen Grossereignisses schätzen (empirische Ansätze). Bei den Ansätzen zur Berechnung einer Transportrate muss über die gesamte Ereignisdauer integriert werden, um das Ereignisvolumen abschätzen zu können. Frick (2013) unterscheidet zusätzlich Methoden, welche auf Geländeaufnahmen basieren sowie GIS-basierte Methoden zur Schätzung von Feststoffvolumina von Grossereignissen.

Im Folgenden wird in einem ersten Schritt auf bestehende Ansätze zur Berechnung der Geschiebetransportrate, in einem zweiten Schritt auf Methoden mit Feldbegehung fokussiert. In einem dritten Schritt wird auf empirischen Schätzverfahren eingegangen. Dabei werden Probleme dieser Ansätze in Bezug auf die Berechnung von Feststoffvolumina von Grossereignissen thematisiert. Die Zusammenstellung dient einem Überblick über mögliche Methoden, wobei der Autor keinesfalls den Anspruch geltend macht, vollständig zu sein, sondern lediglich eine Auswahl an Methoden diskutieren will. Auf die GIS-basierten Methoden wird dabei bewusst nicht eingegangen. Diese Methoden stellen eine Kombination zwischen den empirischen Schätzverfahren und den Methoden mit Feldbegehungen dar. Die Arbeit konzentriert sich auf Methoden, welche die Feststoffvolumina von Grossereignissen ohne detaillierte Felderhebungen schätzt. Aus diesem Grund werden die Methoden mit Feldbegehung bedingt in die Diskussion miteinbezogen. Ansätze zur Geschiebetransportrate werden jedoch ausführlich diskutiert wobei auf statistische Ansätze fokussiert wird

Schätzung durch Geschiebetransportrate

Für die Berechnung der Geschiebetransportrate steht eine grosse Anzahl an unterschiedlichen Ansätzen zur Auswahl. Damit eine Einordnung der physikalisch basierten Ansätze gemacht werden kann, unterteilen Gomez & Church (1989) die Geschiebetransportformeln in vier Gruppen. So können Ansätze unterschieden werden, deren Fokus auf

- die Sohlschubspannung (shear stress) (z.B. du Boys (1879); Meyer-Peter & Müller (1948); Smart & Jäggi (1983); Ackers and White (1973); Yalin (1963)),
- den Abfluss (z. B. Schoklitsch, (1934))
- die stochastische Funktion des Transportes (z. B. Einstein (1950))
- die Leistung, welche durch den Abfluss resultiert (stream power) (Bagnold (1980); Yang (1984))

gerichtet ist. Die Bewegung des Geschiebes wird somit auf unterschiedliche Weise abgeschätzt oder berechnet. In sämtlichen Ansätzen werden verschiedene Gerinneparameter (Messgrößen, welche im Gerinne selbst gemessen werden), wie zum Beispiel die Gerinneneigung, die Gerinnebreite oder die Korngrößenverteilung verwendet, um die Transportrate (Bewegung des Geschiebes) zu berechnen. Dabei werden physikalische Ansätze verwendet, um die Bewegung abzubilden. Solche physikalischen Ansätze werden bereits seit dem Jahr 1879 (du Boys 1879) für die Berechnung der Geschiebetransportrate verwendet. Im letzten Jahrzehnt (z. B. Sasal et al. (2009); Chang et al. (2012); Kumar (2012); Sirdari et al. (2014)) werden nun vermehrt statistische Methoden, respektive „soft computing“ Methoden, zur Berechnung der Geschiebetransportrate herbeigezogen. „Soft computing“ Methoden werden in unterschiedliche Methoden wie z.B. künstlich neuronale Netze (KNN) (z. B. „multilayered feedforward-back propagated Network“), Fuzzy-Systeme und evolutionäre Algorithmen (z.B. „Gene-Expression Programming“) unterschieden (Zadeh 1994). Sämtliche Methoden können mit unterschiedlichen Vorgehensweisen Zusammenhänge zwischen einer oder mehreren unabhängigen Variablen und einer abhängigen Variable identifizieren (Chang et al. 2012). Dadurch eignen sich die Methoden für die Generierung von Modellen zwischen gemessenen Geschiebetransportraten (abhängige Variable) und gemessenen Gerinneparametern und Abflüssen (unabhängige Variablen).

Sasal et al. (2009) trainieren mit maximal fünf dimensionslosen Gerinneparameter verschiedene „multilayered feedforward-back propagated Network“. Diese künstliche neuronalen Netze (KNN) werden mit unterschiedlichen physikalischen Ansätzen verglichen. Dabei weisen die KNN ein höheres Bestimmtheitsmass als die physikalischen Modelle auf. Mit dem gleichen Ziel wie Sasal et al. (2009) wenden Chang et al. (2012) drei unterschiedliche „soft computing“ Methoden auf Gerinneparameter an. wie beispielsweise den hydraulischen Radius, die Gerinneneigung, die Korngrößenverteilung. Neben einem „Gene-Expression Programming“ (GEP) Verfahren und einem „Neuro-Fuzzy Inference System“ (ANFIS) kommt auch ein KNN zum Einsatz. Während bei KNN das Modell über sogenannte Gewichte angepasst wird, werden beim „Gene-Expression Programming“ unterschiedliche Modelle generiert und durch Selektion das Modell mit der besten Güte identifiziert. Beim „Neuro-Fuzzy Inference“ System werden Ansätze von Fuzzy-Systemen und KNN-Modellen kombiniert. Dabei konnte gezeigt werden, dass mit den „soft computing“ Verfahren GEP und KNN bessere Übereinstimmungen zwischen Modell und Messungen erreicht werden als mit den

Geschiebetransportformeln von Yang (1984) und Engelund & Hansen (1967) (Chang et al. 2012). Ähnliche Resultate erzielt Kumar (2012) mit der Anwendung eines KNN, wobei er bemerkt, dass die Auswertungen einen grossen Trainingsdatensatz voraussetzen und dass sich der nichtlineare und nicht-parametrische Charakter der neuronalen Netzwerke für die Verarbeitung eines Modells eignen, welches die gemessenen Daten reproduzieren soll. Gleichzeitig wird aber auch betont, dass bei der Erstellung des Modells das Problem einer Überbestimmung oder Unterbestimmung (over-/underfitting) besteht (Kumar 2012). Bei einer Überbestimmung eines Modelles ist eine Anwendung des Modells auf unabhängige Datensätze nicht möglich (Heiser 2015b). Sirdari et al. (2014) zeigt, dass sich die Anwendung der „nonlinear Regression Method“ und der „soft computing modelling“ Methoden („genetic programming“ und KNN) dazu eignen, den Geschiebetransport in kleinen Flüssen in Malaysia abzubilden. Kitsikoudis & Hrisanthou (2013) erstellen unter Berücksichtigung der heterogenen Korngrößenverteilung im Gerinnebett mithilfe eines KNN ein Modell für die Berechnung des Geschiebetransportes. Für einen umfangreichen Datensatz mit gemessenen Geschiebetransportraten des „U.S. Geological Survey“ (Williams & Rosgen 1986) wenden Yang, Marsooli, & Aalami (2009) ebenfalls einen KNN Ansatz für die Erstellung eines Modells an und vergleichen die berechneten Daten mit Geschiebetransportformeln. Dabei wird ebenfalls festgestellt, dass sich das Modell, welches mit der Methode von KNN erstellt wird, besser für die Berechnung von Geschiebetransportraten eignet, als herkömmliche Geschiebetransportformeln.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine grosse Anzahl an Ansätzen und Formeln zur Berechnung der Geschiebetransportrate bestehen. Neuere „soft computing“ Ansätze zur Erstellung von Geschiebetransportmodellen zeigen eine hohe Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Geschiebetransportraten. Aus den folgenden Gründen können die Ansätze zur Berechnung der Geschiebetransportrate nur bedingt für die Bestimmung der Feststoffvolumina von Grossereignissen verwendet werden.

- 1) Die erwähnten Ansätze sind auf Gerinneneigungen $<<20\%$ ausgelegt. Einzig der Ansatz von Smart & Jäggi (1983) an. In Wildbächen werden allerdings häufig Gerinneneigungen $>20\%$ beobachtet. Auch die neueren „soft computing“ Methoden für die Erstellung eines Modells zur Berechnung der Geschiebetransportrate haben keinen Einsatzbereich, welcher für Wildbäche typisch ist und sind meistens auf spezifische Flüsse kalibriert.
- 2) In Wildbacheinzugsgebieten mit kleinen Einzugsgebietsflächen und Sohlenstrukturen wie Kaskaden und Stufen-Becken-Systemen treten häufig materiallimitierende Verhältnisse auf (vgl. Abbildung 1-5). Bravo-Espinosa, Osterkamp & Lopes (2003) zeigen, dass sich die Geschiebetransportformeln von Parker et. al (1990), Meyer-Peter & Müller (1948) und Schoklitsch (1934) für Gerinne mit transportlimitierten Verhältnissen und die Formel von Bagnold (1980) und Schoklitsch (1934) für materiallimitierende Gerinne eignen. Allerdings fließen keine Information über die materiallimitierende Verhältnisse in die Formel von Bagnold (1980) und Schoklitsch (1934) ein (Gomez & Church, 1989). Wechseln sich somit Abschnitte mit materiallimitierenden und transportlimitierenden Verhältnissen ab, ist die Berechnung der Gesamtgeschiebetransportrate nur durch eine Definition eines Schlüsselabschnittes zu berechnen.

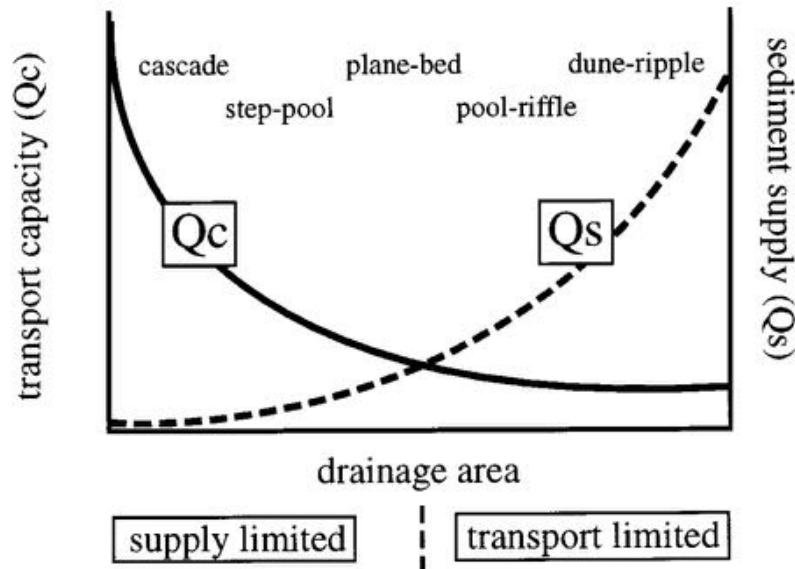


Abbildung 1-5: Schematische Darstellung von Trends der Transportverhältnisse in Wildbacheinzugsgebieten (Montgomery & Buffington 1997).

- 3) In sämtlichen Ansätzen zur Berechnung der Geschiebetransportrate hat der Abfluss des Gerinnes einen zentralen Einfluss auf die Berechnung (vgl. z.B. Gomez & Church 1989). Der Abfluss in Wildbächen variiert stark (vgl. Definition Wildbäche). Messungen zu typischen Grossereignisabflüssen sind in der Regel nicht vorhanden.
- 4) Sämtliche Ansätze berücksichtigen den Prozess des Geschiebetransportes. In Wildbächen kommt es jedoch zu einem Wechsel von Geschiebe- und Murgangprozessen (Zimmerman & Lehmann 1999).

Schätzung durch Feldbegehung

Für die Abschätzung des Feststoffvolumina von Grossereignissen können für die Schweiz die drei Abschätzverfahren Lehmann (1993) Gertsch (2009) und SEDEX (Frick, 2013) hervorgehoben werden. Die Ansätze konzentrieren sich bei einer Feldbegehung auf eine detaillierte Beurteilung des Lockermaterialpotentials und schätzen das transportierte Feststoffvolumen für verschiedene Ereignisszenarien ab. Der Nachteil dieser Abschätzverfahren ist der erhebliche, zeitliche Aufwand. Für die Abschätzungen muss weiter ein grosses Fach- und Erfahrungswissen vorhanden sein, welches in die Beurteilung einfließen kann. Deshalb führt die Anwendung desselben Verfahrens durch unterschiedliche Fachleute nicht zu denselben Ergebnissen (vgl. Gertsch 2009 und Frick 2013).

Schätzung durch empirische Verfahren

Um die Feststofffracht eines Ereignisses zu schätzen, werden in der Praxis die empirischen Verfahren nach Zeller (1985), Zimmermann (1989), Kronfeller-Kraus (1982), oder D'Agostina (1996) angewendet (Schönthal 2011). Zimmermann & Lehmann (1999) ergänzen zu dieser Auswahl den Ansatz von Hampel (1980) und erwähnen, dass es sich dabei um eine Auswahl aus dem Alpenraum handelt und dass für andere Gebiete ähnliche Ansätze bestehen. Allerdings können die Ansätze nicht ohne Anpassungen an andere Regionen verwendet werden. Aus diesem Grund fokussiert die folgende Zusammenstellung auf Schätzverfahren des Alpenraumes. Bei den Ansätzen handelt es sich um empirische Schätzverfahren, welche mithilfe von Einflussfaktoren (Parametern) des Wildbacheinzugsgebietes das Feststoffvolumina von Grossereignissen schätzt. Somit folgen die Ansätze, ähnlich dem vorgestellten Konzeptmodell (vgl. Abbildung 1-4), der Prämisse, dass mithilfe von Parametern das Feststoffvolumens geschätzt werden kann. Anhand der Konzepte von Zeller (1985), Kronfeller-Kraus (1982) und D'Agostina (1996), die in der Praxis auffällig häufig verwendet werden (Schönthal 2011), wird untenstehend der Aufbau dieser Ansätze dargelegt. Für die Zusammenstellung wird Bertschi, Hunziker & Kienholz (2008) herbeigezogen.

Zeller (1985)

Das Schätzverfahren nach Zeller (1985) schätzt mithilfe eines Koeffizienten und der Einzugsgebietsfläche [km²] die Feststoffvolumina von Grossereignissen. Der Zusammenhang zwischen der Einzugsgebietsfläche und dem Feststoffvolumen wird mit einem exponentiellen Zusammenhang beschrieben. Der Koeffizient kann zur Modellkalibration verwendet werden (Wertebereich 17'000 bis 27'000). Die für die Erstellung des Ansatzes verwendeten Daten stammen aus der Versuchseinrichtung „Alptal“. Diese wird von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft unterhalten.

$$V = 17'000 \sim 27'000 * E^{0.78}$$

V = Feststoffvolumen [m³]

E = Einzugsgebietsfläche [km²]

Kronfeller-Kraus (1982)

Dem empirischen Abschätzverfahren nach Kronfeller-Kraus liegen Analysen zu grossen Feststofffrachten im österreichischen Alpenraum zugrunde. Diese Feststofffrachten wird mithilfe der Einzugsgebietsfläche [km²] und der Neigung [%] des Hauptgerinnes geschätzt. Beziehungen zwischen der Zielgrösse und den Parametern entsprechen dabei linearen Zusammenhängen. Bei der Beschreibung des Modells wird erwähnt, dass der Ansatz eine erste grobe Schätzung von extremen Feststoffvolumina errechnet, jedoch aber weitere Ansätze für eine detaillierte Untersuchung notwendig sind.

$$V = K * E * Jc$$

V = Feststoffvolumen [m³]

E = Einzugsgebietsfläche [km²]

Jc = Neigung des Hauptgerinnes [%]

K = Koeffizient []

Der Koeffizient kann anhand von charakteristischen Merkmalen des Einzugsgebietes wie folgt definiert werden:

„Niedrige K-Werte (um 500) gelten für grosse, ausgeräumte, gut bewachsene Einzugsgebiete, hohe K-Werte (um 1500) für steile, kleine und mittlere Einzugsgebiete mit ausgedehnten Geschiebeherden und geringem oder anfälligem Bodenschutz.“ (Kronfellner-Kraus, 1982)

Als weitere Möglichkeit kann der Wert gemäss der Formel:

$$K = 1750/e^{0.018 \cdot E}$$

abgeleitet werden.

D'Agostina Nr. 1 (1996)

Das Schätzverfahren von D'Agostina Nr. 1 (1996) basiert auf 62 Ereignissen, welche im östlichen Trentino zwischen 1882 bis 1995 stattgefunden haben. Das Verfahren verwendet drei Parameter für die Schätzung des Feststoffvolumens. Neben der Einzugsgebietsfläche [km²] und der Neigung des Hauptgerinnes [%] wird ein Geologiefaktor [] verwendet. Weiter wird ein Koeffizient für die Modellkalibration bereitgestellt.

$$V = 39 * E * Jc^{1.5} * IG$$

V = Feststoffvolumen [m³]

E = Einzugsgebietsfläche [km²]

Jc = Neigung des Hauptgerinnes [%]

IG = Geologiefaktor [] gemäss Tabelle 1-2

Tabelle 1-2: Geologiefaktor nach D'Agostina Nr. 1 (1996)

Geologiefaktor	Geologie
5	Moränenbedeckung, Schotter, Rutschungsmassen
4	Metamorphite wie Phyllite, Schiefer
3	Klastische Gesteine wie Mergel, Sandsteine
2	Basaltuff, Brekzien, verwitterte Lavagesteine
1	Kalkgesteine
0	Porphyre, Granite, Diorite

D'Agostina Nr. 2 (1996)

Das Schätzverfahren von D'Agostina Nr. 2 (1996) basiert auf denselben Grundlagen wie D'Agostina Nr. 1. Beim Schätzverfahren Nr. 2 wird allerdings ein sogenannter Prozessfaktor hinzugefügt. Dabei wird unterschieden ob bei dem zu schätzenden Ereignis Murgang oder Geschiebetrieb erwartet wird. Der Prozessfaktor ist der Tabelle 1-3 zu entnehmen.

$$V = 45 * E^{0.9} * Jc^{1.5} * IG * IT^{-0.3}$$

- V = Feststoffvolumen [m²]
- E = Einzugsgebietsfläche [km²]
- Jc = Neigung des Hauptgerinnes [%]
- IG = Gelogiefaktor [] gemäss Tabelle 1-2
- IT = Prozessfaktor [] gemäss Tabelle 1-3

Tabelle 1-3: Prozessfaktor nach D'Agostina Nr. 2 (1996)

Prozessfaktor	Prozess
1	Murgang
2	murgangähnlicher Geschiebetrieb
3	„normaler“ Geschiebetrieb

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die vorgestellten Ansätze insgesamt eine kleine Anzahl an Parametern verwenden, um die Feststoffvolumina von Ereignissen zu schätzen. Weiter werden zwischen den Parametern lineare oder exponentielle Zusammenhänge berücksichtigt. Für die Anwendung der Ansätze ist lediglich ein geringer Zeitaufwand notwendig. Das Problem dieser Ansätze ist die grosse Abweichung zwischen beobachteten Ereignisvolumen und den berechneten Schätzungsergebnissen. Für die Darstellung dieser Abweichung hat Rickenmann (2014) die Ansätze nach Zeller (1985), D'Agostina (1986) und Takei (1984) an einer grossen Anzahl an Grossereignissen in der Schweiz, Kanada, Österreich und Italien getestet (vgl. Abbildung 1-6) Bei einigen Ereignissen handelt es sich um Beobachtungen von D'Agostina die für die Herleitung von D'Agostina (1986) verwendet wurden. Die Abweichung von den beobachteten Ereignisvolumen und den berechneten Ereignisvolumen betragen teilweise mehrere Grössenordnungen. Rickenmann (2014:75-76) weist darauf hin, dass die Ansätze aufgrund der Abweichungen nur auf Stufe „Gefahrenhinweiskarte“ verwendet werden können.

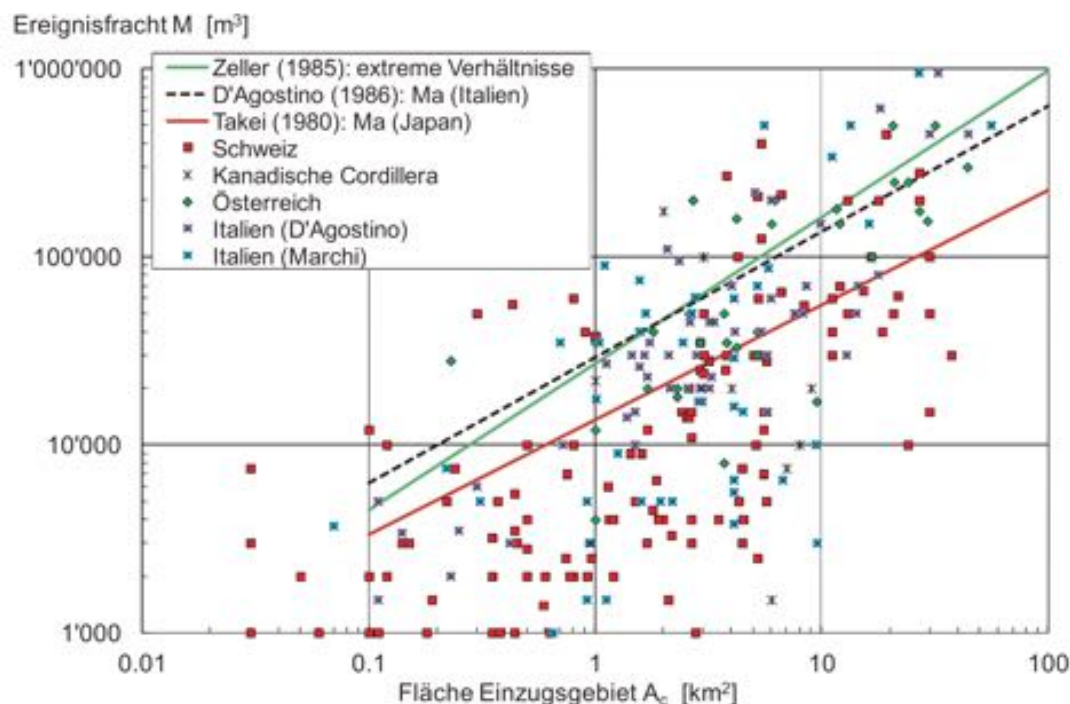


Abbildung 1-6: Feststofffrachten von Grossereignissen in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgrösse. Weiter sind drei empirische Schätzformeln, welche die Einzugsgebietsfläche berücksichtigen, eingetragen (Rickenmann, 2014:75-76).

Folgerungen zu Stand der Forschung

Die Abschätzung von Feststoffvolumina von Grossereignissen anhand von Ansätzen, welche eine Geschiebetransportrate schätzen, ist aufgrund der Neigungsverhältnisse, fehlenden Abflussmessungen und den Prozessverhältnissen (Murgänge anstelle von Geschiebetransport) kaum möglich. Die empirischen Schätzmethoden geben lediglich eine Grössenordnung der Feststoffvolumina an. Anhand des Konzeptmodells (vgl. Abbildung 1-4) können zwei mögliche Gründe für die ungenügende Genauigkeit der empirischen Schätzmethoden abgeleitet werden: Zum einen berücksichtigen die Schätzmethoden nur eine geringe Anzahl an Parametern und zum andern werden lediglich lineare oder exponentielle Zusammenhänge zwischen den Parametern berücksichtigt. Es fehlt somit ein statistisch-empirisches Modell zur direkten Bestimmung der Feststoffvolumina von Grossereignissen in einem Wildbach, welches eine grosse Anzahl der zentralen Einflussfaktoren (Parameter) und den hohen Grad der linearen und nichtlinearen Verknüpfung dieser Parameter berücksichtigt. Die Frage stellt sich somit nach einem statistischen Verfahren, welches das Konzeptmodell abbildet. Das Verfahren muss nichtlineare Zusammenhänge und der hohe Grad an Verknüpfungen der Parameter berücksichtigen können. In Klug & Lang (1983) wird für die Abbildung von Korrelationssystemen die multiple Regression vorgeschlagen. Das Problem dieses statistischen Verfahrens ist, dass keine nichtlinearen Zusammenhänge abgebildet werden können. Künstliche neuronale Netze (KNN) bieten gegenüber der multiplen Regression den Vorteil, dass nichtlineare Zusammenhänge aufgedeckt werden können und eine hohe Anzahl an Variablen berücksichtigt werden können (Schulze 2005:118). Die Methode eignet sich zudem für Datenanalysen, bei welchen grosse Unsicherheiten und Ungenauigkeiten in den zu analysierenden Daten zu erwarten sind (Zadeh 1994). Weiter

können mit KNN komplexe System abgebildet werden (Ikonomopoulos, Tsoukalas, & Uhrig 1993). Die Liste der Studien mit KNN in der Geomorphologie ist lang. Allerdings existieren dabei nur wenige Studien, welche sich mit der Feststoffführung von Wildbächen beschäftigen. Einige Ansätze schätzen mithilfe von KNN die Geschiebetransportrate. Allerdings werden diese Ansätze nicht für Wildbäche entwickelt und bieten in der Regel lediglich ein Modell für die Prognose der Geschiebetransportrate für einen spezifischen Wildbach. Es existieren mehrere Studien, die Murgangprozesse mit KNN untersuchen. So schätzen Liu et al. (2006) die Gefahrenstufen für Regionen, welche von Murgängen betroffen sind mithilfe von KNN. Als Inputdaten werden Niederschlagsstatistikwerte oder weitere Einzugsgebietsparameter wie der Anteil des Einzugsgebietes mit einer Neigung grösser als 25° herbeigezogen. Weiter existieren Ansätze, die die Auftretenswahrscheinlichkeit von Murgängen in Abhängigkeit von Einzugsgebietsparameter und Niederschlagswerten schätzen (Lin (2011); Chang & Chao (2006)). Pak et al. (2009) verwenden ein Set von Parametern für die Schätzung der Summe der transportierten Feststoffvolumina über mehrere Ereignissen in Einzugsgebieten in Los Angeles. Die Grundlagendaten stammen von Feststoffentnahmen von 14 Geschiebesammlern. Als Parameter werden neben der Einzugsgebietsfläche und dem Relieffaktor, die Niederschlagsintensitäten und die Niederschlagssummen sowie ein Faktor zur Charakterisierung der Degradierung durch Waldbrand verwendet. Die Ergebnisse zeigen eine Abweichung $<10\%$ zwischen den gemessenen und den geschätzten Feststoffvolumina. Für die Schweiz existiert jedoch kein Abschätzverfahren von Feststoffvolumina, welches auf KNN basiert.

2 Hypothesen und Forschungsfragen

Basierend auf den Erkenntnissen des ersten Kapitels wird folgende Hypothese erstellt:

Ein Modell basierend auf künstliche neuronalen Netzen (KNN) zur Bestimmung der Feststoffvolumina von Grossereignissen in Wildbächen mit einer verbesserten Güte gegenüber herkömmlichen Ansätzen kann erstellt werden, wenn:

- a) eine grosse Anzahl an Einzugsgebietsparameter, Gerinneparameter und Niederschlagsverhältnisse während des Ereignisses
- b) und ein KNN-Ansatz mit einer Optimierung der freien Konfigurierungsmöglichkeiten (z. B. Hidden-Neuronen, Trainingsdurchgänge)

berücksichtigt werden.

Um die Hypothese zu überprüfen werden drei Fragen gestellt. Dabei konzentrieren sich zwei Fragenstellungen auf den Punkt a) und eine Frage auf b) der Hypothese.

Einzugsgebiets- und Gerinneparameter

A1) Wie kann eine grosse Anzahl an Einzugsgebiets- und Gerinneparametern systematisch, flächendeckend und effizient erhoben werden?

A2) Welche Einzugsgebiets-, Gerinneparameter und Niederschlagsverhältnisse sind für die optimale Schätzung der Feststoffvolumina mit KNN wesentlich?

Künstliche neuronale Netze

B) Welche Einstellungen der Konfigurierungsmöglichkeiten (z. B. Hidden-Neuronen, Trainingsdurchgänge) eines KNN führt zu der bestmöglichen Schätzung der Feststoffvolumina?

3 Daten und Methoden

In diesem Kapitel werden die für die Arbeit verwendeten Daten erläutert, wobei die beobachteten Feststoffvolumina von Schweizer Wildbächen und die Geodaten unterschieden werden. In einem zweiten Teil wird der Vorgang der Erhebung der Einzugsgebiets- und Gerinneparameter beschrieben. Anschliessend wird in einem Kapitel über KNN Grundlagenwissen sowie die Vorgehensweise für die Modellgenerierung erläutert. Für die Orientierung wird der gesamte Ablauf der Arbeit in einer Übersicht dargestellt (vgl. Abbildung 3-1). In der untenstehenden Abbildung sollen die Hauptarbeitsschritte (grau) einen groben Überblick ermöglichen, währenddem die gelben Felder spezifizieren wie diese Hauptarbeitsschritte konkret umgesetzt werden. Auf die einzelnen Schritte wird im nachfolgenden Kapitel eingegangen.

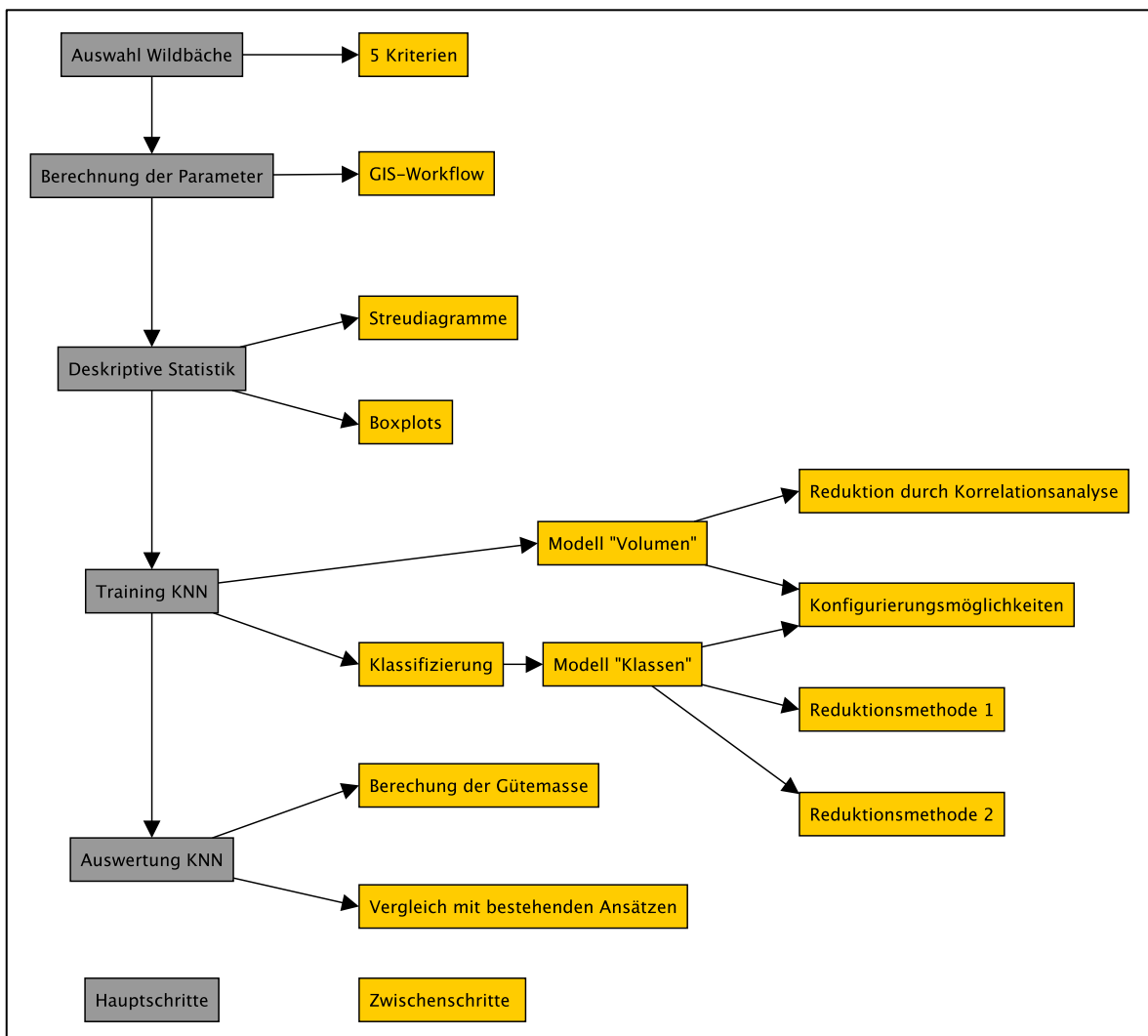


Abbildung 3-1: Ablauf der Hauptarbeitsschritte (grau) und die entsprechenden Vorgehensweisen für die Bearbeitung.

3.1 Datengrundlage Wildbäche

Damit ein statistisches Modell zur Abschätzung der transportierten Feststoffvolumina von Grossereignissen erstellt werden kann, sind gemessene oder geschätzte Daten zu transportierten Feststoffvolumina von Wildbacheignissen nötig. Für die Auswahl von geeigneten Wildbächen und Ereignissen sind Auswahlkriterien notwendig. Im Folgenden wird gezeigt, aus welchen drei Quellen Wildbacheinzugsgebiete für dieses Studie ausgewählt werden. Weiter wird erläutert, wie die Wildbäche aus den entsprechenden Quellen ausgewählt werden. Die drei Quellen werden im Folgenden vorgestellt.

Datenbank Solid:

Die Datenbank Solid ist ein Messnetz für das Monitoring von transportierten Geschiebefrachten, das rund 100 mit einem Geschiebesammler verbauten Wildbacheinzugsgebiete umfasst. Die Feststoffvolumina, welche in den Geschiebesammler abgelagert sind, werden mithilfe von Vermessungsinstrumenten oder bei der Entleerung erruiert. Bei der Entleerung kann durch die Summe der entommenen Kubatur das Feststoffvolumen des Sammlers berechnet werden. Die für die Entleerung oder Messung zuständige Behörde (Kanton, Gemeinde, Schwellenkooperationen, Forschungsinstitutionen usw.) meldet die Kubaturen an das Bundesamt für Umwelt (BAFU), wo die Daten in einer Datenbank festgehalten werden (BAFU 2015). In der Datenbank Solid sind längjährig kumulierte Volumen, als auch Ereignisvolumen dokumentiert. Für dieses Studie werden ausschliesslich Ereignisvolumina verwendet.

Gertsch (2009)

Im Rahmen der Dissertation „Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen - Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens“ (Gertsch 2009) werden die transportierten Feststoffvolumina von über 78 Wildbächen zusammengetragen. Dabei werden mithilfe von Ereignisanalysen und Feldbeobachtungen die Erosion-, Transport- und Ablagerungsvolumen für einzelne Streckenabschnitte bestimmt. Durch die Addition respektive Subtraktion dieser Volumina, über sämtliche Streckenabschnitte wird das Feststoffvolumen auf dem Kegel berechnet. In den meisten Fällen wird jedoch das auf dem Kegel abgelagerte Volumen, das bei der Ereignisanalyse bestimmt wurde, verwendet und die Volumenanteile auf die Abschnitte verteilt (Gertsch 2009).

Rickenmann & Koschni 2010

In dem Paper „Sediment loads due to fluvial transport and debris flows during the 2005 flood events in Switzerland“ (Rickenmann & Koschni, 2010) sind die Ablagerungsvolumina der Wildbäche zusammengetragen, die während der Ereignisse rund um den 22. und 23. August 2005 grosse Mengen von Geschiebe auf zahlreiche Wildbachkegel transportiert haben. In der Zusammenstellung werden auch Vorfluter von Wildbächen berücksichtigt (z.B. Aare oder Lütchine), welche jedoch in der vorliegenden Arbeit keine Verwendung finden.

Damit ein Wildbacheinzugsgebiet für die vorliegende Studie geeignet ist, müssen folgende Kriterien erfüllt sein:

- 1) Das Einzugsgebiet und das Gerinnesystem müssen einem Wildbach der Definition in Kapitel 1.1 entsprechen.
- 2) Das Wildbacheinzugsgebiet muss sich in der Schweiz befinden. Dieses Kriterium muss erfüllt sein, da die für die Erhebung der EZG- und Gerinneparameter notwendigen Geodaten nur für die Schweiz vorhanden sind (vgl. Kapitel 3.2)
- 3) Im Wildbacheinzugsgebiet muss ein Ereignis stattgefunden haben, welches einem Grossereignis gemäss der Definition in Kapitel 1.1 entspricht.
- 4) Durch das Ereignis muss es zu einer Ablagerung von Feststoffen auf dem Wildbachkegel gekommen sein. Sind mehrere Ereignisse dokumentiert, wird das Ereignis mit dem grössten transportierten Feststoffvolumen berücksichtigt.
- 5) Das abgelagerte Feststoffvolumen muss im Rahmen einer Studie oder einer Untersuchung detailliert gemessen oder geschätzt worden sein. Welche Schätz-, respektive Messmethode verwendet werden, spielt dabei keine Rolle. Mögliche Schätz- und Messmethoden sind:
 - Volumenberechnungen infolge von Feldbegehung nach dem Ereignis,
 - erstellen von Höhenmodellen und Berechnung von Volumendifferenzen
 - Zählung der Kubatur infolge der Räumungsarbeiten.

Mithilfe dieser Kriterien werden aus den drei oben aufgeführten Quellen 100 Wildbäche ausgewählt, die für die Erstellung eines Modells verwendet werden. Dabei ist es möglich, dass Wildbäche in den Studien enthalten sind, welche die Kriterien erfüllen, jedoch nicht berücksichtigt werden. Die anhand der eben genannten Kriterien ausgewählten Wildbäche werden zusammen mit den entsprechenden Feststoffvolumina in Kapitel 4.1 genannt und vorgestellt.

3.2 Datengrundlage Geodaten

Die Forschungsfrage A1) lautet: „Wie kann die grosse Anzahl an Einzugsgebiets- und Gerinneparameter systematisch, flächendeckend und effizient erhoben werden?“ (vgl. Kapitel 2). Eine systematische Erhebung der Parameter kann mithilfe eines Geoinformationssystems (GIS) durchgeführt werden (vgl. Kapitel 3.3), wobei Geodaten notwendig sind. In Abbildung 3-2 ist dargestellt, welche Geodaten verwendet werden, um die Parameter aus dem Konzeptmodell (vgl. Abbildung 1-4) abzuleiten. Die Geodaten müssen jeweils für die ganze Schweiz verfügbar sein, damit die Geodatenverfügbarkeit nicht die Auswahl der Wildbäche beschränkt (vgl. Kapitel 3.1). Aus den unterschiedlichen Geodaten kann eine grosse Anzahl an Parametern abgeleitet werden (vgl. Kapitel 3.3). In einer kurzen Erläuterung werden die wichtigsten Eckdaten der verwendeten Geodaten wiedergegeben.

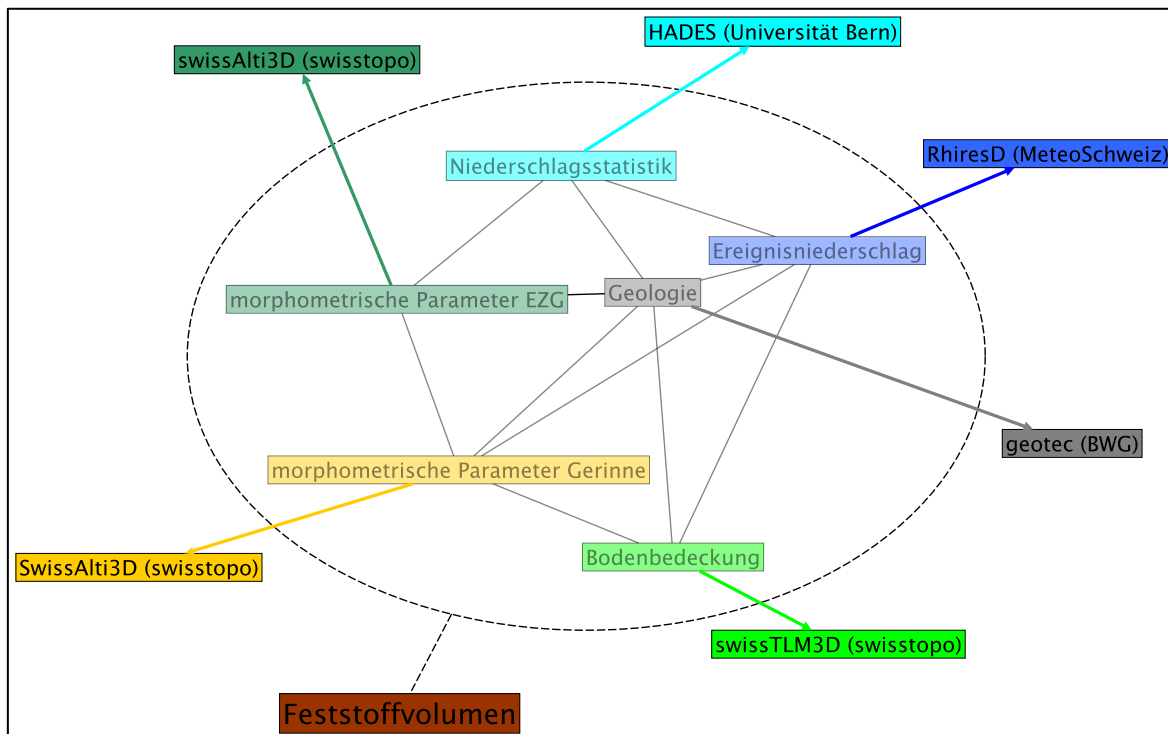


Abbildung 3-2: Verwendete Geodaten mit Datenherkunft. In der Abbildung ist dargestellt, welche Geodaten verwendet werden, um die Parameter der Parametergruppen des Konzeptmodells zu berechnen.

swissAlti^{3D} (swisstopo)

Der wichtigste Geodatensatz ist das Höhenmodell SwissALTI^{3D} von swisstopo. Der Datensatz wurde unterhalb ab 2000 m ü. M. mit der Laserscanning-Methode (Lidar) erstellt. In Gebieten oberhalb von 2000 m ü. M wurde das Höhenmodell anhand von Luftbildern berechnet (Stereokorrelation). Die Genauigkeit (in alle drei Dimensionen) ist für die Laserpunkte mit ± 0.5 m angegeben. Für die Stereokorrelation wird eine Abweichung von 1 - 3 m angegeben. SwissALTI^{3D} ist als Rasterdatensatz mit einer Maschenweite von 2 m verfügbar (swisstopo 2015a).

swissTLM^{3D} (swisstopo)

Beim swissTLM^{3D} Datensatz handelt es sich um jenen Vektordatensatz (shapefile), mit dem das grossmassstäblichen topografische Landschaftsmodell der Schweiz abgebildet wird (swisstopo, 2015b). Der Datensatz basiert auf dem Datensatz „Vector25“. Für klar definierte Objekte (wie Gebäude) ist die geometrische Genauigkeit in alle drei Dimensionen zwischen 0.2 - 2 m gegeben. Für nicht klar abgrenzbare Objekte (wie beispielsweise Wald) ist die geometrische Genauigkeit zwischen 1 - 3 m. Für die vorliegende Arbeit werden lediglich die Featureklassen von „TLM_Bodenbedeckung“ benötigt. Dieser Datensatz enthält neun unterschiedliche Datentypen, welche in der Tabelle 3-1 dargestellt sind. Die Klassifikation der Daten in einem GIS erfolgt nach dem GDB-Code (vgl. Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Unterschiedliche Datentypen und deren Definition in der TLM_Bodenbedeckung-featureklasse (Tabelle swisstopo 2014)

GDB-Code	Datentyp / Wertebereich	Definition
1	Fels	Fels
5	Fliessgewaesser	Flächen der Fliessgewässer. Minimalbreite: 5 m. Minimallänge: 500 m. Die Achsen der Fliessgewässer sind als Polylinien im Gewässernetz vorhanden.
6	Gebueschwald	Mit gleich- oder verschiedenartigen Sträuchern dicht bestockte Fläche (hölzerne Pflanzen, welche sich bereits am Boden verästeln).
7	Lockergestein	Lockergesteinsflächen bestehend aus Felsfragmenten und Lockergestein, wie sie in Kiesgruben, Flussbetten, Deponien oder Gebirgsflächen vorgefunden werden. Minimaler Deckungsgrad: 20%.
9	Gletscher	Überwiegend mit Eis oder ewigem Schnee bedeckte Flächen.
10	Stehende Gewaesser	Stehende Gewässer sind dauernd oder periodisch bedeckte offene Wasserflächen, wie Seen, Stauseen, Teiche usw. Die Achsen der stehenden Gewässer sind als Polylinien im Gewässernetz vorhanden (→ Feature Class TLM_STEHENDES_GEWAESSER).
11	Feuchtgebiet	Ein Feuchtgebiet ist ein Gebiet, das im Übergangsbereich von trockenen zu dauerhaft feuchten Ökosystemen liegt. Der Begriff des Feuchtgebiets umfasst verschiedene Lebensraumtypen wie Sumpf, Moor, Bruchwald, Feuchtwiese, Aue oder Ried.
12	Wald	Eine bewaldete Fläche, die mit gleich- oder verschiedenartigen Bäumen dicht bestockt ist.
13	Wald offen	Eine wenig dicht bewaldete Fläche mit einer Bodenvegetation.

RhiresD (MeteoSchweiz)

RhiresD ist ein Rasterdatensatz mit interpolierten Niederschlagswerten [mm] mit einer räumlichen Auflösung von 1 km und einer zeitlichen Auflösung von einem Tag. Die Daten sind von 1961 bis heute verfügbar. Der Datensatz basiert auf den Messdaten des Niederschlagsmessnetzes der Meteoschweiz. Dieses Messnetz umfasst aktuell rund 430 automatisierte und manuell bediente Messstationen. Bei der Interpolation der Daten werden mittels interpolierter Anomalien Klimatrenddaten berücksichtigt. Die Fehlerquellen des Datensatzes können in Messfehler der Niederschläge und Interpolationsfehler unterschieden werden. Die Messfehler der Niederschläge führen aufgrund von Windeinflüssen zu einer systematischen Unterschätzung der gemessenen Niederschlagswerte. Der Fehler der Messdaten variiert stark und wird von Sevruk (1985) je nach Wind- und Niederschlagsverhältnisse zwischen 4% - 40% geschätzt. Dabei ist eine Zunahme der Unsicherheit korrelierend mit der Höhe über Meer zu beobachten. Der Interpolationsfehler der Daten ist abhängig von der Art der Dateninterpretation. Werden die Daten flächig (z.B. Mittelwerte über Einzugsgebiete) betrachtet, ist der Interpolationsfehler geringer, als wenn die Rasterwerte als Punktinformationen interpretiert werden. Die effektive Auflösung des RhiresD Datensatzes wird auf 15 – 20 km geschätzt. Diese Distanz entspricht einer durchschnittlichen Distanz zwischen zwei Messstationen (MeteoSwiss 2013).

HADES (Universität Bern)

Im Rahmen dieser Arbeit werden die HADES Tafeln 2.2 „Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen“ und die Tafel 2.4² „Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden“ verwendet.

Tafel 2.2: Bei der HADES-Tafel 2.2 handelt es sich um eine auf 1 km-Auflösung gerasterte Niederschlagskarte der Schweiz mit den mittleren jährlichen Niederschlagssummen [mm] für die Periode von 1951-1980. Die Datengrundlage entspricht derjenigen des RhiresD Datensatzes (Messstationen von MeteoSchweiz). Bei der Interpolation der Werte wird der systematische Messfehler der Niederschlagsmessungen sowie der Einfluss der Orographie (Zunahme der Niederschläge mit der Höhe über Meer) berücksichtigt (HADES 2015a).

Tafel 2.4²: Die HADES-Tafel 2.4² umfasst vier shapefiles, welche für die Wiederkehrperioden von 2.33 und 100 Jahren die Höhen extremer Punktregen von ein- und 24-stündiger Dauer zeigen. Als Datengrundlagen werden Niederschlagsmessungen von insgesamt 503 Tagessammlern verwendet. Für die statistische Analyse und Berechnung der Häufigkeit von Starkniederschlägen sind von den Tagessammlern Messreihen vorhanden, welche bis ins Jahr 1901 zurückreichen. 30 Jahre dauert die Mindestlänge der Messreihen, welche für die statistische Analyse verwendet werden. Für sämtliche Stationen kann durch die Durchführung einer Extremalstatistik die Höhe [mm] eines Starkniederschlages in Abhängigkeit der Wiederkehrperiode berechnet werden. Diese Werte werden anschliessend räumlich interpoliert (HADES 2015b).

Geotechnische Karte der Schweiz (BWG)

Die „geotec“ Karte gibt die Verwitterbarkeit des Untergrundes für die ganze Schweiz wieder. Das shapefile basiert auf der vereinfachten, geotechnischen Karte der Schweiz, welche wiederum auf der 1:200'000 Karte der Schweizerischen geotechnischen Kommission aus den Jahren 1963 - 67 basiert. Die vereinfachte geotechnische Karte umfasst 30 Klassen, welche diverse geotechnischen Einheiten wiedergeben (BWG 1997). Diese Klassen werden in vier Kategorien zusammengefasst, die die Verwitterbarkeit des Untergrundes wiedergeben. Eine ähnliche Aggregation wird in Rickenmann & Koschni (2010) vorgeschlagen. In Tabelle 3-2 ist dargestellt, welche Klassen zu welchen Verwitterungskategorien aggregiert werden (mit dissovle-Funktion von SAGA). In der geotechnischen Karte existiert weiter eine Klasse „Gewässer und Gletscher“.

Tabelle 3-2: Einteilung der vier Verwitterungskategorien für die „geotec-Karte“ aus den 30 Klassen der vereinfachten geotechnischen Karte. In Klammern sind die für die Kategorien stellvertretenden Indizes dargestellt. Die Kategorien „Gewässer und Gletscher“ haben folgende Codes: 5 = Gewässer 6 = Gletscher.

Lockermaterial (1)	leicht verwitterbar mit hohem Feinanteil (2)	mittel verwitterbar mit mittlerem Feinanteil (3)	Schlecht verwitterbar mit kleinem Feinanteil (4)
Sande bis Silte	Mergel-Sandstein	Sandstein	Kalk
Tonige Silte	Mergel-Schieferton	Konglomerat (variabel)	Dolomit, Rauwacke/Gips
Kiese und Sande	Ton	Konglomerat, Arkose, Sandstein	Granit, Diorit, Quarz-syenit, Quarzdiorit
eckiger Schutt	Mergel	Schieferkalk, Kieselkalk, Radiolarit	Quarzporphyr, Porphyrit
	Konglomerat: Sand-gestein, Mergel	Schiefer Gneis	Quarzit
	Tonschiefer		Gneis, Amphibolit
	Mergelschiefer, Kalkphylit, Sandstein		Konglomeratgneis
	Kalkphylit, Kalkglimmerschiefer		
	Mergelschiefer, Mergelkalk		
	Grünschiefer		
	Serpentinit, Peridotit		

3.3 Erhebung der Einzugsgebiets- Gerinneparameter

Basierend auf dem Prozessverständnis und der Literatur können Parametergruppen von Einzugsgebiets- und Gerinneparametern abgeleitet werden, welche im Konzeptmodell wiedergegeben werden (vgl. Kapitel 1.1). In der Tabelle 3-3 sind die Parametergruppen, welche in dieser Arbeit verwendet werden, abgebildet. Die Zusammenstellung umfasst zwei Gruppen mehr als das Konzeptmodell. Der Grund für diese „Erweiterung“ ist die Anwendung der Bodenbedeckungsparameter und der geologischen Parameter auf das Gerinne und das Einzugsgebiet. Die Zuweisung spezifischer Parameter zu diesen Parametergruppen erfolgt in der Regel aufgrund von Literaturerkenntnissen. Gewisse Parameter werden zugleich aufgrund der Datengrundlage erhoben. Im Datensatz swissTLM^{3D} ist zum Beispiel der Datentyp Gebüschwald enthalten. Beispielsweise könnte dieser Parameter im Zusammenhang stehen mit der Feststofflieferung, wird jedoch lediglich aufgrund der gegebenen Datengrundlage erhoben.

Tabelle 3-3: Zusammenstellung zentraler Einzugsgebiets - und Gerinneparameter für die Schätzung von Feststoffvolumen. Die Tabelle umfasst den Namen, die Abkürzung und die Einheit der Parameter. Neben einer kurzen Beschreibung wird aufgelistet, welche Literatur auf den entsprechenden Parameter hinweist. Die Zusammenstellung folgte nach Jäggi (2013:17ff)

Morphometrische Einzugsgebietsparameter (morphG)	
Name und Kürzel	Beschreibung und Literatur
Fläche des EZG (A) [m ²]	Umfasst das morphologische Einzugsgebiet. D'Agostina (1996), Hampel (1980), Kronfellner-Kraus (1982), Zeller (1985)
Mittlere Höhe des EZG (mH) [m.ü.M]	Hampel (1980), Zimmermann et al. (1997)
Maximale Höhe des EZG (maxH) [m.ü.M]	Hampel (1980), Zimmermann et al. (1997)
Minimale Höhe des EZG (minH) [m.ü.M]	Hampel (1980), Zimmermann et al. (1997)
Melton-Zahl (melton)	Differenz zwischen maximaler und minimaler Höhe des EZG dividiert durch die Wurzel der Fläche. Jäggi (2013:18)
Morphometrische Gerinneparameter (morphEZG)	
Name und Kürzel	Beschreibung und Literatur
Gerinnelänge (ch_L) [m]	Länge des Hauptgerinnes wobei das Hauptgerinne dem Gerinneverlauf entspricht welcher das Haupteinzugsgebiet entwässert. Hampel (1980)
Gerinneneigung (S) [%]	Neigung des Hauptgerinnes berechnet mit der Steigung der linearen Regression des Längsprofils. . D'Agostina (1996), Hampel (1980), Kronfellner-Kraus (1982), Zimmermann et al. (1997)
Makrorauheit gleitendes Mittel (R) [m]	Standardabweichung der Residuen des gleitenden Mittels des Längsprofils. Nitsche et al. (2012)
Makrorauheit gleitendes Mittel (mR) [m]	Standardabweichung der Residuen der linearen Regression des Längsprofils. Nitsche et al. ()
Geologische Parameter im Einzugsgebiet (geoEZG)	
Name und Kürzel	Beschreibung und Literatur
Prozentualer Anteil leicht verwitterbares Gestein im EZG (geo_easy) [%]	Details vgl. Tabelle 3-2. D'Agostina (1996)
Prozentualer Anteil mittel verwitterbares Gestein im EZG (geo_med) [%]	Details vgl. Tabelle 3-2. D'Agostina (1996)
Prozentualer Anteil schlecht verwitterbares Gestein im EZG (geo_poor) [%]	Details vgl. Tabelle 3-2. D'Agostina (1996)

Fortsetzung zu Tabelle 3-3

Geologische Parameter im Gerinne (geoG)	
Name und Kürzel	Beschreibung und Literatur
Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über leicht verwitterbares Gestein (geo_easy_ch) [%]	Details vgl. Tabelle 3-2. D'Agostina (1996)
Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über mittel verwitterbares Gestein (geo_med_ch) [%]	Details vgl. Tabelle 3-2. D'Agostina (1996)
Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über schlecht verwitterbares Gestein (geo_poor_ch) [%]	Details vgl. Tabelle 3-2. D'Agostina (1996)
Bodenbedeckung im Einzugsgebiet (bodenEZG)	
Name und Kürzel	Beschreibung und Literatur
Prozentualer Anteil Fels im EZG (TLM_rock) [%]	Details vgl. Tabelle 3-1. Beyer & Schleiss (2000), Vente et al. (2007), Raymond Pralong et al. (2011)
Prozentualer Anteil Gebüschwald im EZG (TLM_brush) [%]	Details vgl. Tabelle 3-1. Beyer & Schleiss (2000), Vente et al. (2007), Raymond Pralong et al. (2011)
Prozentualer Anteil Lockergestein im EZG (TLM_sed) [%]	Details vgl. Tabelle 3-1. Beyer & Schleiss (2000), Vente et al. (2007), Raymond Pralong et al. (2011)
Prozentualer Anteil Gletscher im EZG (TLM_glac) [%]	Details vgl. Tabelle 3-1. Meyer –Peter & Müller (1948), Schoklitsch(1934)
Prozentualer Anteil Wald im EZG (TLM_forest) [%]	Details vgl. Tabelle 3-1. . Beyer & Schleiss (2000), Vente et al. (2007), Raymond Pralong et al. (2011), Zimmerman et al. (1997)
Prozentualer Anteil Wald offen im EZG (TLM_oforest) [%]	Details vgl. Tabelle 3-1. Beyer & Schleiss (2000), Vente et al. (2007), Raymond Pralong et al. (2011)
Bodenbedeckung im Gerinne (bodenG)	
Name und Kürzel	Beschreibung und Literatur
Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über Fels (TLM_rock_ch) [%]	Details vgl. Tabelle 3-1. Beyer & Schleiss (2000), Vente et al. (2007), Raymond Pralong et al. (2011)
Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über Lockergestein (TLM_sed_ch) [%]	Details vgl. Tabelle 3-1. Beyer & Schleiss (2000), Vente et al. (2007), Raymond Pralong et al. (2011)
Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über Gletscher (TLM_glac_ch) [%]	Details vgl. Tabelle 3-1. Meyer –Peter & Müller (1948), Schoklitsch(1934)
Niederschlagsstatistik (hydroS)	
Name und Kürzel	Beschreibung und Literatur
100 jährlicher 1h-Punktniederschlag (HA1_100) [mm]	Über die EZGfläche gemittelter Wert des extremen Punktniederschlages aus den HADES Daten. Hampel (1980)
2.33 jährlicher 1h-Punktniederschlag (HA1_233) [mm]	Über die EZGfläche gemittelter Wert des extremen Punktniederschlages aus den HADES Daten. Hampel (1980)
100 jährlicher 24h-Punktniederschlag (HA24_100) [mm]	Über die EZGfläche gemittelter Wert des extremen Punktniederschlages aus den HADES Daten. Hampel (1980)
2.33 jährlicher 24h-Punktniederschlag (HA24_233) [mm]	Über die EZGfläche gemittelter Wert des extremen Punktniederschlages aus den HADES Daten. Hampel (1980)
Mittlerer jährlicher Gebietsniederschlag. (Hamean) [mm]	Über die EZGfläche gemittelter, mittlere jährliche Niederschlag aus den HADES.
Ereignisniederschlag (hydroE)	
Name und Kürzel	Beschreibung und Literatur
Gebietsniederschlag über dem EZG am Ereignistag (p1) [mm]	Über die EZGfläche gemittelter Tagesniederschlages des Ereignistages aus den RhiresD Daten. Dieser Parameter steht als Proxy für den Abfluss.
Gebietsniederschlag über dem EZG am Ereignistag (p1-p20) [mm]	Über die EZGfläche gemittelter Tagesniederschläge der Tage vor dem Ereignis (bis 20 Tage vor dem Ereignis). Dieser

Die systematische, effiziente und flächendeckende Erhebung der Parameter kann mithilfe einer Verkettung von Geoalgorithmen erreicht werden. Eine solche Verkettung von GIS-Algorithmen gewährleistet, dass die Parameter immer mit denselben Berechnungsschritten erhoben werden, wodurch eine systematische Erhebung möglich ist. Durch die Verkettung wird auch die Effizienz gesteigert, da die einzelnen Algorithmen nicht manuell angesteuert werden müssen. Für die Aneinanderreihung von Geoalgorithmen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Eine dieser Möglichkeiten ist der Model-Builder von ArcGIS (ESRI 2015), der sich durch den Vorteil hervorhebt, dass die Anwendung äusserst detailliert dokumentiert wird. Hingegen ist es aus Sicht des Autors von Nachteil, dass nur bereits vorhandene Geoalgorithmen verknüpft werden können oder dass nur eine mit dem Model-Builder erstellte Verkettung verwendet werden kann, sofern die kommerzielle Software ArcGIS vorhanden ist. Diese Software ist zudem nur für das Betriebssystem Windows verfügbar. Eine weitere Möglichkeit stellt die Open-Source Software QGIS dar, welche ebenfalls über eine visuelle Programmiersprache verfügt (ähnlich wie der Model-Builder). Der Vorteil der Software QGIS ist wiederum aus Sicht des Autors neben der kostenlosen Nutzung die Verfügbarkeit für diverse Betriebssysteme wie Windows, MacOS und Linux. Weiter bietet diese Software eine grosse Auswahl an Geoalgorithmen. Hingegen ist es ein Nachteil des Model-Builders von QGIS, dass lediglich bestehende Geoalgorithmen verknüpft werden können und die Flexibilität bei der Kombination von Algorithmen bei der Erstellung eines Workflows eingeschränkt ist. Besagte Flexibilität und die Möglichkeit zur Erstellung neuer Geoalgorithmen ist hingegen bei der Verwendung einer Code-basierten Programmierumgebung gegeben. Damit jedoch auf bestehende Geoalgorithmen zurückgegriffen werden kann, müssen für die Programmiersprache bereits Geoalgorithmen in Form von Funktionen verfügbar sein. Die Programmiersprache Python bietet diese Möglichkeit, wie auch die Statistik-programmiersprache R. Beide Umgebungen können zudem mit QGIS kombiniert werden. Mit R kann zudem auf eine Sammlung von Geoalgorithmen durch sogenannte „Packages“ zugegriffen werden. Für die Erstellung eines GIS-Workflows wird in dieser Arbeit die Statistiksoftware R verwendet. Diese Anwendung wird mit der visuellen Programmierumgebung von QGIS kombiniert. Wie dieser GIS-Workflow aufgebaut ist, wird in Kapitel 4.1.2 zusammengefasst. Zudem wird ein detaillierter Beschrieb des programmierten GIS-Workflows im Benutzerhandbuch „EZG/GP-Tool (Anhang C)“ nachgeliefert.

3.4 Deskriptive Statistik

Durch die Erhebung der Feststoffvolumina von Grossereignissen (vgl. Kapitel 3.1) sowie durch die Erhebung der Einzugsgebiets- und Gerinneparametern (vgl. Kapitel 3.2) entsteht ein Datensatz mit der Zielgrösse (Feststoffvolumina) sowie unabhängigen Parametern (EZG-/ Gerinneparameter). Dieser Datensatz wird mithilfe von deskriptiven statistischen Methoden untersucht.

„Unter deskriptiver Statistik werden statistische Methoden zur Beschreibung und Auswertung von Daten zusammengefasst. Dies kann in Form von Graphiken und Tabellen geschehen, durch die Errechnung von einfachen Parametern wie dem Mittelwert sowie durch die Berechnung komplexerer Parameter wie der Streuung, der Standardabweichung oder des Korrelationskoeffizienten. Das entscheidende Charakteristikum der deskriptiven Statistik ist es, dass ausschliesslich Aussagen zum Datensatz selbst gemacht werden.“ (Statista 2015a)

Die Analyse dient somit zur Darstellung und Beschreibung der erhobenen Parameter (vgl. Tabelle 3-3) für sämtliche 100 Wildbäche und soll erste Erkenntnisse bezüglich der Bedeutung der Parameter für die Schätzung der Feststoffvolumina ermöglichen (vgl. Forschungsfrage A2). Die Parameter werden für diese Beschreibung in den definierten Parametergruppen (vgl. Tabelle 3-3) zusammengefasst. Die Darstellung erfolgt über Streudiagramme und Boxplots. Streudiagramme entsprechen zweidimensionalen Darstellungen mit je einem Parameter auf der x-Achse und einem weiteren Parameter oder aber der Zielgrösse auf der y-Achse. Anhand von diesen Streudiagrammen können Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern oder zwischen Parametern und der Zielgrösse visuell erfasst werden. Im Rahmen der Analyse ist lediglich eine qualitative Auswertung über die Zusammenhänge möglich. Um Aussagen über die Streuung der einzelnen Parameter treffen zu können, werden Boxplots verwendet. Mithilfe eines Boxplots können Aussagen über den Median, die Quantile, die grösste „normale“ Beobachtung sowie den Ausreissern gemacht werden. In der Arbeit wird der Boxplot gemäss Abbildung 3-3 verwendet. Diese beiden Methoden werden hinsichtlich sämtlicher Parametergruppen eingesetzt. Für die Parametergruppe „Ereignisniederschlag (hydroE)“ wird zusätzlich eine Korrelationsanalyse zwischen der Zielgrösse (Feststoffvolumina) und den Ereignisniederschlägen durchgeführt. Ziel dieser Analyse ist die Reduktion und Aggregation von 20 Tagesniederschlägen auf fünf Parameter. Als Kriterium zur Unterteilung wird der Korrelationskoeffizient zwischen der Zielgrösse und den Tagesniederschlägen verwendet.

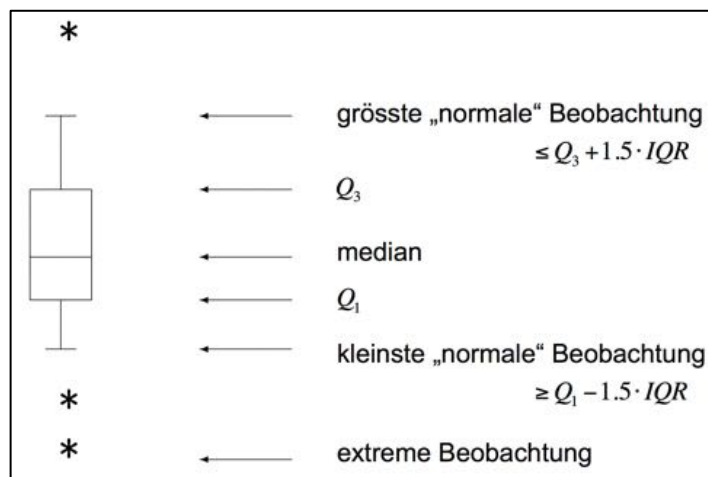


Abbildung 3-3: Beschreibung Boxplot. Der Median entspricht dem Wert welcher sich in der Mitte befindet, wenn sämtliche Werte des untersuchten Datensatzes der Grösse nach sortiert werden. Die Werte Q_3 und Q_1 entsprechen dem 25- und 75% Quantil. Der Quartilabstand (IQR) entspricht der Differenz von Q_3 und Q_1 . Werte ausserhalb des 1.5-fachen Quartilabstandes werden als extreme Beobachtungen oder Ausreisser bezeichnet (Sick et al. 2012)

3.5 Künstliche Neuronale Netze

Um die Hypothese der vorliegenden Arbeit zu bearbeiten, müssen KNN erstellt, trainiert und getestet werden. In diesem Kapitel folgt nach einer kurzen Einleitung zu KNN ein Abschnitt mit Grundlagen zu KNN (vgl. Kapitel 3.5.1). Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Modellansätze basierend auf KNN entwickelt, deren detaillierten Hintergründe im Kapitel 3.5.2 erläutert werden. Dabei wird aufgezeigt, anhand welcher Methoden die Anzahl der Parameter reduziert wird (Forschungsfrage A2) und wie die Konfigurierungsmöglichkeiten der KNN bestimmt und definiert werden (Forschungsfrage B).

KNN werden neben Fuzzy-Systemen in der Literatur (Zadeh 1994) den sogenannten „soft computing“ Methoden zugeschrieben. Diese Ansätze eignen sich, um Daten, respektive Systeme mit grosser Komplexität, Nichtlinearität, Mehrdimensionalität, Unsicherheiten oder Ungenauigkeiten auszuwerten. Dabei orientieren sich sämtliche Ansätze an der Funktionsweise des menschlichen Gehirns (Chandrasekaran et al. 2009). In der folgenden Arbeit wird bewusst lediglich auf KNN eingegangen, obwohl eine Auswertung des Datensatzes mit Fuzzy-Systemen und evolutionären Algorithmen ebenfalls möglich wäre.

Eine einheitliche und allgemeine Definition von KNN ist aufgrund der sehr unterschiedlichen Netztypen nicht möglich. Allerdings existieren Merkmale, welche Teil sämtlicher KNN sind (Rey & Wender, 2011:13-14). Als zentralste Gemeinsamkeit kann die Orientierung der KNN am menschlichen Gehirn hervorgehoben werden. Ein Gehirn besteht aus einer grossen Anzahl an Neuronen ($\approx 10^{11}$). Diese Neuronen, die für die Verarbeitung von Informationen zuständig sind, sind in einem Netzwerk miteinander verbunden. Über elektrische oder chemische Synapsen, werden die Signale von Zellen oder Neuronen über Dendriten in den Zellkern (Soma) geleitet. In der Soma werden aktivierende und abschwächende Signale gesammelt. Überschreitet das kumulierte Signal einen Grenzwert, wird das Signal über das Axon an Neuronen oder andere

Zellenarten weitergeleitet. Das Axon ist elektrisch isoliert, damit die Signale besser geleitet werden können. Das Signal führt in der „Empfängerzelle“ zu der Steuerung dieser Zelle (Kriesel 2007). In Abbildung 3-4 ist schematisch der Aufbau einer menschlichen Neurone abgebildet.

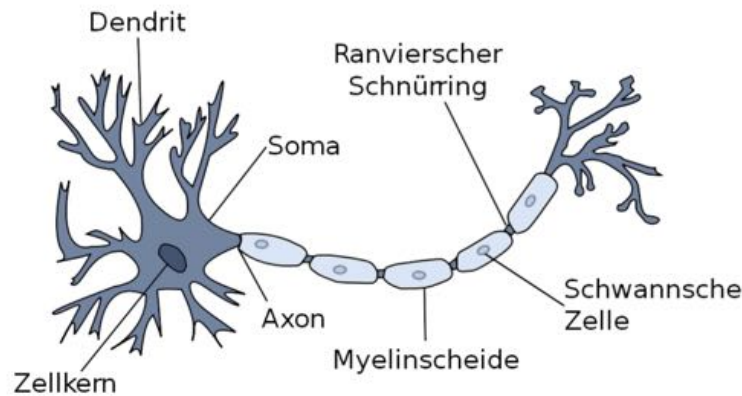


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung einer Neurone. Signale gelangen über Dendriten in den Zellkern der Soma, wo das Signal verarbeitet wird und über das Axon an weitere Neuronen weitergeleitet wird (Kriesel 2007).

Bereits 1943 versuchten Warren McCulloch und Walter Pitts (McCulloch & Pitts 1943) Neuronen technisch „nachzubauen“ und begründen damit den Forschungszweig zu KNN. Sie zeigen auf, dass bereits einfache Netze fast sämtliche logischen oder arithmetischen Funktionen abbilden können (Kriesel 2007). Ein Meilenstein in der Entwicklung von KNN folgte 1949 durch die Entwicklung der Hebb'schen Lernregel (Hebb 1949), auf der beinahe sämtliche Lernverfahren von KNN basieren. Nach dieser Entwicklung folgte eine rund 20-jährige Blütezeit. Aufgrund einer Veröffentlichung von Marvin & Seymour im Jahr (1969) gingen die Forschungsgelder für die Erforschung von KNN dann jedoch deutlich zurück. In dieser Veröffentlichung wurde aufgezeigt, dass eine grosse Anzahl an Problemen nicht mit KNN gelöst werden kann. Rund 15 Jahre später erlebten die Ansätze eine Renaissance: Durch die Entwicklung des Lernverfahren der „Backpropagation of Error“ (Rummelhart et al. 1988) konnten die von Minsky & Seymour (1969) veröffentlichten Problem widerlegt werden, was zu dem Aufschwung führte. In jüngerer Zeit ist eine „explosive Entwicklung des Forschungsgebietes“ zu beobachten (Kriesel 2007). In der gesamten Entwicklungszeit von KNN wurden unterschiedliche Ansätze und Netztypen entwickelt, die eine einheitliche Definition von KNN verhindern. Die unterschiedlichen Netztypen können anhand des Einsatzgebiets (Klassifikation, Vorhersage, Erkennen von Mustern, Optimierung usw.), dem Netzaufbau, der Trainingsart oder anhand der Lernregel unterschieden werden (Rey & Wender 2011:59f). In dieser Arbeit wird ausschliesslich mit „multi-layer feed-forward neuronalen Netzwerken“ (MLF) gearbeitet. MLF können ähnlich wie multiple Regressionen benutzt werden (vgl. z.B. Manallack, Ellis & Livingstone 1994). Kombiniert mit dem „Backpropagation-Lernverfahren“ handelt es sich um den am häufigsten verwendeten Netztyp (Svozil et al. 1997). Der Begriff „multi-layer feed-forward neuronalen Netzwerken“ wird in dieser Arbeit synonym mit dem Begriff „künstliche neuronale Netze“ (KNN) verwendet. Im Folgenden Kapitel wird in einem ersten Schritt der Aufbau eines MLF respektive KNN erläutert, um anschliessend auf den gesamten Ablauf vom Training, Validierung und Testen einzugehen.

3.5.1 Grundlagen KNN

Ein KNN besteht aus einem Netzwerk aus Neuronen (auch Units). Es können drei unterschiedliche Arten von Neuronen unterschieden werden. Diese drei Arten von Neuronen sind in unterschiedlichen Schichten (auch Layer) wiederzufinden. Die drei unterschiedlichen Arten von Neuronen erfüllen einen unterschiedlichen Zweck:

- **Input-Neuronen:**
Die Input-Neuronen werden von der „Aussenwelt“ mit Signalen in Form von Zahlen gespiesen. Diese Zahlen entsprechen den unabhängigen Variablen des Modells.
- **Hidden-Neuronen:**
Die Hidden-Neuronen befinden sich zwischen den Input und Output-Neuronen. Sie sammeln die Signale der Input-Neuronen und verarbeiten das Signal weiter.
- **Output-Neuronen:**
Die Output-Neuronen sammeln die Signale der Hidden-Neuronen und geben das Signal weiter an die „Aussenwelt“.

Die verschiedenen Neuronenarten werden in Schichten zusammengefasst. Während jeweils zwangsläufig nur eine Input- sowie eine Output-Schicht (mit beliebiger Anzahl Neuronen) besteht, kann hingegen die Anzahl der Hidden-Schichten variieren. Sämtliche Neuronen einer Schicht sind mit allen Neuronen der nachfolgenden Schicht über sogenannte Kanten (auch Links oder Verbindungen) verknüpft. Die Stärke der Verknüpfung zwischen zwei Neuronen wird durch sogenannte „Gewichte“ (vgl. Abbildung 3-5). Durch die Veränderung der Gewichte in der Trainingsphase kann „Wissen“ in einem KNN gespeichert werden (Rey & Wender 2011:13ff).

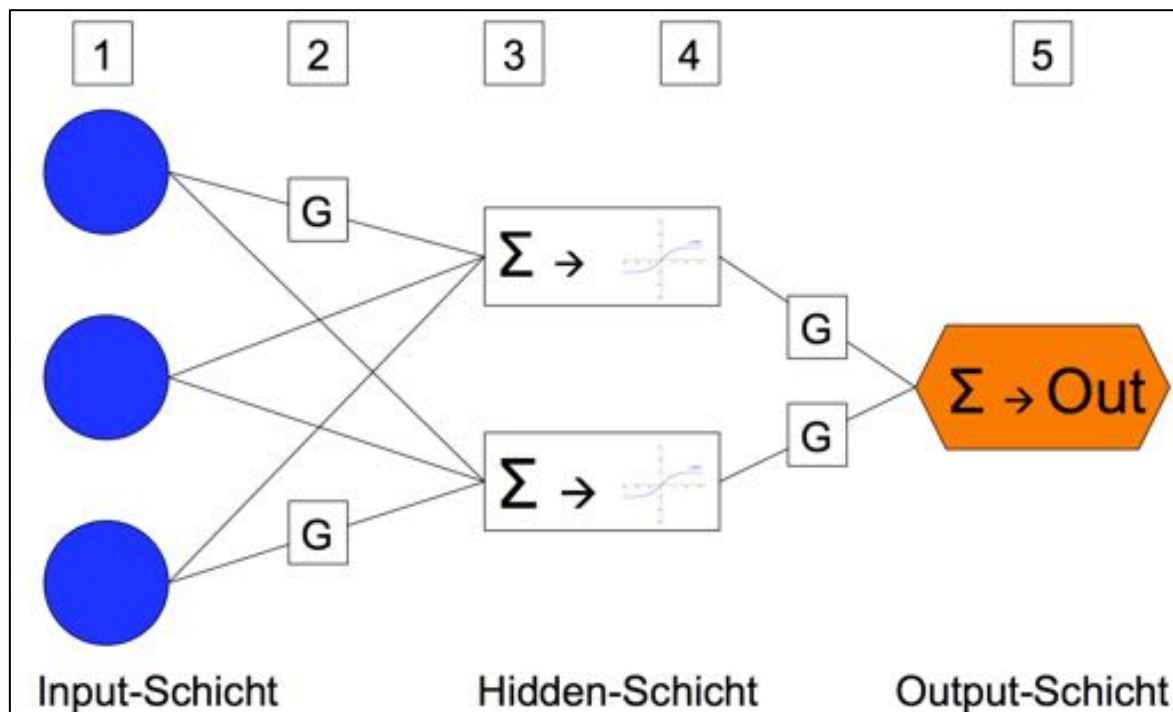


Abbildung 3-5: Schematischer Aufbau eines KNN. Ein KNN umfasst eine Input-, Hidden- und eine Output-Schicht. In diesen Schichten befinden sich sogenannte Neuronen. Die Neuronen sind durch Kanten miteinander verbunden, wobei die Stärke der Verknüpfung durch Gewichte (G) wiedergegeben wird. Die Zahlen in den Kästchen verweisen auf die Erläuterung im Text (vgl.unten) (eigene Abbildung nach Rey & Wender 2011:13ff).

Der Weg der Signale durch das Neuronale Netz kann in fünf Schritte unterteilt werden. In der Abbildung 3-6 wird durch die jeweilige Nummer visualisiert, wo dieser Schritt genau in dem KNN umgesetzt wird:

- 1) In die Input-Neuronen werden die Werte der unabhängigen Variablen eingegeben. Dabei entspricht die Anzahl der unabhängigen Variablen der Anzahl Input-Neuronen.
- 2) Die Werte der Input-Neuronen werden mit den Gewichten der entsprechenden Kanten multipliziert.
- 3) Der Input der Hidden-Neuronen entspricht dem Resultat der Propagierungsfunktion. Die Propagierungsfunktion kann dargestellt werden als:

$$Hidden-Input_i = \sum_j a_j \cdot w_{ij}$$

i = empfangende Hidden-Neurone

j = sendende Output-Neurone

a_j = Wert der sendenden Output-Neurone

w_{ij} = Gewicht zwischen der senden Output und der empfangenden Hidden-Neurone

- 4) In der Hidden-Neurone wird ein Aktivitätslevel gebildet. Dieses Aktivitätslevel wird durch eine einparametrische Aktivitätsfunktion (auch Transferfunktion) berechnet. Die unabhängige Variable entspricht dabei dem Hidden-Input und die abhängige Variable dem Output des Neurons. Es können unterschiedliche Aktivitätsfunktionen verwendet werden. In der Abbildung 3-6 werden häufig verwendete Aktivitätsfunktionen abgebildet.

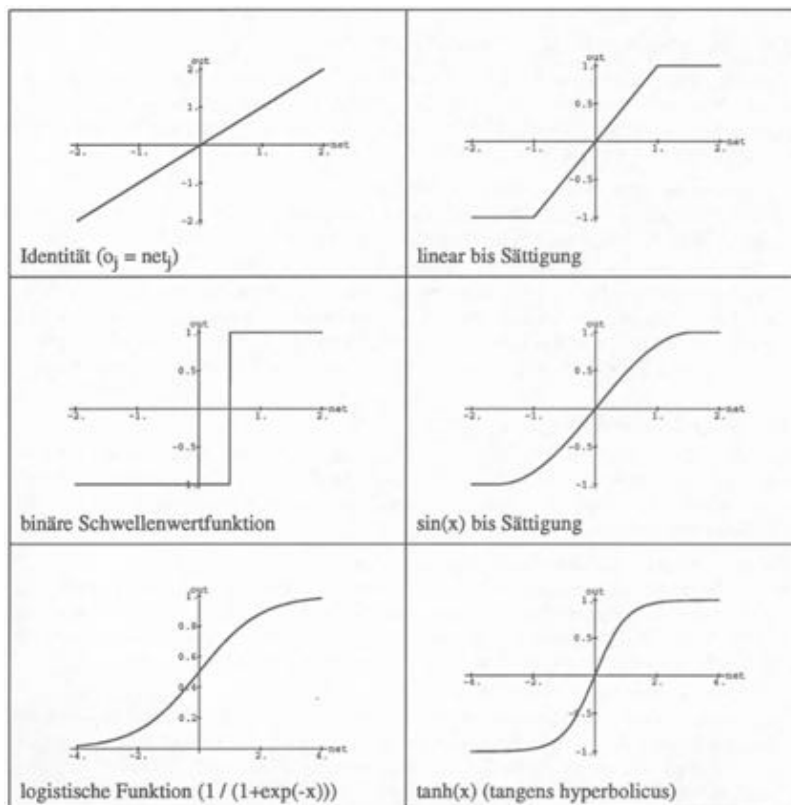


Abbildung 3-6: Unterschiedliche Aktivitätsfunktionen. Auf der x-Achse wird der Hidden-Input-Wert aufgetragen und auf der y-Achse kann der Output des Neurons abgelesen werden (Abbildung Lippe 2015).

- 5) Die Outputs der Hidden-Neuronen werde über die gewichteten Verbindungen in die Output-Neuronen weitergeleitet. In den Output-Neuronen wird über die Propagierungsfunktion (analog zu Hidden-Neuronen vgl. Punkt 3) der Input der Output-Neurone berechnet. Dieser Input wird durch eine Aktivitätsfunktion modifiziert (analog zu Hidden-Neuron vgl. Punkt 4). Die Aktivitätsfunktionen der Hidden- und Output-Neuronen müssen dabei nicht identisch sein. Der modifizierte Wert entspricht dem Modelloutput.

Trainingsvorgang

Während der Trainingsphase findet eine iterative Anpassung der Gewichte statt. Dafür muss ein Trainingsdatensatz vorhanden sein. Ein geeigneter Trainingsdatensatz muss eine möglichst grosse Anzahl an „Zeilen“ mit unabhängigen und abhängigen Variablen aufweisen. Eine Zeile entspricht dabei einer Messung, respektive einer Beobachtung der untersuchten Fragestellung. Damit die Gewichte während der Trainingsphase effizienter angepasst werden können, werden sämtliche Daten normalisiert. Eine häufig verwendete Methode ist die „Z-Score“ Normalisierung. Dabei werden die Daten auf den Mittelwert «0» und Standardabweichung „1“ normalisiert (Priddy & Keller 2005). Zu Beginn der Trainingsphase werden die Werte der Gewichte mithilfe von Vorkenntnissen oder anhand einer Zufallsverteilung definiert. Anschliessend werden die fünf beschriebenen Schritte mit den unabhängigen Variablen der ersten Zeile durchgeführt. Im fünften Schritt wird ein Aktivitätslevel generiert, welches dem Modelloutput und somit der geschätzten abhängigen Variable entspricht. Dieses berechnete Aktivitätslevel kann mit dem tatsächlich gemessenen Wert verglichen werden. Abhängig von der Differenz zwischen dem berechneten Aktivitätslevel und dem gemessenen Wert werden die Gewichte mithilfe einer Lernregel angepasst. Für das Trainieren von KNN existieren unterschiedliche Lernregeln wie die Hebb-Regel, die Delta-Regel oder das Gradientenverfahren. Die Funktionsweise von Lernregeln wird im Folgenden exemplarisch anhand der Delta-Regel erläutert. Dabei wird die Differenz (δ_i) zwischen dem gemessenen Wert und dem berechneten Aktivitätslevel berechnet. Die Veränderung der Gewichte wird anschliessend mit folgender Formel (Delta-Regel) berechnet:

$$\Delta w_{ij} = \epsilon \cdot \delta_i \cdot a_j$$

Δw_{ij} = Veränderung des Gewichts zwischen den Einheiten i und j (auch Fehlerterm)

ϵ = vorgängig festgelegter Lernparameter

δ_i = Delta- Wert

a_j = berechnetes Aktivitätslevel

Der Fehlerterm (Δw_{ij}) wird zu den Gewichten addiert. Weist ein KNN eine Hidden-Schicht auf, kann für die Anpassung der Gewichte zwischen der Input- und der Hidden-Neurone der Delta-Wert nicht direkt berechnet werden, da der gewünschte Aktivitätslevel der Hidden-Neuronen nicht bekannt ist. Aus diesem Grund müssen sämtliche Gewichte mithilfe des Backpropagation Verfahrens angepasst werden. Bei der Backpropagation werden die Fehlerterme rückwärts durch das Netz propagiert. Die Anpassung der Gewichte erfolgt dabei iterativ (Rey & Wender 2011:13ff).

Nachdem die Gewichte aufgrund der ersten Zeile verändert worden sind, wird der beschriebene Prozess für sämtliche Zeilen des Trainingsdatensatzes wiederholt, wobei die Gewichte schrittweise modifiziert werden. In der Regel wird der gesamte Trainingsdatensatz mehrmals durch das KNN iteriert. Mit der steigenden Anzahl an Wiederholungen nimmt der Gesamtfehler des Trainingsdatensatzes ab. Allerdings besteht dabei die Gefahr von einem sogenannten „Overfitting“, das dadurch charakterisiert werden kann, dass das erstellte Modell nicht mehr auf unabhängige Daten zu übertragen ist. Um ein Overfitting zu verhindern, wird nach jeder Iteration das Modell auf einen unabhängigen Validierungsdatensatz angewendet. Dabei findet kein Lernprozess, also keine Veränderung der Gewichte, statt. Nimmt der Gesamtfehler der Validierungsdaten mit steigender Anzahl an Iterationen zu, weist das KNN ein Overfitting auf (vgl. Abbildung 3-7). Mithilfe des Validierungsdatensatzes kann somit die optimale Anzahl an Iterationen bestimmt werden (Eisenbach 2005). Eine weitere Möglichkeit, ein Overfitting zu verhindern, ist die Definition von Abbruchkriterien. Dabei ist die Angabe einer Maximalzahl an Iterationsdurchgängen oder die Definition eines Fehlergrenzwertes denkbar.

Die optimale Topologie (Anzahl Neuronen im Netz) und die Inputparameterkonstellation wird ebenfalls anhand der Validierungsdaten geprüft. Bei der Trennung des Datensatzes in Trainings- und Validierungsdatensatz wird in der Regel der Trainingsdatensatz deutlich grösser gewählt als der Validierungsdatensatz. Bei kleinen Datensätzen wird eine k-fold cross validation durchgeführt. Dabei wird der Datensatz in k-Teile unterteilt. Entspricht zum Beispiel der k-Wert dem Wert „10“ werden die ersten 90% der Daten für das Training verwendet, die restlichen 10% für die Berechnung der Modellgüte. Danach wird das Netz mit denselben Einstellungen (gleiche Topologie und Anzahl Iterationen) erneut trainiert. In diesem Durchgang werden allerdings die ersten 10% der Daten für die Validierung verwendet und die Modellgüte wird zugleich berechnet. Dieser Vorgang wird k-Mal wiederholt, bis sämtliche Daten für die Validierung verwendet wurden. Die Modellgüte entspricht dem Mittelwert sämtlicher berechneter Modellgüten (Heiser 2015b). Für die Berechnung der Modellgüte können unterschiedliche Gütemasse verwendet werden. In der Arbeit wird das;

- Bestimmtheitsmass (R^2),
- der Nash-Sutcliffe-efficiency Koeffizient (NSE) (Nash & Sutcliffe 1970),
- der root mean squared error (RMSE),
- der normalized root mean squared error (NRMSE)
- sowie das akaike's information criterion (AIC) (Panchal et al. 2010)

verwendet. Die Modellgüte wird in der Folge in der Regel mit dem NRMSE angegeben. Auf den RMSE und das AIC wird nicht weiter eingegangen.

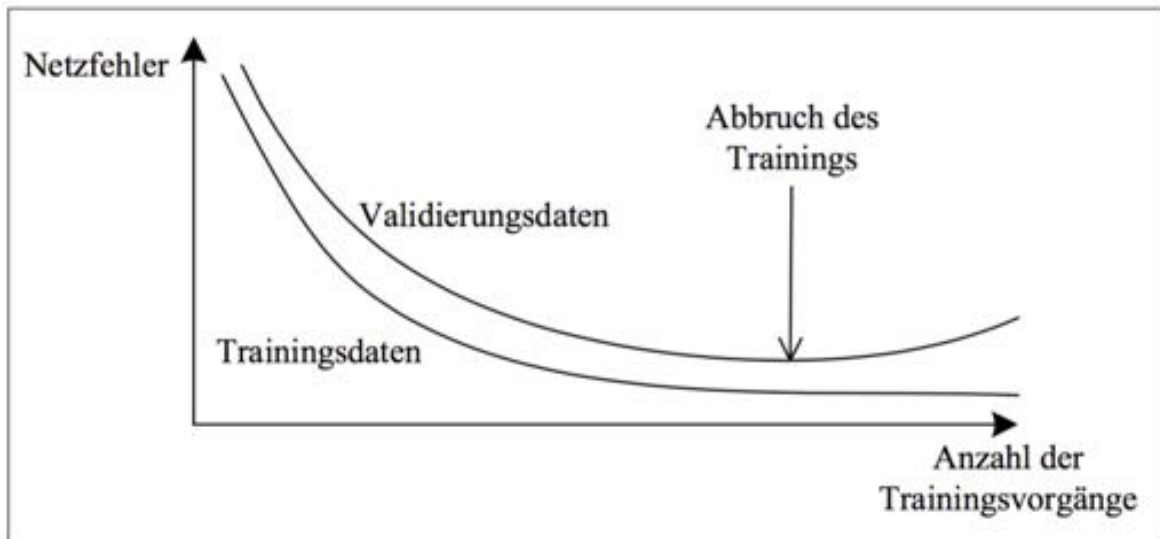


Abbildung 3-7: Einfluss der Anzahl Iteration auf den Netzfehler. Mit steigender Anzahl Trainingsvorgänge (Iterationen) nimmt der Netzfehler der Trainingsdaten ab. Der Fehler der Validierungsdaten nimmt in einem Schritt ab, um anschliessend wieder anzusteigen. Nimmt der Fehler der Validierungsdaten zu, ist das KNN von einem Overfitting betroffen (Abbildung: Eisenbach 2005:26).

Für eine weiterführende Einleitung in die Welt der KNN empfiehlt der Autor folgende Grundlagenliteratur:

- Neuronale Netze. Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung (Rey & Wender 2011).
- Ein kleiner Überblick über Neuronale Netze (Kriesel 2007).

3.5.2 Modellansätze

In der Hypothese (vgl. Kapitel 2) wird postuliert, dass mit den geeigneten Einzugsgebiets- und Gerinneparametern ein künstliches neuronales Netz (KNN) trainiert werden kann, welches das Feststoffvolumen eines Wildbachereignisses (vgl. Definition Kapitel 1.1) mit einer grösseren Güte schätzt als herkömmliche Methoden. Im Folgenden wird der Ablauf erläutert, welcher verwendet wird um die Modelle zu erstellen. Dabei stehen die Forschungsfragen A2 und B (vgl. Kapitel 2) im Fokus. Für die Erstellung des Modells werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt, welche im folgenden mit Modell „Volumen“ und Modell „Klassen“ bezeichnet werden. Während das Modell „Volumen“ direkt auf das Feststoffvolumina der Grossereignisse trainiert wird, befasst sich das Modell „Klassen“ mit der Klassifizierung der Wildbäche in vier Klassen. Die beiden Ansätze verwenden unterschiedliche Vorgehensweisen für die Beantwortung der Forschungsfragen A2 (betreffend der Einzugsgebiets- und Gerinneparameter) und B (betreffend der Konfigurierungsmöglichkeiten des KNN).

Bevor auf die Modellansätze eingegangen wird, werden die allgemeinen Konfigurierungsmöglichkeiten eines KNN diskutiert. Die Suche nach dem geeignetsten KNN für die Schätzung von Feststoffvolumina, ist ein Optimierungsproblem der Konfigurierungsmöglichkeiten. Diese Konfigurationsmöglichkeiten können aus den Grundlagen zu KNN (vgl. Kapitel 3.5.1) abgeleitet werden. In Tabelle 3-4 werden die Konfigurierungsmöglichkeiten im Zusammenhang zur Problemstellung (Erstellung eines Modells für die Schätzung der Feststoffvolumina) erläutert und definiert (vgl. Spalte 2). Weiter wird erklärt, wie die einzelnen Konfigurierungsmöglichkeiten für die beiden KNN-Ansätze optimiert werden (Spalte 3).

Tabelle 3-4: Übersicht über unterschiedlichen Konfigurierungsmöglichkeiten der KNN.

Konfigurierungsmöglichkeit	Definition	Grundsätze der Variation und Optimierung
Anzahl Input-Neuronen	Die Input-Neuronen entsprechen den einzelnen EZG und Gerinneparametern. Wird die Anzahl an Input-Neuronen erhöht, werden mehr Parameter berücksichtigt.	Je grösser die Anzahl an berücksichtigter Parameter, desto grösser die Wahrscheinlichkeit die Komplexität des Wildbaches abzubilden. Mit steigender Anzahl Input-Neuronen steigt jedoch auch die Anzahl an Gewichte des KNN. Die Optimierung erfolgt aufgrund der sogenannten Reduktionsmethoden der Parameter
Anzahl Hidden-Neuronen	Die Hidden-Neuronen stellen die Elemente des KNN zwischen den Input- und Output-Neuronen dar. Je grösser die Anzahl Hidden-Neuronen desto komplexere Zusammenhänge können abgebildet werden.	Es existieren viele unterschiedliche Regeln für die Bestimmung der Anzahl an Hidden-Neuronen. Als Faustregel kann allerdings festgehalten werden, dass die Anzahl zwischen der Anzahl der Input- und Output-Neuronen befinden muss. (Blum 1992:60). Die Anzahl an Gewichten des KNN muss zudem kleiner sein als die Anzahl Trainingszeilen so darf die Gesamtanzahl an Gewichten für beide Modelle nicht >90 sein.
Anzahl Output-Neuronen	In der Output-Neurone wird das Feststoffvolumen oder die entsprechende Klasse ausgegeben.	Wird auf das Feststoffvolumina trainiert so wird ein KNN mit einer Output-Neurone gebildet. Wird nach den Gruppen trainiert, entspricht die Anzahl Gruppen der Anzahl Output-Neuronen.
Lernrate	Die Lernrate entspricht der Änderungsrate der Gewichte pro Trainingsdurchgang.	Als Lernrate werden Defaultwerte der KNN-Software verwendet. Modell „Volumen“ = default R-Package neural Modell „Klassen“ = default R-Package nnet
Aktivitätsfunktion	Die Aktivitätsfunktion entspricht der Funktion innerhalb der Hidden-Neuronen.	Als Aktivitätsfunktion werden für die beide Modelle, Sigmoide Aktivitätsfunktionen verwendet.
Anzahl Iterationen	Während des Trainingsvorgangs werden die Trainingsdaten mehrmals dem KNN „gezeigt“ die Anzahl der Durchläufe entspricht den Anzahl Iterationen.	Beim Modell „Volumen“, wird die optimale Anzahl an Iterationen anhand der Güte des Validierungsdatensatzes bestimmt. Dabei wird die Güte nach jeder Iteration bestimmt. Durch die minimale Güte (vgl. Abbildung 3-7) wird die optimale Anzahl Iterationen bestimmt. Die Anzahl Iterationen beim Modell „Klassen“ wird mithilfe von Abbruchkriterien berechnet (vgl. R-Package nnet).
Lernregeln	Der Lernalgorithmus legt die Art der Anpassung der Gewicht fest.	Für beide Modelle werden die Gewichte mithilfe von Backpropagation angepasst.

Bei der Konstruktion der KNN können somit eine grosse Anzahl an Konfigurierungsmöglichkeiten variiert werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit wird auf die Bestimmung einer geeigneten Anzahl an Input- und Hidden-Neuronen gelegt. Weiter wird auf die Wahl der Inputparameter fokussiert (Forschungsfrage A2). In der Literatur wird für die Bestimmung der geeigneten Topologie keine allgemein gültige Methode angegeben. Die Auswahl erfolgt in der Regel durch „Try and Error“ (vgl. z.B. Svozil et al. (1997); Tu (1996)). Es werden somit eine grosse Anzahl an Kombinationen getestet und das best-fit-Modell ausgesucht. Für die Auswahl geeigneter Inputparameter kann zwischen dem „Filter-“ und dem „Wrapper-Ansatz“ unterschieden werden. Bei diesen Ansätzen steht der Ausschluss sogenannter „redundanter Variablen“ im Vordergrund. Eine redundante Variable enthält dabei denselben Informationsgehalt wie eine bereits berücksichtigte

Variable. Beim Filteransatz werden die Parameter aufgrund von Kriterien wie zum Beispiel der Korrelation mit der Zielgrösse ausgewählt respektive, gefiltert. Der Wrapper-Ansatz wählt die zentralen Input-Variablen aus, indem mehrere KNN mit unterschiedlichen Variablenkonstellationen gebildet werden und deren Güte anschliessend berechnet wird. Die Parameter des KNN mit der grössten Güte werden dann ausgewählt (Heiser 2015b).

Modell „Volumen“

Um das Modell „Volumen“ zu definieren werden in einem ersten Schritt die zentralen Parameter bestimmt (A2). Dabei wird ein Filteransatz verwendet, der von einem einfachen Wrapper-Ansatz ergänzt wird. Um die redundanten Variablen zu filtern, werden Korrelationsmatrizen erstellt. Der Vorgang erfolgt gemäss Abbildung 3-8. Dabei werden von sämtlichen Parametergruppen Korrelationsmatrizen erstellt. Aus der Korrelationsmatrix werden die zwei Parameter mit dem betragsmässig grössten Korrelationskoeffizienten (nach pearson Abkürzung: r) ausgewählt. Um redundante Parameter ausschliessen zu können, darf die Hälfte der Varianz des einen Parameters nicht mit dem anderen Parameter erklärt werden können. Um dieses Kriterium zu erfüllen, muss der Betrag des Korrelationskoeffizienten zwischen den beiden Parametern <0.7 sein (Bestimmtheitsmass: 0.5) (vgl. Ernste 2009:73ff). Ist der Korrelationskoeffizient zwischen diesen beiden Parametern jedoch >0.7 , wird der Parameter mit dem drittgrössten Koeffizienten gewählt und der zweitgrösste wird nicht weiter berücksichtigt. Der Grenzwert von $|r|>0.7$ für den Ausschluss redundanter Parameter wird in Dormann et al. (2013) hergeleitet. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist, dass Variablen nur als redundant identifiziert werden, wenn der Zusammenhang zwischen den Variablen linearer Natur ist. Durch diesen Vorgang wird von 34 auf 16 Parameter reduziert (zwei Parameter mal acht Gruppen). Mit den übrigen 16 Parametern wird erneut eine Korrelationsmatrix erstellt, mit welcher eine Rangliste der verbleibenden Parameter erstellt wird. Die Rangierung erfolgt nach dem Betrag des Korrelationskoeffizienten. Korreliert jedoch ein Parameter mit einem Parameter, welcher sich bereits in der Rangliste befindet (Koeffizient grösser ± 0.7 vgl. Dormann et al. (2013)), wird der Parameter gefiltert. Die Rangliste umfasst schlussendlich die zehn „besten“ Parameter. Die Grenze wird bei zehn Parametern gesetzt, da eine höhere Anzahl an Inputparametern eine höhere Anzahl an Gewichten mit sich bringt. Eine grössere Anzahl an Gewichten erhöht die Gefahr eines Overfittings. In der vorliegenden Arbeit wird die maximale Anzahl Gewicht auf 90 festgelegt (vgl. Tabelle 3-4)

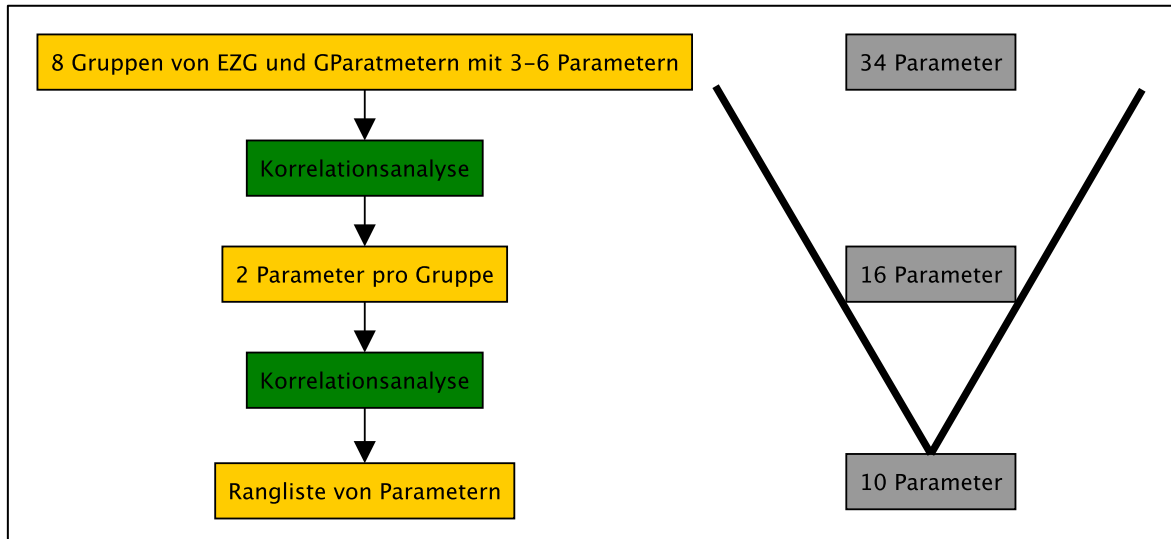


Abbildung 3-8: Ablauf Filteransatz. Die redundanten Variablen der 34 Parametern werden mithilfe einer Korrelationsanalyse gefiltert.

Um die Anzahl weiter zu reduzieren, wird ein einfacher Wrapper-Ansatz verwendet. Dabei werden KNN mit sämtlichen zehn Parametern der Rangliste erstellt und die Netzgüte (der Validierungsdaten) notiert. Anschliessend wird ein KNN mit neun Parametern trainiert (entlang der Rangliste) und der Fehler wird jeweils notiert. Dieser Vorgang wird fortgeführt bis das KNN aus den drei Parametern mit dem höchsten Rang gebildet worden ist.

Dieser Vorgang wird kombiniert mit einer Variation der Anzahl Hidden-Neuronen. Um die optimale Anzahl an Hidden-Neuronen (Forschungsfrage B) zu bestimmen werden verschiedene Netzkonstellationen getestet. Die Anzahl der Hidden-Neuronen wird dabei nach dem Kriterium nach Blum (1992:60) (vgl. Tabelle 3-4) variiert. Die Anzahl an Hidden-Neuronen muss sich somit zwischen der Anzahl an Input- und Output-Neuronen befinden. Weiter darf die Netztopologie nicht mehr Gewichte (freie Variablen) als Trainingszeilen aufweisen. Das bedeutet, dass nicht mehr als 90 Gewichte in einem Netz trainiert werden dürfen. Die Variation der Anzahl Hidden-Neuronen wird für sämtliche Parametersets des Wrapper-Ansatzes durchgeführt. Der Ablauf ist in Abbildung 3-9 dargestellt. Konkret werden in einem ersten Durchgang KNN mit zehn Inputparametern und acht Hidden-Neuronen (nicht neun weil sonst die Anzahl Gewichte >90) trainiert und die Güte anhand der Validierungsdaten berechnet. Um die Variation der Güte durch die zufällige Verteilung der Startgewichte zu berücksichtigen, wird die Berechnung der Güte für dieselbe Netzkonstellation 20 Mal wiederholt. In einem zweiten Durchgang wird die Anzahl Hidden-Neuronen um ein Neuron reduziert. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt bis das KNN mit zehn Inputparametern und zwei Hidden-Neuronen trainiert worden ist. Anschliessend wird die Anzahl Inputparameter um einen Parameter reduziert und der Vorgang wird wiederholt bis drei Inputparameter übrig sind. Die Netzkonstellation mit dem besten Güte-Median (Median der 20 Netze derselben Konstellation) entspricht dem „best-fit-KNN“.

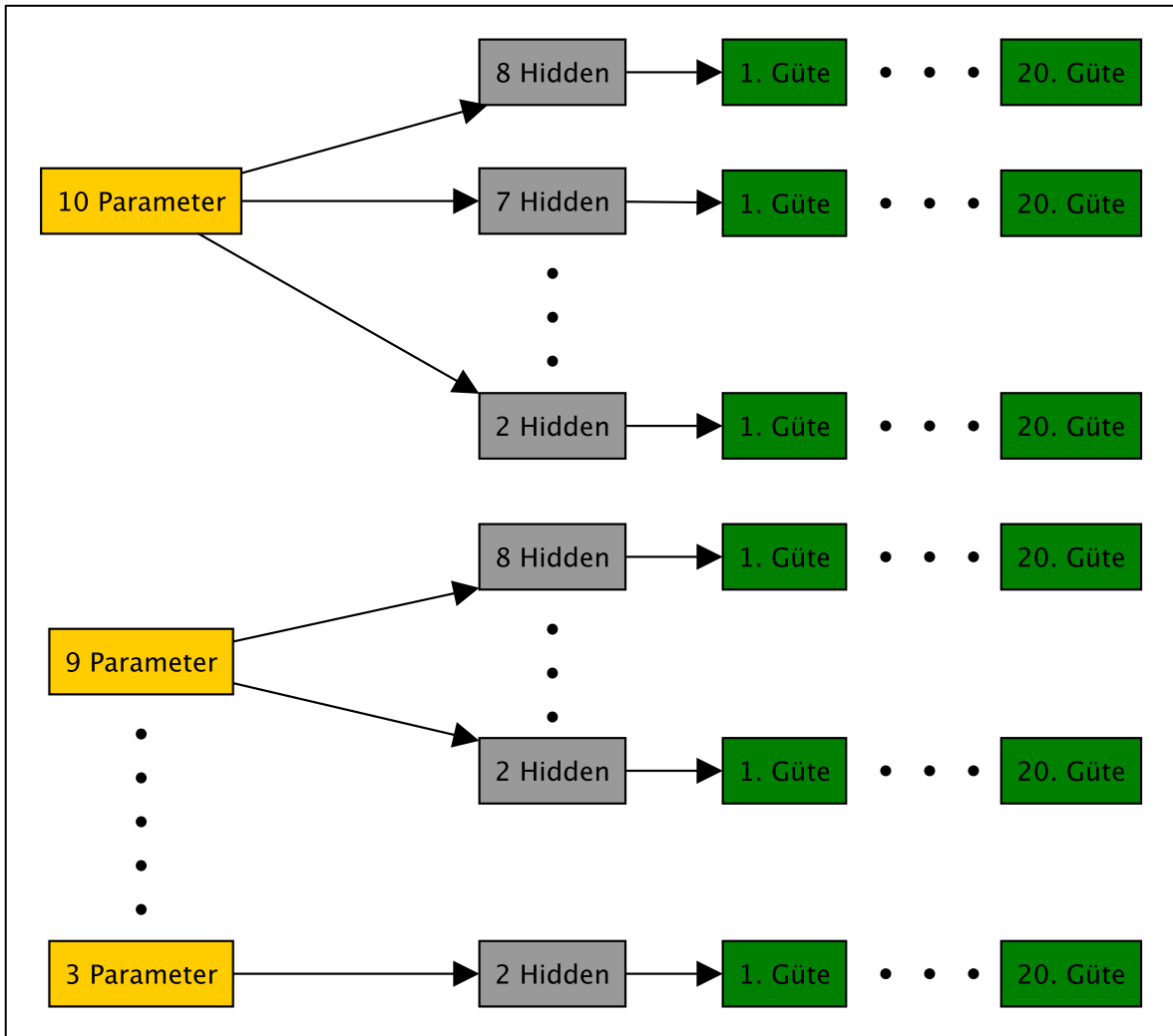


Abbildung 3-9: Ablauf Wrapper-Ansatz. Der Wrapper-Ansatz wird mit der Bestimmung der optimalen Anzahl an Hidden-Neuronen kombiniert.

Modell „Klassen“

Die Klassenbildung kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen. Im Rahmen der Arbeit werden zwei Methoden zur Klassenbildung berücksichtigt. Eine Möglichkeit der Klassenbildung ist die Zuordnung aufgrund der Quantilsgrenzen. Dabei werden in Abhängigkeit der gewünschten Anzahl Klassen die entsprechenden Quantilsgrenzen gebildet und die Zielgrösse anschliessend klassifiziert. Der Vorteil dieser Methode ist die gleiche Anzahl Wildbbäche je Klasse. Der Nachteil ist die grosse Streuung der tatsächlichen Feststoffvolumina in den einzelnen Klassen. Die Streuung in den Klassen möglichst gering zu halten, ist das Ziel des Jenks-Caspall-Algorithmus (Jenks & Caspell 1971), welcher in einem Datensatz sogenannte Unstetigkeiten („natural breaks“) berechnet. Ziel des Algorithmus, ist die Minimierung des Abstandes zwischen den Datenpunkten und der Klassenmitte. Diese Minimierung geschieht aufgrund eines zweistufigen („reiterative cycling“ und „forced cycling“), iterativen Verfahrens. Der Nachteil des Verfahrens ist die ungleiche Anzahl an Stichproben in den unterschiedlichen Klassen. Der Algorithmus wird ausführlich in Jenks & Caspell (1971) diskutiert.

Für die Bestimmung der optimalen Topologie wird in einem ersten Schritt die optimale Anzahl an Hidden-Neuronen bestimmt. Dazu werden 5'000 zufällige Inputparameter-Konstellationen mit zehn der 34 Parameter gebildet. Für jede Konstellation wird mit einer fixierten Anzahl an Hidden-Neuronen die Güte des KNN berechnet. Die Güte entspricht dabei der Anzahl korrekter Klassierungen in dem Validierungsdatensatz. Der Median der 5'000 Netzgüten gibt die mittlere Güte für eine fixierte Anzahl an Hidden-Neuronen an. Der Vorgang wird mit denselben 5'000 Inputparameterkonstellationen wiederholt, jedoch mit einer neuen Anzahl Hidden-Neuronen. Das Resultat des Vorgangs sind Mediane von Netzgüten für unterschiedliche Anzahl Hidden-Neuronen. Mithilfe dieser Mediane wird die optimale Anzahl an Hidden-Neuronen bestimmt. Die Anzahl an Hidden-Neuronen wird zwischen zwei und fünf Neuronen variiert. Dabei wird lediglich die Beschränkung der maximalen Anzahl an Gewichten berücksichtigt. Die Zahl an Gewichten darf bei einer 10-fold cross Validierung und 90 Wildbächen nicht grösser als 90 Gewichte sein. Ein KNN mit zehn Input-Neuronen, fünf Hidden Neuronen, vier Output-Neuronen und zwei sogenannten „Bias-Neuronen“ (diese werden lediglich für das Modell „Volumen“ verwendet und stellen Hilfsneuronen dar) weist 84 Gewichte auf. Bei sechs Hidden-Neuronen ist die Anzahl an Gewichten im KNN grösser als die Anzahl Trainingswildbäche. Ein Nachteil dieser Methode ist die freie Variable „Anzahl zufällige Inputparameter-Konstellationen“ (Variable = 5'000). In der vorliegenden Arbeit wird die Sensitivität des Resultates bezüglich dieser Variablen nicht getestet.

Für die Reduktion der Parameter werden zwei in Serie geschaltete Wrapper-Ansätze verwendet (Reduktionsmethode 1 und 2). Bei einem ersten Ansatz wird die Auswahl von 34 Parametern auf zehn Parameter reduziert. Dazu werden 100'000 zufällige Parameterkonstellationen mit jeweils zehn Parametern gebildet. Für jede Konstellation wird die Güte des KNN berechnet. Die Konstellationen werden entsprechend der Güte sortiert und eine Häufigkeitsanalyse wird durchgeführt. Dabei wird die Häufigkeit der Parameter der Konstellationen mit den 100 grössten Güten bestimmt. Die zehn Parameter welche am häufigsten auftreten, werden für die zweite Reduktionsmethode verwendet. In der Abbildung 3-10 ist der Ablauf der Reduktionsmethode schematisch abgebildet. Der Ablauf wird anhand eines Parametersets von fünf (anstatt 34) Parametern aufgezeigt. Der Ablauf kann in zwei Schritte unterteilt werden: In einem ersten Schritt werden die KNN mit den zufälligen Parameterkonstellationen gebildet. Der zweite Schritt umfasst die Auswahl der Parameter (vgl. Abbildung 3-10). Diese Methode erfordert erneut die Definition von freien Variablen (100'000 sowie 100). Während die Sensitivität der Resultate bezüglich der ersten Variable nicht untersucht wird, wird die Sensitivität der Resultaten bezüglich der zweiten Variable stichprobenartig getestet,

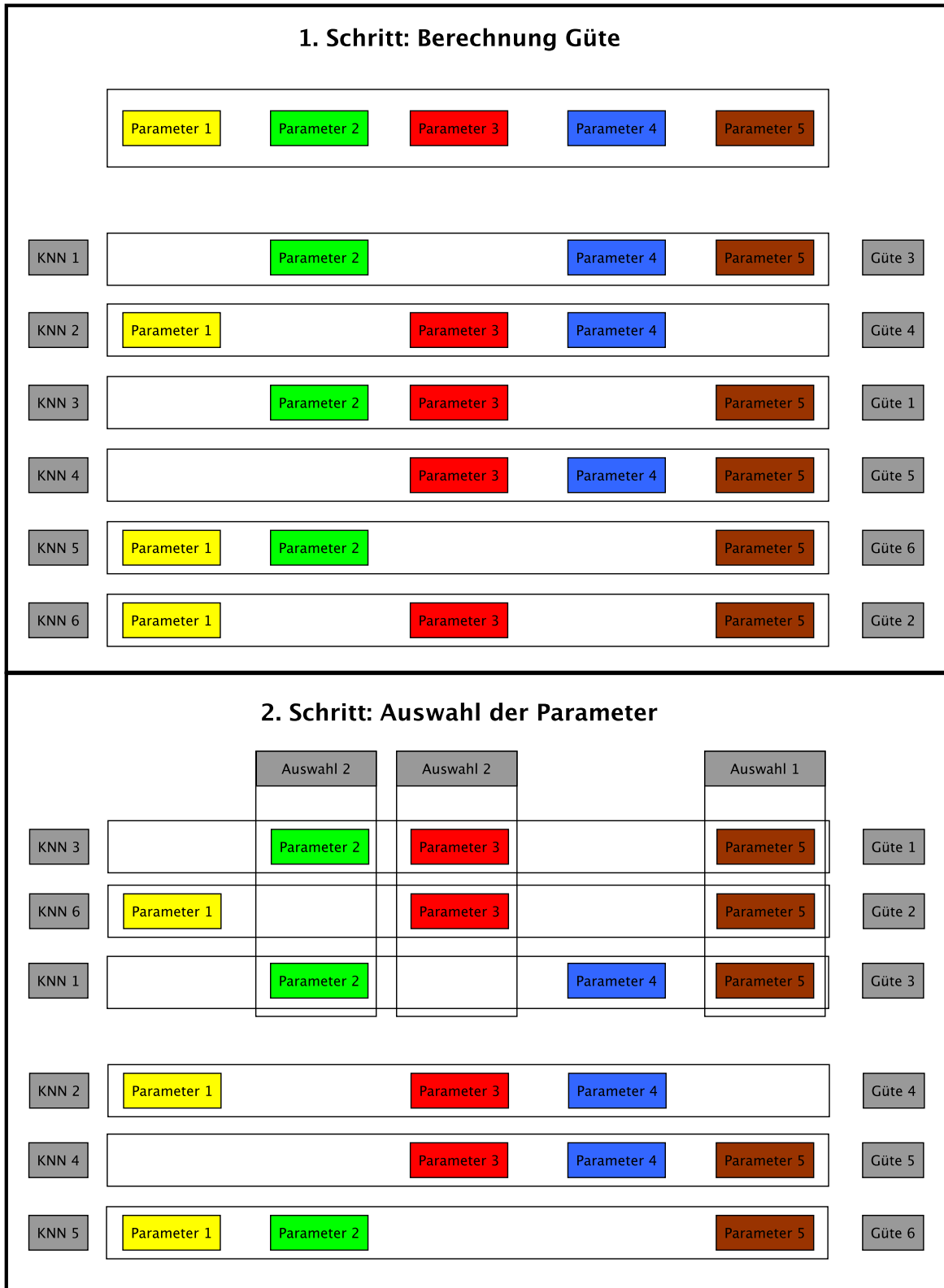


Abbildung 3-10: Schematischer Ablauf der Reduktionsmethode 1. In einem ersten Schritt wird für zufällige Parameterkonstellationen die Güten der KNN berechnet. Im abgebildeten Beispiel werden Parameterkonstellationen zufällig gebildet, indem aus einem Set von fünf Parametern drei zufällig ausgewählt werden. In einem zweiten Schritt werden die Konstellationen nach der Güte sortiert und die Häufigkeit der Parameter der Konstellationen mit den grössten Güten gebildet. Im abgebildeten Beispiel werden die KNN mit den drei grössten Güten analysiert. In diesen drei Konstellationen treten die Parameter 2,3 und 5 am häufigsten auf.

Die Reduktionsmethode 2, die anhand der Abbildung 3-11 erläutert wird, reduziert die zehn verbleibenden Parameter weiter. In der schematischen Darstellung wird ein Set von vier Parametern reduziert. In einem ersten Schritt werden aus dem Parameterset 1 (mit vier Parametern) vier KNN gebildet. Diese vier KNN enthalten jeweils drei Parameter aus dem Parameterset, wobei in jedem ein unterschiedlicher Parameter fehlt. Anschliessend wird für alle vier KNN die Güte bestimmt. Der Parameter, welcher bei dem KNN mit der grössten Güte fehlt, wird reduziert. In dem Beispiel wird somit im ersten Durchgang der Parameter 3 aus dem Parameterset entfernt, weil das KNN 3 die grösste Güte sämtlicher Modelle aufweist. Dieser Vorgang wird mit dem reduzierten Parameterset wiederholt (vgl. Abbildung 3-11). Diese Reduktionsmethode 2 wird auf das Set der zehn Parameter aus der Reduktionsmethode 1 angewendet. Nach jedem Reduktionsvorgang wird die Güte des KNN berechnet. Das Modell mit der grössten Güte entspricht dem gewählten best-fit-Modell. Um die Funktionsweise des best-fit-Modells „Klassen“ zu testen werden die Ergebnisse in einer Konfusionsmatrix dargestellt.

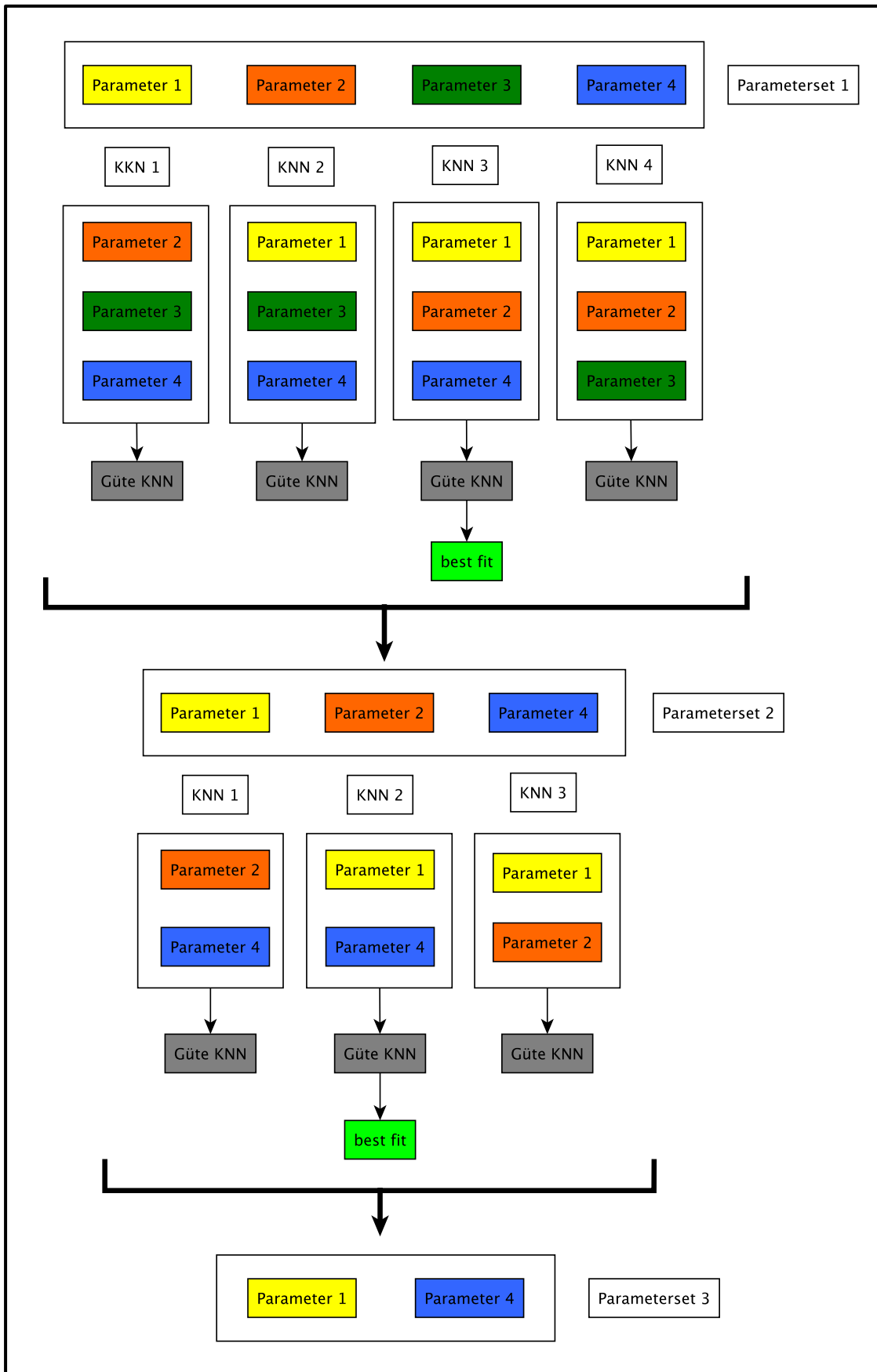


Abbildung 3-11: Schematischer Ablauf der Reduktionsmethode 2. Das Beispiel zeigt die Vorgehensweise für die Reduktion eines Parametersets mit vier Parametern.

3.5.3 Technische Umsetzung der künstlichen neuronalen Netze

Es existiert eine grosse Anzahl an unterschiedlichen Computerprogrammen für statistische Analysen mit KNN. Im Rahmen dieser Arbeit werden unterschiedliche Programme, respektive Anwendungen getestet. Die Analysen werden mithilfe von „R-Packages“ durchgeführt. Der Vorteil der „R“ Umgebung gegenüber anderen Programmen ist die Möglichkeit, die KNN in einen Workflow einzubinden. Die Auswertungen zu dem Modell „Volumen“ werden mithilfe des R-Packages „neural“ durchgeführt. Die Berechnungen des Modell „Klassen“ greifen auf das Package „nnet“ zurück. Um die zentralen Berechnungen, welche im Kapitel 3.5.2 konzeptuell vorgestellt werden, technisch nachzuvollziehen, werden im Anhang B R-Skripts zur Verfügung gestellt. Die Skripts umfassen Funktionen für die Normalisierung der Daten, die Berechnung der Güte, die k-fold cross Validierung sowie der Erstellung der KNN.

4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Resultate der Arbeit dargestellt. In dem Kapitel „Datenerhebung“ wird auf die Erhebung der Feststoffvolumina und auf die Forschungsfrage A1) fokussiert. Die Visualisierung der erhobenen Daten folgt im Kapitel „deskriptive Statistik“. Im Kapitel „künstliche neuronale Netze (KNN)“ werden die Resultate zu den Datenanalysen mithilfe von KNN anhand dem Modell „Volumen“ und dem Modell „Klassen“ aufgezeigt, wobei die Forschungsfragen A2) und B) im Vordergrund stehen.

4.1 Datenerhebung

Das Kapitel „Datenerhebung“ thematisiert in einem ersten Abschnitt die für diese Arbeit verwendeten Wildbäche und die Feststoffvolumina der stattgefundenen Grossereignisse. In einem zweiten Abschnitt wird das EZG/GP-Tool vorgestellt welches die Forschungsfrage A1) beantwortet.

4.1.1 Datengrundlage Wildbäche

Die Tabelle 4-1 enthält sämtliche Wildbäche welche nach den Kriterien (vgl. Kapitel 3.1) aus den Quellen ausgewählt werden. Für 57 von 100 Wildbächen werden die Daten zu den dokumentierten Ereignisvolumen von Gertsch (2009) verwendet. Aus den über 100 Wildbächen der Datenbank Solid werden für die vorliegende Arbeit 29 Wildbäche ausgewählt. Dabei handelt es sich ausschliesslich um Wildbäche mit dokumentierten Ereignisvolumina. Die Ereignisvolumina der restlichen 14 Wildbäche sind in Rickenmann & Koschni (2010) beschrieben. Dabei handelt es sich um Ereignisse, welche ausschliesslich im August 2005 stattgefunden haben.

Bei 41 der 100 Wildbäche wird das Ereignisvolumen vom August 2005 zur Analyse herbeigezogen. Das Grossereignis von 16 weiteren verwendeten Wildbächen hat im August 1987, die restlichen Ereignisse haben im Zeitraum vom Juli 1977 bis zum Juli 2010 stattgefunden. Rund ein drittel (29) der Wildbäche befinden sich im Kanton Bern und weitere 19 Wildbäche im Kanton Graubünden. Die restlichen 52 Wildbäche verteilen sich über die Kantone Obwalden (12), Uri (11) Tessin (8), Wallis (7), Nidwalden (6), Waadt (3), Sankt Gallen (2), Fribourg (1), Glarus (1) und Schwyz (1). Die Ereignisvolumina bewegen sich zwischen 275'000 m³ (Rotlaubach) und 51 m³ (Gasenzenbach). Die Verteilung der Feststoffvolumina wird im Rahmen der deskriptiven Statistik (vgl. Kapitel 3.4) ausführlich dargestellt.

Tabelle 4-1: Zusammenstellung der untersuchten Wildbäche. Die Spalte „G“ zeigt das Feststoffvolumen des entsprechenden Grossereignis. Die Koordinaten geben den Standort des Kegelhalses an. „Ri_Ko_05“ entspricht Rickenmann & Koschni (2010).

Name	Kanton	Quelle	x-Koord.	y-Koord.	Ereignisdatum	G [m3]
Glyssibach	BE	Gertsch	646'650	179'128	2005-08-23	55'000
Sandbach	BE	Gertsch	645'069	163'135	1989-08-17	5'500
Schwendibach	BE	Gertsch	643'114	164'855	2005-08-23	15'000
Rotlauibach	BE	Gertsch	666'387	167'111	2005-08-23	275'000
Schwarzbaechli	BE	Gertsch	591'586	140'834	1999-05-15	5'000
Rote Bach	BE	Gertsch	628'951	115'544	2004-08-04	32'500
Tanzhubelbaechli	BE	Gertsch	635'434	151'779	2006-09-08	11'500
Fallbach	BE	Gertsch	638'225	165'518	2005-08-23	4'500
Louwibach	BE	Gertsch	638'439	165'362	2005-08-23	6'000
Wartenberggraben	BE	Gertsch	640'718	165'142	2005-08-22	7'500
Milibach	BE	Gertsch	657'854	175'483	2005-08-23	25'000
Betelriedgraben	BE	Gertsch	596'698	154'603	1999-05-13	17'500
Riggisalpbach	FR	Gertsch	589'050	168'494	1997-08-11	10'000
Chummerbach	GR	Gertsch	778'688	180'804	1998-08-15	40'000
Alpenbach	GR	Gertsch	784'189	176'201	2006-07-28	14'000
Schwenditobel	GR	Gertsch	766'021	204'009	1999-05-22	2'850
Val da Dusch	GR	Gertsch	753'895	180'221	2002-11-16	11'000
Vadret da l'Alp Ota	GR	Gertsch	785'649	143'618	2006-07-11	17'500
Val Varuna	GR	Gertsch	800'720	135'340	1987-07-19	200'000
Val Valdun	GR	Gertsch	730'550	182'294	2002-11-16	63'500
Plaunca	GR	Gertsch	721'541	178'888	1987-07-19	250'000
Val Farbertg	GR	Gertsch	719'586	178'553	2002-11-16	28'750
Lauigraben	NW	Gertsch	669'805	200'150	2005-08-22	2'000
Haldibach	NW	Gertsch	674'812	193'429	2005-08-22	250'000
Meisibach	OW	Gertsch	662'518	199'430	2005-08-22	11'000
Mehlbach	OW	Gertsch	674'411	186'379	2005-08-22	3'000
Fangtobel	OW	Gertsch	671'390	189'000	2005-08-22	32'500
Melbach	OW	Gertsch	666'902	196'729	2005-08-22	7'000
Acherlibach	OW	Gertsch	665'551	188'596	2005-08-22	130'000
Foribach	OW	Gertsch	664'209	194'377	2005-08-22	20'000
Dorfbach Sachseln	OW	Gertsch	661'307	190'553	1997-08-15	22'500
Flibach	SG	Gertsch	726'500	222'510	1999-05-23	25'000
Usser Dorfbach	SZ	Gertsch	682'617	206'060	2005-08-23	10'000
Ri di Bedretto	TI	Gertsch	682'544	151'276	1987-08-25	1'750
Dongia	TI	Gertsch	718'014	143'221	1987-07-19	1'750
Ri di Ronco	TI	Gertsch	681'228	150'315	1987-08-25	17'000
Naesitalbach	UR	Gertsch	693'983	192'773	2005-08-22	9'000
Rio de Tennasses	VD	Gertsch	576'411	147'513	1995-02-13	11'000
Nant du Pissot	VD	Gertsch	561'812	138'177	1995-08-14	35'000
Reuses du Dolent	VS	Gertsch	573'004	86'200	1990-07-10	17'500
Minstigerbach	VS	Gertsch	663'270	149'000	1987-08-25	54'000
Milibach	VS	Gertsch	667'887	152'698	1987-08-25	1'550
Ritigraben	VS	Gertsch	628'943	115'562	1993-09-24	75'000
Horbach	BE	Gertsch	647'883	165'215	2005-08-23	2'500
Stegenbach	BE	Gertsch	618'558	152'545	1987-07-15	18'000
Seebach	GR	Gertsch	796'045	193'435	2005-08-23	20'000
Riale Lant	GR	Gertsch	736'905	144'025	2008-06-29	45'000
Rabiusa	GR	Gertsch	716'295	177'686	1987-07-18	4'300
Ferrera	GR	Gertsch	718'035	178'714	1987-07-19	7'000

Ergebnisse

Fortsetzung zu Tabelle 4-1

Name	Kanton	Quelle	x-Koord.	y-Koord.	Ereignisdatum	G [m3]
Sinzera	GR	Gertsch	718'915	178'595	18.07.87	27'000
Buholzbach	NW	Gertsch	673'382	198'155	22.08.05	70'000
Duerrbach	OW	Gertsch	675'184	186'444	22.08.05	20'000
Ri Bassengo	TI	Gertsch	705'655	148'345	18.07.87	8'500
Eau Froide	VD	Gertsch	561'205	134'626	08.08.07	15'000
Le Durnand	VS	Gertsch	571'894	100'915	25.07.06	27'500
Minstigerbach	VS	Gertsch	663'270	149'000	21.08.08	35'000
Spisszug	VS	Gertsch	627'330	113'055	07.09.06	8'000
Trachtbach	BE	Ri_Ko_05	645'537	178'627	22.08.05	10'000
Milchbach	GL	Ri_Ko_05	725'539	208'775	22.08.05	25'000
Schisstalbach	UR	Ri_Ko_05	701'004	181'642	22.08.05	20'000
Pletschenbachli	BE	Ri_Ko_05	610'109	161'862	22.08.05	14'000
Chratzmattigraben	BE	Ri_Ko_05	609'958	163'990	22.08.05	30'000
Goldbach	BE	Ri_Ko_05	595'658	162'429	22.08.05	13'000
Ruebibach	NW	Ri_Ko_05	666'039	198'294	22.08.05	5'000
Barenbach	OW	Ri_Ko_05	675'173	186'315	22.08.05	15'000
Gruonbach	UR	Ri_Ko_05	690'548	196'469	22.08.05	40'000
Mattenbach	BE	Ri_Ko_05	635'800	155'220	22.08.05	30'000
Louwibach (Glattbach)	BE	Ri_Ko_05	618'464	163'755	22.08.05	4'000
Tannersgraben	BE	Ri_Ko_05	624'065	155'740	22.08.05	12'500
Sagliains	GR	Ri_Ko_05	802'528	182'619	22.08.05	21'000
Selderbach	UR	Ri_Ko_05	694'406	183'357	22.08.05	27'000
In. Blindlauigraben	BE	DB_Solid	638'782	164'907	15.09.04	1'750
Fritzenbach	BE	DB_Solid	624'083	166'747	01.07.10	1'668
Spissibach	BE	DB_Solid	626'099	166'811	06.07.87	5'500
Steinenbach	BE	DB_Solid	621'850	194'533	30.06.94	888
La. bachmuehle	BE	DB_Solid	622'681	199'463	14.06.88	1'004
Grosse Bachtale	BE	DB_Solid	643'169	179'170	22.07.94	7'104
Schwarzbach	BE	DB_Solid	591'704	141'123	22.08.05	1'150
Eistlenbach	BE	DB_Solid	649'343	179'407	22.08.05	10'000
Dorfruefe	GR	DB_Solid	762'297	196'290	29.07.80	20'000
Valparghera	GR	DB_Solid	756'537	189'094	24.11.02	11'800
Val Punteglias	GR	DB_Solid	717'973	178'723	19.07.87	12'000
Val Gronda	GR	DB_Solid	829'575	196'716	10.08.01	10'670
Steinibach	NW	DB_Solid	672'049	197'505	22.08.05	36'000
Humligenbach	NW	DB_Solid	673'583	196'370	22.08.05	12'000
Bitzighoferbach	OW	DB_Solid	661'310	194'996	15.04.00	1'500
Duerrbach	OW	DB_Solid	675'319	186'547	23.08.05	20'000
Edisriedbach	OW	DB_Solid	660'399	189'768	15.08.97	40'000
Gasenzenbach	SG	DB_Solid	751'386	231'077	17.09.06	51
Riale Tiglia	TI	DB_Solid	714'820	146'120	29.08.03	3'000
Brima	TI	DB_Solid	701'798	113'279	30.04.94	1'000
Riale di Sementina	TI	DB_Solid	719'599	116'545	15.10.04	2'050
Leggiuna	TI	DB_Solid	719'097	138'566	19.07.87	8'500
Gangbach	UR	DB_Solid	693'080	190'714	22.08.05	250'000
Kummetbach	UR	DB_Solid	690'168	190'024	01.08.77	25'000
Poeschrueti	UR	DB_Solid	688'076	193'986	22.12.91	127
Fischlauwi	UR	DB_Solid	688'213	193'731	07.08.95	1'380
Opplibach	UR	DB_Solid	693'035	183'093	03.05.02	19'000
Schipfenbach	UR	DB_Solid	694'688	182'406	03.07.87	50'000
Kirchbach	UR	DB_Solid	694'405	183'083	31.07.77	8'500

4.1.2 Erhebung Einzugsgebiets-und Gerinneparameter

Für die systematische, effiziente sowie flächendeckende Erhebung der zentralen Einzugsgebiets- und Gerinneparameter, welche für die Schätzung von Feststoffvolumina von zentraler Bedeutung sind, wird im Rahmen dieser Arbeit ein GIS-Workflow (vgl. Kapitel 3.3) entwickelt (Forschungsfrage A1). Die anwenderfreundliche Benutzung dieses Workflows erfolgt über das GIS-Tool „EZG-/GP-Tool“. In Abbildung 4-1 wird die Funktionsweise des EZG-/GP Tools in groben Zügen zusammengefasst.

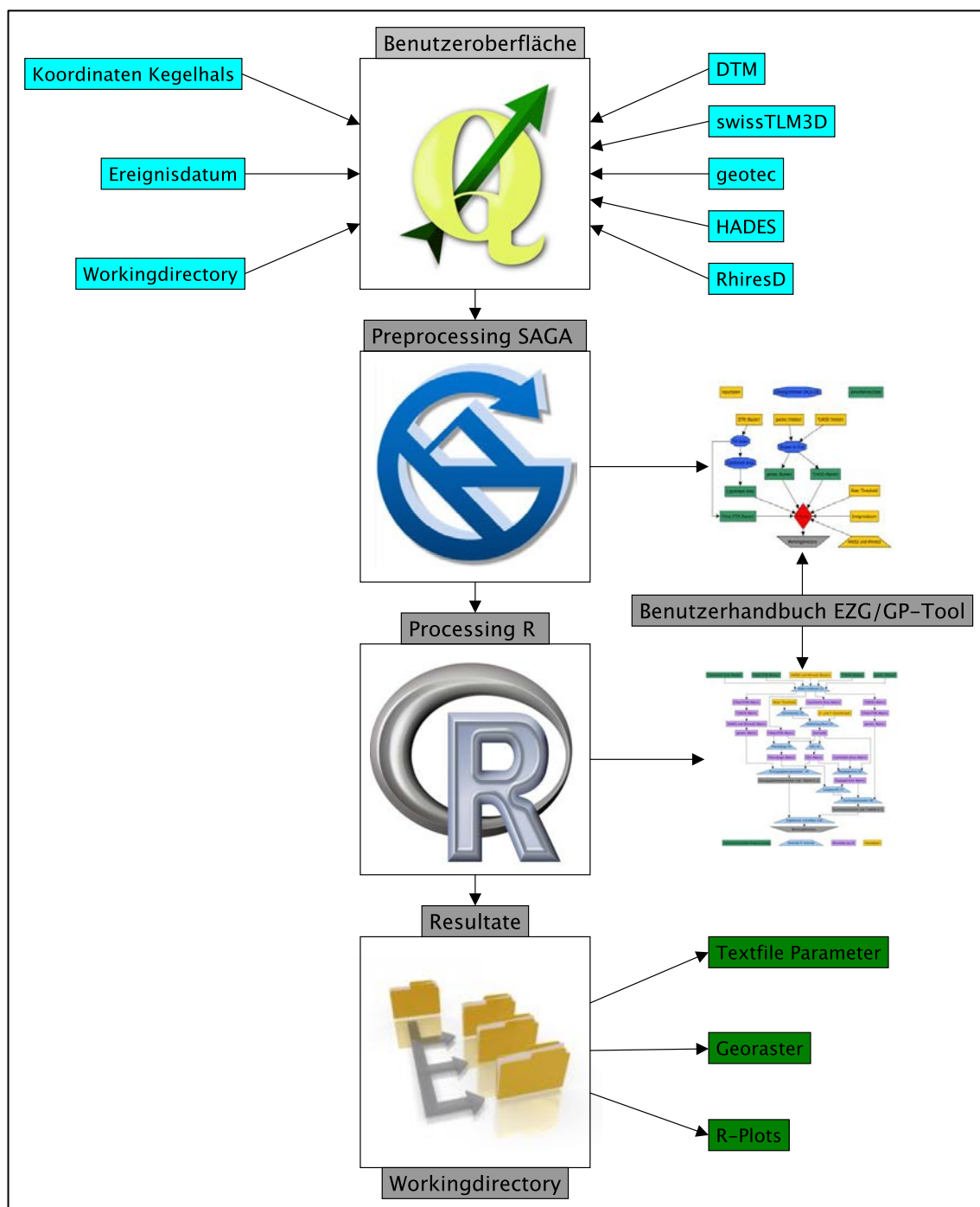


Abbildung 4-1: Funktionsweise des EZG/GP-Tools. Die Abbildung zeigt die wichtigsten Komponenten des EZG/GP-Tools. Eine ausführliche Erläuterung der Funktionsweise ist im Benutzerhandbuch (vgl. Anhang C) beschrieben.

Während für das Preprocessing auf bestehende Geoalgorithmen zurückgegriffen werden kann, müssen für das Processing einige Geoalgorithmen neu entwickelt werden. Das EZG/GP-Tool kann nach der Installation (vgl. Anhang C) mithilfe einer Benutzeroberfläche, die über QGIS gesteuert wird und anhand welcher die Geodaten (vgl. Kapitel 3.2) per Dropdown-Menü angewählt werden, bedient werden. So müssen lediglich die Koordinaten des Kegelhalses, das Ereignisdatum und ein Workingdirectory (Ordner) angegeben werden. Dieser Ordner wird nach dem Wildbach benannt. Die eingegebenen Geodaten werden mithilfe von SAGA-Algorithmen in einem Preprocessing verarbeitet. Anschliessend werden die Resultate dieses Preprocessings in einem R-Skript weiterverarbeitet, das sämtliche Einzugsgebiets- und Gerinneparameter berechnet. Im nach dem jeweiligen Wildbach benannten Workingdirectory werden sämtliche generierten Resultate abgespeichert. Die Resultate können in drei Gruppen unterschieden werden:

- 1) **Textfiles** (Format .txt): Ergebnissen des EZG/GP-Tool in Textform.
 - **Name_Bach.txt**: Im Textfile sind sämtliche generierten Parameter in Textform enthalten
 - **river_point**: Textfile mit den x- und y-Koordinaten jeder Rasterzelle des Hauptgerinnes (maximale Auflösung für ein Längsprofil).
 - **macro_profil**: Textfile mit den z-Koordinaten für ein Längsprofil mit konstantem Abstand von 2.83 m (1.41 multipliziert mit Zellenlänge).

- 2) **Georaster** (Format .tiff) generierte Raster mit entsprechenden Informationen zum Einzugsgebiet. Folgenden Georaster werden erstellt:
 - **catch_height.tif**: Raster mit Höhenwerten für sämtliche Zellen innerhalb des EZG.
 - **TLM_sub.tif**: Raster mit GDB-Code des swissTLM^{3D} Datensatzes (vgl. Tabelle 3-1)
 - **geotec_sub.tif**: Raster mit Code der geotec_Karte (vgl. Tabelle 3-2).
 - **main_river.tif**: Raster mit dem Hauptgerinne. Der Rasterwert entspricht dem Gerinne.

- 3) **R-Plots** (Format .pdf) mit einer möglichen Visualisierung der Resultate.
 - **Plot_Catchment_Height_EZG.pdf**: Darstellung der Höhenwerte im EZG
 - **Plot_Geotec.pdf**: Visualisierung der geotec-Karte im EZG
 - **Plot_Longitudinal_Profil.pdf**: Längsprofil im Hauptgerinne
 - **Plot_Precipitation.pdf**: Histogramm mit den mittleren Niederschlägen des Ereignistages und der Tage vor dem Ereignis.
 - **Plot_TLM3D.pdf**: Visualisierung der swissTLM3D-Karte

Beispiele der Resultate sind im Benutzerhandbuch (vgl. Anhang C) abgebildet. Die Anwendung des EZG/GP-Tools pro Wildbach dauert rund zehn Minuten (davon rund sechs Minuten Rechenzeit) – natürlich nur sofern das EZG/GP-Tool installiert und die Datengrundlage vorhanden ist. Muss das Höhenmodell zugeschnitten und die Kegelkoordinaten bestimmt werden, dauert die Anwendung rund 30 Minuten. Die Installation plus die Einarbeitung in das EZG/GP-Tool dauert rund fünf bis sechs Stunden (vgl. Anhang C). Im Rahmen der Arbeit werden die Parameter für zwei Wildbäche durch die manuelle Anwendung von GIS-Algorithmen erhoben. Die Erhebung dauert rund einen Arbeitstag pro Wildbach. Das EZG/GP-Tool wird im Rahmen der Arbeit auf sämtliche 100 Wildbäche aus Tabelle 4-1 angewendet. Die Parameter werden aus den generierten Textfiles in der Tabelle 4-2 zusammengeführt.

Tabelle 4-2: Erhobene Parameter der 100 untersuchten Wildbäche. Die Erläuterung der Parameter ist in Tabelle 3-3 wiedergegeben. Die Ereignisniederschläge werden in Anhang C dargestellt.

Name	A [km ³]	mH [m.ü.M]	maxH [m.ü.M]	minH [m.ü.M]	melton	ch_L [m]	S [%]	R [m]	mR [m]	HA1_100 [mm]	HA1_233 [mm]	HA24_100 [mm]	HA24_233 [mm]	Hamean [mm]
Glyssibach	1.5	1'347	2'039	737	1.1	1'436	23	0.27	13.5	50	22	130	65	2'039
Sandbach	2.8	2'032	3'778	961	1.7	3'393	26	0.39	45.1	50	20	119	55	2'347
Schwendibach	5.2	1'802	2'709	932	0.8	3'030	22	0.37	25.5	54	22	122	60	2'121
Rotlauibach	3.8	2'348	3'149	1'290	1.0	1'928	48	0.26	13.4	50	22	150	70	2'894
Schwarzbaechli	3.5	1'782	2'476	1'259	0.7	3'019	15	0.17	8.9	35	17	101	55	1'888
Rote Bach	2.1	2'034	3'134	1'066	1.4	3'189	33	0.38	43.3	71	24	153	56	1'093
Tanzhubelbaechli	2.9	2'542	3'889	1'458	1.4	1'695	54	0.54	28.3	44	20	103	55	2'794
Fallbach	0.3	1'408	1'852	757	2.1	725	74	0.88	17.3	55	22	130	60	1'722
Louwibach	1.6	1'669	2'420	700	1.4	2'200	53	0.47	36.2	55	22	130	60	2'059
Wartenberggraben	2.0	1'902	2'571	851	1.2	2'352	46	0.58	53.5	55	22	130	60	2'170
Milibach	3.8	1'550	2'241	638	0.8	3'212	20	0.38	31.7	41	20	120	62	2'178
Betelriedgraben	11.4	1'743	2'474	1'038	0.4	4'076	19	0.21	17.3	35	18	120	59	1'962
Riggisalpbach	3.7	1'570	2'183	1'119	0.6	2'248	16	0.2	17.2	40	20	130	65	2'154
Chummerbach	5.9	2'258	2'780	1'581	0.5	3'892	20	0.16	8.9	39	18	107	50	1'774
Alpenbach	1.4	2'535	3'005	1'984	0.9	821	52	0.43	18.0	35	18	100	50	1'851
Schwenditobel	2.5	1'334	1'776	698	0.7	3'023	23	0.36	54.0	50	24	134	67	1'653
Val da Dusch	3.5	1'619	2'494	885	0.9	3'080	25	0.26	16.8	50	26	120	60	1'549
Vadret da l'Alp Ota	0.9	3'030	3'431	2'147	1.3	1'814	46	0.42	32.5	45	20	130	60	2'341
Val Varuna	4.4	2'319	3'437	1'336	1.0	3'119	28	0.4	20.1	50	22	152	75	2'084
Val Valdun	4.7	1'553	2'292	780	0.7	3'135	27	0.29	31.9	45	22	120	61	1'713
Plauca	3.8	2'102	3'101	898	1.1	5'168	31	0.35	25.5	55	26	150	72	2'155
Val Farbertg	1.7	1'646	2'503	900	1.2	2'575	41	0.36	37.6	55	26	150	75	1'740
Lauigraben	0.8	1'289	1'832	664	1.3	1'102	34	0.38	19.2	60	26	130	65	1'878
Haldibach	2.8	1'566	2'273	902	0.8	2'199	25	0.3	20.3	60	28	140	70	2'161
Meisibach	4.3	1'474	2'102	498	0.8	5'628	23	0.35	51.0	60	24	135	65	2'214
Mehlbach	0.6	1'537	2'061	1'131	1.2	275	27	0.21	0.9	60	25	140	65	2'105
Fangtobel	3.6	1'628	2'592	736	1.0	1'812	40	0.39	15.8	60	25	130	65	2'234
Melbach	1.8	1'248	1'813	773	0.8	2'307	20	0.34	25.7	60	24	130	60	1'890
Acherlibach	1.8	1'565	2'342	837	1.1	2'109	34	0.31	16.1	52	24	120	63	2'134
Foribach	4.6	1'254	2'049	600	0.7	4'442	11	0.4	67.2	55	24	120	60	1'856
Dorfbach Sachsen	3.2	1'300	2'028	565	0.8	3'079	25	0.43	33.6	49	22	110	60	1'923
Flibach	8.3	1'337	1'949	491	0.5	4'937	19	0.29	30.8	55	24	170	75	2'478
Usser Dorfbach	0.6	997	1'450	597	1.1	427	29	0.28	0.9	60	30	160	80	1'835
Ri di Bedretto	4.3	2'333	3'115	1'401	0.8	3'461	30	0.32	52.3	55	26	199	92	2'714
Dongia	6.4	2'116	2'840	493	0.9	5'024	33	0.69	67.9	50	25	210	105	2'624
Ri di Ronco	3.1	2'382	3'190	1'494	1.0	2'049	39	0.29	22.9	55	25	197	93	2'693
Naesitalbach	0.8	1'265	1'785	593	1.3	213	37	0.24	1.4	60	25	150	70	2'007
Rio de Tennasses	1.7	1'602	2'197	1'015	0.9	1'702	29	0.45	35.0	40	18	120	60	1'932
Nant du Pissot	1.0	1'130	1'767	499	1.3	948	52	0.65	14.5	40	20	123	62	1'689
Reuses du Dolent	6.2	2'540	3'812	1'659	0.9	3'261	21	0.19	21.7	45	20	123	56	2'666
Minstigerbach	15.3	2'489	3'458	1'409	0.5	6'223	23	0.27	104.1	50	22	145	68	2'570
Milibach	3.8	2'355	2'877	1'480	0.7	2'958	33	0.28	33.4	45	21	151	70	2'609
Ritigraben	2.2	2'008	3'134	1'065	1.4	3'218	33	0.38	43.3	71	24	152	56	1'082
Horbach	1.9	2'078	2'590	1'483	0.8	2'980	29	0.34	30.1	50	22	120	60	2'319
Stegenbach	5.7	2'094	2'860	1'051	0.8	3'750	32	0.53	43.9	45	20	120	55	2'178
Seebach	9.1	2'459	3'119	1'672	0.5	4'606	18	0.3	39.7	40	19	110	55	2'397
Riale Lant	0.9	2'182	2'839	1'342	1.6	1'313	48	0.39	31.1	55	26	190	100	2'476
Rabiusa	5.3	2'115	3'072	1'041	0.9	4'149	36	0.32	46.9	60	28	160	75	2'132
Ferrera	14.0	2'352	3'421	991	0.7	6'775	24	0.34	82.5	59	28	160	75	2'447
Sinzera	3.3	2'162	3'218	935	1.3	3'645	42	0.34	32.6	55	26	150	75	2'210

Ergebnisse

Fortsetzung zu Tabelle 4-2

Name	A [km ³]	mH [m.ü.M]	maxH [m.ü.M]	minH [m.ü.M]	melton	ch_L [m]	S [%]	R [m]	mR [m]	HA1_100 [mm]	HA1_233 [mm]	HA24_100 [mm]	HA24_233 [mm]	Hamean [mm]
Buoholzbach	13.5	1'508	2'404	557	0.5	6'286	18	0.29	62.2	63	28	151	70	2'111
Duerrbach	18.1	2'101	2'881	1'044	0.4	6'756	23	0.46	129.0	58	26	140	66	2'570
Ri Bassengo	5.0	1'842	2'658	821	0.8	3'800	28	0.37	35.9	56	28	230	108	2'316
Eau Froide	14.3	1'522	2'329	418	0.5	9'170	10	0.41	104.1	40	20	125	63	2'024
Le Durnand	8.9	2'069	2'878	965	0.6	4'169	33	0.34	64.2	40	20	120	55	2'584
Minstigerbach	15.3	2'489	3'458	1'409	0.5	6'223	23	0.27	104.1	50	22	145	68	2'566
Spisszug	2.6	2'521	3'304	1'277	1.3	2'151	53	0.37	12.6	60	20	131	50	1'553
Trachtbach	1.4	1'171	1'912	615	1.1	1'130	21	0.23	6.6	50	22	130	65	1'928
Milchbach	2.7	1'702	2'310	556	1.1	2'439	47	0.49	20.7	60	26	140	70	2'456
Schisstalbach	3.2	2'340	3'186	1'193	1.1	3'784	30	0.5	109.9	65	22	160	69	2'679
Pletschenbachli	1.9	1'955	2'346	1'409	0.7	2'158	29	0.37	14.9	35	18	110	58	2'208
Chratzmattigraben	2.0	1'743	2'397	1'006	1.0	3'512	21	0.26	21.6	37	18	110	58	2'098
Goldbach	5.5	1'528	2'060	859	0.5	4'565	17	0.26	38.0	35	18	120	60	1'905
Ruebibach	1.2	1'178	1'888	550	1.2	2'261	14	0.17	11.3	60	25	130	60	1'748
Barenbach	11.8	1'843	2'639	1'041	0.5	4'689	27	0.48	121.9	59	26	140	65	2'335
Gruonbach	7.0	1'445	2'221	493	0.7	2'950	27	0.37	28.4	60	26	150	72	2'165
Mattenbach	0.9	2'008	2'664	943	1.8	346	42	0.29	1.2	50	20	120	55	2'312
Louwibach	3.6	1'557	2'360	799	0.8	1'744	31	0.55	10.4	42	20	110	58	1'991
Tannersgraben	0.6	1'663	1'955	1'186	1.0	194	68	0.76	7.5	50	20	120	55	1'785
Sagliains	14.5	2'494	3'410	1'491	0.5	6'483	16	0.19	55.0	45	21	100	50	1'836
Selderbach	1.7	1'975	2'985	606	1.9	2'186	52	0.75	27.7	65	22	150	65	2'341
In. Blindlauigraben	0.3	1'615	2'211	779	2.8	585	66	0.6	11.8	55	22	123	60	1'773
Fritzenbach	0.9	1'078	1'425	666	0.8	161	32	0.3	1.3	50	20	120	60	1'582
Spissibach	2.5	1'308	2'180	626	1.0	2'881	25	0.3	11.4	50	20	121	60	1'749
Steinenbach	7.2	930	1'132	737	0.2	3'572	5	0.14	11.1	45	22	110	58	1'455
La. bachmuehle	2.3	830	975	686	0.2	1'322	5	0.1	1.9	50	22	110	60	1'461
Grosse Bachtale	0.6	1'435	2'124	788	1.7	354	47	0.38	4.0	50	24	130	65	2'055
Schwarzbach	3.5	1'787	2'476	1'308	0.6	2'647	14	0.19	7.4	35	17	101	55	1'888
Eistlenbach	3.5	1'551	2'204	809	0.7	2'099	33	0.57	17.4	48	22	130	65	2'198
Dorfruefe	5.7	1'583	2'390	650	0.7	4'509	21	0.49	47.6	52	24	130	65	1'659
Valparghera	1.6	1'271	1'846	727	0.9	994	20	0.3	3.4	50	26	120	65	1'328
Val Punteglias	14.0	2'352	3'421	1'005	0.7	6'715	23	0.34	82.7	59	28	160	75	2'434
Val Gronda	3.4	2'162	3'036	1'191	1.0	4'020	25	0.29	43.5	40	20	90	45	1'763
Steinibach	10.9	1'287	1'992	589	0.4	5'559	15	0.26	43.4	60	25	132	63	1'895
Humligenbach	1.3	1'308	1'876	628	1.1	750	41	0.75	8.9	61	28	147	70	1'941
Bitzighoferbach	1.9	1'069	1'684	502	0.9	3'579	22	0.26	8.3	55	24	110	60	1'804
Duerrbach	18.1	2'102	2'881	1'050	0.4	6'574	23	0.46	130.0	58	26	140	66	2'572
Edisriedbach	2.6	1'368	2'074	559	0.9	3'212	30	0.37	32.5	45	22	110	60	2'011
Gasenzenbach	2.4	1'221	2'123	572	1.0	2'184	21	0.33	8.1	60	22	149	65	1'979
Riale Tiglia	2.8	1'567	2'365	598	1.1	2'970	25	0.39	30.8	49	25	217	105	2'215
Brima	2.7	581	1'290	248	0.6	1'935	9	0.18	5.0	75	37	303	151	2'126
Riale di Sementina	10.1	1'282	2'336	291	0.6	5'993	20	0.51	56.6	76	35	250	119	2'586
Leggiuna	36.3	1'792	2'949	369	0.4	10'765	13	0.47	82.0	58	29	215	107	2'651
Gangbach	10.9	1'600	2'505	560	0.6	5'216	22	0.33	59.3	62	24	150	70	2'196
Kummetbach	3.6	1'396	1'907	641	0.7	2'775	38	0.45	32.8	55	24	140	66	2'049
Poeschrueti	0.3	1'019	1'633	519	2.0	492	55	0.39	5.5	55	28	140	70	1'729
Fischlauwi	0.6	1'263	2'256	505	2.2	353	42	0.38	4.1	55	27	140	70	2'087
Opplibach	0.8	1'404	2'029	706	1.5	194	50	0.26	0.9	61	24	140	65	1'760
Schipfenbach	1.3	1'725	2'581	708	1.6	1'315	55	0.56	9.0	65	22	150	65	2'139
Kirchbach	0.7	1'335	2'482	580	2.2	656	57	0.63	11.2	65	22	150	65	1'806

Fortsetzung zu Tabelle 4-2

Name	TLM_rock [%]	TLM_brush [%]	TLM_sed [%]	TLM_glac [%]	TLM_forest [%]	TLM_oforest [%]	geo_easy [%]	geo_med [%]	geo_poor [%]	TLM_rock_ch [%]	TLM_brush_ch [%]	TLM_sed_ch [%]	TLM_glac_ch [%]	TLM_forest_ch [%]	TLM_oforest_ch [%]	geo_easy_ch [%]	geo_med_ch [%]	geo_poor_ch [%]
Glyssibach	33	5	22	0	28	1	0	0	55	13	0	80	0	5	0	0	0	63
Sandbach	35	0	10	5	22	0	14	22	48	11	0	1	0	37	0	28	10	25
Schwendibach	4	3	10	0	27	0	53	7	0	0	0	0	0	57	0	37	0	0
Rotlauibach	49	6	20	4	2	0	0	5	89	7	0	64	0	0	0	0	10	90
Schwarzbaechli	1	3	5	0	26	2	40	0	14	0	4	12	0	63	0	15	0	0
Rote Bach	12	0	29	0	38	3	0	21	3	7	0	73	0	4	0	0	18	0
Tanzhubelbaechli	47	2	7	30	1	0	0	62	4	44	0	54	0	0	0	0	100	0
Fallbach	14	0	9	0	59	3	6	0	63	12	0	44	0	21	0	0	0	0
Louwibach	13	1	11	0	28	2	0	14	61	0	2	0	0	57	0	0	33	4
Wartenberggraben	6	2	7	0	13	0	18	58	0	6	9	0	0	48	0	25	1	0
Milibach	1	2	1	0	31	1	13	85	0	2	0	0	0	65	0	0	100	0
Betelriedgraben	7	1	10	0	28	4	32	9	32	0	3	2	0	59	0	49	13	38
Riggisalpbach	5	0	4	0	11	0	25	0	18	0	0	2	0	56	0	0	0	0
Chummerbach	8	1	23	0	7	2	0	11	50	0	0	23	0	1	0	0	9	48
Alpenbach	17	0	47	0	0	0	45	0	25	32	0	0	0	0	0	76	0	24
Schwenditobel	14	0	0	0	0	0	55	31	0	16	0	0	0	0	0	55	28	0
Val da Dusch	4	10	2	0	48	0	12	82	0	4	38	3	0	42	0	20	73	0
Vadret da l'Alp Ota	27	0	38	29	0	0	0	0	59	6	0	56	0	0	10	0	0	100
Val Varuna	11	2	27	1	15	3	0	53	0	5	15	20	0	0	0	0	28	0
Val Valdun	0	2	0	0	42	1	14	0	30	0	0	6	0	14	0	0	0	20
Plaunca	14	1	26	1	14	0	22	42	14	1	5	27	0	18	0	38	44	8
Val Farbertg	1	4	8	0	35	2	7	35	10	0	22	12	0	19	0	17	43	13
Lauigraben	1	10	0	0	56	1	0	0	98	0	0	0	0	63	0	0	0	79
Haldibach	2	2	5	0	37	0	32	0	56	0	0	12	0	61	0	59	0	8
Meisibach	11	0	7	0	34	3	31	0	60	10	0	0	0	63	1	26	0	42
Mehlbach	0	6	0	0	51	0	0	0	24	0	0	0	0	90	0	0	0	37
Fangtobel	9	1	9	0	38	1	0	7	40	4	0	3	0	75	0	0	0	57
Melbach	0	1	1	0	65	0	3	0	79	0	0	0	0	68	0	0	0	40
Acherlibach	12	1	11	0	23	1	9	0	47	0	0	1	0	55	2	23	0	26
Foribach	5	3	2	0	27	0	26	0	41	2	0	0	0	46	0	0	0	48
Dorfbach Sachsen	3	7	1	0	54	0	47	0	49	1	0	0	0	80	0	39	0	47
Flibach	6	2	3	0	35	6	5	73	7	0	0	52	0	30	0	18	75	7
Usser Dorfbach	1	0	0	0	39	4	3	13	29	0	0	0	0	100	0	0	0	63
Ri di Bedretto	22	1	40	0	2	0	0	9	67	4	6	33	0	0	0	0	21	31
Dongia	22	1	25	0	21	6	0	0	100	26	0	8	0	35	6	0	0	100
Ri di Ronco	23	6	47	2	1	0	0	3	52	15	9	19	0	0	0	0	20	36
Naesitalbach	2	1	5	0	76	0	72	0	0	0	0	0	0	100	0	52	0	0
Rio de Tennasses	16	0	1	0	12	1	63	0	37	34	0	0	0	55	0	57	0	43
Nant du Pissot	8	0	0	0	81	3	34	0	64	0	0	0	0	74	0	0	0	90
Reuses du Dolent	32	1	23	21	0	0	12	38	12	0	0	46	3	0	0	71	4	0
Minstigerbach	28	2	23	18	2	1	0	31	43	14	0	63	3	0	3	0	6	0
Milibach	7	3	19	0	3	2	0	29	48	3	2	0	0	1	0	0	0	19
Ritigraben	12	0	28	0	39	3	0	20	3	7	0	72	0	4	0	0	18	0
Horbach	2	0	5	0	1	0	36	59	0	1	0	0	0	13	0	61	39	0
Stegenbach	15	2	33	0	11	1	45	0	28	8	0	29	0	25	6	46	0	2
Seebach	25	1	44	4	0	0	0	0	49	1	0	42	0	0	0	0	0	16
Riale Lant	48	4	18	0	1	2	0	95	0	36	2	59	0	0	0	0	66	0
Rabiusa	10	6	30	0	13	0	0	35	59	2	12	32	0	0	0	0	46	51
Ferrera	32	3	26	8	7	0	0	14	58	3	0	33	0	1	0	0	22	32
Sinzera	17	2	22	1	12	0	0	39	26	0	5	9	0	31	0	0	49	8

Fortsetzung zu Tabelle 4-2

Name	TLM_rock [%]	TLM_brush [%]	TLM_sed [%]	TLM_glac [%]	TLM_forest [%]	TLM_oforest [%]	geo_easy [%]	geo_med [%]	geo_poor [%]	TLM_rock_ch [%]	TLM_brush_ch [%]	TLM_sed_ch [%]	TLM_glac_ch [%]	TLM_forest_ch [%]	TLM_oforest_ch [%]	geo_easy_ch [%]	geo_med_ch [%]	geo_poor_ch [%]
Buoholzbach	4	1	8	0	35	0	28	0	41	1	0	18	0	58	0	28	0	3
Duerrbach	34	1	24	6	8	0	2	15	51	16	0	48	0	15	0	0	0	62
Ri Bassengo	6	1	5	0	29	4	0	0	51	0	14	0	0	60	0	0	0	49
Eau Froide	3	6	1	0	41	0	46	0	34	18	3	0	0	61	0	38	0	37
Le Durnand	16	7	18	0	19	0	0	30	52	10	0	9	0	23	0	0	24	35
Minstigerbach	28	2	23	18	2	1	0	31	43	14	0	63	3	0	3	0	6	0
Spisszug	54	1	18	0	3	0	0	99	0	54	13	11	0	0	0	0	86	0
Trachtbach	13	1	7	0	64	0	0	0	58	0	0	2	0	93	0	0	0	0
Milchbach	18	0	4	0	24	1	4	24	65	4	0	0	0	42	0	0	65	16
Schisstalbach	26	0	28	16	2	0	0	22	46	3	0	24	0	11	0	0	38	41
Pletschenbachli	7	0	12	0	6	0	100	0	0	7	0	0	0	37	0	100	0	0
Chrutzmattigraben	6	2	17	0	20	0	76	0	0	0	1	3	0	51	0	51	0	0
Goldbach	2	0	0	0	29	2	42	8	27	0	0	0	0	67	0	10	0	34
Ruebibach	14	0	3	0	49	0	26	0	34	0	0	0	0	89	0	0	0	0
Barenbach	22	2	23	0	15	0	3	15	47	7	0	24	0	22	0	6	0	34
Gruonbach	5	1	4	0	51	2	56	2	16	1	0	10	0	87	0	65	6	0
Mattenbach	53	9	22	0	4	0	7	19	74	12	0	18	0	39	0	99	0	1
Louwibach (Glattbach)	4	1	4	0	22	0	75	0	1	18	0	0	0	45	0	54	0	12
Tannersgraben	0	0	0	0	28	3	71	0	4	3	0	0	0	97	0	0	0	34
Sagliains	24	1	43	1	5	0	0	0	82	0	0	57	0	6	0	0	0	72
Selderbach	28	10	23	0	8	0	29	22	49	29	39	0	0	8	0	0	68	30
Inner Blindlauigraben	8	5	0	0	53	0	52	48	0	0	0	0	0	32	0	100	0	0
Fritzenbach	0	0	0	0	77	0	32	0	2	0	0	0	0	100	0	93	0	0
Spissibach	4	3	2	0	50	0	71	0	4	14	0	0	0	73	0	100	0	0
Steinenbach	0	0	0	0	39	0	0	100	0	0	0	0	0	82	0	0	100	0
Laengenbachmuehle	0	0	0	0	39	0	1	99	0	0	0	0	0	63	0	0	100	0
Grosse Bachtale	32	5	1	0	15	0	9	0	91	3	9	81	0	0	0	28	0	72
Schwarzbach	1	3	5	0	25	2	39	0	15	0	4	14	0	59	0	10	0	0
Eistlenbach	9	4	11	0	24	0	13	0	75	9	0	47	0	10	0	0	0	87
Dorfruefe	6	15	5	0	43	3	38	44	0	10	11	15	0	52	2	43	51	0
Valparghera	7	0	1	0	89	0	41	51	0	0	0	0	0	100	0	0	91	0
Val Punteglias	32	3	26	8	7	0	0	14	58	3	0	34	0	1	0	0	21	32
Val Gronda	3	1	11	0	5	0	93	0	0	30	0	9	0	10	0	79	0	0
Steinibach	0	1	0	0	31	0	17	0	27	0	0	0	0	91	0	9	0	15
Humligenbach	3	2	2	0	49	0	33	0	65	20	0	20	0	59	0	48	0	52
Bitzighoferbach	0	0	0	0	40	0	54	0	0	0	0	0	0	76	0	43	0	0
Duerrbach	34	1	24	6	8	0	2	15	51	16	0	49	0	16	0	0	0	63
Edisriedbach	2	1	7	0	41	2	50	0	50	0	4	1	0	74	0	54	0	46
Gasenzenbach	7	13	1	0	36	1	7	0	36	0	1	0	0	89	0	0	0	0
Riale Tiglia	1	27	3	0	25	0	0	0	72	9	7	5	0	67	0	0	0	62
Brima	1	0	0	0	87	0	0	20	50	0	0	0	0	89	0	0	45	0
Riale di Sementina	10	2	3	0	60	4	0	0	77	6	0	16	0	64	0	0	0	95
Leggiuna	16	7	17	0	32	3	0	2	75	24	0	34	0	22	4	0	0	71
Gangbach	13	7	12	0	23	0	21	0	34	0	1	2	0	57	0	28	0	9
Kummetbach	1	10	0	0	47	1	78	0	1	2	0	0	0	79	0	46	0	11
Poeschrueti	25	1	0	0	73	0	51	0	49	6	0	0	0	94	0	100	0	0
Fischlauwi	26	3	0	0	42	0	48	0	52	0	0	0	0	100	0	100	0	0
Opplibach	12	18	1	0	39	0	0	98	0	0	0	5	0	41	0	0	100	0
Schipfenbach	21	7	25	0	21	0	12	55	33	8	0	29	0	59	0	0	97	0
Kirchbach	10	3	8	0	45	0	0	74	23	18	0	0	0	79	0	0	64	0

4.2 Deskriptive Statistik

Die Abbildungen im Kapitel „deskriptive Statistik“ geben einen visuellen Überblick über sämtliche erhobene Parameter (vgl. Tabelle 4-2). Die Auswertungen werden dabei anhand der Parametergruppen (vgl. Tabelle 3-3) unterteilt, wobei für sämtliche Parametergruppen eine „Streudiagramm-Matrix“ erstellt wird, welche sämtliche Streudiagramme der Parameter der entsprechenden Parametergruppe sowie der Zielgrösse (Feststoffvolumina) zeigt. In einer zweiten Darstellung sind die Boxplots für die sämtlicher Parameter der Parametergruppe abgebildet.

Die Abbildung 4-2 zeigt den Boxplot für die Zielgrösse (Feststoffvolumina). Der Boxplot klassifiziert neun Wildbäche als Ausreisser, die ein Feststoffvolumina von $>55'000 \text{ m}^3$ (oberer Whisker) aufweisen. Bei den Ausreissern handelt es sich um den Rotlaubibach ($275'000 \text{ m}^3$), die Plaunca, den Haldibach, den Gangbach (je $250'000 \text{ m}^3$), das Val Varuna ($200'000 \text{ m}^3$), den Acherlibach ($130'000 \text{ m}^3$), den Ritigraben ($75'000 \text{ m}^3$), den Buholzbach ($70'000 \text{ m}^3$) und das Val Valdun ($63'500 \text{ m}^3$) (vgl. Tabelle 4-1). Der obere Whisker und der obere Quantilsabstand (Q_3) zeigen eine rechtsschiefe Verteilung an. Bei rund der Hälfte der 100 Grossereignisse wurden weniger $13'500 \text{ m}^3$ Feststoffe transportiert.

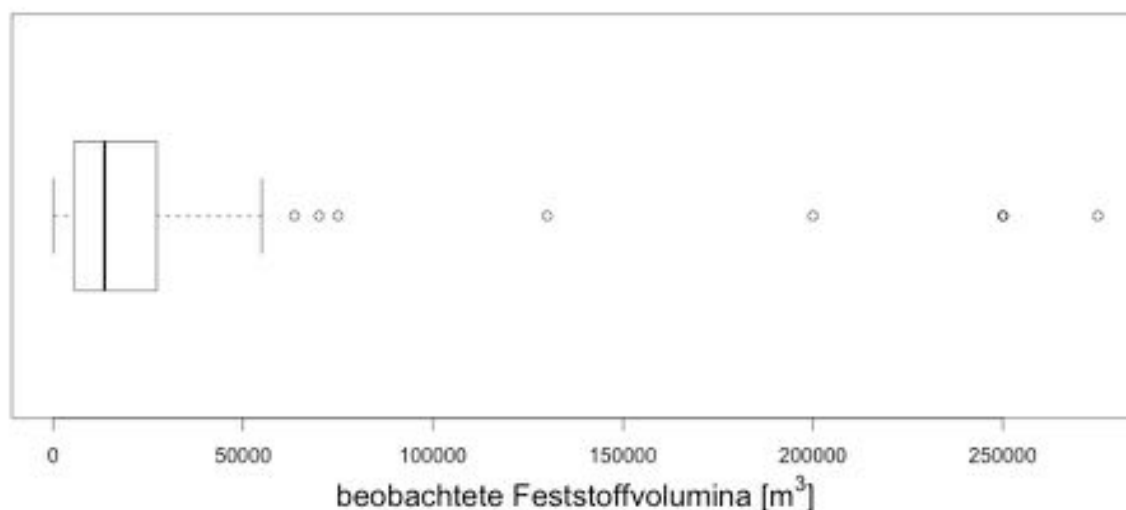


Abbildung 4-2: Boxplot der Feststoffvolumina der 100 untersuchten Wildbäche (vgl. Tabelle 4-1). (Ergänzung: Der Median der Verteilung hat den Wert $13'500 \text{ m}^2$).

Morphometrische Einzugsgebietsparameter (morphEZG)

Es werden fünf morphometrische Parameter erhoben, welche das Einzugsgebiet charakterisieren. In der Abbildung 4-3 ist die Streudiagramm-Matrix für sämtliche Parameter abgebildet. Der obersten Zeile sind die Streudiagramme der Parameter mit der Zielgrösse (Feststoffvolumina) zu entnehmen. Die Zielgrösse ist auf der y-Achse, die Parameter auf der x-Achse abgebildet. In diesen fünf Streudiagrammen sind die Ausreisser der Feststoffvolumina (vgl. Abbildung 4-2) zu erkennen. Lineare Zusammenhänge zwischen den Parameter sind bei den Parametern mH, maxH und minH zu erkennen. Weiter wird ein Zusammenhang zwischen der Einzugsgebietsfläche und der Meltonzahl zu deutlich.

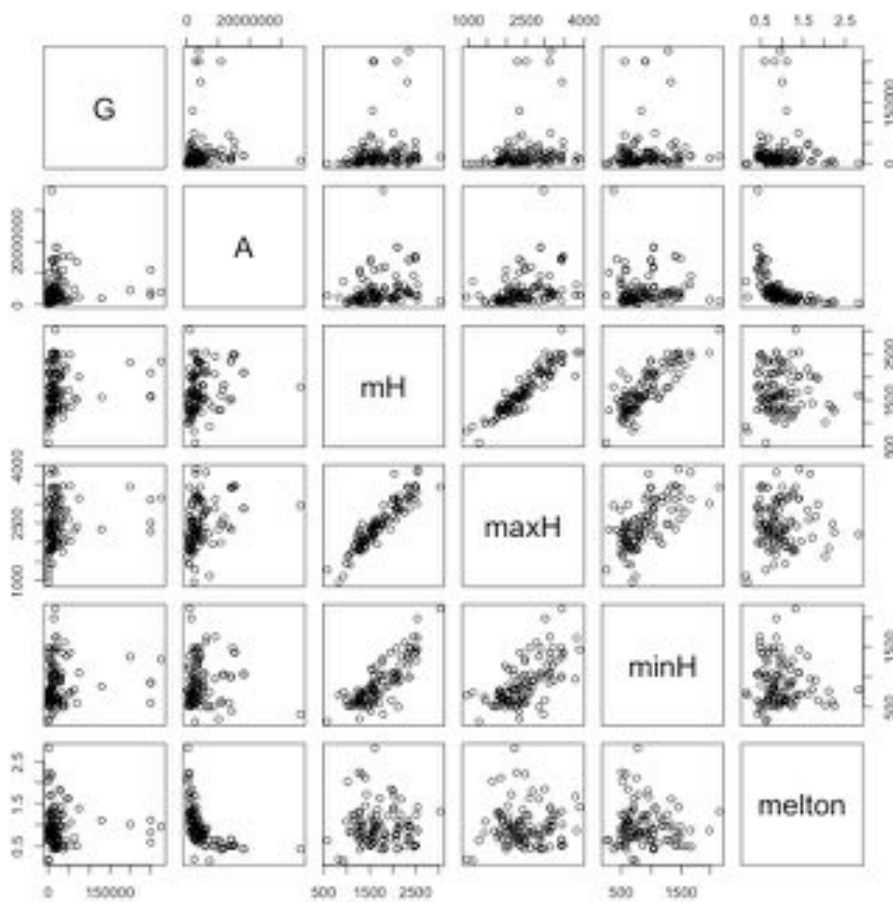


Abbildung 4-3: Streudiagramm-Matrix sämtlicher Parameter der Parametergruppe morphEZG.

In der Abbildung 4-4 sind die Boxplots der Parameter abgebildet. Die Einzugsgebietsflächen (Parameter A) zeigen eine rechtsschiefe Verteilung mit Ausreissern. Beim Wildbach mit der grössten Einzugsgebietsfläche handelt es sich um das Gerinne Leggiuna mit einer Einzugsgebietsfläche von 36 km². Die Parameter zu den Höhen [m.ü.M] sind gleichverteilt und ohne Ausreisser (Ausnahme minH leichte rechtsschiefe). Bei der Meltonzahl variieren die Werte zwischen als 0.15 und 2.82 (vgl. Tabelle 4-2) mit einer leichten rechtsschiefe.

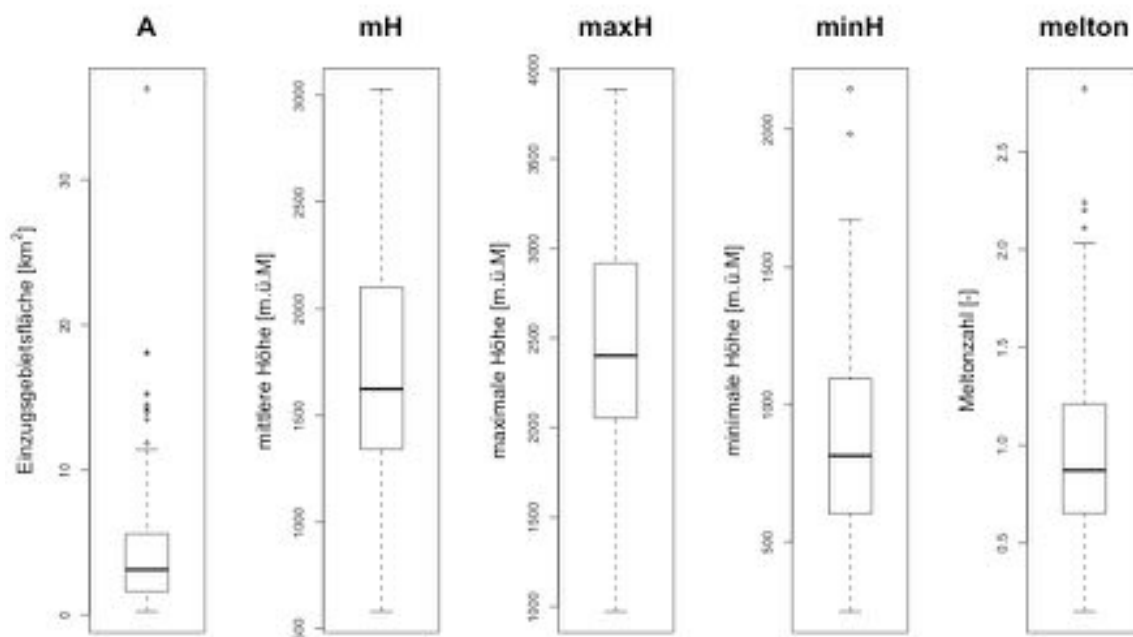


Abbildung 4-4: Boxplots sämtlicher Parameter der Parametergruppe morphEZG.

Morphometrische Gerinneparameter (morphG)

Die Parametergruppe morphG enthält vier Gerinneparameter. In der Abbildung 4-5 ist zu erkennen, dass kein signifikanter Zusammenhang zwischen den Parameter und der Zielgrösse zu beobachten ist (oberste Zeile). Ein linearer Zusammenhang ist zwischen der Neigung (S) und der Rauheit (R) des Gerinnes auszumachen. Will heissen: Die Rauheit des Gerinnes nimmt mit der Neigung zu. Weiter besteht ein Zusammenhang zwischen der Gerinnelänge und der Makrorauheit des Gerinnes (mR). Das wiederum bedeutet, dass die Makrorauheit des Gerinnes mit der Gerinnelänge zunimmt. Der Unterschied der Parameter R und mR ist in der Tabelle 3-3 erläutert. Im Streudiagramm der Parameter ch_L und S lässt sich erkennen, dass die Gerinneneigung bei Wildbächen mit einer grossen Gerinnelänge tendenziell kleiner ist als bei Wildbächen mit einer kurzen Gerinnelänge. In den Boxplots der Parameter ist zu erkennen, dass die Hälfte der Wildbäche eine Gerinneneigung >25% und eine Gerinnelänge >3'000 m aufweisen. Die Parameter zur Rauheit der Gerinne weisen Ausreisser gegen oben sowie eine rechtsschiefe Verteilung auf.

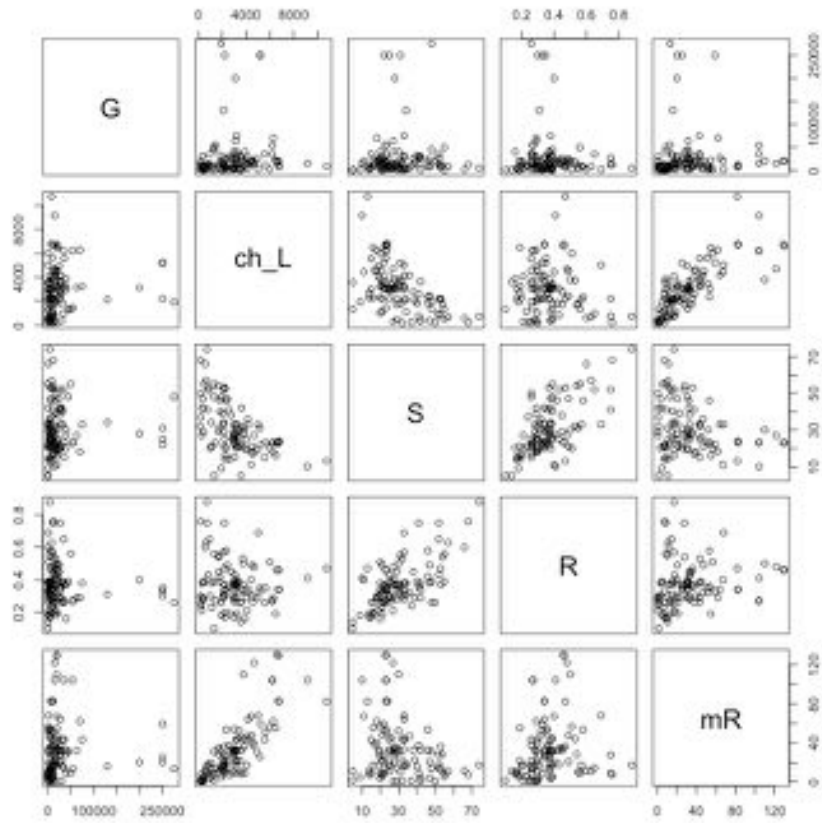


Abbildung 4-5: Streudiagramm-Matrix sämtlicher Parameter der Parametergruppe morphG.

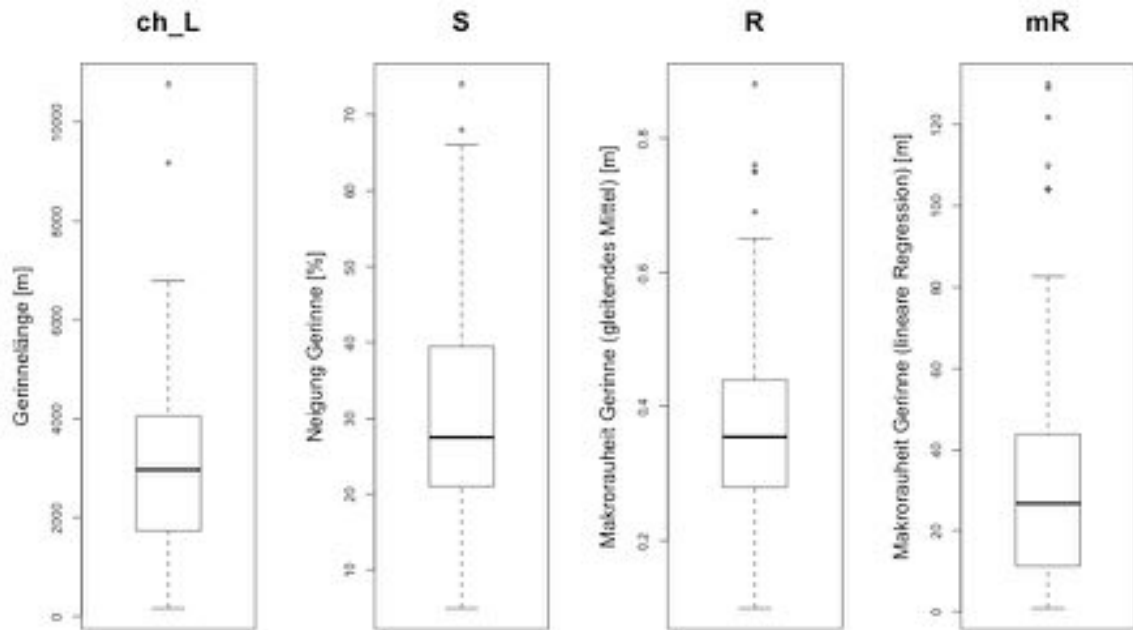


Abbildung 4-6: Boxplots sämtlicher Parameter der Parametergruppe morphG.

Geologische Parameter im Einzugsgebiet (geoEZG)

Bei den geologischen Parametern werden leicht (`geo_easy`), mittel (`geo_med`) und schlecht (`geo_poor`) verwitterbares Gestein unterschieden (vgl. Tabelle 3-3). Die Streudiagramm-Matrix zeigt keinen erkennbaren Zusammenhang zwischen den Parametern und dem Feststoffvolumen der Wildbäche (vgl. Abbildung 4-7 oberste Zeile). Abgesehen von den Ausreißern kann im Streudiagramm `G` vs. `geo_poor` (1 Zeile, 4 Spalte) eine Tendenz zu kleineren Feststoffvolumina bei grösserem Anteil schlecht verwitterbaren Gestein im Einzugsgebiet erkannt werden. Im Streudiagramm der zweiten Zeile, vierte Spalte ist zu erkennen, dass Einzugsgebiete mit geringem Anteil an schlecht verwitterbaren Gestein einen grossen Anteil an leicht verwitterbarem Gestein aufweisen und umgekehrt.

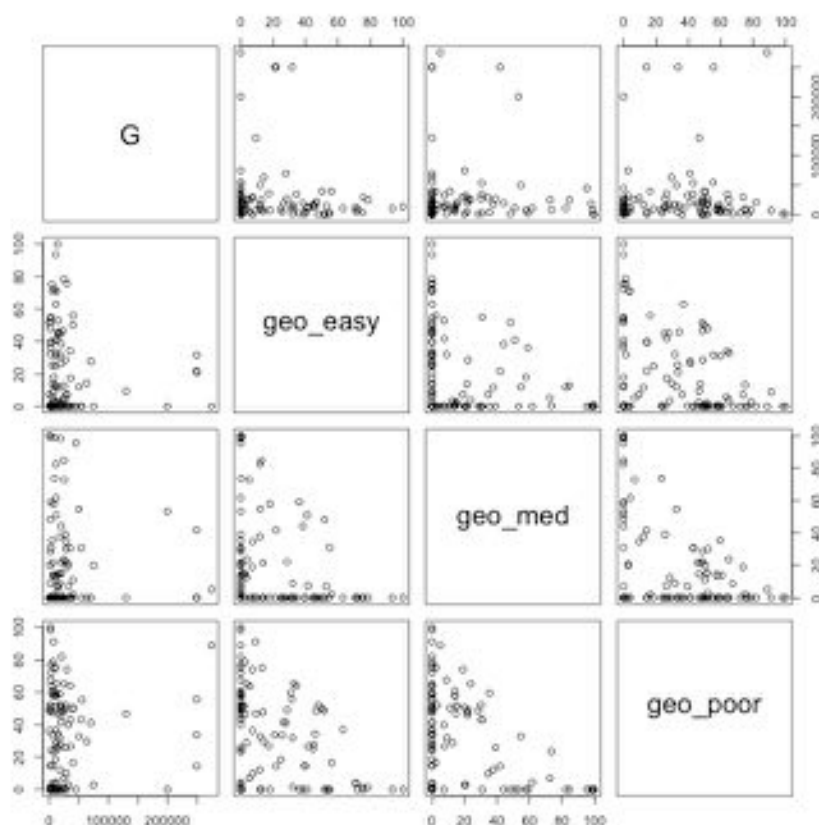


Abbildung 4-7: Streudiagramm-Matrix sämtlicher Parameter der Parametergruppe `geoEZG`.

Die Boxplots der geologischen Parameter des Einzugsgebiets zeigen eine rechtsschiefe Verteilung sämtlicher Parameter an. In den Boxplots der Parameter `geo_easy` und `geo_med` ist zu erkennen, dass die Hälfte der 100 Wildbäche einen prozentualen Anteil Parameter von kleiner als 10% im Einzugsgebiet aufweisen. Im Datensatz existieren jedoch auch wenige Wildbacheinzugsgebiete, welche 100% von leicht- oder mittelverwitterbarem Gestein bedeckt sind. Rund 50 Wildbäche weisen einen Anteil von 40% schlecht-verwitterbarem Gestein im Gerinne auf.

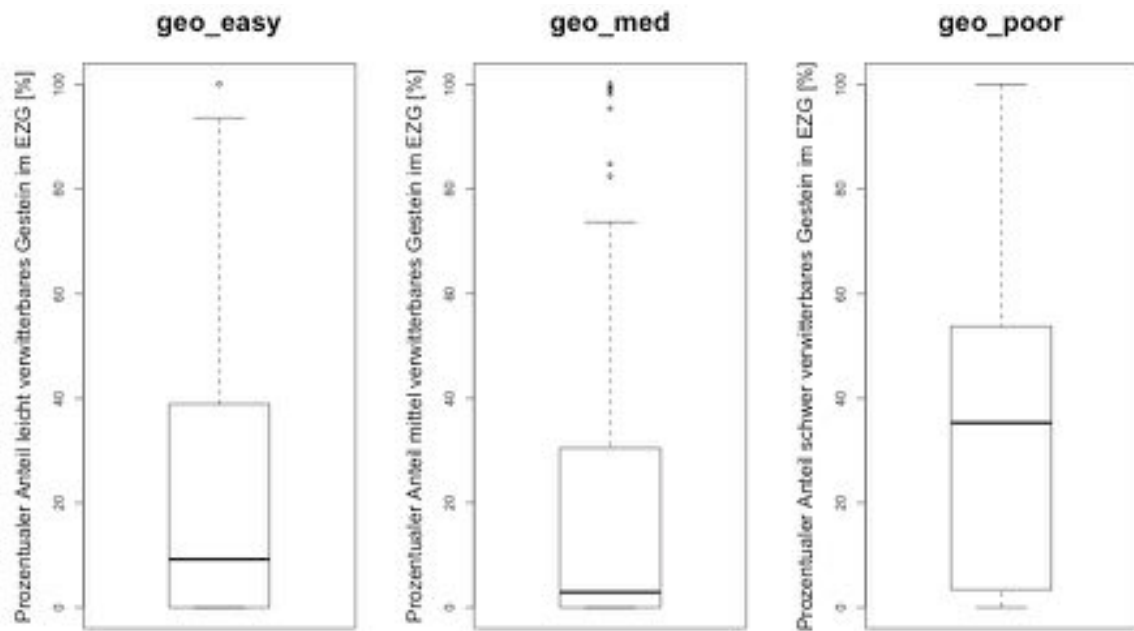


Abbildung 4-8: Boxplots sämtlicher Parameter der Parametergruppe geoEZG.

Geologische Parameter im Gerinne (geoG)

Die geologischen Parameter im Gerinne (geoG) umfassen die gleichen Parameter wie die Parametergruppe geoEZG. In dieser Gruppe wird allerdings nicht der prozentuale Anteil der entsprechenden geologischen Gegebenheiten im Einzugsgebiet betrachtet, sondern der prozentuale Anteil des Gerinnes, welches sich über die unterschiedlichen Gegebenheiten erstreckt. Die Grundlagendaten sind somit dieselben (aggregierte geotechnische Karte vgl. Tabelle 3-3). Die Streudiagramme der Parametergruppe (geoG) sind ähnlich den Streudiagrammen in Abbildung 4-7. Allerdings kann in Abbildung 4-9 erkannt werden, dass viele Wildbäche bei sämtlichen Parametern einen sehr geringen prozentualen Anteil aufweisen. In den Boxplots wiederholt sich diese Beobachtung durch einen Median nahe null bei den Parametern geo_easy_ch und geo_med_ch. Der Parameter geo_poor_ch hat einen Median von einem prozentualen Anteil von rund 10%. Die Boxplots zeigen an, dass einige Wildbachgerinne zu 100% durch denselben geologischen Verwitterungstyp fließt (vgl. Abbildung 4-10).

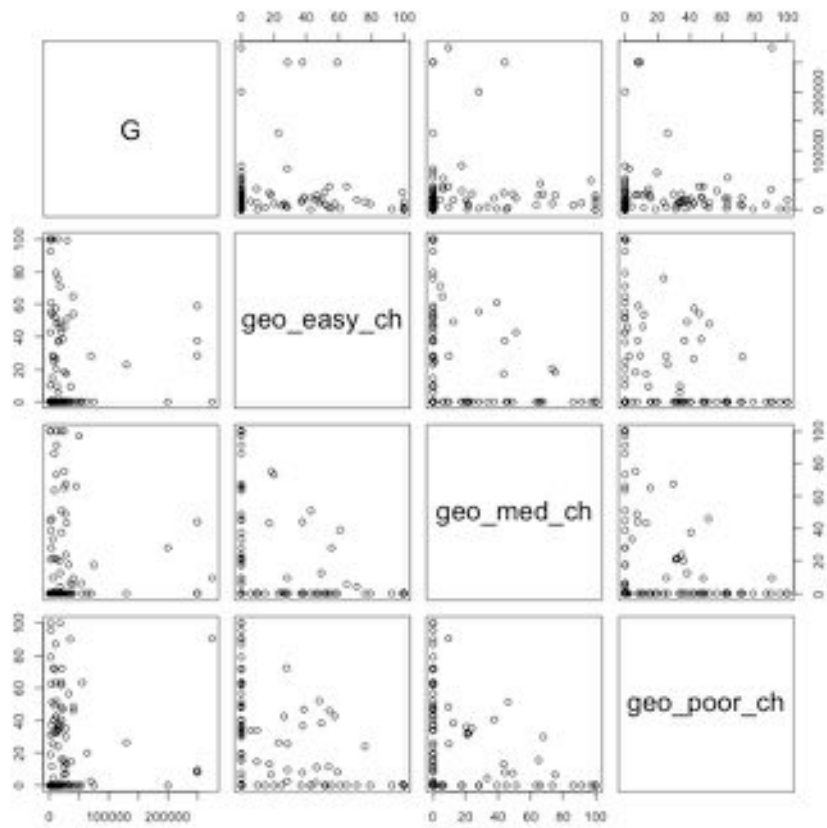


Abbildung 4-9: Streudiagramm-Matrix sämtlicher Parameter der Parametergruppe geoG.

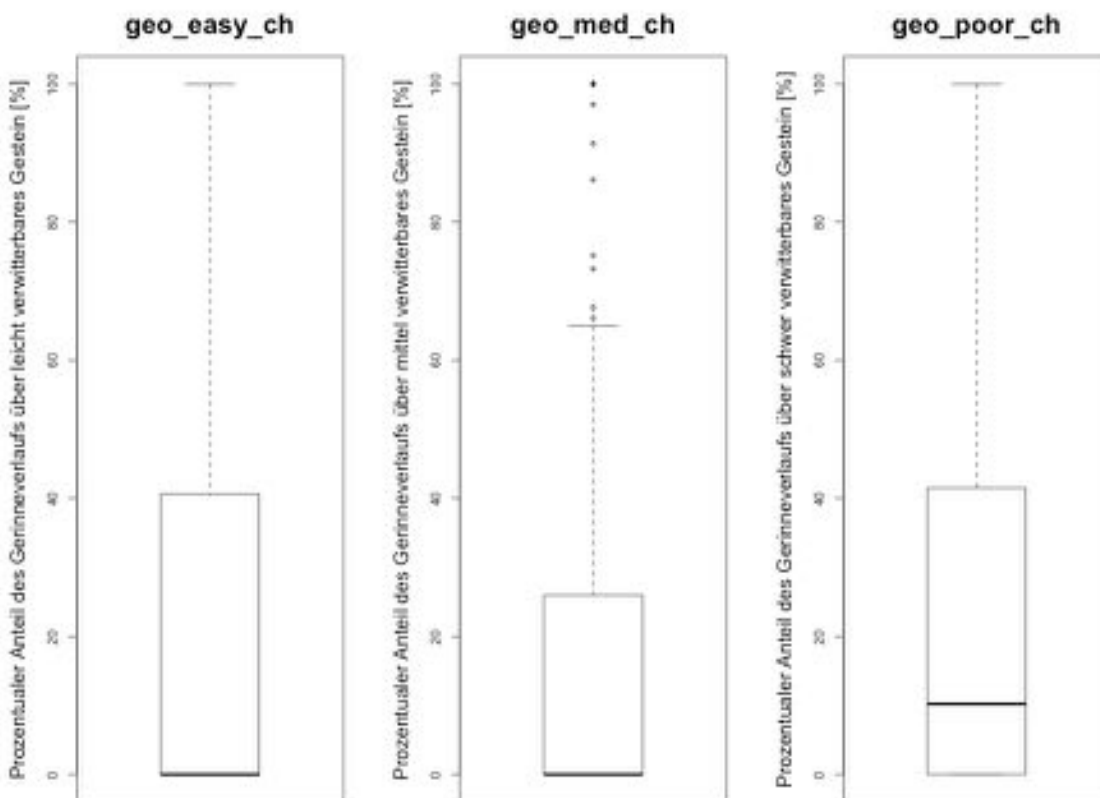


Abbildung 4-10: Boxplots sämtlicher Parameter der Parametergruppe geoG.

Bodenbedeckung im Einzugsgebiet (bodenEZG)

Die Gruppe der Parameter der Bodenbedeckung im Einzugsgebiet umfasst sechs unterschiedliche Bodenbedeckungstypen. Der Abbildung 4-11 ist zu entnehmen, dass keiner der sechs Typen einen signifikanten Zusammenhang mit der Zielgrösse (Feststoffvolumina) aufweist. Werden die Parameter gegenübergestellt, ist ein Zusammenhang zwischen dem Anteil Lockermaterial Einzugsgebiet (TLM_sed) und dem Anteil Fels im Einzugsgebiet (TLM_rock) erkennbar (2 Zeile, 4 Spalte). Weiter zeigt das Streudiagramm TLM_glac vs. TLM_forest an, Einzugsgebiete mit einem hohen Vergletscherungsgrad einen kleinen Waldanteil besitzen. Dieser Zusammenhang kann auch im Streudiagramm TLM_sed vs. TLM_forest beobachtet werden.

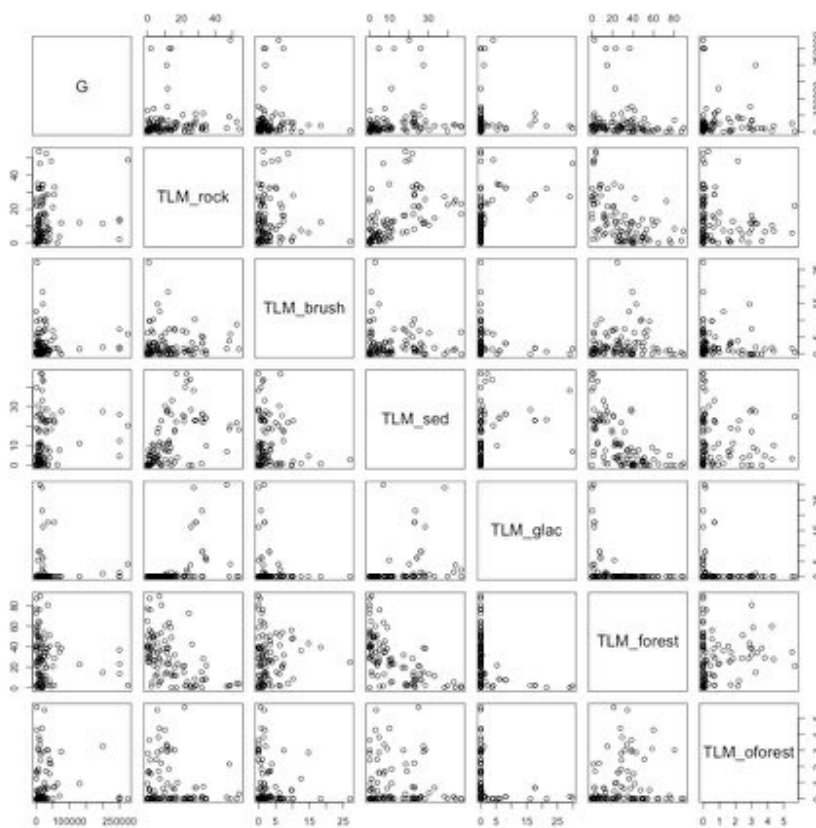


Abbildung 4-11: Streudiagramm-Matrix sämtlicher Parameter der Parametergruppe bodenEZG.

Bei den Boxplots zu den Parametern der Gruppe bodenEZG fällt der Boxplot zum Parameter TLM_glac auf. Dabei lässt sich erkennen, dass eine Mehrzahl der untersuchten Einzugsgebiete nicht, einzelne Einzugsgebiete aber bis zu 30% vergletschert sind. Am stärksten vergletschert sind die Einzugsgebiete des Tanzhubelbächli und dem Vadret da l'Alp Ota mit 30% Vergletscherungsanteil (vgl. Tabelle 4-2). Der Anteil an Boden mit Lockermaterial und an Fels im Einzugsgebiet entspricht im Mittel rund 10%, wobei Ausreisser eine Bedeckung von Lockermaterial und Fels von über 50% aufweisen. Die Parameter TLM_brush, TLM_glac und TLM_oforest sind stark rechtsschief verteilt, während die Parameter TLM_rock, TLM_sed und TLM_forest nur leicht rechtsschief bis normalverteilt sind.

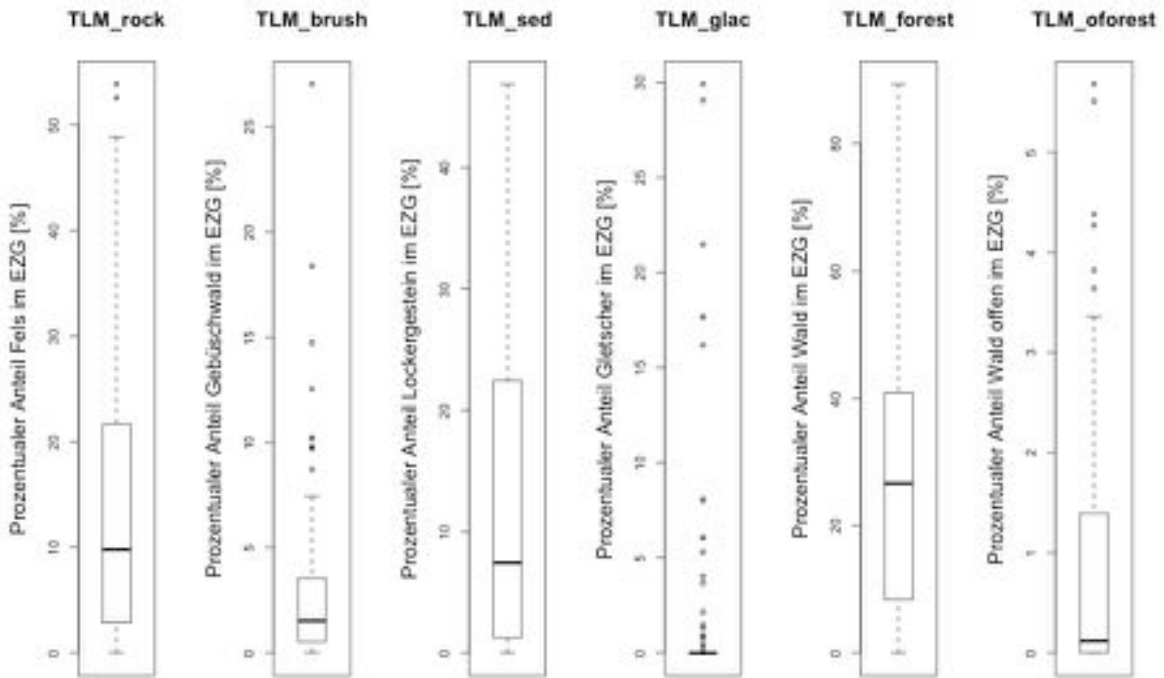


Abbildung 4-12: Boxplots sämtlicher Parameter der Parametergruppe bodenEZG.

Bodenbedeckung im Gerinne (bodenG)

Die Parametergruppe „bodenG“ umfasst die drei Parameter TLM_rock_ch, TLM_sed_ch und TLM_glac_ch. Bei den Streudiagrammen in Abbildung 4-13 fallen die Diagramme mit dem Parameteranteil „Gerinnelänge über Gletscher“ auf. Dabei ist zu erkennen, dass nur bei wenigen Wildbächen ein Anteil von rund 2 - 3% des Hauptgerinnes über einem Gletscher ausgewiesen wird. Bei den Diagrammen G vs. TLM_rock_ch und G vs. TLM_sed_ch ist eine Tendenz zu steigenden Feststoffvolumina bei grösseren prozentualen Anteilen von TLM_rock_ch respektive TLM_sed_ch zu beobachten (vgl. erste Zeile). Die Ausreisser der Feststoffvolumina sind in den entsprechenden Streudiagrammen deutlich zu erkennen.

Beim Boxplot zum Parameter TLM_glac_ch ist erneut zu erkennen, dass nur wenige Gerinne über einem Gletscher entwässern. Die Mediane der prozentualen Anteile des Gerinnes über Fels oder Lockermaterial (TLM_rock_ch und TLM_sed_ch) sind im Bereich von 5%. In den beiden Boxplots sind allerdings Ausreisser mit Anteilen bis zu 55% (TLM_rock_ch), respektive 80% (TLM_sed_ch) zu erkennen.

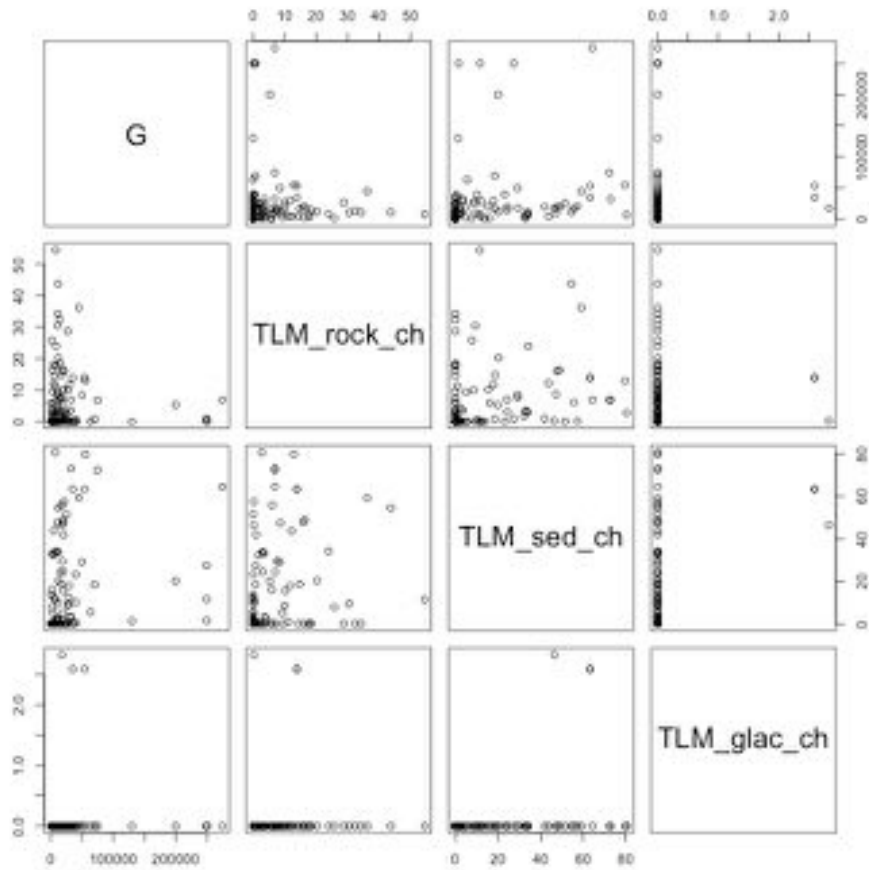


Abbildung 4-13: Streudiagramm-Matrix sämtlicher Parameter der Parametergruppe bodenG

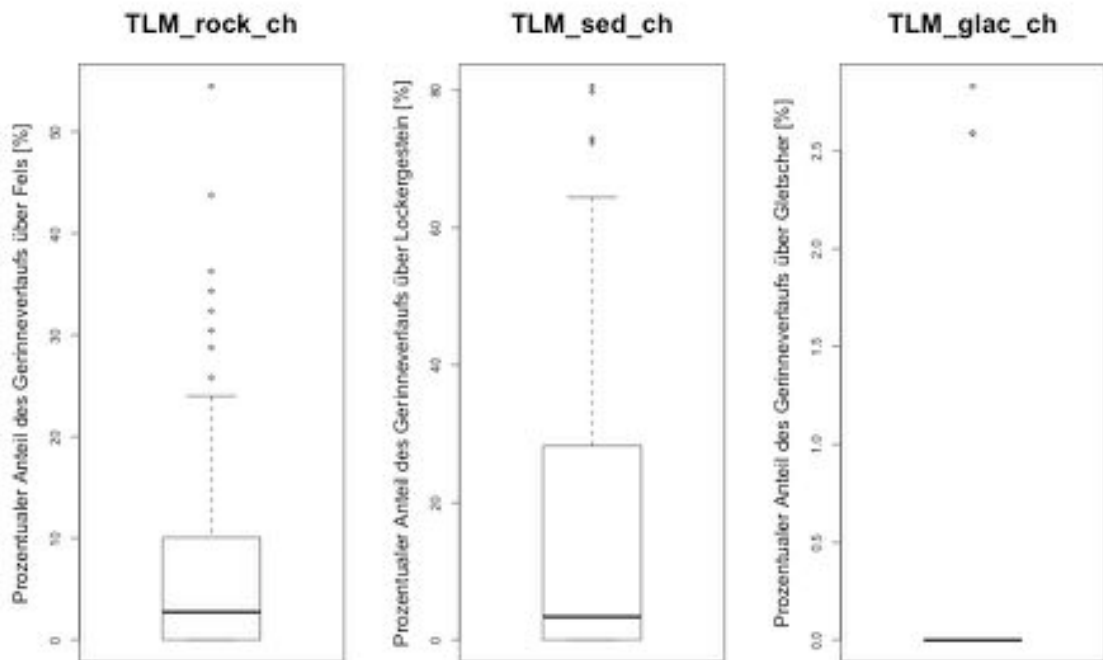


Abbildung 4-14: Boxplots sämtlicher Parameter der Parametergruppe bodenG

Niederschlagsstatistik (hydroS)

In den Streudiagrammen der Parameter zur Niederschlagsstatistik sind keine deutlichen Zusammenhänge zwischen den Parametern und dem Feststoffvolumen der Wildbäche zu erkennen (vgl. Abbildung 4-15 oberste Zeile). Allerdings lässt sich eine Abstufung der Parameter feststellen. Im Streudiagramm G vs. HA1_100 ist zum Beispiel zu erkennen, dass viele Einzugsgebiete ein HA1_100 aufweisen, welches 50 mm, 55 mm oder 60 mm beträgt. Werden die Streudiagramme der Parameter betrachtet, sind lineare Zusammenhänge der extremen Punktniederschläge (HA1_100, HA1_233, HA24_100 und HA23_233) erkennbar. Zwischen den mittleren jährlichen Niederschläge (Hamean) im Einzugsgebiet und den Punktniederschlägen ist kein Zusammenhang auszumachen.

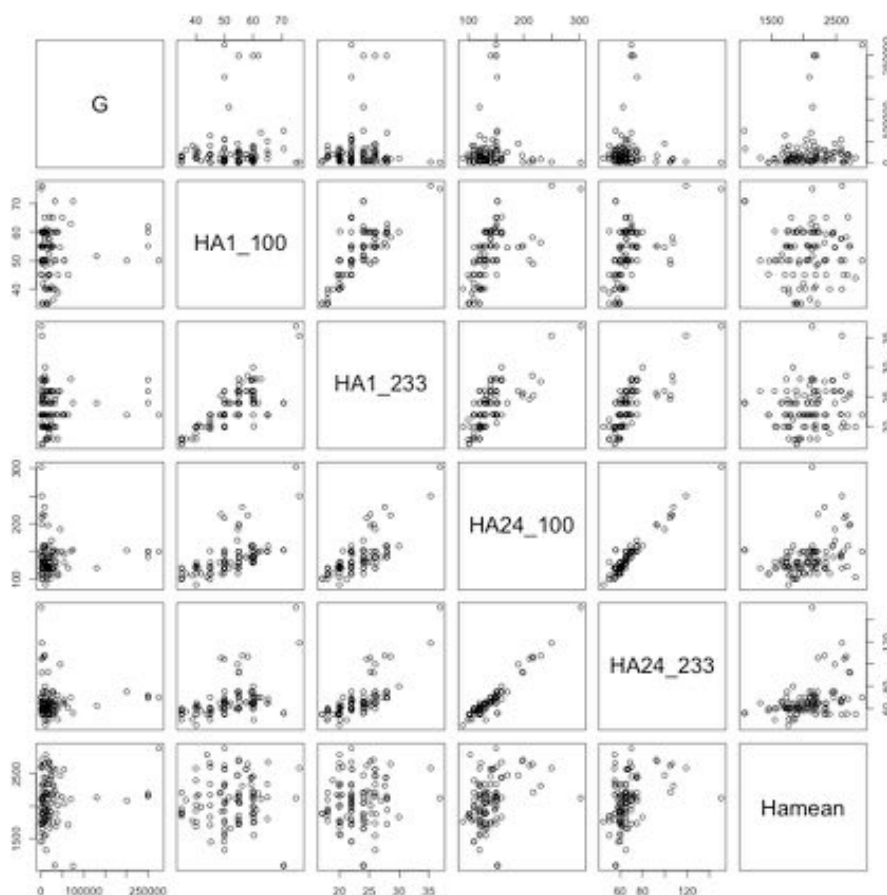


Abbildung 4-15: Streudiagramm-Matrix sämtlicher Parameter der Parametergruppe hydroS.

Der mittlere jährlichen Niederschlag (Hamean) sowie der 100-jährliche 1h-Punktniederschlag (HA1_100) über dem Einzugsgebiet ist für die 100 Wildbäche normalverteilt. Die restlichen Parameter weisen eine rechtsschiefe Verteilung auf. Der Median für den Parameter Hamean beträgt über 2'000 mm, wobei in einzelnen Einzugsgebieten Niederschläge von bis zu 3'000 mm fallen. Der höchste Wert wird im Einzugsgebiet des Rotlaubaches mit bis zu 2'900 mm/a beobachtet (vgl. Tabelle 4-2)

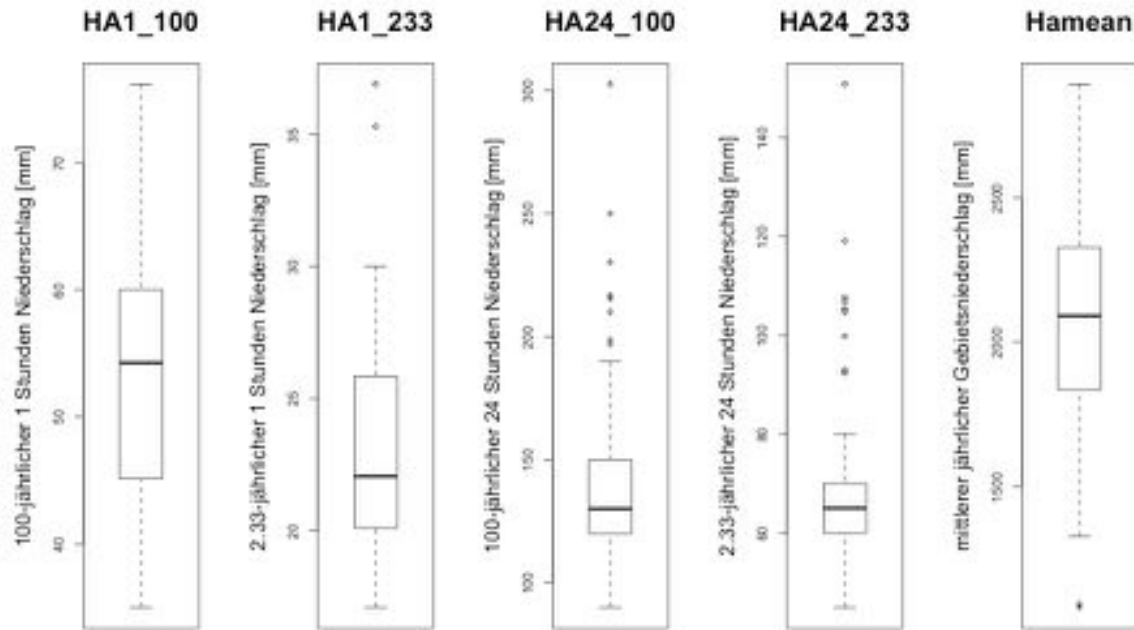


Abbildung 4-16: Boxplots sämtlicher Parameter der Parametergruppe hydroS.

Ereignisniederschlag (hydroE)

Das EZG/GP-Tool berechnet den gemittelten Tagesniederschlag im Einzugsgebiet für den Ereignistag und die 19 Tage vor dem Ereignis (vgl. Anhang B). Um die Anzahl an Parametern zu reduzieren, müssen die Tage extrahiert werden, welche einen Zusammenhang mit den Feststoffvolumen aufweisen. Diese Reduktion wird aufgrund einer Korrelationsanalyse zwischen den Tagesniederschlägen und den Feststoffvolumina durchgeführt (vgl. Kapitel 3.4). In der Abbildung 4-17 sind die Korrelationskoeffizienten zwischen den Feststoffvolumina und den Ereignisniederschlägen am Ereignistag und den 19 Tagen vor dem Ereignis abgebildet. Die Korrelationskoeffizienten beziehen sich auf die 100 untersuchten Wildbäche. Die Niederschläge am Ereignistag und den beiden Tagen vor dem Ereignis weisen, wie auf die Tage acht und neun, sowie der 16 und 17 Tag vor dem Ereignis die grössten positiven Korrelationskoeffizienten auf. Der grösste Korrelationskoeffizient der einzelnen Tage weist der Tag vor dem Ereignis (p2) auf. In Abbildung 4-18 ist zusätzlich zu erkennen, dass an diesen Tagen die durchschnittlich grössten Ereignisniederschläge gemessen wurden. Für die weitere Berücksichtigung der Parameter werden die Tage mit den grössten Korrelationskoeffizienten zu folgenden drei Parametern aggregiert:

- **p3v [mm]**: Niederschlagssumme des Ereignistages und den beiden Tagen vor dem Ereignis
- **p8_9 [mm]**: Niederschlagssumme des achten und neunten Tages vor dem Ereignis
- **p16_17 [mm]**: Niederschlagssumme des 16 und 17 Tages vor dem Ereignis
- **p2 [mm]**: Niederschlag des Tages vor dem Ereignis

Als weiterer Parameter (ptotmean) wird der Mittelwert über sämtliche 20 Tage gebildet. Diese fünf Parameter werden als Inputparameter für die KNN verwendet. Die Werte dieser fünf aggregierten Niederschlagswerten sind in Tabelle 4-3 für sämtliche 100 untersuchte Wildbäche wiedergegeben.

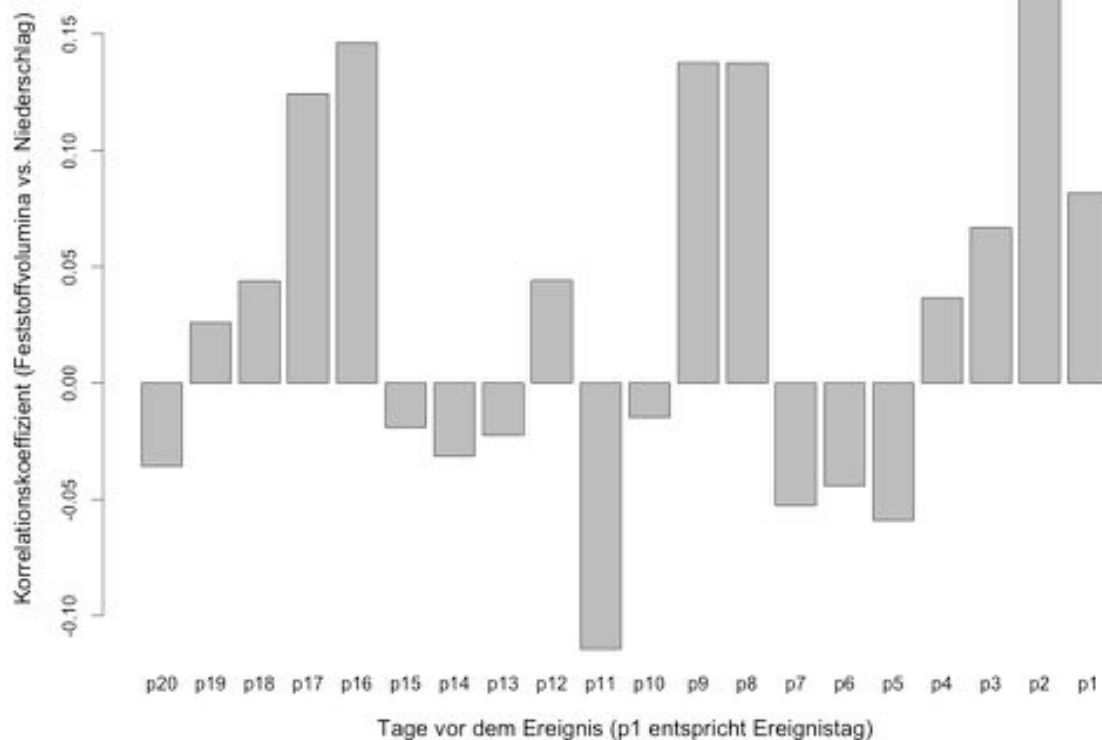


Abbildung 4-17: Korrelationsanalyse der Ereignisniederschläge mit den Feststoffvolumina. Auf der x-Achse ist der Korrelationskoeffizient zwischen den Feststoffvolumina und den Ereignisniederschlägen am Ereignistag und den 19 Tagen vor dem Ereignis abgeleitet der 100 Wildbäche abgebildet.

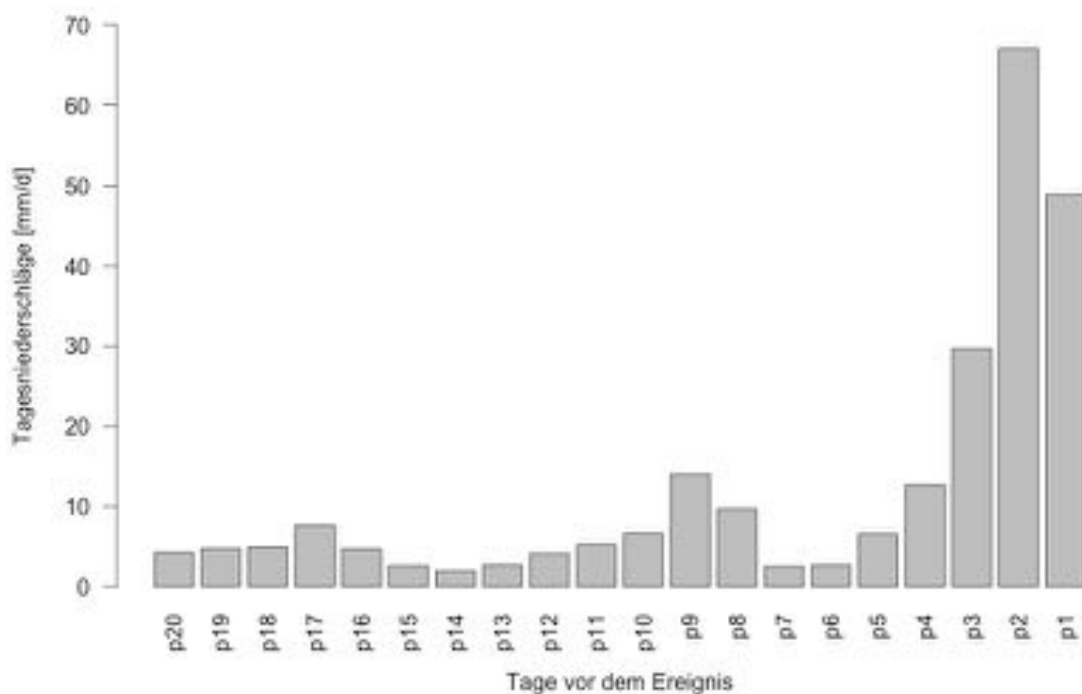


Abbildung 4-18: Mittelwert der Tagesniederschläge vor dem Ereignis der 100 Wildbäche.

Tabelle 4-3: Werte der fünf aggregierte Niederschlagsparameter.

Name	p2 [mm]	p3v [mm]	p8_9 [mm]	p16_17 [mm]	ptotmean [mm]	Name	p2 [mm]	p3v [mm]	p8_9 [mm]	p16_17 [mm]	ptotmean [mm]
Glyssibach	115	213	26	7	19	Buoholzbach	105	241	78	39	21
Sandbach	20	26	15	11	8	Duerrbach	83	222	75	43	19
Schwendibach	105	175	17	4	15	Ri Bassengo	118	390	0	3	21
Rotlaubach	94	148	19	12	13	Eau Froide	34	122	2	39	12
Schwarzbaechli	23	49	17	3	9	Le Durmand	0	12	1	0	2
Rote Bach	2	6	0	9	3	Minstigerbach	0	36	16	6	8
Tanzhubelbaechli	24	25	0	13	9	Spisszug	3	26	0	0	5
Fallbach	81	149	16	5	13	Trachtbach	94	253	59	16	19
Louwibach	84	155	17	5	13	Milchbach	39	179	41	37	15
Wartenberggraben	72	188	48	16	14	Schisstalbach	68	260	65	33	20
Milibach	109	201	24	10	17	Pletschenbachli	98	181	37	5	13
Betelriedgraben	42	108	17	3	8	Chratzmattigraben	101	186	37	5	13
Riggisalpbach	0	14	0	6	7	Goldbach	89	149	46	5	12
Chummerbach	0	15	0	16	5	Ruebibach	118	206	64	26	18
Alpenbach	8	33	8	5	3	Barenbach	88	226	75	42	19
Schwenditobel	133	167	4	0	12	Gruonbach	67	191	64	37	17
Val da Dusch	44	155	9	0	10	Mattenbach	62	185	43	22	15
Vadret da l'Alp Ota	0	0	2	11	5	Louwibach (Glattbach)	101	191	37	7	13
Val Varuna	110	193	0	2	13	Tannersgraben	100	202	39	12	15
Val Valdun	73	249	14	2	18	Sagliains	21	163	13	7	11
Plaunca	204	284	2	1	16	Selderbach	67	234	61	31	18
Val Farbertg	87	274	17	1	20	Inner Blindlauigraben	15	24	0	1	3
Lauigraben	114	191	61	23	16	Fritzenbach	0	15	0	11	5
Haldibach	103	244	81	42	21	Spissibach	0	12	0	11	5
Meisibach	108	217	56	23	18	Steinenbach	0	3	0	0	3
Mehlbach	92	226	74	39	19	Laengenbachmuehle	7	69	14	16	11
Fangtobel	99	226	75	38	19	Grosse Bachtale	0	3	2	32	7
Melbach	118	210	65	27	18	Schwarzbach	65	108	38	7	9
Acherlibach	104	226	69	33	20	Eistlenbach	102	242	58	20	19
Foribach	110	210	62	28	18	Dorfgruefe	0	16	7	8	4
Dorfbach Sachseln	0	19	13	5	3	Valparghera	0	34	64	11	11
Flibach	28	166	6	12	21	Val Punteglias	232	320	3	2	18
Usser Dorfbach	117	212	31	18	19	Val Gronda	51	59	0	0	7
Ri di Bedretto	223	338	16	4	19	Steinibach	119	209	68	28	18
Dongia	159	362	5	1	23	Humligenbach	112	226	75	35	19
Ri di Ronco	215	325	16	3	18	Bitzighoferbach	0	3	0	1	2
Naesitalbach	66	202	63	35	17	Duerrbach	127	211	33	16	19
Rio de Tennasses	0	14	0	27	6	Edisriedbach	0	20	13	6	3
Nant du Pissot	7	10	14	0	3	Gasenzenbach	51	81	0	0	8
Reuses du Dolent	6	6	8	0	5	Riale Tiglia	60	160	0	4	10
Minstigerbach	184	270	21	1	15	Brima	0	0	2	32	4
Milibach	132	202	14	1	11	Riale di Sementina	14	44	14	0	9
Ritigraben	57	152	3	15	10	Leggiuna	75	293	1	9	21
Horbach	115	200	21	3	16	Gangbach	66	218	62	32	18
Stegenbach	13	37	16	0	5	Kummetbach	91	101	12	9	10
Seebach	104	137	8	7	13	Poeschrueti	81	139	0	0	9
Riale Lant	0	19	0	0	5	Fischlauwi	5	48	9	37	6
Rabiusa	75	304	0	3	17	Opplibach	71	183	14	1	12
Ferrera	233	322	3	2	18	Schipfenbach	23	28	18	27	9
Sinzerä	76	303	0	2	17	Kirchbach	19	113	0	7	9

Die Streudiagramm-Matrix zu den fünf aggregierten Ereignisniederschlagsparameter zeigt in der obersten Zeile (Zusammenhang mit der Zielgröße) ein ähnliches Bild wie die Parameter aus sämtlichen Parametergruppen. Während die Ausreisser der Feststoffvolumina klar erkennbar sind, zeigt sich allgemein kein Zusammenhang zwischen den Parametern und den Feststoffvolumina. Ein deutlicher Zusammenhang ist jedoch zwischen dem Mittelwert des Niederschlages der 20 Tagen (ptotmean) und der Niederschlagssumme „p3v“ zu erkennen. Die p3v-Niederschlagssumme korreliert zudem mit dem Niederschlag vor dem Ereignistag (p2). Die restlichen Parameter weisen keine klar erkennbaren Zusammenhänge auf (vgl. Abbildung 4-19). Die Boxplots der Parametergruppen zeigen auf, dass bezüglich der Niederschläge keine Einzugsgebiete als Ausreisser hervortreten und die Parameter der 100 Wildbäche normal (ptotmean) bis leicht rechtsschief verteilt sind. Es ist hervorzuheben, dass die Parameter p8_9 und p16_17 eine ähnliche Verteilung und ähnliche Absolutwerte aufweisen. So liegt der Median beider Parameter bei rund 8 mm Niederschlag (vgl. Abbildung 4-20).

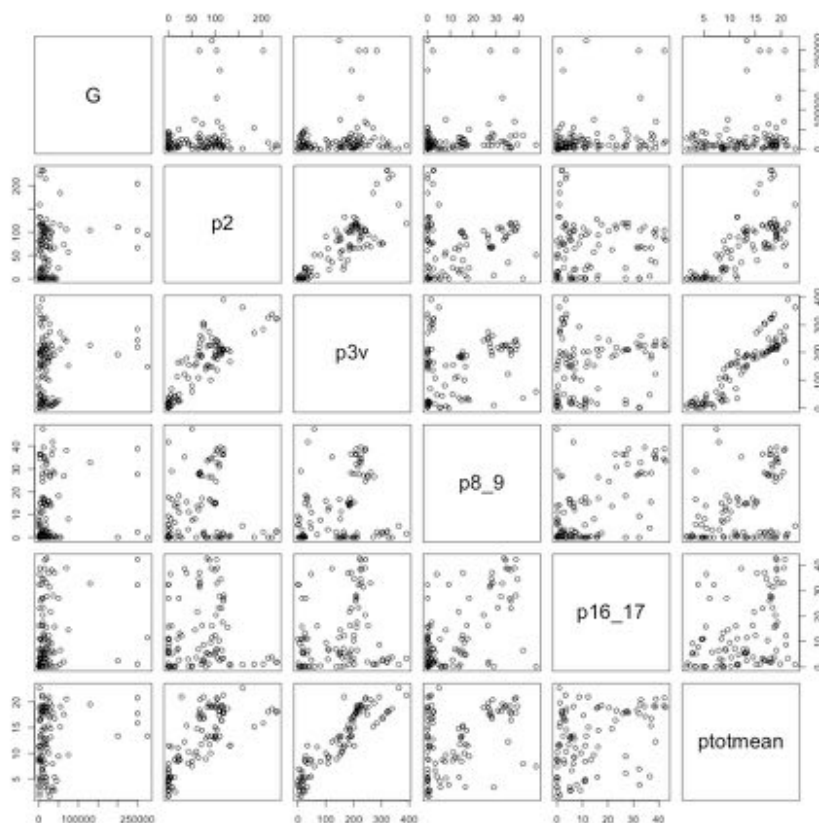


Abbildung 4-19: Streudiagramm-Matrix sämtlicher Parameter der Parametergruppe hydroE

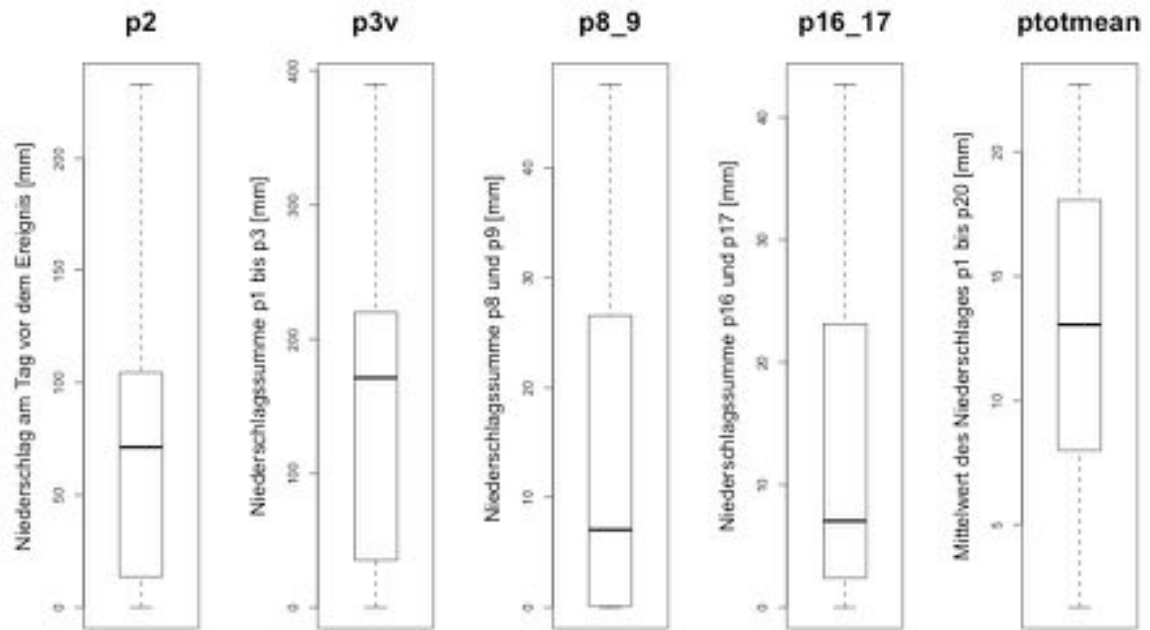


Abbildung 4-20: Boxplots sämtlicher Parameter der Parametergruppe hydroE

4.3 Künstliche neuronale Netze (KNN)

Im folgenden Kapitel werden die Resultate der Analyse mit KNN vorgestellt. Die Ansätze Modell „Volumen“ und Modell „Klassen“ (vgl. Kapitel 3.5.2) werden anschliessend in separaten Unterkapiteln behandelt. In einem ersten Schritt werden die Resultate der Modellgenerierung (vgl. Forschungsfrage A2 und B), anschliessend wird das best-fit-Modell bezüglich Aufbau und Güte vorgestellt.

4.3.1 Modell „Volumen“

Die zentralen Parameter des Modells „Volumen“ werden mithilfe eines Filteransatzes bestimmt. Die Vorgehensweise ist in Kapitel 3.5.2 detailliert beschrieben. Die Korrelationsmatrizen zeigen den Korrelationskoeffizienten (pearson) zwischen sämtlichen Parametern der Parametergruppe sowie der Zielgrösse (Feststoffvolumina). Zwei Parameter werden je Parametergruppe nach den Kriterien in Kapitel 3.5.2 gefiltert.

Filteransatz

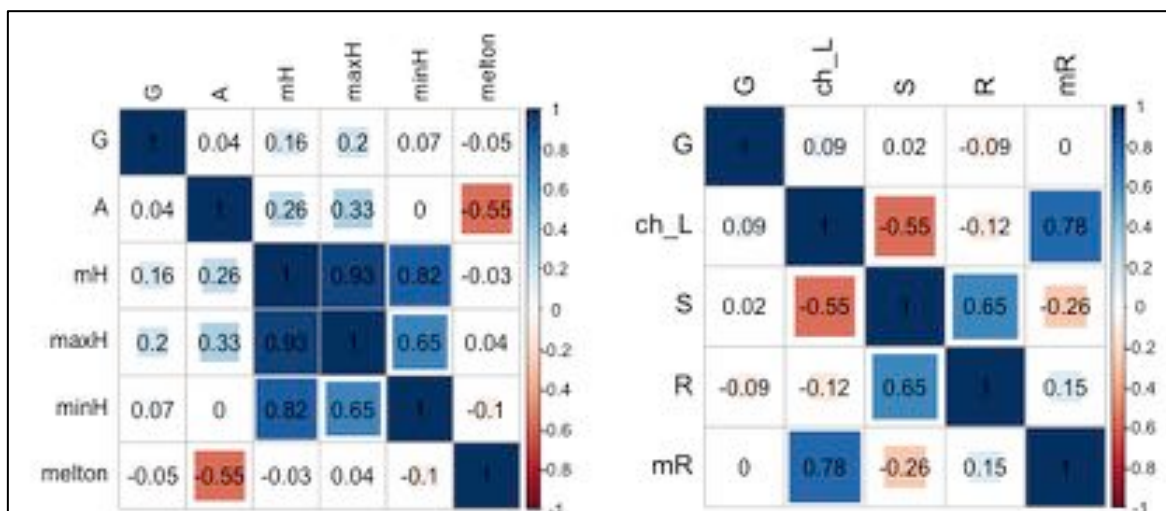


Abbildung 4-21: Korrelationsmatrizen der morphometrischen Parameter (links EZG, rechts Gerinne).

morphEZG (links)

Die maximale Höhe (maxH) [m.ü.M] des Einzugsgebietes weist mit $r=0.2$ den grössten Korrelationskoeffizient der Parametergruppe morphEZG zur Zielgrösse auf. Die mittlere Höhe (mH) sowie die minimale Höhe (minH) [m.ü.M] des Einzugsgebietes korrelieren stark mit diesem Parameter. Aus diesem Grund wird als zweiter Parameter die Melton-Zahl verwendet.

morphG (rechts)

Die Parameter Gerinnelänge (ch_L) [m] und Makrorauheit (R) [m] haben die betragsmässig grössten Korrelationskoeffizienten der Parametergruppe. Der Korrelationskoeffizient der Makrorauheit deutet mit einem negativen Wert eine Abnahme der beobachteten Feststoffvolumina mit steigender Gerinnerauheit an. Die Gerinneneigung (S) und die Makrorauheit mit linearer Regression (mR) zeigen eine schwache (S) bis inexistente Korrelation mit der Zielgrösse an.

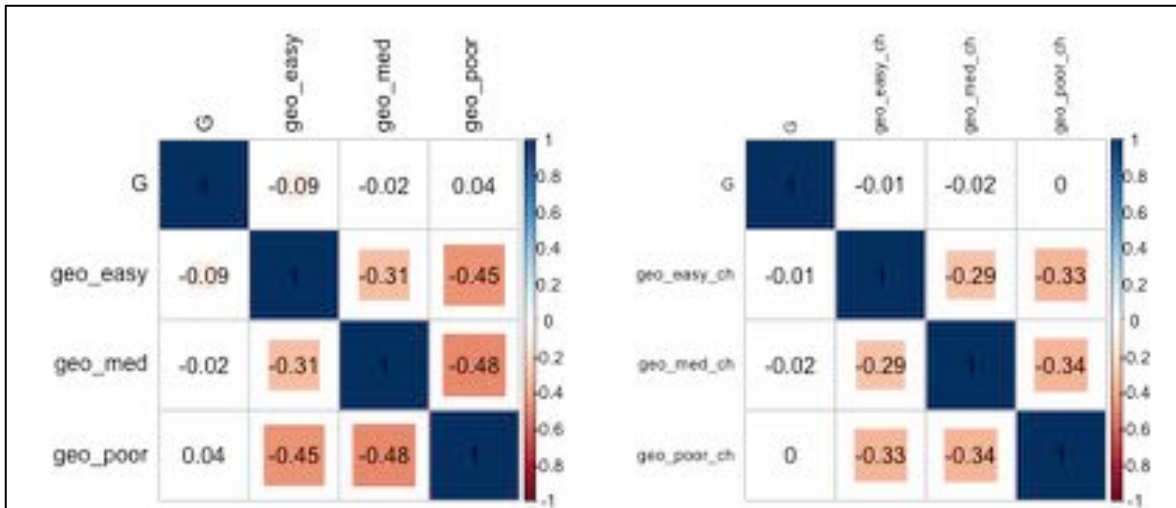


Abbildung 4-22: : Korrelationsmatrizen der geologischen Parameter (links EZG, rechts Gerinne).

geoEZG (links)

Der Parameter „mittlere Verwitterbarkeit im EZG“ (geo_med) wird im Gegensatz zu den Parametern geo_easy und geo_poor für die weiterführende Analyse nicht mehr berücksichtigt. Zwischen der Zielgrösse und der leichten Verwitterbarkeit im Einzugsgebiet (geo_easy) besteht eine negative Korrelation. Sämtliche geologischen Parameter zeigen eine Korrelation nahe null zu der Zielgrösse an.

geoG (rechts)

Die geologischen Parameter als prozentualer Anteil über dem Gerinneverlauf weisen ebenfalls Korrelationskoeffizienten nahe null auf. Weil der Korrelationskoeffizient für den Parameter geo_poor_ch gleich null ist, werden für die weiteren Analysen die Parameter geo_easy_ch und geo_poor_ch verwendet.

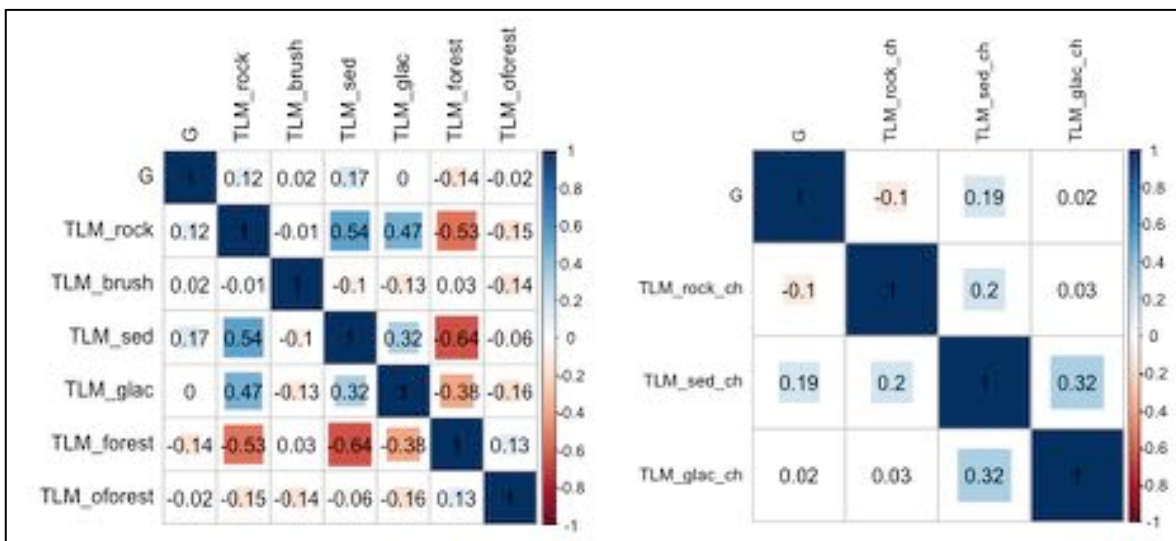


Abbildung 4-23: Korrelationsmatrizen der Bodenbedeckungsparameter ((links EZG, rechts Gerinne).

bodenEZG (links)

Der Anteil an Lockermaterial im Einzugsgebiet (TLM_sed) korreliert am stärksten mit dem Feststoffvolumen ($r=0.17$). Eine negative Korrelation ($r=-0.14$) besteht zwischen dem Waldanteil und dem Feststoffvolumen (TLM_forest). Die beiden Parameter korrelieren zueinander mit einem Korrelationskoeffizienten von $r=-0.64$. Weil dieser Koeffizient kleiner ist als 0.7, werden beide Parameter weiterverwendet (vgl. Kapitel 3.5.2).

bodenG (rechts)

Von den drei Parametern in der Parametergruppe bodenG weist der Parameter „Anteil der Gerinnelänge über Lockermaterial“ den grössten ($r=0.19$) Korrelationskoeffizienten auf. Ebenfalls weiterverwendet wird der „Parameter Anteil der Gerinnelänge über Fels“ (TLM_rock_ch).

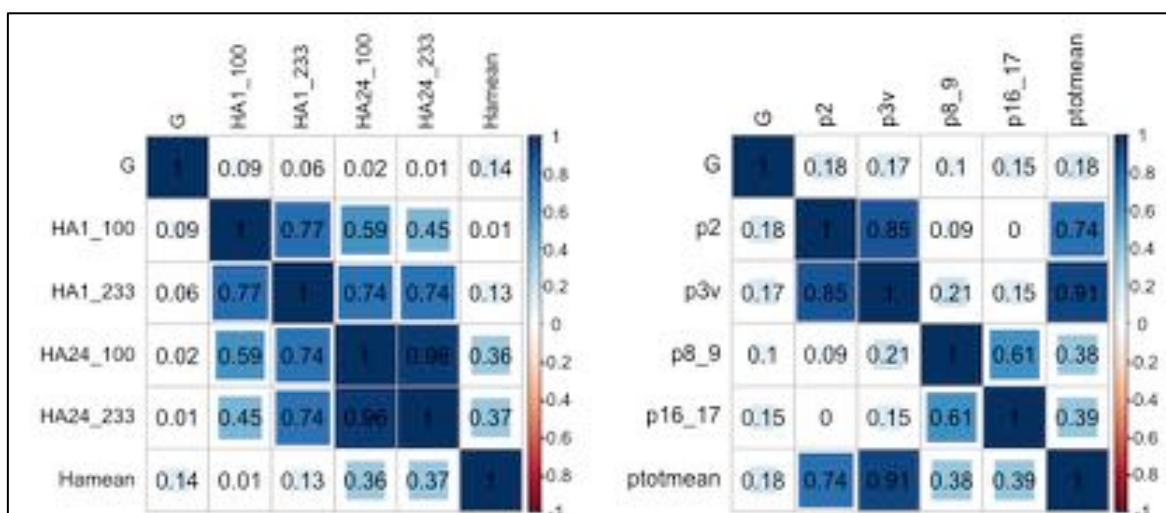


Abbildung 4-24: Korrelationsmatrizen der Niederschlagsparameter (links Niederschlagsstatistik, rechts Ereignisniederschläge).

hydroS (links)

Der langjährige mittlere Niederschlag (Hamean) hat den grössten, linearen Zusammenhang mit dem Feststoffvolumen von sämtlichen Parametern in der Gruppe „hydroS“. Mit einem Korrelationskoeffizienten von $r=0.09$ wird als zweiter Parameter der statistische stündliche Punktniederschlag mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren (HA1_100) gefiltert.

hydroE (links)

Die Korrelationskoeffizienten der Parameter zu den Ereignisniederschlägen und den Feststoffvolumina sind zwischen $r=0.10$ und $r=0.18$. Die Parameter p2 ($r=0.178$) und ptotmean ($r=0.183$) haben die grössten Korrelationskoeffizienten im Zusammenhang mit den Feststoffvolumina. Aufgrund der hohen Korrelation der beiden Parameter wird der Parameter mit dem kleineren Korrelationskoeffizienten (p2) nicht weiter berücksichtigt. Der Parameter p3v weist ebenfalls eine Korrelation >0.7 mit dem Parameter ptotmean auf. Aus diesem Grund wird der Parameter p16_17 verwendet.

Die 16 gefilterten Parameter (zwei Parameter von acht Gruppen) werden zu einer neuen Matrix zusammengeführt. Anhand dieser Matrix wird anschliessend eine neue Korrelationsmatrix (vgl. Abbildung 4-25) gebildet. Durch die Rangierung der Parameter anhand des Korrelationskoeffizienten mit der Zielgrösse wird eine Rangliste (vgl. erste und zweite Spalte Tabelle 4-4) erstellt. Die Rangliste wird mithilfe der Korrelationsmatrix nach redundanten Parametern untersucht. Für den weiterführenden Wrapper-Ansatz werden die zehn Parameter mit der besten Rangierung (nach Ausschluss redundanter Parameter) verwendet.

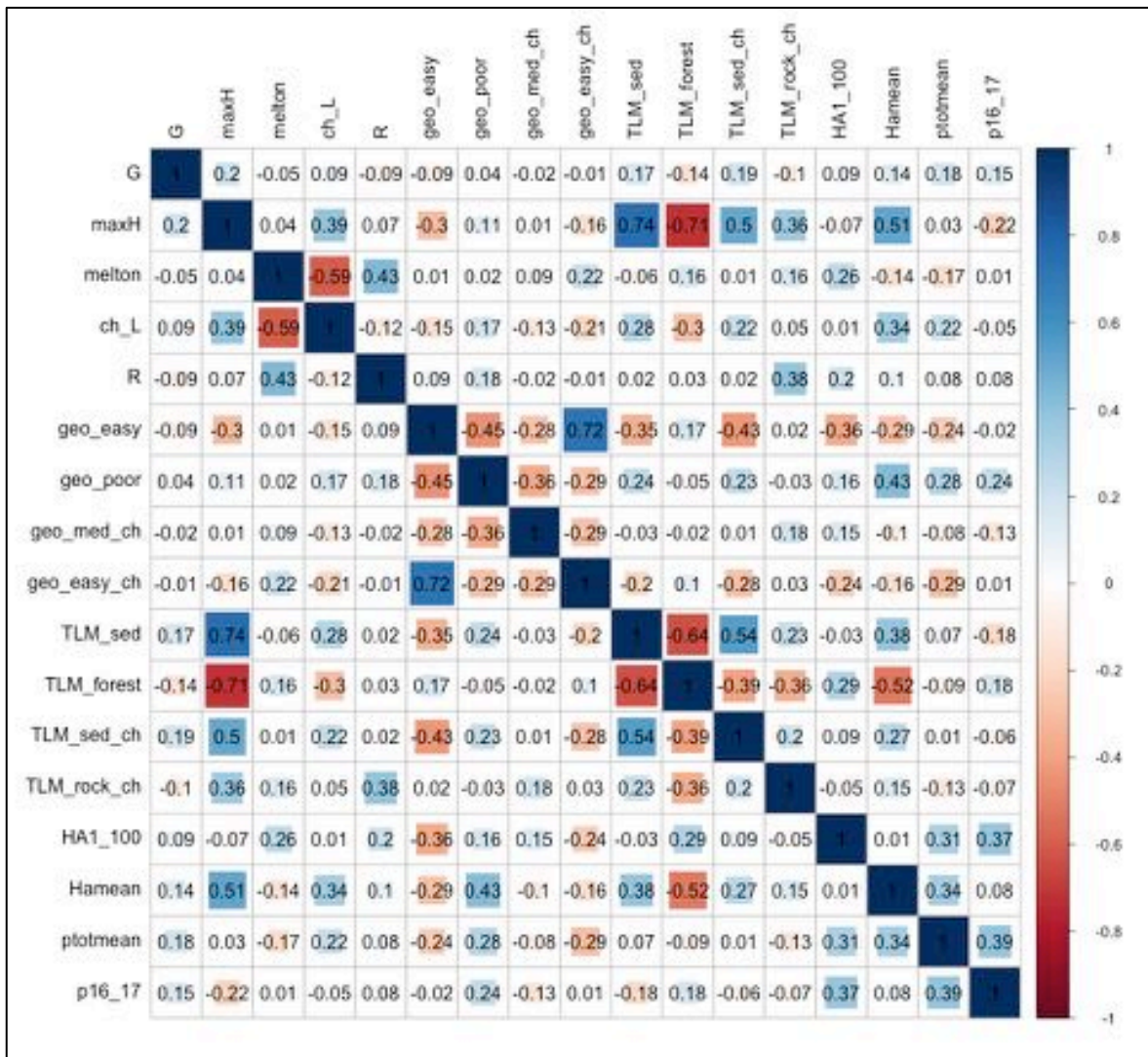


Abbildung 4-25: Korrelationsmatrix der 16 gefilterten Parameter. Anhand der Korrelation der Parameter mit dem Feststoffvolumina (erste Zeile) werden die Parameter rangiert. Mithilfe der Spalte wird nach redundanten Parametern gesucht.

Tabelle 4-4: Gefilterte Parameter des Modell „Volumen“ unter Berücksichtigung redundanter Parameter. Der Rang in der ersten Spalte entspricht der Rangierung nach dem Korrelationskoeffizienten korrespondierend mit dem Feststoffvolumina. Der definitive Rang wird nach der Berücksichtigung der redundanten Parameter zugewiesen.

Rang	Parameter	Korreliert zu	Rang definitiv	Gruppe
1	maxH (0.2)		1	morphEZG
2	TLM_sed_ch (0.19)		2	bodenG
3	ptotmean (0.18)		3	hydroE
4	TLM_sed (0.17)	maxH (0.74)		bodenEZG
5	p16_17 (0.15)		4	hydroE
6	TLM_forest (-0.14)	maxH (0.71)		bodenEZG
7	Hamean (0.14)		5	hydroS
8	TLM_rock_ch (0.1)		6	bodenG
9	R (-0.09)		7	morphG
10	geo_easy (-0.09)		8	geoEZG
11	HA1_100 (0.09)		9	hydroS
12	ch_L (0.09)		10	morphG
13	melton (-0.05)		11	morphEZG
14	Geo_poor (0.04)		12	geoEZG
15	Geo_med_ch (-0.02)		13	geoG
16	geo_easy_ch (-0.01)	geo_easy (0.72)		geoG

Wrapper-Ansatz und Hidden-Neuronen

Um das best-fit-KNN bestimmen zu können, wird der Wrapper-Ansatz mit einer Hidden-Neuronen-Variation kombiniert (vgl. Kapitel 3.5.2). In der Abbildung 4-26 sind die Güten der verschiedenen Netzwerkkonstellationen abgebildet. Um die Variation der Güte in Abhängigkeit der zufälligen Zuweisung der Startgewichte zu berücksichtigen, wird die Güte für dieselbe Netzkonstellation 20-fach berechnet (vgl. Abbildung 3-9: Ablauf Wrapper-Ansatz). Der Wrapper-Ansatz wird mit der Bestimmung der optimalen Anzahl an Hidden-Neuronen kombiniert. Die Streuung der Resultate ist in den Boxplots dargestellt, wobei die sieben Boxplots links die Güten für KNN mit sämtlichen zehn Parametern des Filteransatzes (vgl. Tabelle 4-4) und unterschiedlichen Anzahl an Hidden-Neuronen zeigen. Die Anzahl an Inputparametern und Hidden-Neuronen nimmt von links nach rechts ab. Bei sämtlichen Inputkonstellationen kann eine Abnahme der Güte (Zunahme des normalized root mean squared errors) mit der Zunahme von Hidden-Neuronen beobachtet werden. Die kleinsten NRMSE-Werte weisen KNN mit zwei Hidden-Neuronen auf. Die Konstellation mit sechs Inputparametern und zwei Hidden-Neuronen (6-2-1 KNN) hat den kleinsten Median sämtlicher Konstellationen (rote Line) und entspricht somit dem best-fit-Modell. Die 10-2-1 KNN- und 4-2-1 KNN-Konstellationen weisen einen geringfügig grösseren NRMSE-Median auf. Währendem sich die Streuung der Mediane der verschiedenen Konstellationen mit gleicher Anzahl Hidden-Neuronen im Bereich von $\pm 10\%$ bewegt, ist die Streuung mit denselben Inputparametern, jedoch unterschiedlicher Anzahl an Hidden-Neuronen bis zu $\pm 50\%$ (z.B. Median 10-2-1 zu 10-8-1). Die unterschiedliche Güte, die auf unterschiedliche Startgewichte zurückzuführen ist, bewegt sich maximal zwischen $\sim 230\%$ bis 130% (9-8-1 KNN) und minimal zwischen $\sim 135\%$ bis 120% (9-2-1). Die Streuung der Güte aufgrund der Startgewichte steigt mit der Anzahl an Gewichten im KNN.

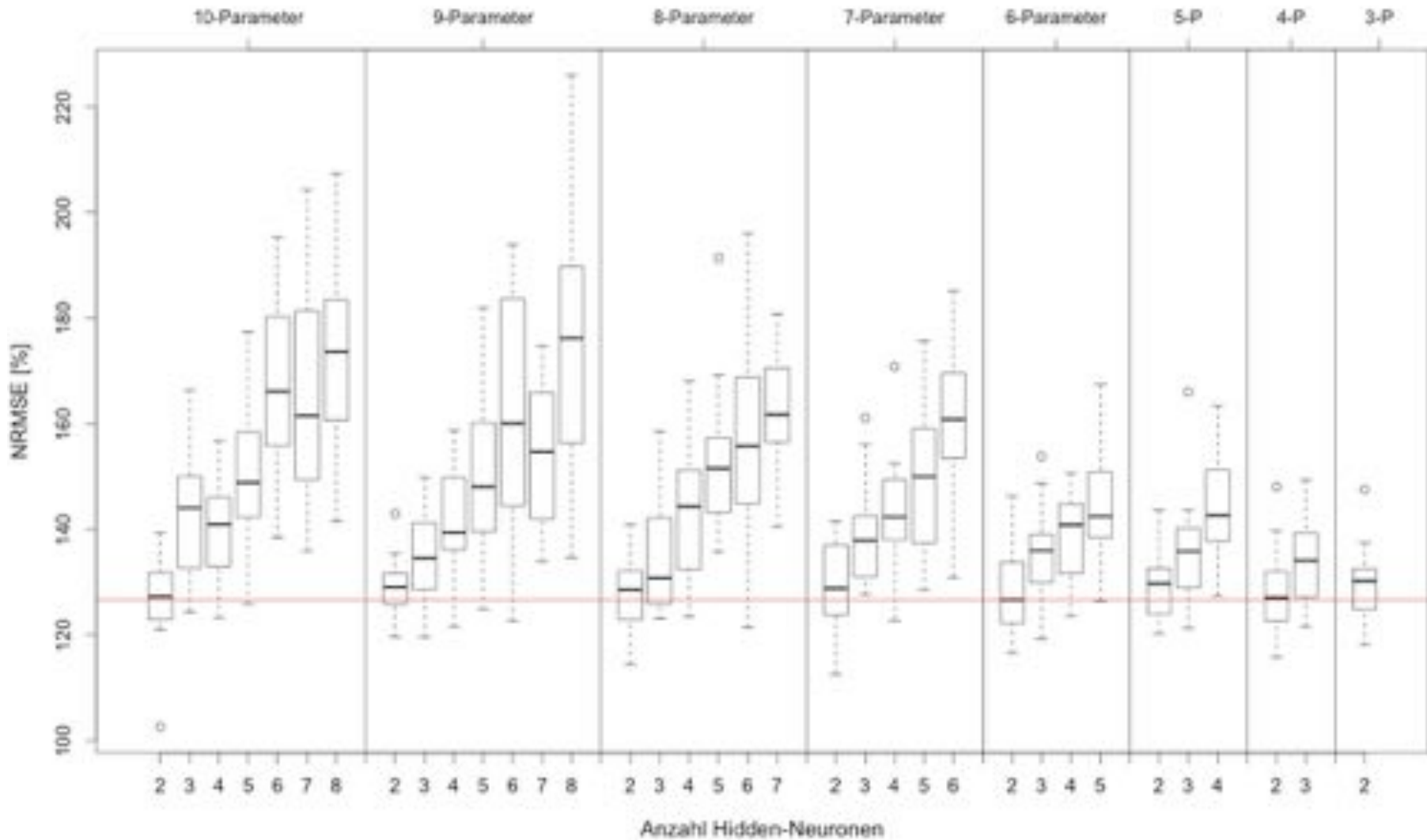


Abbildung 4-26: Wrapper-Ansatz kombiniert mit einer Hidden-Neuronen-Variation. Die Netzwerküte wird für sämtliche Netzwerkonstellationen je 20 mal mit unterschiedlichen Startgewichten berechnet (Boxplot $N=20$). Die rote Linie zeigt das Median-Niveau des best-fit-Modells (6-2-1 KNN) an.

best-fit-Modell „Volumen“

Gemäss Abbildung 4-26 entspricht das KNN 6-2-1 mit einer mittleren Güte von ~125% Abweichung von Modell zu Messung (NRMSE) dem best-fit-Modell. Das Bestimmtheitsmass zwischen Modell und Messung entspricht $r^2=0.16$ und der Nash-Sutcliffe-efficiency Koeffizient ist gleich $NSE=-0.99$. Das Modell verwendet eine sigmoide Aktivitätsfunktion und zwei Hidden-Neuronen. Folgende Inputparameter werden im Modell verwendet.

- **maxH [m.ü.M]:** Maximale Höhe des EZG
- **TLM_sed_ch [%]:** Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über Lockergestein
- **ptotmean [mm]:** Niederschlagssumme des Ereignistages und 19 Tagen vor dem Ereignis
- **p16_17 [mm]:** Niederschlagssumme des 16 und 17 Tages vor dem Ereignis
- **Hamean [mm]:** Mittlerer jährlicher Gebietsniederschlag.
- **TLM_rock_ch [%]:** Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über Fels

In Abbildung 4-27 ist der Zusammenhang zwischen der Anzahl an Iterationen und der NRMSE [%] für den Validierungs- und Trainingsdatensatz für das best-fit-KNN abgebildet. In der Abbildung ist zu erkennen, dass nach einer Iteration die Validierungsgüte im Mittel (die Startgewichte werden variiert und Mittelwerte aus den Durchläufen gebildet) minimal ist. Weiter ist zu erkennen, dass die Validierungsgüte vor der ersten Iteration kleiner ist (NRMSE grösser) als beim Trainingsdatensatz vor der ersten Iteration. Die Güte vor der ersten Iteration ist direkt abhängig von der zufälligen Verteilung der Startgewichte.

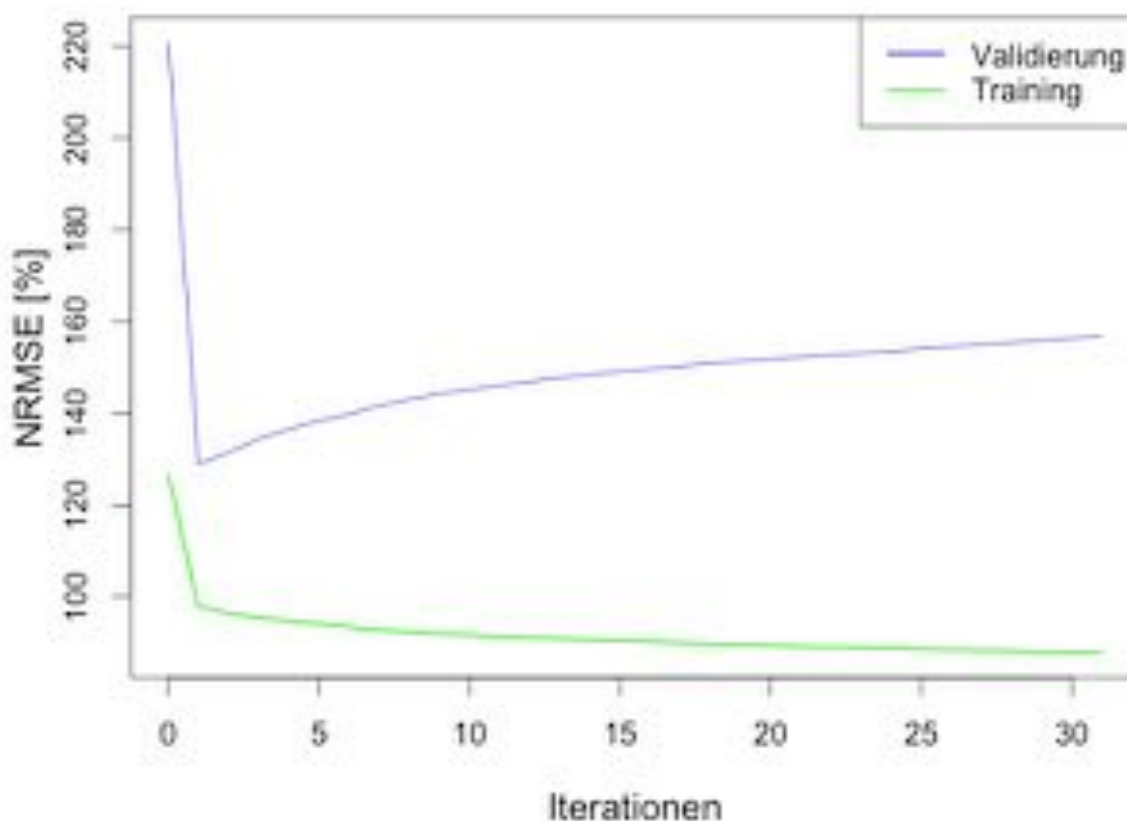


Abbildung 4-27: Zusammenhang zwischen Anzahl Iterationen und der Güte der KNN.

In Abbildung 4-28 ist ein Vergleich des best-fit-KNN mit den Ansätzen von Kronfeller-Kraus (1982) und Zeller (1985) dargestellt. Dafür werden die drei Modelle hinsichtlich sämtlicher 100 Wildbäche angewendet. Die Resultate für das best-fit-Modell werden mithilfe der k-fold-cross Validierung berechnet (vgl. Kapitel 3.5.1). Die Ergebnisse der Modelle werden den beobachteten Feststoffvolumina gegenübergestellt. Die Ansätze nach Kronfeller-Kraus (1982) und Zeller (1985) schätzen das transportierte Feststoffvolumen für die meisten Wildbäche grösser als das beobachtete Feststoffvolumen. Die Schätzungen nach Kronfeller-Kraus (1982) für die sechs Wildbäche mit den grössten Feststoffvolumina weisen eine Abweichung von <100% von den beobachteten Feststoffvolumina auf. Das KNN 6-2-1 unterschätzt die beobachteten Feststoffvolumina in diesem Bereich um mehrere Grössenordnungen.

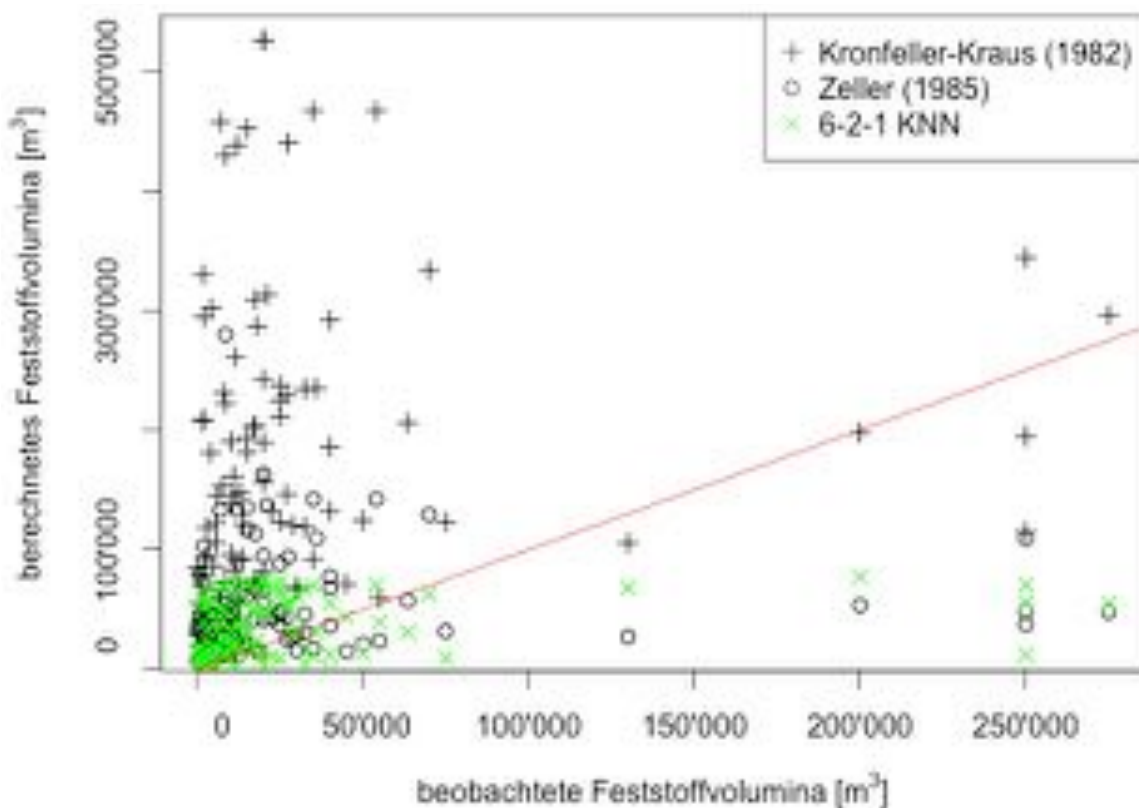


Abbildung 4-28: Vergleich der Validierungsergebnisse des best-fit-KNN mit den Ansätzen nach Kronfeller-Kraus (1982) und Zeller (1985) anhand der ausgewählten 100 Wildbacheinzugsgebiete. Die Validierung wird mithilfe von k-fold cross Validierung an sämtlichen Einzugsgebieten durchgeführt. Die rote Linie entspricht der optimalen Übereinstimmung von Modell und Messung.

4.3.2 Modell „Klassen“

Die Klassierung der 100 Feststoffvolumina wird nach den Quantilsgrenzen und sogenannten „natural breaks“ vorgenommen (vgl. Kapitel 3.5.2). Dabei werden jeweils vier Klassen gebildet. Die Klassengrenzen nach den Quantilen ist in der Legende zur Abbildung 4-29 definiert. In den Klammern ist jeweils abgebildet, wie viele Wildbäche in die der jeweiligen Klassen zusammengefasst sind. Der Boxplot zeigt die Verteilung der Feststoffvolumina. Diese Streuung der Feststoffvolumina ist in der vierten Klasse im Verhältnis zu den übrigen Klassen sehr gross. In der vierten Klasse befinden sich somit Wildbäche mit sehr unterschiedlicher Charakteristika (grosse Streuung der Feststoffvolumina). Damit das KNN jedoch Muster zwischen den Klassen und den Parametern der Wildbäche ausmachen kann, muss die Streuung möglichst gering sein. Die Klassengrenzen nach dem Jenks-Caspell-Algorithmus (Jenks & Caspell 1971) sind in Abbildung 4-30 dargestellt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Streuung in der vierten Gruppe geringer ist als bei den den Klassengrenzen nach den Quantilen. Im folgenden werden die Klassengrenzen nach dem Jenks-Caspell-Algorithmus (Jenks & Caspell 1971) verwendet (vgl. Diskussion Kapitel 5.2.1).

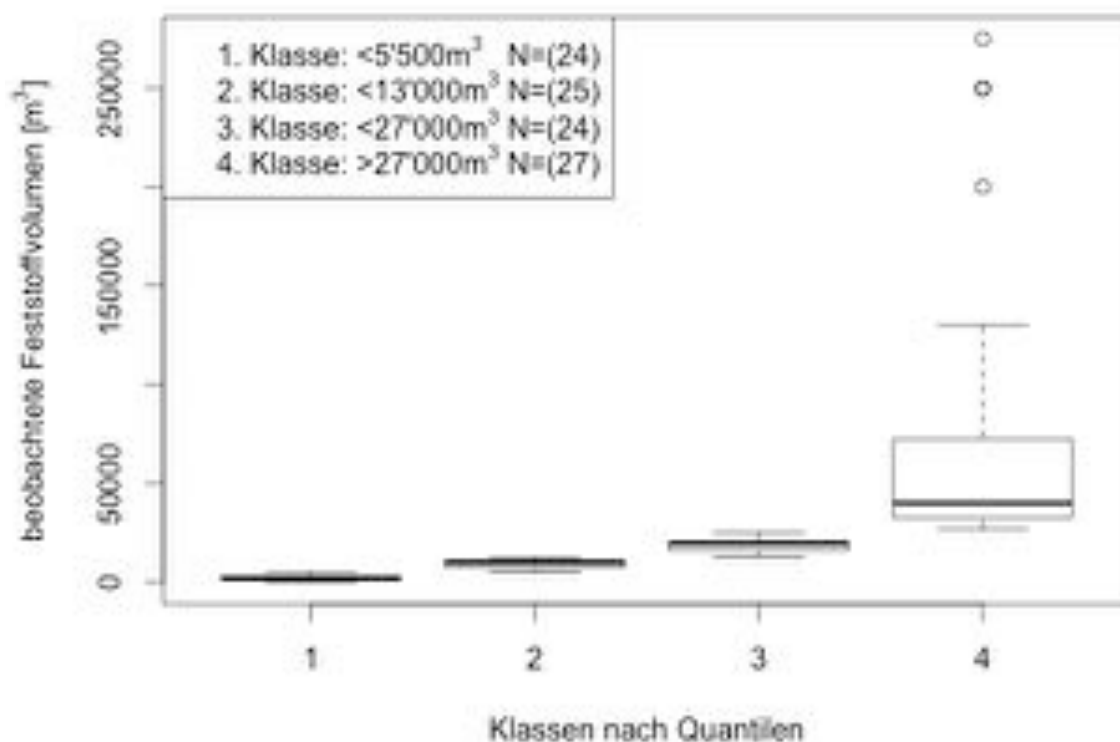


Abbildung 4-29: Klasseneinteilung der 100 Feststoffvolumina nach Quantilen.

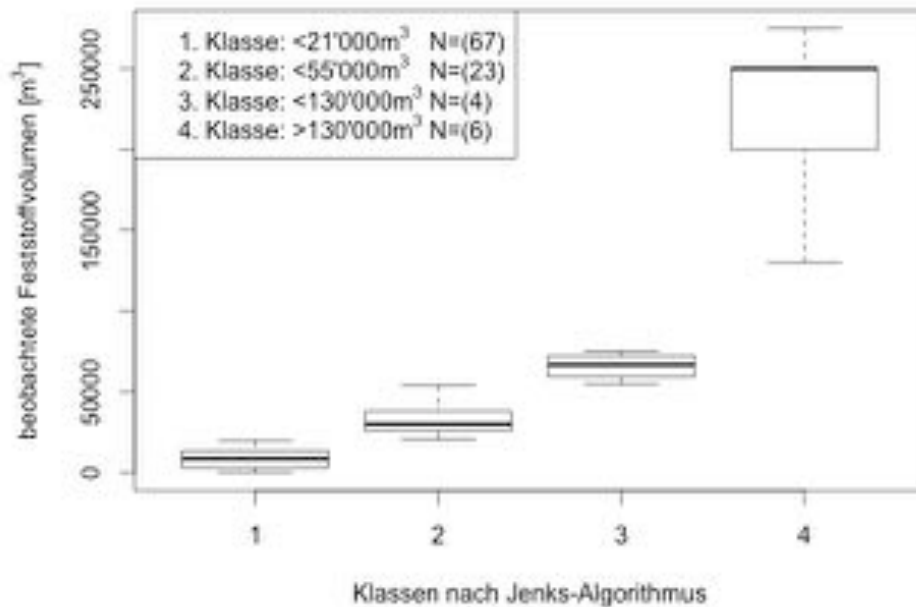


Abbildung 4-30: Klasseneinteilung der 100 Feststoffvolumina nach dem Jenks-Caspell-Algorithmus

Die optimale Anzahl an Hidden-Neuronen wird durch die Variation der Anzahl Hidden-Neuronen und dem Notieren der jeweiligen Güte des KNN bestimmt (vgl. 3.5.2). In Abbildung 4-31 sind die Boxplots der verschiedenen KNN-Güten für zufällige Inputparameterkonstellationen (mit jeweils zehn aus 34 Parametern) abgebildet. Die Güte entspricht dem Anteil an korrekten Klassierungen des Validierungsdatensatzes. Werden sämtliche zehn Wildbäche des Validierungsdatensatzes korrekt klassifiziert ist die Güte 100%. Für die Bestimmung der Validierungsgüte wird eine 10-fold cross Validierung verwendet. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Netzkonstellationen mit zwei Hidden-Neuronen im Mittel die beste Güte aufweisen. Aus diesem Grund wird die Reduktionsmethoden 1 mit zwei Hidden-Neuronen durchgeführt. In der Abbildung ist weiter zu erkennen, dass die Streuung der Güte bei fixierter Anzahl Hidden-Neuronen bis zu 40% beträgt.

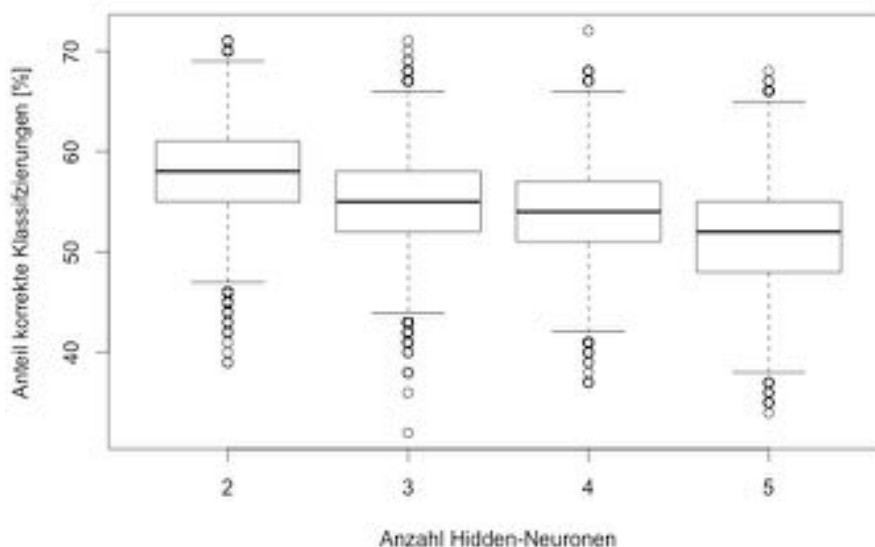


Abbildung 4-31: Bestimmung der optimalen Anzahl Hidden-Neuronen für das Modell „Volumen“.

Für die Reduktion der eingangs 34 Parameter auf zehn Parameter wird die Reduktionsmethode 1 angewendet. Aus den 100'000 KNN mit zufälligen Inputparameterkonstellationen (zehn Parameter und zwei Hidden-Neuronen vgl. Kapitel 3.5.2) werden die 100 KNN mit den grössten Güten nach der Häufigkeit ihrer Inputparameter analysiert (vgl. Abbildung 3-10). Das Resultat dieser Analyse ist in Abbildung 4-32 dargestellt. Dem Histogramm ist zu entnehmen, dass in den 100 KNN mit den grössten Güten (aus 100'000 KNN) in über 50 Fällen die Inputparameter „TLM_glac“ und „geo_med_ch“ vertreten sind. Die Parameter „mH“, „maxH“, „geo_easy“, „p8_9“ und „R“ sind in weniger als 20 KNN vertreten. Bei einem gleichmässigen Einfluss der Parameter müssten sämtliche Parameter 30 Mal vorhanden sein ($10/34 \cdot 100$). Für die Reduktionsmethode 2 werden die zehn Parameter mit den grössten Häufigkeiten verwendet. Diese Parameter befinden sich auf der x-Achse links bis und mit dem Parameter der Gerinnelänge (ch_L).

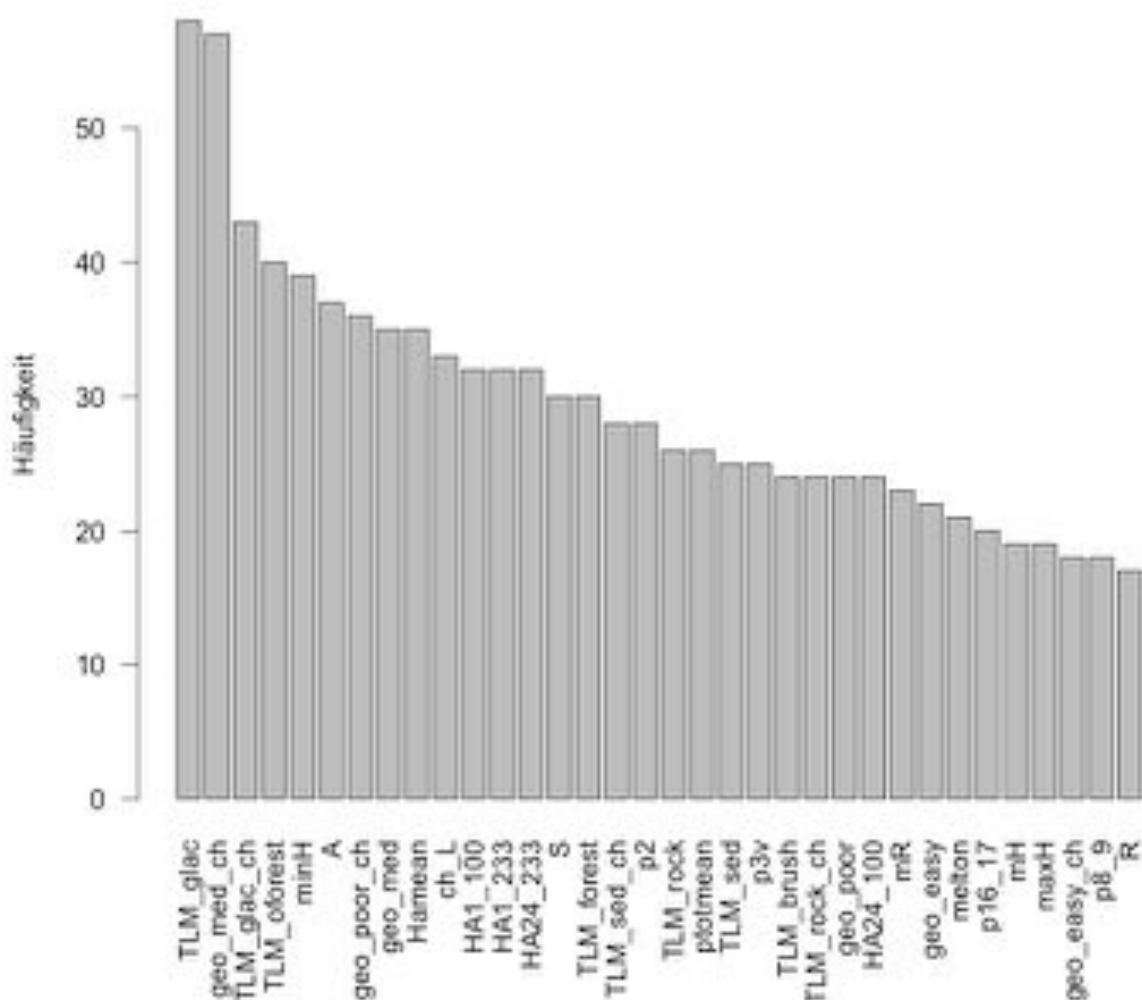


Abbildung 4-32: Histogramm der Reduktionsmethode 1. Dargestellt ist die Häufigkeit der Input-Parameter der 100 KNN mit der grössten Güten aus 100'000 trainierten KNN mit zufälligen Inputparameterkonstellationen.

Das Resultat der Häufigkeitsanalyse der zehn KNN anstatt der 100 KNN mit den grössten Güten (aus 100'000 KNN) ist in Abbildung 4-33 abgebildet. Die Interpretation erfolgt identisch zur Abbildung 4-32, mit dem Unterschied, dass bei einer gleichmässigen Verteilung, sämtliche Parameter lediglich drei Mal vertreten sind ($10/34 \cdot 10$). In den zehn KNN mit den grössten Güten (aus 100'000 KNN) ist der Parameter „geo_med_ch“ siebenfach, die Parameter „S“, geo_poor_ch“ und „p2“ sechsfach vertreten. Für die Reduktionsmethode 2 werden die zehn häufigsten Parameter aus der Abbildung 4-32 verwendet.

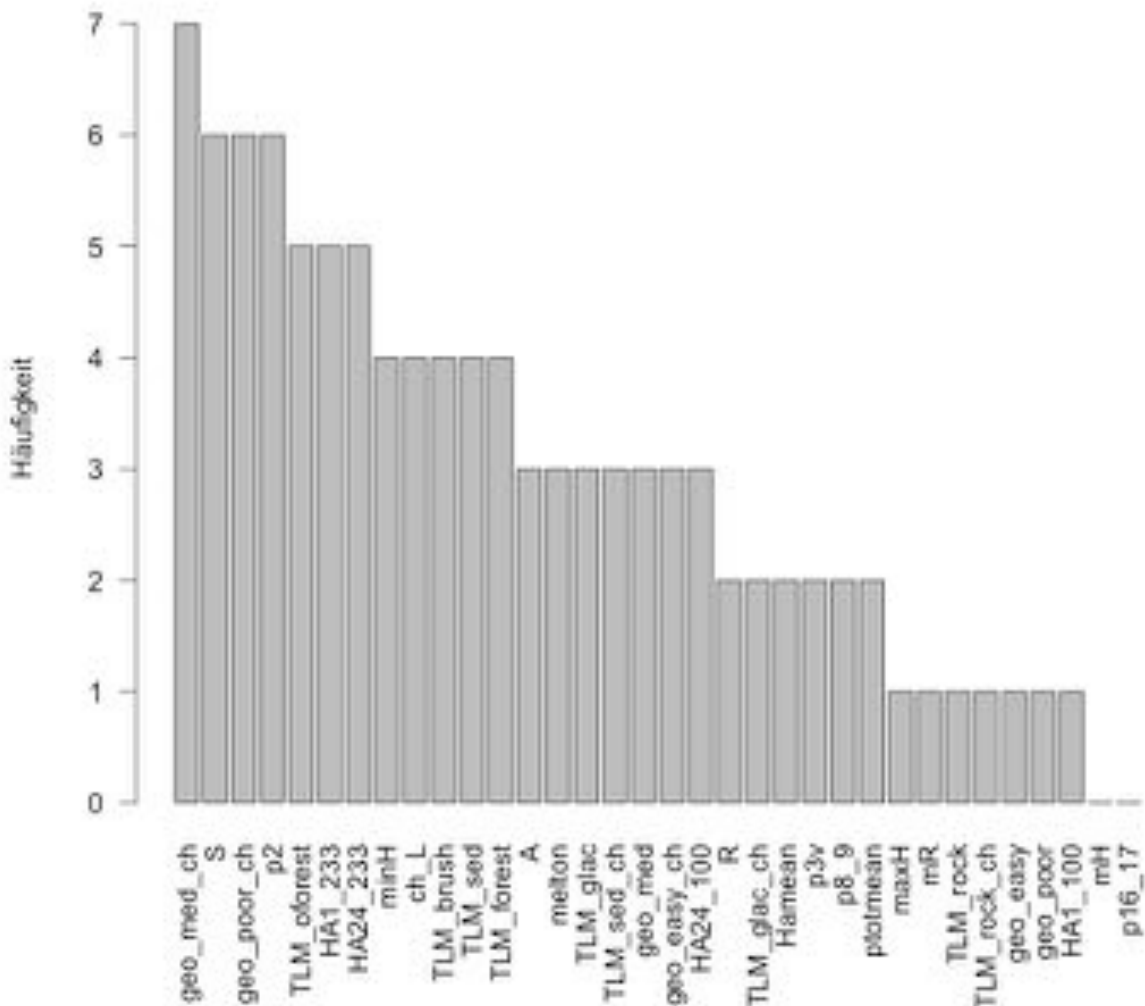


Abbildung 4-33: Histogramm der Reduktionsmethode 1. Dargestellt ist die Häufigkeit der Input-Parameter der zehn KNN mit der grössten Güten aus 100'000 trainierten KNN mit zufälligen Inputparameterkonstellationen.

Die Resultate der Reduktionsmethode 2 sind in der Tabelle 4-5 zusammengefasst. Der Ablauf der Methode wird in Abbildung 3-11 erläutert. Die Reduktion wird bezogen auf die zehn Parameter aus Reduktionsmethode 1 so lange angewendet, bis das ursprüngliche Inputparameterset auf drei Inputparameter reduziert ist. Im dritten Durchgang werden zwei Parameter (TLM_glac_ch und Hamean) reduziert, weil das KNN dieselbe Güte aufweist unabhängig davon, ob der Parameter TLM_glac_ch und Hamean nicht berücksichtigt werden. Die Anzahl Hidden-Neuronen werden für sämtliche Konstellationen erneut zwischen zwei und fünf Neuronen variiert. In Spalte vier ist die optimale Anzahl an Hidden-Neuronen für die entsprechende Konstellation notiert. Die KNN mit fünf oder mehr Inputparameter haben die grösste Netzgüte, wenn zwei Hidden-Neuronen verwendet werden, die KNN mit vier und drei Parameter bei der Verwendung von drei Hidden-Neuronen. In der Spalte drei ist die Güte in Prozent korrekter Klassierungen für die entsprechende Konstellation angegeben. Die maximale Güte weist das KNN mit fünf Parameter (71%) auf. Dieses Modell entspricht dem best-fit-Modell „Klassen“.

Tabelle 4-5: Resultat der Reduktionsmethode 2. In den Spalten sind die Durchgänge der Reduktionsmethode 2 abgebildet. Die grünen Haken geben an, welche Inputparameter bei den entsprechenden Durchgängen berücksichtigt werden. Die Güte entspricht der Anzahl korrekten Klassierungen der Validierungsdaten.

Durchgänge Reduktion	0	1	2	3	4	5	6
Input-parameter	10 Parameter	9 Parameter	8 Parameter	6 Parameter	5 Parameter	4 Parameter	3 Parameter
Güte [%]	68	69	67	67	71	69	67
Hidden-N	2	2	2	2	2	3	3
TLM_glac	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
geo_med_ch	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
TLM_glac_ch	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
TLM_oforest	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
minH	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
A	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
geo_poor_ch	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
geo_med	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Hamean	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
ch_L	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

best-fit-Modell „Klassen“

Das best-fit-Modell hat eine 5-2-4 Netztopologie (vgl. Abbildung 4-34) und zwei Bias-Neuronen (B1 und B2). Die Liniendicke zwischen den Neuronen ist proportional zu dem Betrag der Gewichte zwischen den beiden Neuronen. Eine schwarze Linie bedeutet, dass das Gewicht einen positiven Wert aufweist, graue Linien stehen für negative Werte. Die Inputparameter umfassen zwei Parameter der morphometrischen Parameter (A = Fläche des Einzugsgebietes und minH = minimale Höhe des EZG), einen Parameter der morphometrischen Gerinneparameter (ch_L=Gerinnelänge) und je eine Parameter zur Geologie und der Bodenbedeckung (TLM_oforest = Anteil offener Wald im Einzugsgebiet und geo_poor_ch= Anteil Gerinne über leicht Verwitterbares Gestein). Das best-fit-Modell „Klassen“ hat eine Güte von 71% an korrekten Klassierungen (vgl. Tabelle 4-5). Die Güte wird für die zehn Validierungsbäche berechnet. Allerdings muss erwähnt werden, dass mithilfe einer 10-fold cross Validierung die Güte über sämtliche 100 Wildbäche analysiert wird (vgl. Kapitel 3.5.1).

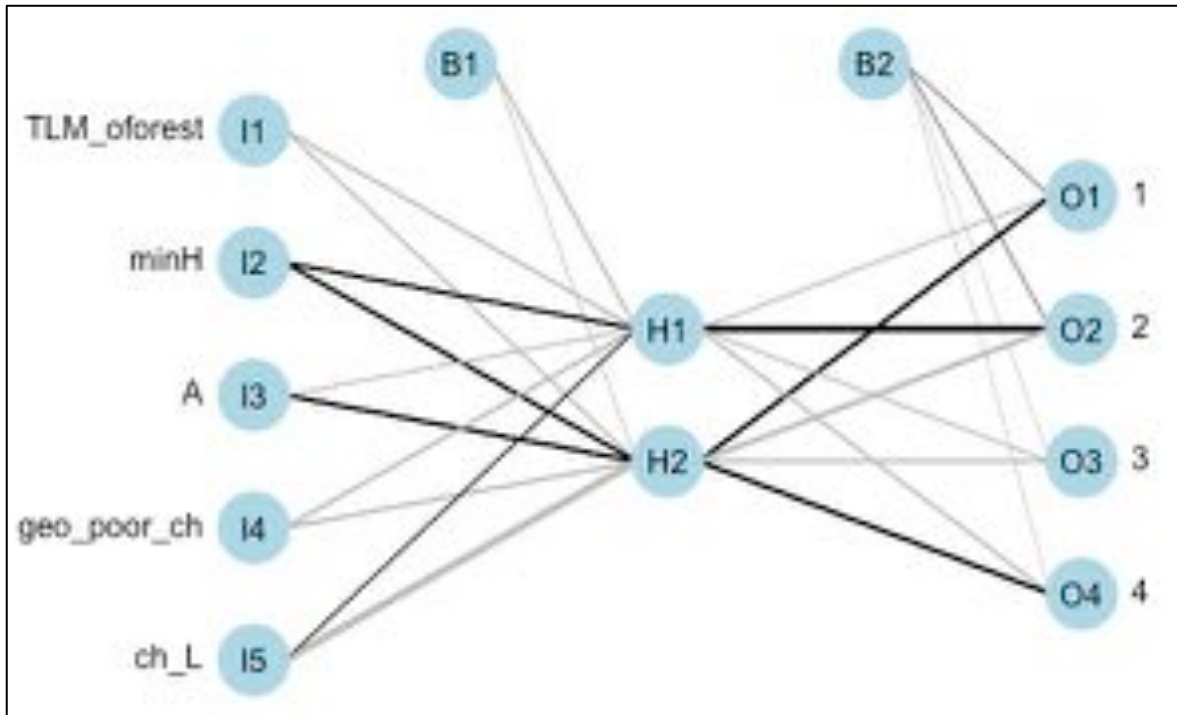


Abbildung 4-34: Visualisierung des best-fit-Modells „Klassen“. Das KNN hat fünf Inputparameter, zwei Hidden-Neuronen und vier Output-Neuronen. Graue Linien = negative Gewichte, schwarze Linien = positive Gewichte. Dünne Linie = Betrag des Gewichtes im Verhältnis klein, dicke Linie = Betrag des Gewichtes im Verhältnis gross.

Entspricht die Güte der Anzahl korrekter Klassierungen, können keine Aussagen zur Leistungsfähigkeit des Ansatzes bezüglich der Prognose der einzelnen Klassen gemacht werden. Aus diesem Grund werden die Resultate in der Konfusionsmatrix dargestellt (vgl. Abbildung 4-35). In der Abbildung ist zu erkennen, dass 57 Wildbäche der Klasse 1 korrekt klassifiziert werden und zehn Wildbäche der Klasse 1 fälschlicherweise in die Klasse 2 eingeteilt werden (vgl. erste Zeile). Das KNN 5-2-4 klassifiziert zudem 14 von 23 Wildbächen der Klasse 2 korrekt zu. Drei Wildbäche der Klasse 3 werden als Klasse 1 und einer wird als Klasse 2 Bach betitelt. Die Wildbäche der Klasse 4 werden als Wildbäche der Klasse 1 oder Klasse 2 klassifiziert. Das Modell teilt somit keinen Wildbache der Klasse 3 oder 4 korrekt zu.

		Prognose 5-2-4 KNN			
		KI	1	2	3
Validierungsdaten	1	57	10	0	0
	2	9	14	0	0
	3	3	1	0	0
	4	5	1	0	0

Abbildung 4-35: Konfusionsmatrix des best-fit-Modell „Klassen“

5 Diskussion

Zugunsten der Übersichtlichkeit wird dieses Kapitel ähnlich wie das vorhergegangene Kapitel „Ergebnisse“ gegliedert. In einem ersten Teil wird das EZG/GP-Tool, welches für die Datenerhebung verwendet wird, kritisch beurteilt. Dabei wird ein Schwerpunkt auf die Vor- und Nachteile dieses Tools gelegt und erarbeitete Erfahrungen werden wiedergegeben. Weiter wird die verwendete Methode „deskriptiven Statistik“ (vgl. Kapitel 4.2) analysiert und kritisch diskutiert. Die Diskussion der Datenauswertung mithilfe der KNN wird in drei Kapiteln gegliedert: In den ersten beiden Kapiteln wird je ein KNN-Ansatz diskutiert. Dabei werden auch Zwischenergebnisse der Modellgenerierung aufgegriffen. Anschliessend folgt eine Synthese der Erkenntnisse und eine kritische Betrachtung der allfälligen Problemen der Datenauswertung. Zudem werden die wichtigsten Erkenntnisse, die bezüglich der Bedeutung der erhobenen Parameter dahingehend diskutiert, ob diese für die Untersuchung der Hypothese von Nutzen waren oder nicht.

5.1 EZG/GP-Tool

Auf die Forschungsfrage A1) „Wie kann die grosse Anzahl an Einzugsgebiets- und Gerinneparameter systematisch, flächendeckend und effizient erhoben werden?“ wird in der vorliegenden Arbeit das EZG/GP-Tool als mögliche Antwort vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein GIS-Tool mit einer grafischen Benutzeroberfläche, das unter Eingabe zahlreicher Geodaten (vgl. Kapitel 3.2) eine grosse Anzahl an Einzugs- und Gerinneparameter (vgl. Kapitel 3.3) berechnet. Das Tool ist aufgrund der Datengrundlage für Wildbäche in der gesamten Schweiz einsetzbar. Ein vergleichbares GIS-Tool für die automatisierte Erhebung von Einzugsgebiets- und Gerinneparameter für Wildbäche ist dem Autor nicht bekannt. Das Tool basiert auf einer Mischung von SAGA-GIS-Algorithmen und einem R-Skript. Neben den SAGA-GIS-Algorithmen, kann auch im R-Skript auf bestehende GIS-Algorithmen zurückgegriffen werden. Für die Bestimmung Hauptgerinnes sowie der Rasterzelle des Gebietsausflusses werden Algorithmen entwickelt (vgl. Anhang C) Die Verknüpfung der SAGA-GIS-Algorithmen sowie die Erstellung der Benutzeroberfläche findet in QGIS statt. Der Zugang zum Tool für weitere Anwendende, wird durch die Verwendung von Open-Source Programmen vereinfacht. Durch die Entwicklung des Tools werden folgende Erfahrungen generiert:

- R eignet sich um Geoalgorithmen zu entwickeln, verknüpfen und anzuwenden, insbesondere bei der Rasterverarbeitung bietet die Software grosse Vorteile gegenüber herkömmlicher GIS-Software.
- Für die Verknüpfung des R-Skripts mit QGIS bewährt sich das QGIS Python-Plugin „Processing“ mit einer eigenen Oberfläche für die Integration von R-Skripts.
- Für die Lösung von spezifischen Problemen wie der Definition des Hauptgerinnes oder der Suche nach dem sogenannten „Pour-point“ (vgl. Anhang C) ist die Entwicklung eines spezifischen Algorithmus häufig zweckmässiger als die Integration und anschliessende Anpassung eines bestehenden Algorithmus.

Die Anwendung des EZG/GP-Tools für die Erhebung der Einzugsgebiets- und Gerinneparameter der 100 Wildbäche ermöglicht eine laufende Anpassung des Tools. Dabei können laufend Fehler und Mängel behoben werden, indem die Parameter

stichprobenartig mithilfe unabhängiger manueller GIS-Erhebungen oder mit Literaturwerten aus den Ereignisdokumentationen überprüft werden. Die manuelle GIS-Erhebung dient auch der Überprüfung der Effizienz des EZG/GP-Tools. Für die manuelle Erhebung der Parameter für ein Einzugsgebiet benötigte der Autor rund einen Arbeitstag (vgl. Kapitel 3.3). Dabei muss beachtet werden, dass der zeitliche Aufwand für die manuelle Erhebung stark abhängig ist von den GIS-Vorkenntnissen. Der minimale zeitliche Aufwand wird auf einen Arbeitstag geschätzt, weil der Autor auch bei Kenntnissen über sämtliche notwendigen GIS-Algorithmen in etwa so lange benötigte.

Ein Nachteil des EZG/GP-Tools ist die Abhängigkeit von den fünf spezifischen Inputgeodaten (DTM, geotec, RhiresD, swissTLM^{3D} und HADES vgl. Kapitel 3.2), welche nicht frei verfügbar sind. Eine Anwendung des EZG/GP-Tools ohne den vollständigen Satz an Geodaten ist nicht möglich. Während diese Geodaten für Forschungszwecke in der Regel verfügbar sind, müssen die Geodaten für eine Anwendung in der Privatwirtschaft erworben werden. Ein weiter Nachteil ist, dass die R-, SAGA- und QGIS-Funktionen und Algorithmen, auf welche das EZG/GP-Tool zugreift, an Programmversionen gebunden sind. Bei einem Update oder Anpassungen der Software ist es möglich, dass Komplikationen bei der Anwendung des EZG/GP-Tools auftreten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das EZG/GP-Tool eine einzigartige Möglichkeit bietet, Einzugsgebiets- und Gerinneparameter systematisch, flächendeckend und effizient für Schweizer Wildbäche zu erheben. Die Unsicherheiten der erhobenen Parameter setzt sich aus den Unsicherheiten der Inputgeodaten (DTM, geotec, RhiresD, swissTLM^{3D} und HADES vgl. Kapitel 3.2) sowie der Erhebungsmethoden (vgl. Anhang C) zusammen. Für die Quantifizierung der Unsicherheiten der erhobenen Parameter wird im Rahmen dieser Arbeit keine Fehlerrechnung, respektive unabhängige GIS- oder Feld-Überprüfung der Parameter durchgeführt.

5.2 Deskriptive Statistik

Für die Darstellung der Feststoffvolumina und der erhobenen Parametern werden Methoden der deskriptiven Statistik verwendet. Diese Untersuchungen ermöglichen Zusammenhänge zwischen den Parametern und der Zielgrösse zu erkennen und damit einen Beitrag zur Beantwortung der Forschungsfrage A2 zu generieren. Um die Parameter hinsichtlich ihrer Bedeutung bewerten zu können, muss die mögliche Redundanz mit weiteren Parametern berücksichtigt werden.

Der Boxplot der Feststoffvolumina der 100 untersuchten Wildbächen zeigt eine rechtsschiefe Verteilung mit neun Ausreissern (ausserhalb des Whiskers) (vgl. Abbildung 4-2). Anhand dieser Verteilung wird sichtbar, dass diese neun Wildbäche nicht repräsentativ hinsichtlich des Datensatzes sind. Diese Ausreisser können eine statistische Untersuchung des Datensatzes massgeblich beeinflussen. Mithilfe der Parameter-Streudiagramme bezogen auf die Zielgrösse (Feststoffvolumina) (vgl. sämtliche Streudiagramme-Matrizen in Kapitel 4.2, erste Zeile) kann erkannt werden, dass bei sämtlichen Parametern eine starke Streuung zwischen den einzelnen Parametern und den Feststoffvolumina besteht. Diese Streuung zwischen Feststoffvolumen und einzelnen Parametern wird in weiteren Studien ebenfalls beobachtet (z.B. Gertsch (2009); Grasso et al. (2010); Rickenmann & Koschni (2010)). Visuell kann dabei kein Zusammenhang

erkannt werden. Bei sämtlichen Streudiagrammen sind jedoch die Ausreisser der Feststoffvolumina (vgl. Kapitel 4.2) deutlich sichtbar, was eine detailliertere Auswertung der Streudiagramme verhindert. Um den Einfluss der Ausreisser der Feststoffvolumina auf die Auswertung der Streudiagramme darzustellen, ist in der Abbildung das Streudiagramm „Feststoffvolumina vs. Anteil Lockermaterial“ mit (links) und ohne Ausreisser (rechts) dargestellt. Während in der Abbildung mit den Ausreissern (links) der Fokus auf den Ausreissern liegt, lässt sich in der Abbildung ohne Ausreisser (rechts) eine Tendenz zu höheren Feststoffvolumina bei steigendem Anteil an Lockermaterial im Einzugsgebiet feststellen. Bei einer Prüfung eines linearen Zusammenhangs (Korrelation) zwischen dem Feststoffvolumina Feststoffvolumen und dem Anteil Lockermaterial (mit Ausreissern) mit einem t-Test, kann festgestellt werden, dass ein statistisch signifikanter Zusammenhang (Irrtumswahrscheinlichkeit $p=5\%$ vgl. Statista 2015b) zwischen den beiden Grössen besteht. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass anhand der Streudiagramme zwischen der Zielgrösse und den Parametern keine Parameter als besonders zentral für die Schätzung der Zielgrösse hervorgehoben werden können. Zum einen, da bei sämtlichen Streudiagrammen eine grosse Streuung zu beobachten ist und zum anderen, da die neun Ausreisser das Erscheinungsbild der Streudiagramme beeinflussen (vgl. Abbildung 5-1). Bei der Analyse der Streudiagramme können auch statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen den Parametern und der Zielgrösse nicht identifiziert werden

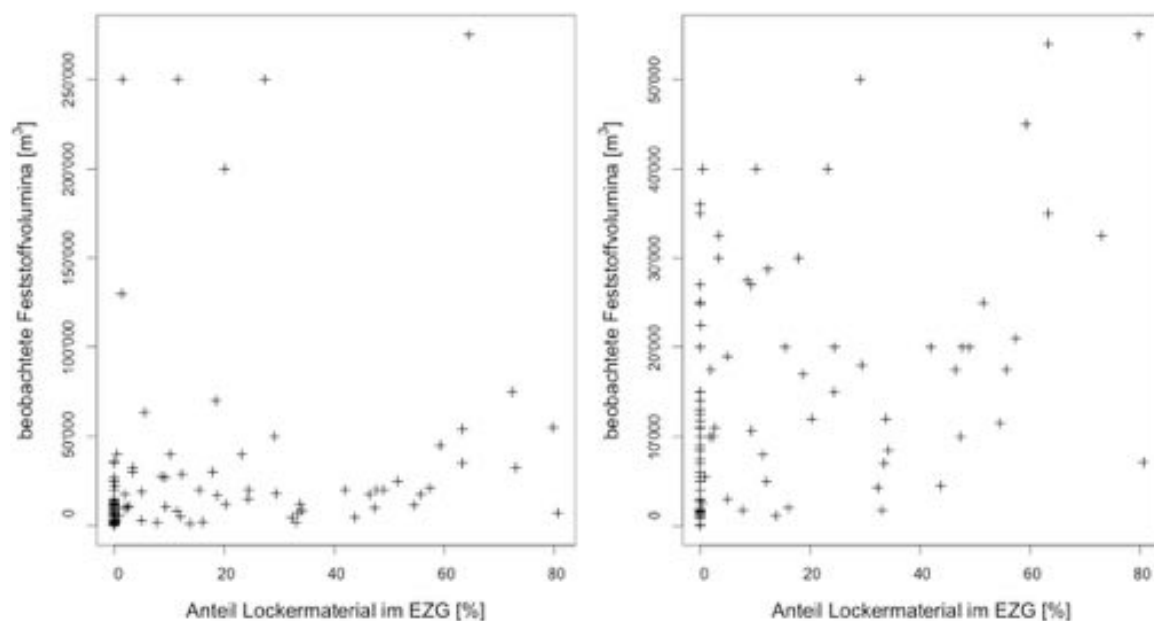


Abbildung 5-1: Streudiagramm Feststoffvolumina vs. Anteil Lockermaterial. (links mit Ausreisser, rechts ohne Ausreisser)

Werden die Streudiagramme zwischen den Parametern betrachtet, können bei einigen Parameterpaaren Zusammenhänge identifiziert werden. So korreliert zum Beispiel die minimale mit der maximalen Höhe [m.ü.M] des Einzugsgebietes oder die Gerinneneigung [m] mit der Gerinnerauheit [m] (vgl. Abbildung 4-3 und Abbildung 4-5). Neben morphometrischen Parametern existieren auch Korrelationen zwischen Parametern zur Niederschlagsstatistik oder zur Bodenbedeckung und zu den geologischen Parametern. Die Streudiagramme weisen somit auf eine grosse Anzahl an redundanten Variablen hin.

Für die Erstellung eines statistischen Modells liefern diese Variablen keinen Mehrwert und müssen deshalb reduziert werden. Für die Reduktion der 34 Parameter muss deshalb eine Methode angewendet werden, welche redundante Parameter ausschliesst.

Zusätzlich zum Niederschlag am Ereignistag wird der Niederschlag, der an den 19 Tagen vor dem Ereignis gefallen ist, erhoben. Durch diese Erhebung stehen 20 Parameter mit Niederschlagsdaten zur Verfügung. Um diese Parameter zu reduzieren, wird eine Korrelationsanalyse durchgeführt (vgl. Kapitel 4.2). Dabei wird untersucht, welche Niederschläge den stärksten linearen Zusammenhang mit der Zielgrösse aufweisen. Der Tag vor dem Ereignis weist dabei den grössten Korrelationskoeffizienten auf (vgl. Abbildung 4-17). Für das transportierte Feststoffvolumen ist somit die Ausprägung des Niederschlages am Vortag des Ereignisses von grösserer Bedeutung, als die Niederschläge des Ereignistages. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass eine Unsicherheit bezüglich der Definition des Ereignistages besteht. Für die Analyse wird der Ereignistag der Ereignisdokumentation (vgl. Kapitel 3.1) entnommen. Dabei wird nicht unterschieden, ob das Ereignis zu Beginn oder am Ende eines Tages aufgetreten ist. Für die Definitionen der weiteren Parameter werden Niederschlagssummen von zwei oder drei aufeinanderfolgenden Tagen mit einem hohen Korrelationskoeffizient erhoben. Die Summe der Tage 16 und 17 sowie acht und neun weisen einen verhältnismässig hohen Korrelationskoeffizient mit dem Feststoffvolumen auf. Durch die Bildung des Niederschlagsmittelwertes sämtlicher Tage über die 100 Wildbacheinzugsgebiete (vgl. Abbildung 4-18) kann erkannt werden, dass an diesen Tagen insgesamt auch hohe Niederschlagswerte gemessen werden. Diese Beobachtung lässt darauf schliessen, dass verhältnismässig hohe Feststoffvolumina transportiert werden, wenn in zwei Abständen von rund acht Tagen vor dem Ereignis Niederschläge auftreten und dass die transportierten Feststoffvolumina umso grösser sind, je stärker die Niederschläge ausfallen. Dieselbe Beobachtung gilt für die Niederschlagssumme für den Ereignistag und die beiden Tage vor dem Ereignis (p3v). Allerdings muss bemerkt werden, dass 41 der 100 Ereignisse am 22. oder 23. August 2005 stattgefunden haben und diese Beobachtung vorwiegend auf die aussergewöhnliche, metrologische Situation im August 2005 hinweist. Dabei wird die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, dass gerade diese metrologische Situation die überdurchschnittliche Dichte an Grossereignissen ausgelöst hat. Umbricht (2015) zeigt auf, dass der Niederschlag der ersten 48 Stunden eines Niederschlagsereignis für die Auslösung eines Murganges von Bedeutung ist. Ein Zusammenhang zwischen dem Vorregen und der Auslösung von Murgängen kann dabei nicht hergeleitet werden. Das Problem der Aggregation und Vorselektion der Parameter anhand des statistischen Zusammenhanges mit der Zielgrösse ist, dass dabei ein Overfitting entstehen kann. Dieses tritt durch die doppelte Verwendung der Zielgrösse im Bezug auf die Reduktion dieser Ereignisniederschlagsparameter auf. Die vorgestellten, reduzierten Niederschlagsparameter haben bei einer zweiten Reduktion durch die doppelte Verwendung einen „Vorsprung“ gegenüber den restlichen Parametern. Eine Möglichkeit, diese Problematik zu umgehen, wäre die Definition der Ereignisniederschläge anhand des Prozessverständnisses oder anhand von Literaturwerten. Die Boxplots der Parameter zeigen in der Regel rechtsschiefe Verteilungen sowie Ausreisser an, was bedeutet, dass einige Wildbäche der Verteilung (100 Wildbäche) eine stärkere Ausprägung eines Parameters aufweisen als die Mehrheit der untersuchten Wildbäche. Diese rechtsschiefe Verteilung ist in den meisten Fällen jedoch auf eine untere Grenze zurückzuführen. So ist zum Beispiel der prozentuale Anteil an Wald im Einzugsgebiet nie kleiner als null.

5.2.1 Modell „Volumen“

Für die Erstellung eines Modells, welche das Feststoffvolumen von Grossereignissen in Wildbächen mit einer verbesserten Güte als herkömmliche Ansätze schätzt, wird ein KNN trainiert. Um das umfassende Set, das ursprünglich 34 Einzugsgebiets- und Gerinneparameter umfasst, zu reduzieren, werden ein Filter- und ein Wrapperansatz in Serie verwendet (vgl. 3.5.2). Das Ziel der Reduktion ist die Bestimmung der wesentlichen Parameter für die Schätzung der Feststoffvolumina.

Durch den Filteransatz wird eine Rangliste der wesentlichen Parameter erstellt (vgl. Tabelle 4-4). Diese Rangliste wird durch den Parameter „maximale Höhe des Einzugsgebietes“ (maxH) [m.ü.M] angeführt. Der normalverteilte (vgl. Abbildung 4-4) Parameter weist einen Korrelationskoeffizienten von $r=0.2$ zur Zielgrösse auf. Der lineare Zusammenhang zwischen dem Parameter und dem Feststoffvolumen ist statistisch signifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit $<1\%$). In Zimmermann et al. (1997) wird der Zusammenhang zwischen der Murganggefahr und der Höhe des Einzugsgebietes diskutiert, zusätzlich verwendet Hampel (1980) in einem Ansatz zur Schätzung von Murenfrachten die minimale Höhe des Einzugsgebietes. Hingegen wird der Parameter maxH in keinem Ansatz zur Schätzung des Feststoffvolumens verwendet. Der Parameter korreliert zudem mit einem Korrelationskoeffizienten von $r=0.74$ mit dem prozentualen Anteil an Lockermaterial im Einzugsgebiet (TLM_sed). Dieser Zusammenhang bedeutet, dass der prozentuale Anteil von Lockermaterial in höher gelegenen Einzugsgebieten grösser ist als in tiefer gelegenen Einzugsgebiete. Weiter bedeutet ein Korrelationskoeffizient von $r=0.74$, dass es sich um redundante Parameter (vgl. 3.5.2) handelt und dass somit nicht beide Parameter in einem Modell berücksichtigt werden sollten.

Der Parameter TLM_sed_ch folgt in der Rangliste auf den Parameter maxH und weist den zweitgrössten Korrelationskoeffizient mit der Zielgrösse auf. Der Parameter beschreibt den prozentualen Anteil des Gerinnes über Lockermaterial im Einzugsgebiet. Jäggi (2013) weist in einer Untersuchung zur mittleren jährlichen Geschiebelieferung von Hochgebirgsbächen bereits auf einen statistischen Zusammenhang zwischen diesem Parameter und der Geschiebelieferung hin. Der Parameter basiert auf der gleichen Datengrundlage wie der Parameter TLM_sed und stellt ebenfalls eine Quantifizierung des Lockermaterials im Einzugsgebiet dar. Aufgrund der Ähnlichkeit der Parameter ist zu erwarten, dass ein statistischer Zusammenhang zwischen diesen beiden Parametern besteht. Das Bestimmtheitsmass von $r^2=0.3$ ($r=0.54$) zeigt jedoch, dass lediglich 30% der Varianz des einen Parameters mit dem anderen Parameter erklärt werden kann (Ernste 2009:73ff). Das Gerinne in einem Einzugsgebiet mit einem hohen Anteil an Lockermaterial verläuft daher nicht zwingend über mehr Lockermaterial (prozentual), als ein Gerinne in einem Einzugsgebiet mit einem geringen prozentualen Anteil an Lockermaterial. Mit prozessbasierten Überlegungen kann dieses Phänomen insofern erklärt werden, dass sich Wildbachgerinne auch in Einzugsgebieten mit kleinen Anteilen von Lockermaterial, in Zonen mit hohem Anteil an Lockermaterial bilden. Weil die Verfügbarkeit von Lockermaterial in einem Gerinne einen Zusammenhang mit dem Transport von Feststoffen und Geschiebe aufweist, die Gesamtverfügbarkeit von Lockermaterial im Einzugsgebiet jedoch nicht direkt mit der Verfügbarkeit im Gerinne zusammenhängt, ist ein weiterer Parameter notwendig, welcher die Konnektivität zwischen den Lockermaterialdepots und dem Gerinne beschreibt.

In Borselli, Cassi & Torri (2008) wird ein Index vorgestellt, der die Sedimentkonnektivität zum Gerinne quantifiziert. Bei diesem Index handelt es sich jedoch lediglich um eine potentielle Konnektivität. Dem Autor ist kein Index bekannt, bei dem die potentielle Konnektivität direkt mit dem Standort von Lockermaterialdepots verknüpft wird.

Ab dem siebten Rang in der Rangliste des Filteransatzes weisen die Parameter einen Korrelationskoeffizienten $r < \pm 0.1$ auf. Diese Zusammenhänge sind statistisch nicht signifikant. Der Korrelationskoeffizient des Parameters `geo_easy` (Anteil leicht verwitterbares Gestein im Einzugsgebiet) auf Rang 8 hat ein negatives Vorzeichen. Ein negativer Zusammenhang zwischen dem Parameter und der Zielgrösse macht aus Sicht des Prozessverständnisses keinen Sinn, denn der Parameter weist auf das Vorhandensein von Lockermaterial hin. Die Vorzeichen der restlichen Parameter mit $r < \pm 0.1$ können aufgrund von Prozessüberlegungen hergeleitet werden. So korreliert die Gerinnerauheit (R) mit dem Feststoffvolumen negativ, während die Korrelationskoeffizienten der Parameter `HA1_100` (100 jährlicher 1h-Punktniederschlag) und `ch_L` (Gerinnelänge) ein positives Vorzeichen haben. Der Filteransatz liefert eindeutige Ergebnisse im Bezug auf die Reduktion der Parameter. Der Nachteil des Filteransatzes ist, dass vorausgesetzt wird, dass Parameter mit einem stärkeren linearen Zusammenhang bedeutender für die Schätzung der Feststoffvolumina mit KNN sind, als Parameter mit einem schwachen linearen Zusammenhang. Mit KNN können jedoch nichtlineare Zusammenhänge zwischen Parametern und der Zielgrösse abbildet werden (vgl. Kapitel 1.1). Der Filteransatz setzt somit voraus, dass Parametern, welche einen linearen Zusammenhang mit der Zielgrösse aufweisen, eine grössere Bedeutung für die Schätzung von Feststoffvolumina mit KNN zugeschrieben werden kann, als Parametern ohne linearen Zusammenhang.

Dem Filteransatz folgt ein Wrapper-Ansatz, bei dem die zehn Parameter entlang der Rangliste bis auf drei Parameter reduziert werden. Aus diesen acht KNN wird das best-fit-Modell „Volumen“ anhand der Güte der Validierungsdaten bestimmt. Diese Reduktion wird kombiniert mit einer Variation der Anzahl an Hidden-Neuronen. Für jede Netztopologie wird die Validierungsgüte für 20 unterschiedliche, zufällig gewählte Startgewichte erhoben wird. Dabei kann beobachtet werden, dass Netztopologien mit einer kleineren Anzahl Neuronen eine bessere Güte aufweisen, als KNN mit einer grösseren Anzahl Neuronen (vgl. Abbildung 4-26). Begründet wird diese Beziehung durch das Verhältnis zwischen Anzahl Gewichten zu Anzahl Beobachtungen (Wildbäche). Die Gewichte stellen die freien Variablen eines KNN dar. Je mehr Gewichte vorhanden sind, desto grösser ist die Gefahr eines Overfittings, da für jede Beobachtung ein eigenes Gewicht angepasst werden kann. Diese Gefahr ist umso grösser, je kleiner die Anzahl Beobachtungen ist. Weiter ist zu erkennen, dass die Streuung aufgrund der unterschiedlichen Startgewichte grösser ist als die Streuung der Mediane der unterschiedlichen Netztopologien (vgl. Abbildung 4-26). Der Einfluss der zufälligen Startgewichte auf die Güte des KNN ist somit stärker als der Einfluss der Anzahl Hidden-Neuronen oder die unterschiedlichen Inputparameter. Der Grund dieser Beobachtung ist anhand des Zusammenhanges zwischen der Anzahl Iterationen und der Güte der Validierungsdaten (vgl. Abbildung 4-27) zu erkennen. Der Trainingsvorgang der KNN muss bereits nach einem Iterationsdurchgang abgebrochen werden, um ein Overfitting zu verhindern (vgl. Abbildung 3-7). Diese starke Abhängigkeit der Startgewichte und das Overfitting nach einer Iteration verhindern das Trainieren eines finalen best-fit-Modells „Volumen“, da die Gewichte nicht eindeutig angepasst werden können.

Bei der Betrachtung der Abbildung 4-27 ist zudem auffallend, dass der NRMSE der Validierungsdaten bereits vor der ersten Iteration einen grösseren Wert aufweist als die Trainingsdaten. Grund dafür ist der zehn Mal kleinere Validierungsdatensatz verglichen mit dem Trainingsdatensatz. Wird der k-Wert der k-fold cross Validierung verkleinert, wird der Unterschied zwischen der Validierungs- und Trainingsgüte bei einer Iteration kleiner.

Der Vergleich der Validierungsergebnisse eines best-fit-Modells „Volumen“ mit den erhobenen Feststoffvolumina (vgl. Abbildung 4-28) zeigt, dass das best-fit-Modell „Volumen“ die Feststoffvolumina bei grossen Volumen unterschätzt. Bei diesen Feststoffvolumina handelt es sich um Ausreisser, welche nicht repräsentativ für den Datensatz sind. Das KNN ist nicht fähig, Werte zu extrapolieren (Lohinger 2015), weshalb Ausreisser systematisch unterschätzt werden. Der Ansatz nach Zeller (1985) zeigt für diese Beobachtungen ebenfalls eine Unterschätzung, während der Ansatz von Kronfeller-Kraus (1982) die Grössenordnung der Feststoffvolumina korrekt schätzt. Allgemein zeigt der Vergleich der beobachteten und erhobenen Feststoffvolumina mit den Schätzungen nach Zeller (1985) und Kronfeller-Kraus (1982), dass die Ansätze die Feststoffvolumina teilweise um mehrere Grössenordnungen überschätzen. Diese Beobachtungen stimmen mit Untersuchungen von Rickenmann (2014) und Bertschi, Hunziker & Kienholz (2008) überein. Beim best-fit-Modell „Volumen“ sind keine Über- oder Unterschätzungen von mehreren Grössenordnungen zu beobachten. Der Vergleich des NRMSE des best-fit-Modells „Volumen“ (~125%) mit den Ansätzen von Zeller (1985) (133%) und Kronfeller-Kraus (1982) (357%) zeigt, dass das best-fit-Modell „Volumen“ eine verbesserte Güte gegenüber den herkömmlichen Ansätzen aufweist. Allerdings wird die Güte anhand eines Datensatzes berechnet, welcher für die Erstellung und Auswahl des best-fit-Modells „Volumen“ verwendet wird. Damit ein Modell getestet werden kann, muss ein unabhängiger Testdatensatz vorhanden sein (Heiser 2015b). Der Vergleich der vorgestellten Güten ermöglicht somit keine abschliessende Bewertung des best-fit-Modells. Allerdings muss festgestellt werden, dass aufgrund des Overfittings nach einer Iteration und der starken Abhängigkeit der Startgewichte keine eindeutige Realisation des Modells bestimmt werden kann und so der Vergleich des best-fit-Modells „Volumen“ auch bei der Verwendung eines Testdatensatzes nicht möglich ist. Weil mit dem Volumen-Ansatz kein KNN trainiert werden kann, welches Feststoffvolumina schätzt, wird ein zweiter Ansatz entwickelt.

5.2.2 Modell „Klassen“

Ziel dieses Klassen-Ansatzes ist nicht die Schätzung von Feststoffvolumina, sondern die Klassierung der Wildbäche in unterschiedliche Feststoffklassen. Dieser Ansatz verfolgt somit nicht das Ziel, die Hypothese der vorliegenden Arbeit zu belegen, sondern fokussiert auf die Erfassung von Zusammenhängen zwischen den Feststoffvolumina und den erhobenen Einzugsgebiets- und Gerinneparameter. Die Grundprämisse des Klassen-Ansatzes ist, dass durch die Bildung von Geschiebeklassen die „Trefferwahrscheinlichkeit“ des KNN erhöht wird und dass Unsicherheiten bezüglich der Zielgrösse eliminiert werden. Für die Reduktion der Parameter werden im Gegensatz zum Modell-Volumen Reduktionsmethoden verwendet, die das KNN direkt einbeziehen (vgl. Kapitel 3.5.2). Grund der Anpassung der Reduktionsmethoden ist die Vermutung, dass der verwendete Filter- und Wrapper-Ansatz bei der Erstellung des Modells „Volumen“ die zentralen Parameter für die Schätzung reduziert.

Die beiden Reduktionsmethoden werden aufgrund von theoretischen Überlegungen hergeleitet (vgl. Kapitel 3.5.2). Während die Funktionsweise der Reduktionsmethoden im Rahmen dieser Arbeit nicht beurteilt werden kann, wird jedoch bei der Reduktionsmethode 1 eine starke Sensivität der Methode bezüglich der freien Variable der Methode festgestellt. Diese freie Variable bestimmt die Anzahl der KNN mit den grössten Güten der zufällig generierten KNN, für welche die Häufigkeitsanalyse durchgeführt wird (vgl. Abbildung 3-10). Diese Sensivität kann durch einen Vergleich der Abbildung 4-32 und Abbildung 4-33 hergeleitet werden, weil dabei offensichtlich wird, dass unterschiedlich Parameter reduziert werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird für diese Variable kein theoretischer oder empirischer Grenzwert hergeleitet. Das best-fit-Modell „Klassen“ klassifiziert im Mittel 71% der Validierungsbäche korrekt. Wird allerdings die Konfusionsmatrix des Modells betrachtet (vgl. Abbildung 4-35), fällt auf, dass das best-fit-Modell „Klassen“ nicht fähig ist, Wildbäche den Klassen 3 und 4 zuzuordnen. In diesen Klassen befinden sich die Wildbäche mit einem Feststoffvolumen, welche als Ausreisser identifiziert werden (vgl. Abbildung 4-2). Weil die Klassen mithilfe des Jenks-Caspell-Algorithmus (Jenks & Caspell 1971) definiert werden (vgl. Kapitel 3.5.2), werden diese Ausreisser in eigene Klassen eingeteilt. Dadurch sind in den Klassen 3 und 4 lediglich zehn der 100 Wildbäche klassiert. Beim Training des KNN können keine Muster für Wildbäche der Klassen 3 und 4 erstellt werden, weil die Anzahl an Wildbächen zu klein ist. Um dieses Problem zu beheben, könnten die Klassen anhand der Quantilsgrenzen definiert werden (vgl. Abbildung 4-29). Werden die Klassen jedoch nach den Quantilsgrenzen hergeleitet, befinden sich Wildbäche mit sehr unterschiedlicher Charakteristik (grosse Streuung der Feststoffvolumina) in der Klasse 4. Damit das KNN jedoch Muster zwischen den Klassen und den Parametern der Wildbäche erfassen kann, muss diese Streuung möglichst gering sein.

5.3 Synthesediskussion künstliche neuronale Netze

Im folgenden Kapitel werden die Erkenntnisse der Datenauswertung mit KNN zusammengefasst und diskutiert. Anschliessend werden Unsicherheiten bezüglich der Auswertungen aufgelistet und beschrieben.

Bei dem Filteransatz und der Reduktionsmethode 1 des Klassen-Ansatzes werden je 24 der 34 Parameter reduziert. Der Vergleich der gefilterten zehn Parameter zeigt, dass lediglich die Parameter Gerinnelänge (ch_L) und der mittlere Jahresniederschlag im Einzugsgebiet (Hamean) in beiden Auswahlen auftreten. Allerdings identifizieren die Reduktionsmethoden diese Parameter nicht als zentrale Parameter (vgl. Rangierung der Parameter). Die beiden Methoden filtern somit unterschiedliche Parameter als zentrale Parameter für die Schätzung von Feststoffvolumina von Grossereignissen. Weil beide Methoden Nachteile bezogen auf die Filterung der zentralen Parameter auf KNN aufweisen, können keine Parameter eindeutig als „zentral“ betitelt werden. Allgemein kann jedoch festgehalten werden, dass die Parameter in den herkömmlichen Ansätzen nicht als „zentral“ identifiziert werden. Die Einzugsgebietsfläche und die Gerinneneigung welche in herkömmlichen Ansätzen eine zentrale Rolle spielen, werden durch die Reduktionsmethoden reduziert.

Um ein best-fit-Modell zu finden, werden für beide KNN-Ansätze mehrere Netztopologien getestet. Dabei zeigt sich, dass die verhältnismässig grössten Güten bei Netztopologien mit wenigen Neuronen resultieren. Die Neuronenanzahl setzt sich aus der Anzahl Hidden- und Input-Neuronen zusammen. Die Beobachtung, dass komplexere KNN nicht zwingend zu verbesserten Güten führen, stimmt mit den Ergebnissen zahlreicher Studien überein (vgl. z.B. Sasal et al. (2009); Pak et al. (2009)). Ein Zusammenhang zwischen dieser Beobachtung und der Anzahl der zur Verfügung stehenden Trainingsdaten (90 Wildbäche) kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht ausgeschlossen werden.

Die Resultate der beiden best-fit-Modellen zeigen, dass mithilfe des vorliegenden Datensatzes keine KNN trainiert werden können, welche einen Zusammenhang zwischen der Zielgrösse und den Einzugsgebiets- und Gerinneparameter erfassen können. Im Folgenden werden mögliche Gründe für diese Feststellung wiedergegeben und diskutiert:

Datengrundlage

Ein möglicher Grund ist die Anzahl an Trainingsdaten. Um Muster zu erkennen, müssen dem KNN eine grosse Anzahl an Trainingsdaten zur Verfügung gestellt werden. Dabei müssen in demselben Datensatz mehrmals ähnliche Beobachtungen gemacht werden können. Eine heterogene Verteilung der Input- und Outputdaten erschwert dabei die Mustererkennung. Die Studie von Pak et al. (2009), stellt ein KNN vor, welches eine maximale Abweichung von 5% zwischen Messung und Modell aufweist. Das KNN wird auf Feststoffvolumina von Zeitperioden von 14 Einzugsgebieten trainiert. Für sämtliche Gebiete sind jedoch mehrerer Beobachtungen (insgesamt 300) von Feststoffvolumina vorhanden und die Einzugsgebiete befinden sich in einem Umkreis von maximal 50 km. Im Gegensatz dazu werden in der vorliegenden Arbeit 100 Wildbäche mit sehr unterschiedlichen Merkmalsausprägungen analysiert (vgl. Kapitel 4.2). Die Zielgrösse ist zudem heterogen verteilt und wird durch neun Ausreisser dominiert (vgl. Abbildung 4-2). Die Mess- und Erhebungsunsicherheit der Einzugsgebiets- und Gerinneparameter sowie der Zielgrösse sind weitere Gründe, wieso mithilfe des Datensatzes kein Zusammenhang

zwischen den Parametern und der Zielgrösse gefunden werden kann. Der Einfluss der Unsicherheit bezüglich der Zielgrösse wird als bedeutender eingeschätzt als die Unsicherheit der Parameter. Der Grund dafür ist, dass die Zielgrösse zwei entscheidende Quellen für Unsicherheiten aufweist. Eine Quelle sind die Messfehler der Feststoffvolumina. Die Volumina werden im Anschluss an das Ereignis geschätzt oder mithilfe der Zählung der für die Räumungen notwendigen Lastwagen berechnet (vgl. Kapitel 3.1). Bei dieser Schätzung können Fehler auftreten. Eine weitere Quelle ist durch die Definition eines Grossereignisses gegeben (vgl. Kapitel 1.1). Das Grossereignis wird als Ereignis mit einer Jährlichkeit grösser als 100 Jahre definiert. Bei sämtlichen Wildbächen wird dabei das grösste gemessene, beziehungsweise geschätzte Ereignisvolumen verwendet. Aufgrund der eingeschränkten Beobachtungsdauer kann nicht überprüft werden, ob es sich bei dem entsprechenden Ereignis um ein 100 jährliches Ereignis handelt. Insbesondere bei den Wildbächen der Datenbank Solid dürfte diese Unsicherheit nicht zu unterschätzen sein. Bei diesen Wildbächen wird jedoch die Messunsicherheit als geringer eingeschätzt als bei den auf Schätzungen basierten Feststoffvolumina von Rickenmann & Koschni (2010) sowie Gertsch (2009).

Inputparameter

Die 34 erhobenen Einzugsgebiets- und Gerinneparameter werden mithilfe von Reduktionsmethoden auf die zentralen Parameter reduziert. Aufgrund der Unsicherheiten dieser Reduktionsmethoden besteht die Möglichkeit, dass Parameter reduziert werden, welche für die Schätzung der Feststoffvolumina wesentlich sein könnten. Weiter ist es möglich, dass entscheidende Parameter fehlen. Zum Beispiel könnte die Berücksichtigung des Sedimentkonnektivitätsfaktors in einem KNN dazu führen, dass die Güte steigt. Im Verhältnis zu herkömmlichen Ansätzen wird allerdings ein grosses Set an Parametern berücksichtigt. Aus diesem Grund wird diese Unsicherheit nicht als bedeutend eingestuft.

Modellgenerierung

Ein weiterer Grund, wieso kein Zusammenhang zwischen den Parametern und der Zielgrösse festgestellt werden kann, ist die Wahl der freien Konfigurierungsmöglichkeiten (vgl. Tabelle 3-4). Die Wahl wird anhand von Fachliteratur begründet. Die Analyse mit KNN erfordert die Programmierung vieler Berechnungsschritte (vgl. Anhang B). Ein Fehler in diesen Berechnungsschritten kann signifikante Auswirkungen auf die Ergebnisse der KNN haben.

Konzeptmodell „System Wildbach“

Das Konzeptmodell der vorliegenden Arbeit beinhaltet die Annahme, dass die Feststoffvolumina direkt anhand von charakteristischen Kenngrößen berechnet werden kann (vgl. Kapitel 1.1). Dabei wird vorausgesetzt, dass die Parameter miteinander in Verbindung stehen. Bei dem Modell handelt es sich um eine Mischung aus einem Korrelations- und einem Prozesssystem nach Klug & Lang (1983). Kienholz (1998:51ff) weist darauf hin, dass für die Abbildung der Massen- und Feststoffflüssen Prozess-Reaktionssysteme verwendet werden sollen. Die Prozess-Reaktionssysteme entstehen durch eine Integration von Korrelationssystemen in Prozesssystemen (Klug & Lang 100ff). Die Konzeptmodelle der feldbasierten Ansätze für die Abschätzung der Feststoffvolumina von Grossereignissen (vgl. Lehmann (1993); Gertsch (2009) und SEDEX (Frick (2013))) können als Prozess-Reaktionssysteme bezeichnet werden. Diese feldbasierten Ansätze werden in der Schweiz in vielen Fällen für eine detaillierte Abschätzung des Feststoffvolumens verwendet (Schönthal 2011). Es besteht die Möglichkeit, dass eine Anpassung des Konzeptmodells im Sinne eines Prozess-Reaktionssystem dazu führen würde, dass die Güte des Modells verbessert werden könnte. Dazu wäre eine Definition von einzelnen Korrelationssystemen nötig, die mit KNN abgebildet würden. Diese Systeme müssten anschliessend in ein vordefiniertes Prozesssystem integriert werden.

Nach dem Cynefin-Framework (Snowden & Boone 2007) kann das Konzeptmodell zwischen komplizierten und komplexen Systemen eingeordnet werden. Für die Betrachtung als komplexes System fehlt die Berücksichtigung der dynamischen Veränderungen und den Beziehungen zwischen den einzelnen Parametern. Insbesondere bei Parametern wie dem Lockermaterialangebot im Einzugsgebiet oder im Gerinne wäre eine dynamische Betrachtung relevant. Die Ereignisniederschlagsparameter werden als zeitlich veränderbar betrachtet, jedoch werden dynamische Beziehungen dieser Parameter mit weiteren Parametern nicht berücksichtigt. Eine solche Art der Verknüpfung ist zum Beispiel die Verlagerung von Lockermaterial in das Gerinne, ausgelöst durch starke Niederschläge. Neben komplexen Systemen beschreibt der Cynefin-Framework (Snowden & Boone 2007) chaotische Systeme. In einem chaotischen System sind keine erkennbaren Muster erkennbar (vgl. Abbildung 1-3). Beinhaltet das System Wildbach chaotische Systemkomponenten oder Prozessabläufe (vgl. Gertsch 2008), wird das Erkennen von Mustern mithilfe von KNN erschwert, weil eine chaotische Überprägung der Muster vorliegt.

6 Schlussfolgerung

In der vorliegenden Arbeit werden Zusammenhänge zwischen Einzugsgebiets- sowie Gerinneparametern und den Feststoffvolumina mithilfe von künstlichen neuronalen Netzen (KNN) untersucht. Ziel dieser Untersuchung ist die Herleitung eines neuen Ansatzes für die Schätzung von Feststoffvolumina von Grossereignissen. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und die Forschungsfragen und Hypothese beantwortet.

Forschungsfrage A1)

Wie kann eine grosse Anzahl an Einzugsgebiets- und Gerinneparametern systematisch, flächendeckend und effizient erhoben werden?

Die Antwort auf diese Frage lautet: unter Anwendung des EZG/GP-Tools, welches im Rahmen dieser Arbeit erstellt wird (vgl. Kapitel 3.3). Das EZG-Tool leitet aus bestehenden Geodaten (vgl. Kapitel 3.2) eine grosse Anzahl an Einzugsgebiets- und Gerinneparameter ab (vgl. Tabelle 3-3). Das Tool basiert auf einer definierten Verkettung von GIS-Algorithmen, die für ein beliebiges Wildbacheinzugsgebiet in der Schweiz angewendet werden kann. Die Erhebung der Parameter eines Wildbacheinzugsgebietes dauert bei vorhandener Datengrundlage zwischen zehn und 30 Minuten. Eine manuelle Erhebung der Parameter mit GIS-Algorithmen ist stark von den Vorkenntnissen des Anwenders abhängig dauert aber minimal einen Arbeitstag (vgl. Kapitel 5.1). Allgemein kann festgehalten werden, dass sich das EZG/GP-Tool für die Erhebung von Einzugsgebiets- und Gerinneparameter von Wildbäche für wissenschaftliche Untersuchungen eignet.

Forschungsfrage A2)

Welche Einzugsgebiets-, Gerinneparameter und Niederschlagsverhältnisse sind für die optimale Schätzung der Feststoffvolumina mit KNN wesentlich?

Diese Frage kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht abschliessend beantwortet werden, weil die Ansätze für die Reduktionen der Parameter unterschiedliche Resultate liefern. Für die Reduktion von 34 auf zehn Parameter wird ein Filter- und ein Wrapper-Ansatz angewendet. Der Filteransatz filtert die Parameter, „maximale Höhe über Meer“, „prozentualer Anteil des Gerinnes über Lockermaterial“ sowie die „Niederschlagssumme“ im Einzugsgebiet vor dem Ereignis, heraus und definiert diese somit als zentral für die Schätzung von Feststoffvolumina. Für weitere Untersuchungen zum Thema „Feststofftransport in Wildbächen“ sind diese Parameter somit von Bedeutung. Der Parameter „Einzugsgebietsfläche“, welchem in bestehenden Ansätzen eine zentrale Rolle beigemessen wird (vgl. Kapitel 1.1), wird in dem Filteransatz reduziert (vgl. Kapitel 4.3.1). Der Wrapper-Ansatz liefert aufgrund einer methodischen Schwäche keine eindeutigen Resultate (vgl. Kapitel 5.2.2).

Forschungsfrage B)

Welche Einstellungen der Konfigurierungsmöglichkeiten (z.B. Hidden-Neuronen, Trainingsdurchgänge) eines KNN führt zu der bestmöglichen Schätzung der Feststoffvolumina?

Für die Beantwortung dieser Forschungsfrage werden KNN mit unterschiedlichen Konfigurationen getestet. Diese Untersuchung wird für zwei unterschiedliche KNN-Ansätze durchgeführt. Wobei ein Ansatz auf Feststoffvolumina und ein weiterer auf Klassen trainiert wird. Dabei zeigt sich, dass KNN mit einer geringeren Anzahl an Neuronen, insbesondere der Hidden-Neuronen, die Zielgrösse besser schätzen, als KNN mit einer grösseren Anzahl an Neuronen (vgl. Kapitel 5.3). Diese Aussage gilt explizit für den verwendeten Datensatz und die berücksichtigten KNN-Ansätze. Für den KNN-Ansatz, welcher das Feststoffvolumen schätzt, ist die optimale Anzahl an Trainingsdurchgängen nach einer Iteration erreicht.

Hypothese

Ein Modell basierend auf künstlichen neuronalen Netzen (KNN) zur Bestimmung der Feststoffvolumina von Grossereignissen in Wildbächen mit einer verbesserten Güte gegenüber herkömmlichen Ansätzen kann erstellt werden, wenn:

- a) eine grosse Anzahl an Einzugsgebietsparameter, Gerinneparameter und Niederschlagsverhältnisse während des Ereignisses*
- b) und ein KNN-Ansatz mit einer Optimierung der freien Konfigurierungsmöglichkeiten (z. B. Hidden-Neuronen, Trainingsdurchgänge) berücksichtigt werden.*

Die Hypothese wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt. Das best-fit-Modell kann aufgrund des fehlenden Testdatensatzes nicht unabhängig getestet werden, wodurch ein Vergleich mit bestehenden Ansätzen nicht möglich ist. Weil die Forschungsfragen A2 und B nicht abschliessend beantwortet werden können ist eine abschliessende Falsifizierung der Hypothese im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Es kann jedoch festgehalten werden, dass die Hypothese auch bei der Verwendung eines Testdatensatzes nicht bestätigt werden könnte, weil die Validierungsgüte des best-fit-Modells lediglich eine geringfügig verbesserte Güte gegenüber herkömmlichen Ansätzen aufweist (vgl. Kapitel 5.3). Weiter zeigt das Overfitting des best-fit-Modells bei zwei Trainingsdurchgängen, dass das KNN keinen Zusammenhang zwischen den Inputparametern und der Zielgrösse der Validierungsdaten abbilden kann. Abgeleitet aus der Untersuchung der Hypothese werden folgende drei Schlussfolgerungen gezogen:

- 1) Die Erforschung der Feststoffführung in Wildbächen erfordert Messungen von Feststoffvolumina mit geringen Unsicherheiten.
- 2) Die verwendeten KNN-Ansätze erkennen im untersuchten Datensatz keine Zusammenhänge zwischen Einzugsgebiets- und Gerinneparameter und Feststoffvolumina von Grossereignissen
- 3) Das entwickelte EZG/GP-Tool eignet sich für die systematische und effiziente Erhebung von Einzugsgebiets- und Gerinneparameter.

7 Ausblick

Um das komplexe System „Wildbach“ differenzierter verstehen zu können, sind weitere Studien und Untersuchungen zu dem Systemverhalten von Wildbächen notwendig. Während der Erarbeitung der vorliegenden Arbeit sind zahlreiche neue Ideen entstanden, wie man die Auswertungen verbessern und ausbauen könnte. Im Folgenden werden in kurzen Absätzen einige dieser Ideen, die als zentral beurteilt werden, erläutert. Die Vorschläge beziehen sich auf das EZG/GP-Tool sowie die Datenauswertung und können teilweise aus den Kapiteln «Diskussion» und «Schlussfolgerungen» abgeleitet werden. Die fetten gedruckten Wörter stehen für den jeweiligen Themenbereich.

EZG/GP-Tool

- Mithilfe des Tools können Einzugsgebiets- und Gerinneparameter von effizient erhoben werden. Das Tool könnte somit genutzt werden um einen grösseren Datensatz für die Analyse zu generieren.
- In das Tool können Abschätzverfahren integriert werden, so dass zusätzlich zu den Parametern, Schätzungen von Feststoffvolumina von Grossereignissen erhoben werden können.
- Die Integration des Ansatzes nach Broselli, Cassi & Torri (2008) für die Berechnung des Konnektivitätsfaktors in das Tool, würde eine Aussage zu der Sedimentkonnektivität erlauben, dabei könnte durch die Berücksichtigung der Lockermaterialkarte (swissTLM^{3D}), der Ansatz erweitert werden.
- Durch die Integration eines Niederschlags-Abfluss-Modells, könnte der Spitzenabfluss des Ereignisses geschätzt werden. Dabei können die Niederschlagswerte, welche bereits erhoben werden als Modellinput verwendet werden. Als Modell bietet sich das Topmodel (vgl. Beven et al. 1995) an, welches bereits in R integriert ist. Für eine flächendeckende Anwendung müssen die Modellparameter des Topmodels mit einem Regionalisierungsverfahren zugewiesen werden.
- Ein Nachteil des Tools ist, dass die Anwendung nur möglich ist, sofern sämtliche Geodaten verfügbar sind, jedoch könnten insbesondere die morphometrischen Parameter nur unter Verwendung des DTMs erhoben werden. Eine Umstrukturierung zu einem modularen Aufbau des Tools im Sinne der Parametergruppen könnte diesen Nachteil beheben.
- Die Unsicherheiten, bzw. Fehler der erhobenen Parameter werden im Rahmen der Arbeit nicht abgeleitet. Eine aus den Inputgeodaten und Verarbeitungsmethode abgeleitete Fehlerrechnung sowie der Vergleich der Parameterwerte mit Feldmessungen würden eine ausführliche Diskussion der Unsicherheiten ermöglichen.

Datenauswertung

- Die Auswertung des Datensatzes mit weiteren „soft computing“ Ansätzen könnten neue Erkenntnisse ermöglichen.
- Die Datenauswertung könnte erneut ohne die Berücksichtigung der neun Wildbäche durchgeführt werden, welche als Ausreisser identifiziert sind.
- Für die Bestimmung der entscheidenden Ereignisniederschlagsparameter wird eine Korrelationsanalyse verwendet. Eine Herleitung dieser Parameter aufgrund von Literaturwerten wird nicht berücksichtigt.
- Die Reduktionsmethoden müssten mithilfe eines unabhängigen Datensatzes getestet werden. Weiter könnten die Reduktionsmethoden des Volumen-Ansatzes auf den Klassen-Ansatz angewendet werden.

8 Literaturverzeichnis

Ackers, P., & White, W. R. 1973: Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, 99 (hy11).

Ahnert, F. 2009: Einführung in die Geomorphologie. UTB, Stuttgart.

BAFU, Bundesamt für Umwelt 2015: Messnetze zum Feststofftransport in Gewässern. <http://www.bafu.admin.ch/wasser/13462/14737/15098/index.html?lang=de>.
Zugriff: 08.01.2016.

Badoux, A., Andres, N., & Turowski, J. M. 2014: Damage costs due to bedload transport processes in Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Science*, 14(2): 279-294.

Bagnold, R. A. 1980: An empirical correlation of bedload transport rates in flumes and natural rivers. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 372, No. 1751): 453-473.

Bardou, E. 2002: Methodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin. Doktorarbeit. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.

von Bertalanffy, L. 1951: General system theory; a new approach to unity of science. 1. *Problems of general system theory. Human biology*, 23/4: 302-312.

Bertschi, W., Hunziker G., & Kienholz H. 2008: Empirische Modelle zur Geschiebeabschätzung – Kalibrierung und Eingrenzung unterschiedlicher Modelle. *Interpraevent 2008, Tagungspublikation, (Band 1): 261- 269.*

Beven, K., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R., Freer, J., & Singh, V. P. 1995: Topmodel. *Computer models of watershed hydrology*: 627-668.

Beyer, N., & Schleiss, A. 2000: Bodenerosion in alpinen Einzugsgebieten in der Schweiz. – *Wasser- Wirtschaft*, (90): 88-92.

Blum, A. 1992: *Neural Networks in C++*. Wiley, New York.

Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. 2008: Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75(3): 268-277.

Du Boys, M. P. 1879: The Rhone and streams with movable beds. *Annals des Pontes et Chaussees*, Tome XVIII.

Bravo-Espinosa, M., Osterkamp, W. R., & Lopes, V. L. 2003: Bedload transport in alluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(10): 783-795.

BUWAL, 1998: Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko. Arbeitspapier. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Eidg. Forstdirektion, Bern

BWG, Bundesamt für Wasser und Geologie 1997: Vereinfachte Geotechnische Karte der Schweiz, Bundesamt für Wasser und Geologie / Bundesamt für Umwelt, Wald Landschaft.

Chandrasekaran, M., Muralidhar, M., Krishna, C. M., & Dixit, U. S. 2010: Application of soft computing techniques in machining performance prediction and optimization: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(5-8): 445-464.

Chang, C. K., Azamathulla, H. M., Zakaria, N. A., & Ab Ghani, A. 2012: Appraisal of soft computing techniques in prediction of total bed material load in tropical rivers. *Journal of earth system science*, 121(1): 125-133.

Chang, T. C., & Chao, R. J. 2006: Application of back-propagation networks in debris flow prediction. *Engineering Geology*, 85(3): 270-280.

Chorley, R. J., & Kennedy, B. A. 1971: *Physical geography: a systems approach*. Prentice-Hall. London.

D'Agostino, V., Cerato, M., & Coali, R. 1996: Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del trentino orientale. *Interpraevent 1996, Tagungspublikation, (Band 1): 377 – 386.*

DIN 19663 1985: *Wildbachverbauung; Begriffe, Planung und Bau*. Deutscher Normenausschuss, Berlin

Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., & Münkemüller, T. 2013: Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1): 27-46.

Einstein, H. A. 1950: *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows (No. 1026)*. US Department of Agriculture.

Eisenbach, D. 2005: *Künstliche Neuronale Netze zur Prognose von Zeitreihen*. Degree thesis, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster.

Engelund, F., & Hansen, E. 1967: *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark.

Ernste, H. 2009: *Angewandte Statistik in Geographie und Umweltwissenschaften*. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich.

ESRI 2015: Was ist ModelBuilder? <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/what-is-modelbuilder-.htm>. Zugriff: 08.01.2016

Friedrichsen U, 2011: *Agilität Gestern, Heute und Morgen: Eine Bestandsaufnahme und ein Blick in die Zukunft*. <https://public.centerdevice.de/578762ad-9630-4a13-b610-d3ecb128ddd4>. Zugriff: 08.1.2016

Frick, E. 2013: *SEDEX (SEDiments and EXperts), Entwicklung einer praxistauglichen Methode zur Beurteilung der Geschiebe-Szenarien in Wildbächen*. Inauguraldissertation der Philosophisch- naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Bern.

Gertsch E. 2009: Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen – Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens. Inauguraldissertation der Philosophisch- naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Bern.

Gertsch, E., & Kienholz, H. 2008: "Geschiebelieferung Alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen. Interpraevent 2008, Tagungspublikation, (Band 1): 331-342.

Gomez, B., & Church, M. 1989: An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers. *Water Resources Research*, 25(6): 1161-1186.

Grasso A., Jakob A., Spreafico M., & Bérod D. 2010: Monitoring von Feststofffrachten in schweizerischen Wildbächen, Wasser, Energie, Luft, 102. Jahrg., Heft 1/2010.

HADES, 2015a: Tafel 2.2 Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen 1951-1980, Erläuterungstext. <http://www.hadesdaten.unibe.ch/downloads/datentabellen/niederschlag>. Zugriff 05.11.2015

HADES, 2015b: Tafel 2.4_2 Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden, Erläuterungstext. <http://www.hadesdaten.unibe.ch/downloads/datentabellen/niederschlag>. Zugriff 05.11.2015

Hampel, R. 1980: Die Murenfracht von Katastrophenhochwässern. Wildbach- und Lawinerverbau, Dezember 1980, (H2): 71 – 102.

Hegg, C, Rickenmann, D., & Forster, F. 2001: Hochwasser und Feststofftransport in Wildbacheinzugsgebieten. *Bulletin Angewandte Geologie*, 6, 85-97.

Heiser, M. 2015b: Neuronale Netze. Zusammenfassung. unveröffentlicht

Heiser, M., Scheidl, C., Eisl, J., Spangl, B., & Hübl, J. 2015a: Process type identification in torrential catchments in the eastern Alps. *Geomorphology*, (232): 239-247.

Hugget, R.J. 1985: *Earth Surface Systems*. Springer Series in Physical Environment. Springer-Verlag, Berlin.

Ikonomopoulos, A., Tsoukalas, L. H., & Uhrig, R. E. 1993: Integration of neural networks with fuzzy reasoning for measuring operational parameters in a nuclear reactor. *Nuclear technology*, 104(1): 1-12.

Jäggi, M. 2013: Zur mittleren Geschiebelieferung in Hochgebirgsbächen. Masterarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Bern

Jenks, G. F., & Caspall, F. C. 1971: Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. *Annals of the Association of American Geographers*, 61(2): 217-244.

Käser, S. 2016: Geomorphologische Auswirkungenvon Geschiebesammlern auf den Unterlauf in Wildbächen. Eine Untersuchung an Geschiebesammlern der Datenbank Solid. Masterarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Bern.

Kienholz, H., Keller, H.M., Ammann, W., Weingartner, R., Germann, P.F., Hegg, Ch., Mani, P., & Rickenmann, D. 1998: Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. Projektabschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes „Klimaveränderung und Naturkatastrophen“, NFP 31. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich.

Kirkby, M. J. 1990: The landscape viewed through models. *Zeitschrift für Geomorphologie*, NF, Suppl.-Bd, (79): 63-81.

Kitsikoudis, V., & Hrissanthou, V. 2013: Artificial neural network modeling of the fractional transport rate of bed-load in gravel-bed streams. In *Proceedings of the 6th international conference on water resources and environment research*: 231-255.

Klug, H., & Lang, R. 1983: Einführung in die Geosystemlehre. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt

Kriesel, D. 2007: Ein kleiner Überblick über Neuronale Netze. <http://www.dkriesel.com>
Zugriff: 08.01.2016.

Kronfellner-Kraus, G. 1982: Über den Geschiebe- und Feststofftransport in Wildbächen. *Österreichische Wasserwirtschaft*, (24, 1/2): 12-21.

Kumar, B. 2012: Neural network prediction of bed material load transport. *Hydrological Sciences Journal*, 57(5): 956-966.

Lehmann, C. 1993: Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen. *Geogr. Bernensia*, G42. Bem.

Lin, J. W. 2011: Neural network model and geographic grouping for risk assessment of debris flow. *Int J Phys Sci*, 6(6): 1374-1378.

Lippe, W-M. 2015: Einführung in Neuronale Netze. <http://wwwmath.uni-muenster.de:8010/Professoren/Lippe/lehre/skripte/wwwnscript/prin.html>.
Zugriff: 08.01.2015.

Liu, Y., Guo, H. C., Zou, R., & Wang, L. J. 2006: Neural network modeling for regional hazard assessment of debris flow in Lake Qionghai Watershed, China. *Environmental Geology*, 49(7): 968-976.

Lohinger, H. 2015: Neuronale Netze und Extrapolation. *Grundlagen der Statistik*. http://www.statistics4u.com/fundstat_germ/cc_ann_extrapolation.html. Zugriff 10.01.2015.

Manallack, D. T., Ellis, D. D., & Livingstone, D. J. 1994: Analysis of linear and nonlinear QSAR data using neural networks. *Journal of Medicinal Chemistry*, 37(22): 3758-3767.

McCulloch, W. S., & Pitts, W. 1943: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4): 115-133.

MeteoSwiss, 2013: Documentation of MeteoSwiss Grid-Data Products, Daily Precipitation (final analysis): RhiresD, Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss.

Meyer-Peter, E., & Müller, R. 1948: Formulas for bed load transport, Zürich.

- Minsky, M., & Seymour, P. 1969: Perceptrons.
- Montgomery, D. R., & Buffington, J. M. 1997: Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5): 596-611.
- Hebb, D. 1949: *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory*. Wiley, New York.
- Nash, J., & Sutcliffe, J. V. 1970: River flow forecasting through conceptual models part I— A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3): 282-290.
- Nitsche, M. 2012: Macro-roughness, flow resistance and sediment transport in steep mountain streams. Doktorarbeit. Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Zürich.
- Pak, J. H., Kou, Z., Kwon, H. J., & Lee, J. J. 2009: Predicting Debris Yield From Burned Watersheds: Comparison of Statistical and Artificial Neural Network Models¹. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 45(1): 210-223.
- Panchal, G., Ganatra, A., Kosta, Y. P., & Panchal, D. 2010: Searching most efficient neural network architecture using Akaike's information criterion (AIC). *International Journal of Computer Applications*, 1(5): 41-44.
- Parker, G. 1990: Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. *Journal of hydraulic research*, 28(4): 417-436.
- PLANAT, 2016: Murgänge Brienz (2005): <http://www.planat.ch/de/bilder-detailansicht/datum/2011/03/16/murgaenge-brienz-2005/>. Zugriff: 02.11.2015
- Priddy, K.L., & Keller, P.E. 2005: *Artificial neural networks: an introduction* (Vol. 68). SPIE Press.
- Raymond Pralong, M., Turowski, J. M., Beer, A., Rickenmann, D., Métraux, V. & Glassey, T. 2011: *Klimaänderung und Wasserkraft. Auswirkung der Klimaänderung auf die Geschiebefracht*, Sion und Birmensdorf.
- Rey, G.D., & Wender, K.F. 2011: *Neuronale Netze. Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen Und Datenauswertung*. Huber, Bern.
- Rickenmann, D. 2014: Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen. In Report 9. Eidg. Forschungsanstalt WSL.
- Rickenmann, D. (2007): *Modellierung von Murgängen und Sedimenttransport in Wildbächen*. Bautechnik und Naturgefahren, Wien.
- Rickenmann, D. (1996): Murgänge: Prozess, Modellierung und Gefahrenbeurteilung. In B. Oddsson (ed), *Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse*, Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften, pp. 397–407. Basel: Birkhäuser.
- Rickenmann, D., & Scheidl, C. 2010: Modelle zur Abschätzung des Ablagerungsverhaltens von Murgängen. *Wasser Energie Luft*, (102): 17-26.

Rickenmann, D., & Koschni, A. 2010: Sediment loads due to fluvial transport and debris flows during the 2005 flood events in Switzerland. *Hydrological Processes*, 24(8): 993 – 1007

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. 1988: Learning representations by back-propagating errors. *Cognitive modeling*, 5, 3.

Sasal, M., Kashyap, S., Rennie, C. D., & Nistor, I. 2009: Artificial neural network for bedload estimation in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 47(2): 223-232.

Schälchli U. & Kirchhofer A. 2012: Sanierung Geschiebehaushalt. Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1226: 74

Schoklitsch, A. 1934: Der Geschiebetrieb und die Geschiebefracht. – *Wasserkraft Wasserwirtschaft*, S: 1-7.

Schönthal E. 2011: Feststofffrachtabschätzungen für Gefahrenkarten im Kanton Bern. Masterarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Bern.

Schulze, H. 2005: Vergleich von künstlichen Neuronalen Netzen und multivariaten statistischen Verfahren in der Primärforschung: Ein empirischer Vergleich. Masterarbeit der Fakultät für Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen.

Sevruk, B. 1985: Systematischer Niederschlagsmessfehler in der Schweiz. In: *Der Niederschlag in der Schweiz*. (Ed. Sevruk B.), Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie, (31): 65-75.

Sick, B. Spasojevic, A., & Salvisberg M. (2012): Programmieren mit R. <https://stat.ethz.ch/education/semesters/as2012/biostat/Uebungen/Uebungen/R-in-Kurzform.pdf>. Zugriff: 08.01.2015.

Sirdari, Z. Z., Ab Ghani, A., & Hassan, Z. A. 2014: Bedload transport of small rivers in Malaysia. *International Journal of Sediment Research*, 29(4): 481-490.

Snowden, D. J., & Boone, M. E. 2007: A leader's framework for decision making. *harvard business review*, 85(11): 68.

Smart, G. M. & Jäggi, M. N. R. 1983: Sedimenttransport in steilen Gerinnen. – *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, Bd. 64, Zürich.

Spreafico, M., Lehmann, C., Jakob, A., & Grasso, A. 2005: Feststoffbeobachtung in der Schweiz – Ein Tätigkeitsgebiet der Landeshydrologie. *Berichte des BWG, Serie Wasser* Nr. 8, Bern.

Statista 2015a: Statistik-Lexikon: Definition Deskriptive Statistik. http://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/49/deskriptive_statistik/. Zugriff 08.01.2016

- Statista 2015b: Statistik-Lexikon: Definition Signifikanz.
<http://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/122/signifikanz/>. Zugriff: 08.01.2016
- Svozil, D., Kvasnicka, V., & Pospichal, J. 1997: Introduction to multi-layer feed-forward neural networks. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 39(1): 43-62.
- Swisstopo, 2014: Objektkatalog swissTLM3D 1.2, Bundesamt für Landestopografie swisstopo.
- Swisstopo 2015a: Produkte: swissALTI_3D:
<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/swissALTI3D.html>. Zugriff: 02.11.2015
- Swisstopo 2015b, Produkte Landschaftsmodelle: swissTLM_3D : <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/landscape/swissTLM3D.html>.
Zugriff: 02.11.2015.
- Takei, A. 1984: Interdependence of sediment budget between individual torrents and a river-system. *Interpraevent 1984, Tagungspublikation, (Band 2): 35–48.*
- Tu, J. V. 1996: Advantages and disadvantages of using artificial neural networks versus logistic regression for predicting medical outcomes. *Journal of clinical epidemiology*, 49(11): 1225-1231.
- Ueblagger, G. 1989: Erkundung und Bewertung von Wildbacheinzugsgebieten. *Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Informationsbericht, 4(89): 117-147.*
- Umbricht, F. 2015: Analyse der Niederschlagsverhältnisse bei Murgängen im östlichen Berner Oberland. Masterarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Bern.
- Vente, J. de, Poesen, J., Arabkhedri, M. & Verstraeten, G. 2007: The sediment delivery problem revisited. – *Progress in Physical Geography*, (31) 155-178.
- Williams P., & Rosgen L. 1986: Measured total sediment load for 93 United States streams. U.S. Geological Survey.
- Yalin, M. S. 1963: An expression for bedload transportation. – *Journal of the Hydraulics Division*. (Vol. 89): 221-250.
- Yang, C. T., Marsooli, R., & Aalami, M. T. 2009: Evaluation of total load sediment transport formulas using ANN. *International Journal of Sediment Research*, 24(3): 274-286.
- Yang, C. T. 1984: Unit stream power equation for gravel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(12): 1783-1797.
- Zadeh, L. A. (1994). *Soft computing and fuzzy logic*. IEEE software, 11.
- Zeller J. 1985: Feststoffmessung in kleinen Gebirgseinzugsgebieten. *Wasser, Energie, Luft*, vol. 77, Nr. 7/8.

Zimmermann, M. 1989: Geschiebeaufkommen und Geschiebebewirtschaftung: Grundlagen zur Abschätzung des Geschiebehaushaltes im Emmental. Geograph. Inauguraldissertation der Philosophisch- naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Bern.

Zimmermann, M., & Lehmann, C. 1999: Geschiebefracht in Wildbächen: Grundlagen und Schätzverfahren. Wasser, Energie, Luft, 91(7/8): 189-194.

Zimmermann, M., Mani, P. & Gamma, P. 1997: Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS- basierter Ansatz. Projektschlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes "Klimaänderungen und Naturkatastrophen", NFP 31. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich.

9 Anhang

Der Anhang besteht aus drei Teilen A-C. Der Anhang A umfasst die Tabelle der mittleren Tagesniederschläge des Ereignistages (p1) bis 19 Tagen vor dem Ereignis (p19) für die 100 untersuchten Wildbäche. Der Anhang B zeigt die zentralen Programmierschritte für die Erstellung der KNN der vorliegenden Arbeit auf. Der Anhang C umfasst das Benutzerhandbuch zu dem EZG/GP-Tool, das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt worden ist. Es handelt sich dabei um ein eigenständiges Dokument (eigene Nummerierung)

Anhang A

Mittlere Tagesniederschläge des Ereignistages (p1) bis 19 Tagen vor dem Ereignis (p19).

Name	p20 [mm]	p19 [mm]	p18 [mm]	p17 [mm]	p16 [mm]	p15 [mm]	p14 [mm]	p13 [mm]	p12 [mm]	p11 [mm]	p10 [mm]	p9 [mm]	p8 [mm]	p7 [mm]	p6 [mm]	p5 [mm]	p4 [mm]	p3 [mm]	p2 [mm]	p1 [mm]
Glyssibach	1	5	12	7	0	0	0	0	5	1	33	26	0	0	10	29	40	97	115	2
Sandbach	0	0	36	11	0	0	0	8	2	10	46	0	15	0	0	1	14	0	20	7
Schwendibach	0	4	11	4	0	0	0	0	2	2	30	17	0	0	10	16	21	71	105	0
Rotlaubach	0	7	12	12	0	0	0	4	3	1	29	19	0	0	9	10	15	54	94	0
Schwarzbaechli	0	1	0	3	0	0	0	0	1	16	2	6	11	0	9	39	38	20	23	6
Rote Bach	10	12	12	5	4	0	0	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5
Tanzhubelbaechli	8	2	0	0	13	0	15	6	53	41	12	0	0	1	0	0	0	0	24	0
Fallbach	0	3	11	5	0	0	0	1	2	1	29	16	0	0	7	15	18	68	81	0
Louwibach	0	4	11	5	0	0	0	0	2	1	30	17	0	0	7	16	19	71	84	0
Wartenberggraben	5	0	4	12	5	0	0	0	0	2	2	31	17	0	0	8	16	20	72	96
Milibach	1	6	16	10	0	0	0	2	5	1	34	24	0	0	14	19	15	91	109	2
Betelriedgraben	2	0	1	3	0	2	0	0	0	0	5	16	1	2	9	0	13	38	42	28
Riggisalpbach	18	42	21	6	0	0	0	0	6	8	2	0	0	3	4	9	0	0	0	14
Chummerbach	39	0	0	0	16	16	1	16	0	0	0	0	0	0	0	5	2	0	0	13
Alpenbach	0	0	1	4	1	10	0	0	1	0	0	2	6	11	0	0	0	1	8	25
Schwenditobel	0	0	0	0	0	15	0	1	12	22	4	3	1	0	0	0	6	18	133	17
Val da Dusch	0	0	0	0	0	17	12	5	1	0	2	0	9	2	3	0	0	53	44	58
Vadret da l'Alp Ota	0	0	10	11	0	7	11	16	0	0	0	2	0	6	14	8	8	0	0	0
Val Varuna	0	5	5	2	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	6	5	23	58	110	24
Val Valdun	0	0	0	0	2	35	16	12	2	0	6	0	14	13	3	0	0	86	73	90
Plaunca	0	12	1	1	0	0	0	1	13	1	0	0	2	0	0	1	1	72	204	8
Val Farbertg	0	0	0	0	1	38	21	19	2	0	8	3	14	13	4	0	0	95	87	92
Lauigraben	5	1	4	15	8	0	0	0	0	6	0	25	36	0	0	8	28	33	114	44
Haldibach	8	1	7	26	16	0	0	0	0	6	0	42	39	0	0	3	23	19	103	121
Meisibach	8	1	5	15	8	0	0	0	0	7	0	26	30	1	0	14	35	48	108	61
Mehlbach	6	1	7	25	14	0	0	0	0	6	1	40	34	0	0	5	17	12	92	122
Fangtobel	6	1	6	25	13	0	0	0	0	6	1	38	36	0	0	5	19	15	99	112
Melbach	6	1	5	18	9	0	0	0	0	7	0	28	36	0	0	12	29	32	118	60
Acherlibach	7	1	7	23	10	0	0	0	0	7	1	36	33	0	0	17	23	19	104	103
Foribach	7	1	5	20	8	0	0	0	0	7	0	30	32	0	0	17	28	29	110	71
Dorfbach Sachsen	0	0	5	0	5	8	4	0	0	0	1	12	1	0	0	0	0	0	0	19
Flibach	0	19	5	1	11	0	9	49	74	29	21	6	0	0	1	5	24	137	28	0
Usser Dorfbach	2	7	18	17	0	0	0	0	7	0	36	29	2	0	2	30	23	93	117	2
Ri di Bedretto	5	10	0	4	0	0	0	0	1	0	0	16	0	0	0	0	0	84	223	32
Dongia	0	10	1	1	0	0	0	1	7	0	0	0	5	0	9	7	52	189	159	14
Ri di Ronco	5	11	0	3	0	0	0	0	1	0	0	16	0	0	0	0	0	80	215	30
Naesitalbach	6	2	8	19	16	0	0	0	0	4	1	36	27	1	0	5	18	9	66	128
Rio de Tennasses	23	12	4	14	13	15	0	0	2	0	7	0	0	0	9	3	7	1	0	13
Nant du Pissot	0	5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	6	8	21	0	1	17	3	7	0
Reuses du Dolent	5	7	0	0	0	8	10	0	6	30	0	0	8	0	22	0	0	0	6	0
Minstigerbach	1	10	0	1	0	0	0	0	0	1	0	20	0	0	0	0	0	63	184	24
Milibach	1	11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	50	132	20
Ritigraben	0	0	0	0	14	0	0	0	13	0	0	0	3	6	1	0	4	22	57	74
Horbach	0	5	11	3	0	0	0	0	2	2	31	21	0	0	9	18	25	85	115	0
Stegenbach	21	0	0	0	0	3	11	6	3	0	9	2	14	0	0	0	0	0	13	24
Seebach	3	4	10	7	0	0	0	4	0	0	18	5	2	0	5	24	36	15	104	17
Riale Lant	2	5	3	0	0	11	31	16	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	19
Rabiusa	0	0	10	1	2	0	0	0	0	14	1	0	0	2	0	0	1	2	75	227
Ferrera	0	13	1	2	0	0	0	1	19	1	0	0	3	0	0	1	2	79	233	10
Sinzera	0	0	13	1	1	0	0	0	1	16	1	0	0	2	0	0	1	2	76	225

Mittlere Tagesniederschläge des Ereignistages (p1) bis 19 Tagen vor dem Ereignis (p19).

Name	p20 [mm]	p19 [mm]	p18 [mm]	p17 [mm]	p16 [mm]	p15 [mm]	p14 [mm]	p13 [mm]	p12 [mm]	p11 [mm]	p10 [mm]	p9 [mm]	p8 [mm]	p7 [mm]	p6 [mm]	p5 [mm]	p4 [mm]	p3 [mm]	p2 [mm]	p1 [mm]
Buoholzbach	9	1	7	24	15	0	0	0	0	6	0	40	38	0	0	3	26	23	105	113
Duerrbach	5	2	7	27	16	0	0	0	0	5	1	41	33	0	0	3	18	12	83	127
Ri Bassengo	0	0	15	0	3	0	0	0	3	3	0	0	0	2	0	6	4	33	118	239
Eau Froide	9	22	0	32	7	0	0	0	0	17	0	0	2	34	0	0	0	15	34	73
Le Durnand	8	1	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	4	1	4	0	0	12
Minstigerbach	0	0	0	0	6	25	1	0	0	23	25	0	16	26	0	0	0	36	0	0
Spisszug	2	4	0	0	0	2	0	4	0	40	29	0	0	0	0	0	0	0	3	23
Trachtbach	4	1	5	10	6	0	0	0	0	5	1	32	27	0	0	9	28	44	94	116
Milchbach	8	3	6	15	22	0	0	0	0	4	3	29	13	3	0	6	18	3	39	137
Schisstalbach	8	5	6	14	19	0	0	0	0	2	2	39	27	2	0	5	20	11	68	181
Pletschenbachli	3	0	5	2	3	0	0	0	3	2	0	23	15	0	0	10	14	33	98	50
Chratzmattigraben	3	0	5	2	3	0	0	0	2	2	0	22	15	0	0	9	14	35	101	50
Goldbach	1	0	3	1	4	0	0	0	0	1	0	29	17	0	0	21	8	19	89	41
Ruebibach	6	1	5	18	8	0	0	0	0	7	0	27	36	0	0	11	30	33	118	55
Barenbach	6	2	7	27	15	0	0	0	0	5	1	41	34	0	0	3	18	12	88	126
Gruonbach	5	1	8	21	16	0	0	0	0	5	1	37	27	1	0	4	19	11	67	113
Mattenbach	7	0	4	13	9	0	0	0	2	3	2	30	14	0	0	11	18	19	62	104
Louwibach (Glattbach)	5	0	2	4	3	0	0	0	0	1	0	22	15	0	0	10	17	40	101	49
Tannersgraben	4	0	3	8	4	0	0	0	0	2	1	24	15	0	0	12	26	29	100	73
Sagliains	1	0	0	7	1	0	0	0	14	0	0	12	1	1	0	9	13	49	21	94
Selderbach	6	4	5	14	18	0	0	0	2	2	36	25	2	0	5	15	10	67	157	
Inner Blindlauigraben	0	1	7	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	4	6	5	0	15	9
Fritzenbach	4	22	9	0	11	6	11	15	4	0	0	0	0	0	0	0	1	14	0	1
Spissibach	10	6	6	7	4	0	0	9	3	21	0	0	0	0	3	4	10	0	0	12
Steinenbach	6	0	0	0	0	0	0	0	30	1	1	0	0	6	7	3	11	3	0	0
Laengenbachmuehle	23	27	0	7	9	6	2	0	6	22	18	14	0	1	0	0	20	4	7	59
Grosse Bachtale	0	8	14	27	6	2	0	0	0	0	3	2	0	0	3	46	26	3	0	0
Schwarzbach	4	0	3	4	3	0	0	2	3	2	0	25	12	0	0	9	10	8	65	35
Eistlenbach	4	1	5	13	7	0	0	0	0	6	1	34	25	0	0	10	30	32	102	108
Dorfruefe	1	0	1	7	1	10	4	0	0	0	27	7	0	0	0	0	6	0	0	16
Valparghera	2	0	4	0	11	3	3	0	0	45	36	64	0	17	3	0	7	10	0	24
Val Punteglias	0	12	1	2	0	0	0	0	18	1	0	0	3	0	0	1	2	78	232	10
Val Gronda	0	3	0	0	0	2	29	0	0	0	0	0	0	48	0	9	0	7	51	1
Steinibach	5	1	5	19	10	0	0	0	0	6	0	29	39	0	0	8	27	29	119	61
Humligenbach	7	1	6	22	13	0	0	0	0	6	0	35	39	0	0	3	25	23	112	91
Bitzighoferbach	6	0	3	1	0	0	0	0	1	6	1	0	0	0	2	8	5	1	0	1
Duerrbach	2	7	27	16	0	0	0	0	5	1	41	33	0	0	3	18	12	83	127	1
Edisriedbach	0	0	5	0	6	9	4	0	0	0	1	12	1	0	0	0	0	0	0	20
Gasenzenbach	26	13	0	0	0	1	0	0	0	39	0	0	0	8	0	0	1	0	51	30
Riale Tiglia	0	0	0	0	4	0	4	11	19	0	8	0	0	0	1	0	0	0	60	100
Brima	0	0	0	23	10	6	0	14	4	0	0	1	1	8	11	0	0	0	0	0
Riale di Sementina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	10	5	2	58	15	1	0	14	30
Leggiuna	0	8	0	9	0	0	0	0	10	0	0	0	1	0	10	9	80	199	75	18
Gangbach	6	3	7	16	16	0	0	0	0	3	2	36	26	2	0	5	16	9	66	143
Kummetbach	19	24	0	9	0	0	0	27	2	0	0	0	12	4	2	0	1	7	91	2
Poeschrueti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	18	15	5	81	53
Fischlauwi	0	0	2	37	0	0	0	0	16	0	0	5	4	0	0	0	0	0	5	43
Opplibach	2	0	1	0	1	3	3	0	0	1	23	2	12	3	0	3	0	4	71	109
Schipfenbach	4	68	13	15	13	1	5	3	0	0	20	0	18	0	0	0	0	4	23	1
Kirchbach	2	11	15	0	6	0	0	0	17	1	0	0	0	13	4	3	1	4	19	89

Anhang B

Zentrale Skripts für die Erstellung der Modelle

```

# Normalisierung
norm<-function(mv_to_normalize){
  norm_h<-function(x){
    norm_h<- (x-mean(x))/sd(x)
    return(norm_h)
  }
  norm_c<-c()
  if(class(mv_to_normalize) == "matrix"){

    for (i in 1: dim(mv_to_normalize)[2]){
      norm_c1<-norm_h(mv_to_normalize[,i])
      norm_c<-cbind(norm_c,norm_c1)
    }
    colnames(norm_c) <- colnames(mv_to_normalize)
    return(norm_c)
  }
  else
  return(norm_h(mv_to_normalize))
}
denorm<-function(vector_to_denormalize, normalize_data){
  denorm<-vector_to_denormalize*sd(normalize_data)+mean(normalize_data)
  return(denorm)
}

norm_new<-function(new_data, normalize_data){

  if(dim(new_data)[2]!= dim(normalize_data)[2]) return("the number of
input variable are not identical")
  norm_new<-c()
  for (i in 1: dim(new_data)[2]){
    norm_new_c<-(new_data[,i]-
    mean(normalize_data[,i])/sd(normalize_data[,i])
    norm_new<-cbind(norm_new,norm_new_c)
  }
  colnames(norm_new) <- colnames(new_data)
  return(norm_new)
}

# Akaike's Information Criterion (AIC)
AIC<- function(obs, sim, mlp_neural){
  K<-sum(mlp_neural$neurons[-length(mlp_neural$neurons)]*
(mlp_neural$neurons[-1]) )
  n<-length(obs)
  L<- (RSS(obs = obs, sim=sim))/n
  AIC<- n*log(L)+ 2*K + (2*K*(K+1))/ (n-K-1)
  return(AIC)
}

```



```

# Funktion Modell-Volumen
mlptrain_overfitt<-function (data, neurons_d, actfns_d ,it_v , k ){

  library(foreach)
  library(neural)
  source(file = "/Users// functions//normalize_functions.R")
  source(file = "/Users// splitting_data_functions.R")
  source(file = "/Users// AIC_RSS_functions.R")
  library(doParallel)
  # Backend foreach package
  cl <- makeCluster(8)
  registerDoParallel(cl)

  data_n<-norm(data)

  # k-fold Splitting
  kk<-dim(data)[1]/k
  # Splitting the data
  data_split<-split(as.data.frame(data_n), rep(1:k, each=kk ) )

  # data split only for produce the start weights
  data_valid<-data_split[[1]]
  data_train<-do.call(rbind, data_split[-1])

  # create start weights with the mlptrain function

  train_start<-mlptrain(
  inp =as.matrix(data_train[, (1:(dim(data_train)[2]- 1))]), out
  =as.matrix( data_train[, (dim(data_train)[2])]), neurons= neurons_d,
  actfns = actfns_d , it=0, permute=F, visual=F,online = T, alfa = 0.05)

  st_weigth<-train_start$weight
  st_dist<-train_start$dist

  # foreach for k-fold crossing #
  res_foreach<-foreach(z = 1:k, .packages=c('neural', "hydroGOF"))
  %dopar% {
    source(file = "/Users/AIC_RSS_functions.R")

  # data split
    data_valid<-data_split[[z]]
    data_train<-do.call(rbind, data_split[-z])
  nse_v_valid<-c()
  nse_v_train<-c()
  nrmse_v_valid<-c()
  nrmse_v_train<-c()
  r_sq_v_valid<-c()
  r_sq_v_train<-c()
  aic_v_valid<-c()
  aic_v_train<-c()

```

```

# ----- Train start----- #

# ----- calculate train start----- #
res_train<-mlp( inp =as.matrix(data_train[(1:(dim(data_train)[2]-
1))]) , weight = train_start$weight, train_start$dist,
train_start$neurons,train_start$actfns)

# ----- goodness train start----- #
nrmse_v_train_st<-nrmse(sim = res_train ,obs = as.matrix( data_train[,
(dim(data_train)[2]))] )
nse_v_train_st<-NSE(sim = res_train ,obs = as.matrix( data_train[,
(dim(data_train)[2]))] )
r_sq_v_train_st<-cor(res_train ,as.matrix( data_train[,
(dim(data_train)[2]))])^2
aic_v_train_st<-AIC(sim = res_train ,obs = as.matrix( data_train[,
(dim(data_train)[2]))] , train_start )
# ----- calculate valid start----- #
res_valid<-mlp( inp =as.matrix(data_valid[(1:(dim(data_valid)[2]-
1))]) , weight = train_start$weight, train_start$dist,
train_start$neurons,train_start$actfns)

# ----- goodness valid start----- #
nrmse_v_valid_st<-nrmse(sim = res_valid ,obs = as.matrix( data_valid[,
(dim(data_valid)[2]))] )
nse_v_valid_st<-NSE(sim = res_valid ,obs = as.matrix( data_valid[,
(dim(data_valid)[2]))] )
r_sq_v_valid_st<-cor(res_valid ,as.matrix( data_valid[,
(dim(data_valid)[2]))])^2
aic_v_valid_st<-AIC(sim = res_valid ,obs = as.matrix( data_valid[,
(dim(data_valid)[2]))] , train_start )

# ----- calculate train start +1 ----- #
train<-mlptrain( inp =as.matrix(data_train[(1:(dim(data_train)[2]-
1))]) , out =as.matrix( data_train[, (dim(data_train)[2])]) , weight =
st_weighth, dist=st_dist , neurons= neurons_d , actfns = actfns_d ,
it=1, permute=F, visual=F,online = T, alfa = 0.05)

# ----- calculate train start +1 ----- #
res_train<-mlp( inp =as.matrix(data_train[(1:(dim(data_train)[2]-
1))]) , weight = train$weight, train$dist, train$neurons,train$actfns)

# ----- goodness train start +1 ----- #
nrmse_v_train1<-nrmse(sim = res_train ,obs = as.matrix( data_train[,
(dim(data_train)[2]))] )
nse_v_train1<-NSE(sim = res_train ,obs = as.matrix( data_train[,
(dim(data_train)[2]))] )
r_sq_v_train1<-((cor(res_train ,as.matrix( data_train[,
(dim(data_train)[2]))])^2
aic_v_train1<-AIC(sim = res_train ,obs = as.matrix( data_train[,
(dim(data_train)[2]))] , train )

# ----- calculate valid start +1 ----- #
res_valid<-mlp( inp =as.matrix(data_valid[(1:(dim(data_valid)[2]-
1))]) , weight = train$weight, train$dist, train$neurons,train$actfns)

```

```

# ----- goodness train start +1 ----- #
nrmse_v_valid1<-nrmse(sim = res_valid ,obs = as.matrix( data_valid[,
(dim(data_valid)[2])) )
nse_v_valid1<-NSE(sim = res_valid ,obs = as.matrix( data_valid[,
(dim(data_valid)[2])) )
r_sq_v_valid1<-(cor(res_valid ,as.matrix( data_valid[,
(dim(data_valid)[2]))))^2
aic_v_valid1<-AIC(sim = res_valid ,obs = as.matrix( data_valid[,
(dim(data_valid)[2])) ) , train )

nrmse_v_train<-c(nrmse_v_train_st , nrmse_v_train1)
nse_v_train<-c(nse_v_train_st ,nse_v_train1 )
r_sq_v_train<-c( r_sq_v_train_st ,r_sq_v_train1)
aic_v_train<-c(aic_v_train_st, aic_v_train1 )

nrmse_v_valid<-c(nrmse_v_valid_st , nrmse_v_valid1)
nse_v_valid<-c(nse_v_valid_st ,nse_v_valid1 )
r_sq_v_valid<-c( r_sq_v_valid_st ,r_sq_v_valid1)
aic_v_valid<-c(aic_v_valid_st, aic_v_valid1 )

for( i in 1:it_v){

# calculate the results with training data
train<-mlptrain( inp =as.matrix(data_train[(1:(dim(data_train)[2]-
1))]), out =as.matrix( data_train[, (dim(data_train)[2])]), weight
=train$weight , dist=train$dist , neurons= neurons_d , actfns =
actfns_d , it=1 , permute=F, visual=F,online = T , alfa = 0.05)

res_train<-mlp( inp =as.matrix(data_train[(1:(dim(data_train)[2]-
1))]) , weight = train$weight, train$dist, train$neurons,
train$actfns)

# stat. goodness train
nrmse_v_train<-c(nrmse_v_train, nrmse(sim = res_train ,obs =
as.matrix( data_train[, (dim(data_train)[2])]) ))
nse_v_train<-c(nse_v_train, NSE(sim = res_train ,obs = as.matrix(
data_train[, (dim(data_train)[2])]) ) )
r_sq_v_train<-c( r_sq_v_train, (cor(res_train ,as.matrix(
data_train[, (dim(data_train)[2])]))))^2
aic_v_train<-c(aic_v_train, AIC(sim = res_train ,obs = as.matrix(
data_train[, (dim(data_train)[2])]) , train ) )

# Validation
res_valid<-mlp( inp =as.matrix(data_valid[(1:(dim(data_valid)[2]-
1))]) , weight = train$weight, train$dist,
train$neurons,train$actfns)

# stat. goodness
nrmse_v_valid<-c(nrmse_v_valid, nrmse(sim = res_valid, obs =
as.matrix( data_valid[, (dim(data_valid)[2])]))))
nse_v_valid<-c(nse_v_valid, NSE(sim = res_valid ,obs =as.matrix(
data_valid[, (dim(data_valid)[2])]), train ))
r_sq_v_valid<-c(r_sq_v_valid, (cor(res_valid ,as.matrix(
data_valid[, (dim(data_valid)[2])]))))^2
aic_v_valid<-c(aic_v_valid, AIC(sim = res_valid ,obs =as.matrix(
data_valid[, (dim(data_valid)[2])]), train ))

```

```

    overfitt<-rbind(nrmse_v_train,nrmse_v_valid,nse_v_train,
      nse_v_valid,r_sq_v_train,r_sq_v_valid,aic_v_train,aic_v_valid )
  }
  return(overfitt)
}
return(res_foreach)
}

# Modell-Klassen

nnet_cat_hit<-function(data, out, k ,maxit, size) {
  source(file = "/Users/normalize_functions.R")
  library(nnet)
  train_hit_kf<-c()
  valid_hit_kf<-c()

  data<-norm(data)
  out_class <- class.ind(out)

  # k-fold Splitting
  string<-dim(data)[1]/k
  for(i in 0:(k-1) ) {
    set.seed(2)
    data_valid<-data[ (1+ (i*string)) : ( (i+1) * string) , ]
    data_train<-data[- ((1+ (i*string)) : ( (i+1) * string)) , ]

    out_valid_class<-out_class[ (1+ (i*string)) : ( (i+1) * string) , ]
    out_train_class<-out_class[- ((1+ (i*string)):( (i+1)*string)),]

    out_valid<-out[ (1+ (i*string)) : ( (i+1) * string) ]
    out_train<-out[- ((1+ (i*string)) : ( (i+1) * string)) ]

    ann = nnet(x = data_train, y=out_train_class, size=size,
      softmax=T,trace=T ,maxit=maxit, lineout=F)

    train_hit_kf<-c(train_hit_kf, sum(iffelse( out_train == predict(ann,
      data_train, type="class" ), 1, 0 ) ) )

    valid_hit_kf<-c(valid_hit_kf, sum (iffelse( out_valid ==
      predict(ann, data_valid, type="class" ), 1, 0 ) ) )
    res<- rbind(train_hit_kf, valid_hit_kf)
  }
  return(res)
}

```

Anhang C Benutzerhandbuch EZG/GP-Tool

Benutzerhandbuch EZG/GP-Tool

GIS-Tool zur automatisierten Erhebung von charakteristischen Parametern von Wildbächen



Vorwort

Das Einzugsgebiets-, respektive Gerinneparameter-Tool, welches in diesem Benutzerhandbuch vorgestellt wird, ist im Rahmen der Masterarbeit „Abschätzung von ereignisbasierten Feststoffvolumina in Schweizer Wildbächen mit neuronalen Netzwerken“ entstanden. Das Tool ist dazu geeignet, um eine grosse Anzahl von charakteristischen Parametern von Wildbachgerinnen und Einzugsgebieten in der Schweiz zu erheben. Es handelt sich hierbei um Parameter, welche mit Geoinformationssystemen (GIS) erhoben werden. Das Tool ermöglicht eine automatisierte und systematische Erhebung der Parameter. Anwendungen des Tools sind im Bereich der Forschung und Praxis möglich. Das Tool erleichtert die Generierung einer breiten Datengrundlage für die Beschreibung von Wildbacheinzugsgebieten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Installation	2
3	Benutzeroberfläche	5
4	Notwendige Geodaten.....	6
4.1	Digital Terrain Modell DTM.....	6
4.2	swissTLM ^{3D}	6
4.3	geotec.....	7
4.4	RhiresD	8
4.5	HADES	9
5	Die 7 Schritte für die Verwendung des EZG/GP-Tools	10
6	Generierte EZG/GParameter	12
7	Programmierschritte des EZG/GP-Tools.....	18
7.1	Struktur des EZG/GP-Tool und Preprocessing	18
7.2	R Skript.....	19
8	Literaturverzeichnis	29
9	Anhang	30

Glossar

Bei der Verwendung von Abkürzungen und englischen Fachbegriffen wird aufgrund des Schriftbildes bewusst auf Anführungszeichen oder eine kursive Schreibweise verzichtet. Weiter werden Wörter wie Gerinnematrix aufgrund der Leserlichkeit mit einem Bindestrich getrennt: Gerinne-Matrix.

DTM	Digital Terrain Modell. Die Einheit des DTMs entspricht der Höhe über Meer.
EZG	Wildbacheinzugsgebiet. Die Fläche des Einzugsgebietes wird mit EZGfläche abgekürzt.
Geodaten	Der Begriff beschreibt GIS-Daten, welche Vektor und Rasterdaten umfassen und georeferenziert sind.
Georaster	Der Begriff beschreibt georeferenzierte Rasterdaten z.B. ascii-grid oder .tiff.
geotec	Geotechnische Karte der Schweiz
GIS	Geoinformationssystem
GP	Gerinneparameter
HADES	Hydrologischer Atlas der Schweiz
Matrix	Der Begriff wird verwendet für in R in Matrizen umgewandelte Georaster.
Parameter	Unter dem Begriff werden in dem Benutzerhandbuch charakteristische Kenngrößen des Wildbaches, wie zum Beispiel Einzugsgebietgrößen, Neigung des Hauptgerinne, verstanden.
QGIS	Quantum GIS:umfangreiche Open Source GIS Software.
R	Programmiersprache,welche für statistische Anwendungen geeignet ist.
Resample	Vergrößerung der Zellaufösung in einem Georaster, respektive in einer Matrix.
SAGA	Open Source GIS Software,speziell für Rasterverarbeitung geeignet.
shapefile	Vektorfileformat der Firma ESRI
swissTLM^{3D}	Im Text wird häufig nur TLM3D verwendet. Der Begriff steht für Topografisches Landschaftsmodell der Schweiz.
Vector25	Digitales Landschaftsmodell der Schweiz

1 Einführung

Das in diesem Benutzerhandbuch vorgestellte GIS-Tool eignet sich zur Berechnung der für die Charakterisierung von Schweizer Wildbächen beschreibenden Einzugs- und Gerinneparameter wie z.B:

- Einzugsgebietgrösse,
- mittlere Höhe des Einzugsgebietes,
- Länge des Hauptgerinnes
- Neigung des Hauptgerinnes
- Makrorauheit des Hauptgerinne
- Prozentualer Anteil von unterschiedlichen Bodenbedeckungsklassen wie Lockermaterial oder Wald.

Diese Parameter können für Forschungszwecke, sowie für die Beurteilung der Gefahrensituation von Bedeutung sein. Das Tool richtet sich an Personen, mit Erfahrungen in GIS und im Speziellen im Umgang mit der Open-Source-Software „QGIS“.

In dem Benutzerhandbuch wird erläutert, wie das EZG/GP-Tool installiert und bedient werden muss, damit eine optimale Nutzung möglich ist. Weiter wird aufgezeigt, welche Daten für die Verwendung des Tools notwendig sind. Die Arbeitsschritte für die Installation und die Anwendung des Tools sind in den ersten Kapiteln detailliert und mit Illustrationen erklärt. Anschliessend werden alle Produkte des EZG/GP-Tool erläutert. Im letzten Kapitel wird der Aufbau des Tools, sowie die einzelnen Berechnungsschritte bis ins Detail erläutert. Dieses Kapitel eignet sich für eine vertiefte Auseinandersetzung mit dem Tool.

2 Installation

Das Kapitel „Installation“ erklärt in mehreren Schritten, wie das EZG/GP-Tool auf einem „Windows“ basierten Rechner installiert werden kann. Getestet wurde diese Vorgehen für „Windows 7“, allerdings weicht die Installation auf anderen Betriebssystemen nur geringfügig ab.

Notwendige Software:

Das EZG/GP-Tool basiert auf der Open Source Software **QGIS** und der Programmiersprache **R**. Unter den beiden Links kann die Notwendige Software downloadet werden.

<http://www.qgis.org/de/site> (Entwickelt wurde das EZG/GP-Tool mit Version 2.6, getestet mit Version 2.12)

<https://www.r-project.org> (Entwickelt wurde das EZG/GP-Tool mit Version 3.1.3 getestet mit Version 3.2.2)

Für ein einwandfreies Funktionieren des EZG/GP-Tools ist es entscheidend, dass R-Skripts über QGIS angesteuert werden kann. In den folgenden Schritten wird erläutert, wie die beiden Softwarepakete miteinander verknüpft werden können. Je nach QGIS-Einstellungen und QGIS-Version, können die Begriffe welche die Abreitschritte angeben (sind fett und mit „→“ gekennzeichnet), in Englisch oder in Deutsch sein. Weiter kann der Pfad zu den einzelnen Werkzeugen wie zum Beispiel: **Erweiterungen → Installiert → Processing** von diesem Benutzerhandbuch abweichen.

Schritte zur Implementierung des R-Skripts

- 1) Installation R (sämtliche Informationen auf der Homepage siehe oben)
- 2) Installation QGIS (sämtliche Informationen auf der Homepage siehe oben)
- 3) Starten von QGIS
- 4) Rechtsklick auf die Toolzeile in QGIS, Werkzeugkiste (Processing) anwählen (vgl. Abbildung 2-1). Falls die Box „Verarbeitungswerkzeuge“ (vgl. Abbildung 2-3) nicht erscheint, muss im Reiter: **Erweiterungen → Installiert → Processing** angewählt werden (Achtung: das Plugin „Processing“ muss aktualisiert sein).



Abbildung 2-1: Visualisierung zu Arbeitsschritt 4

- 5) Für die Verknüpfung von R mit QGIS muss im Reiter **Verarbeitung** → **Optionen...** → **Anbieter** → **R-Skripts** → **R-Verzeichnis** zu dem Ordner mit der Installierten R-Version navigiert werden (Abbildung 2-2). In der Regel setzt sich der Pfad folgendermassen zusammen: **C:\Programme\R\R-Versionsname** (vgl. Abbildung 2-2). Im gleichen Schritt soll zusätzlich überprüft werden, dass **SAGA** ebenfalls aktiviert ist (alle Kreuze setzen).



Abbildung 2-2: Visualisierung zu Arbeitsschritt 5

- 6) Um zu überprüfen, dass die Verknüpfung funktioniert, empfiehlt es sich in der Verarbeitungswerkzeuge (vgl. Abbildung 2-3 Achtung: unten auf „**Advanced interface**“ umstellen) unter **R-Skripts** → **Tools** → **Get R-Skripts from online scripts collection** ein beliebiges R-Skript aus der Online-Auswahl herunterzuladen und mit beliebigen Geodaten testen.

Es ist möglich, ob die beiden Softwarepakete bereits nach dem Download korrekt verknüpft sind. In diesem Fall dienen die Schritte zur Überprüfung der Verknüpfung.

Schritte zur Implementierung des EZG/GP-Tools

Im Folgenden werden die notwendigen Schritte zur Implementierung des EZG/GP-Tools in QGIS erklärt. Dazu muss der Ordner „EZG_GP_Tool“ vorhanden sein. Das Tool besteht aus einem R-Skript, der in einem ersten Schritt implementiert werden muss. Danach wird in einem zweiten Schritt das File, indem die Benutzeroberfläche und der Arbeitsablauf des Tools gespeichert sind mit QGIS verknüpft.

- 1) File „EZG_GP_Tool_R.rsx“ aus dem Ordner „EZG_GP_Tool“ in den Ordner von: **Verarbeitung** → **Optionen...** → **Anbieter** → **R-Skripts** → **R-Verzeichnis** → **Ordner für die R-Skripts in QGIS** (vgl. Abbildung 2-2) verschieben. Nach einem Neustart von QGIS erscheint bei den Verarbeitungswerkzeugen unter **R-Skripts** → **User R scripts** das R-Skript **EZG_GP_Tool** (vgl. Abbildung 2-3, roter Rahmen).

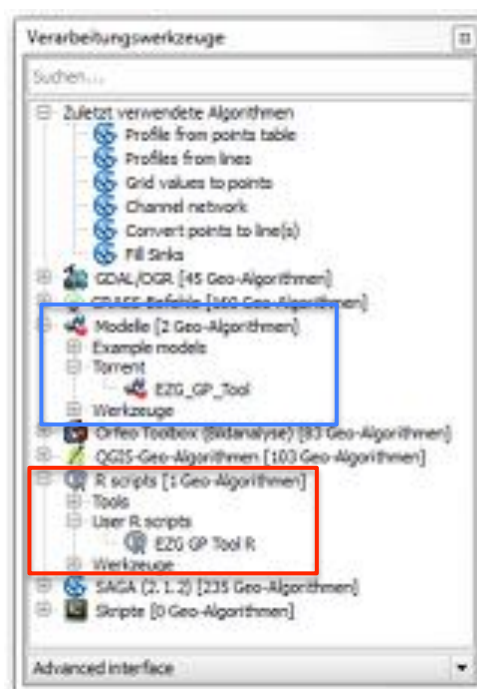


Abbildung 2-3: Verarbeitungswerkzeuge Advanced Interface

- 2) In den Verarbeitungswerkzeugen kann unter **Modelle** → **Werkzeuge** → **Füge Modell aus Datei hinzu** zu dem File „EZG_GP_Tool.model“ navigiert werden. Nachdem das File angewählt ist, ist das EZG/GP-Tool installiert. Unter **Modelle** → **Torrent** erscheint das EZG_GP_Tool (vgl. Abbildung 2-3, blauer Rahmen)

Mögliche Fehlerquellen

Der Ordner, in welchem nötige „R-Packages“ gespeichert werden sollen, ist schreibgeschützt. Ordner unter **Verarbeitung** → **Optionen...** → **Anbieter** → **R-Skripts** → **R user library Folder** (vgl. Abbildung 2-1) ändern oder den Schreibschutz aufheben.

3 Benutzeroberfläche

In der Abbildung 3-1 ist die Benutzeroberfläche dargestellt, welche erscheint, wenn nach der Installation unter Verarbeitungswerkzeugen bei **Modelle** → **Torrent** → **EZG_GP-Tool** ausgewählt wird. Wie die Benutzeroberfläche bedient werden muss, wird in Kapitel 5 erläutert.



Abbildung 3-1: Benutzeroberfläche des EZG/GP-Tool

4 Notwendige Geodaten

Für die Verwendung des EZG/GP-Tools sind mehrere Geodaten als Inputdaten notwendig. Die Parameter können nur mit der Verwendung dieser Daten berechnet werden. Im Folgenden werden sämtliche notwendigen Geodaten beschrieben. Die benötigten Geodaten befinden sich alle im EZG/GP-Tool-Ordner, mit Ausnahme des DTM.

4.1 Digital Terrain Modell DTM

Der wichtigste Input des Tools ist das Höhenmodell SwissALTI^{3D} von swisstopo. Der Datensatz wurde unterhalb von 2000 m ü. M. mit Laserscanning (Lidar) erstellt. In Gebieten oberhalb von 2000 m ü. M. wurde mithilfe von Luftbildern das Höhenmodell berechnet (Stereokorrelation). Die Genauigkeit (in alle drei Dimensionen) ist für die Laserpunkte mit ± 0.5 m 1σ angegeben. Für die Stereokorrelation wird eine Abweichung von 1-3 m angegeben. SwissALTI^{3D} ist als Rasterdatensatz mit einer Maschenweite von 2 m verfügbar (swisstopo, 2015a). Für die Anwendung des Tools muss das Höhenmodell für das gesamte Einzugsgebiet des Wildbaches vorhanden sein. Das EZG/GP-Tool wurde unter Verwendung des 2 m SwissALTI^{3D} entwickelt und getestet. Als Inputfiles wurden ascii-grid-files verwendet. Das Tool ist theoretisch auch für andere Zellengrößen vorgesehen, in diesem Fall empfiehlt es sich aber, die Resultate stichprobenartig zu überprüfen.

4.2 swissTLM^{3D}

Beim swissTLM^{3D} Datensatz handelt es sich um den Vektordatensatz (shapefile) mit dem grossmassstäblichen topografischen Landschaftsmodell der Schweiz (swisstopo, 2015b). Der Datensatz basiert auf dem Datensatz Vector25. Für klar definierte Objekte (wie Gebäude) ist die geometrische Genauigkeit in allen drei Dimensionen zwischen 0.2-2 m gegeben. Für nicht klar abgrenzbare Objekte (wie beispielsweise Wald) ist die geometrische Genauigkeit zwischen 1-3 m. Im EZG/GP-Tool werden lediglich die Featureklassen von TLM_Bodenbedeckung benötigt. Dieser Datensatz enthält neun unterschiedliche Datentypen, welche in Tabelle 4-1 definiert sind. Die Klassifikation der Daten in einem GIS erfolgt nach dem GDB-Code (vgl. Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Unterschiedliche Datentypen und deren Definition in der TLM_Bodenbedeckungfeatureklasse (Tabelle modifiziert swisstopo, 2014)

GDB-Code	Datentyp / Wertebereich	Definition
1	Fels	Fels
5	Fliessgewaesser	Flächen der Fliessgewässer. Minimalbreite: 5 m. Minimallänge: 500 m. Die Achsen der Fliessgewässer sind als Polylinien im Gewässernetz vorhanden.
6	Gebueschwald	Mit gleich- oder verschiedenartigen Sträuchern, dicht bestockte Fläche (hölzerne Pflanzen, welche sich bereits am Boden verästelten).
7	Lockergestein	Lockergesteinsflächen bestehend aus Felsfragmenten und Lockergestein, wie sie in Kiesgruben, Flussbetten, Deponien oder Gebirgsflächen vorgefunden werden. Minimaler Deckungsgrad: 20%.
9	Gletscher	Überwiegend mit Eis oder ewigem Schnee bedeckte Flächen.
10	Stehende Gewaesser	Stehende Gewässer sind dauernd oder periodisch bedeckte offene Wasserflächen, wie Seen, Stauseen, Teiche usw. Die Achsen der stehenden Gewässer sind als Polylinien im Gewässernetz vorhanden (→ Feature Class TLM_STEHENDES_GEWAESSER).
11	Feuchtgebiet	Ein Feuchtgebiet ist ein Gebiet, das im Übergangsbereich von trockenen zu dauerhaft feuchten Ökosystemen liegt. Der Begriff des Feuchtgebiets umfasst verschiedene Lebensraumtypen wie Sumpf, Moor, Bruchwald, Feuchtwiese, Aue oder Ried.
12	Wald	Eine bewaldete Fläche, die mit gleich- oder verschiedenartigen Bäumen dicht bestockt ist.
13	Wald offen	Eine wenig dicht bewaldete Fläche mit einer Bodenvegetation.

4.3 geotec

Das File „geotec“ ist eine für das EZG/GP-Tool generierte Karte der Schweiz mit unterschiedlichen Klassen, welche die Verwitterbarkeit des Untergrundes wiedergibt. Das shapefile basiert auf der vereinfachten, geotechnischen Karte der Schweiz, welche wiederum auf der 1:200'000 Karte der Schweizerischen geotechnischen Kommission aus den Jahren 1963-67 basiert. Die vereinfachte geotechnische Karte umfasst 30 Klassen, welche geotechnischen Einheiten wiedergeben (BWG, 1997). Diese Klassen werden nach 4 Kategorien zusammengefasst, welche die Verwitterbarkeit des Untergrundes wiedergeben. In Tabelle 4-2 ist dargestellt, welche Klassen zu welchen Verwitterungskategorien aggregiert werden (mit dissovle-Funktion von SAGA). In der geotechnischen Karte existiert weiter eine Klasse „Gewässer und Gletscher“.

Tabelle 4-2: Einteilung der 4 Verwitterungskategorien für das EZG/GP-Tool aus den 30 Klassen der vereinfachten geotechnischen Karte. In Klammer sind die für die Kategorien stellvertretenden Indizes dargestellt. Die Kategorien „Gewässer und Gletscher“ haben den Code 5 = Gewässer und 6 = Gletscher

Lockermaterial (1)	leicht verwitterbar mit hohem Feinanteil (2)	mittel verwitterbar mit mittlerem Feinanteil (3)	schwer verwitterbar mit kleinem Feinanteil (4)
Sande bis Silte	Mergel-Sandstein	Sandstein	Kalk
Tonige Silte	Mergel-Schieferton	Konglomerat (variabel)	Dolomit, Rauwacke/Gips
Kiese und Sande	Ton	Konglomerat, Arkose, Sandstein	Granit, Diorit, Quarzsyenit, Quarzdiorit
eckiger Schutt	Mergel	Schieferkalk, Kieselkalk, Radiolarit	Quarzporphyr, Porphyrit
	Konglomerat: Sandgestein, Mergel	Schiefer Gneis	Quarzit
	Tonschiefer		Gneis, Amphibolit
	Mergelschiefer, Kalkphylit, Sandstein		Konglomeratgneis
	Kalkphylit, Kalkglimmerschiefer		
	Mergelschiefer, Mergelkalk		
	Grünschiefer		
	Serpentinit, Peridotit		

4.4 RhiresD

RhiresD ist ein Rasterdatensatz mit interpolierten Niederschlagswerten [mm] mit einer räumlichen Auflösung von 1 km und einer zeitlichen Auflösung von einem Tag. Die Daten sind von 1961 bis heute verfügbar. Der Datensatz basiert auf den Messdaten des Niederschlagsmessnetzes von Metoschweiz. Dieses Messnetz umfasst aktuell rund 430 automatisierte und manuelle Messstationen. Bei der Interpolation der Daten werden mittels interpolierter Anomalien Klimatrenddaten berücksichtigt. Die Fehlerquellen des Datensatzes können in Messfehler der Niederschläge und Interpolationsfehler unterschieden werden. Die Messfehler der Niederschläge führen aufgrund von Windeinflüssen zu einer systematischen Unterschätzung der gemessenen Niederschlagswerte. Der Fehler der Messdaten variiert stark und wird von Sevruk (1985) je nach Wind- und Niederschlagsverhältnisse zwischen 4% - 40% geschätzt. Dabei ist eine Zunahme der Unsicherheit korrelierend mit der Höhe zu beobachten. Der Interpolationsfehler der Daten ist abhängig von der Art der Interpretation der Daten. Werden die Daten flächig (z.B. Mittelwerte über Einzugsgebiete) betrachtet, ist der Interpolationsfehler geringer, als wenn die Rasterwerte als Punktinformationen interpretiert werden. Die effektive Auflösung des RhiresD Datensatzes wird auf 15 – 20 km geschätzt. Diese Distanz entspricht einer durchschnittlichen Distanz zwischen zwei Messstationen (ganzer Abschnitt, MeteoSwiss, 2013).

4.5 HADES

Im EZG/GP-Tools werden die HADES Tafeln 2.2 „Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen“ und die Tafel 2.4² „Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden“ verwendet.

Tafel 2.2: Bei der HADES-Tafel 2.2 handelt es sich um eine auf 1 km Auflösung gerasterte Niederschlagskarte der Schweiz mit den mittleren jährlichen Niederschlagssummen [mm] für die Periode von 1951-1980. Die Datengrundlage entspricht derjenigen des RhiresD Datensatzes (Messstationen von MeteoSchweiz). Bei der Interpolation der Werte wird der systematische Messfehler der Niederschlagsmessungen sowie der Einfluss der Orographie (Zunahme der Niederschläge mit der Höhe) berücksichtigt (HADES, 2015a).

Tafel 2.4²: Die HADES-Tafel 2.4² umfasst vier shapefiles, welche für die Wiederkehrperioden von 2.33 und 100 Jahren die Höhen extremer Punktregen von ein- und 24- stündiger Dauer zeigen. Als Datengrundlagen werden Niederschlagsmessungen von insgesamt 503 Tagessammler verwendet. Für die statistische Analyse und Berechnung der Häufigkeit von Starkniederschlägen sind von den Tagessammler Messreihen vorhanden, welche bis ins Jahr 1901 zurückreichen. 30 Jahre ist die Mindestlänge der Messreihen, welche für die statistische Analyse verwendet werden. Für sämtliche Stationen kann durch die Durchführung einer Extremalstatistik die Höhe [mm] eines Starkniederschlages in Abhängigkeit der Wiederkehrperiode berechnet werden. Diese Werte werden anschliessend räumlich interpoliert (HADES, 2015b). Damit die Verwendung im EZG/GP-Tool möglich ist, werden die shapefiles auf 100 m gerastert. Durch die Umwandlung in das Rasterformat findet ein Genauigkeitsverlust statt, welcher bei einer Auflösung von 100 m im Bereich von 1% liegt.

5 Die 7 Schritte für die Verwendung des EZG/GP-Tools

- 1) Starten von QGIS mit installiertem EZG/GP-Tool (vgl. Kapitel 2)
- 2) DTM (vgl. Kapitel 4.1) in QGIS einlesen (Drag and Drop in QGIS Fenster). Wichtig: Als Koordinatenbezugssystem (KBS) CH1903LV03 verwenden. Das DTM danach auf die ungefähre Grösse des gewünschten EZG zuschneiden. Für das Zuschneiden kann in QGIS das Tool Clipper: **Raster → Extraktion → Clipper** gewählt werden.
- 3) TLM3dv1.shp und geotec.shp aus dem Ordner EZG_GP_Tool in QGIS einlesen (Drag and Drop ins QGIS Fenster)
- 4) EZG/GP-Tool öffnen (vgl. Kapitel 3)
- 5) Eingabe der Daten in Felder gemäss Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1: Beschreibung der einzelnen Felder der Benutzeroberfläche und Verwendungshinweise (die Abfolge entspricht der Abfolge der Benutzeroberfläche vgl. Abbildung 3-1 je nach QGIS-Version kann es jedoch zu Abweichungen kommen)

Feldname	Aktion
DEM (2m resolution)	DTM per Drop/Down Menu anwählen.
Land Cover (TLM_3D)	Shapefile-TLM3dv1 per Drop/Down Menu anwählen.
Geology (geotec)	Shapefile-geotec per Drop/Down Menu anwählen.
Event Date (YYYYMMDD)	Datum des Events im vorgegebenen Format eingeben.
River Threshold	Das Hauptgerinne im EZG/GP-Tool wird bis zu dem Punkt im EZG definiert, bei welchem die EZGfläche oberhalb des Punktes kleiner als der River Threshold [m ²] ist (vgl. Abbildung 5-1, der Defaultwert ist 500'000 m ²).
X- Koordinate	Entspricht der X-Koordinate des Punktes auf dem Kegel, von welchem aus das Einzugsgebiet definiert werden soll. Dieser Punkt wird automatisch auf das Gerinnenetz verschoben. Achtung: Die Koordinate muss im KBS:„CH1903LV03“ angegeben werden.
Y-Koordinate	Vgl. oben.
Choose DEM_Extent	DTM per Drop/Down Menu anwählen.
Workingdirectory	Als Workingdirectory muss ein Ordner ausgewählt werden, welcher sich in demselben Ordner befindet, wie der Ordner „data“ im Ordner EZG_GP_Tool. Zu dem Ordner „data“ existiert in dem Tool ein relativer Pfad. Der Name des Ordners Workingdirectory entspricht gleichzeitig dem Namen des Wildbaches. Dieser Name wird für die Erstellung der Resultate verwendet.

- 6) In die Felder: geotec, fill_sinks, TLM_3D und catchment area können optional Pfade zu Ordner eingegeben werden, wo die entsprechenden Files abgelegt werden. Diese Files entsprechen Zwischenresultaten und werden in der Regel bei der Verwendung des Tools nicht gespeichert. Die Tabelle 5-2 zeigt auf, welche Raster in diesen Zwischenresultaten abgespeichert werden.

Tabelle 5-2: Beschreibung der Files, welche über die Benutzeroberfläche gespeichert werden können.

Name	Beschreibung des Files
geotec	Gerasterte Form des geotec geclippt auf die Ausdehnung des eingegebenen DTMs.
Fill_sinks	Entspricht dem mit der fill sink Funktion von SAGA bereinigte DTM.
Geology (geotec)	Shapefile geotec per Drop/Down Menu anwählen.
TLM_3D	Gerasterte Form des TLM3dv1 geclippt auf die Ausdehnung des eingegebenen DTMs.
Catchment area	Entspricht dem flow accumulation Raster mit Einheit Quadratmeter (Anzahl Zellen multipliziert mit der Zellenfläche)

- 7) Nach dem Ausfüllen sämtlicher Felder kann mit „Run“ der Berechnungsprozess gestartet werden. Je nach Computermodell und in Abhängigkeit der Einzugsgebietgrösse variiert die Rechenzeit zwischen drei bis acht Minuten.

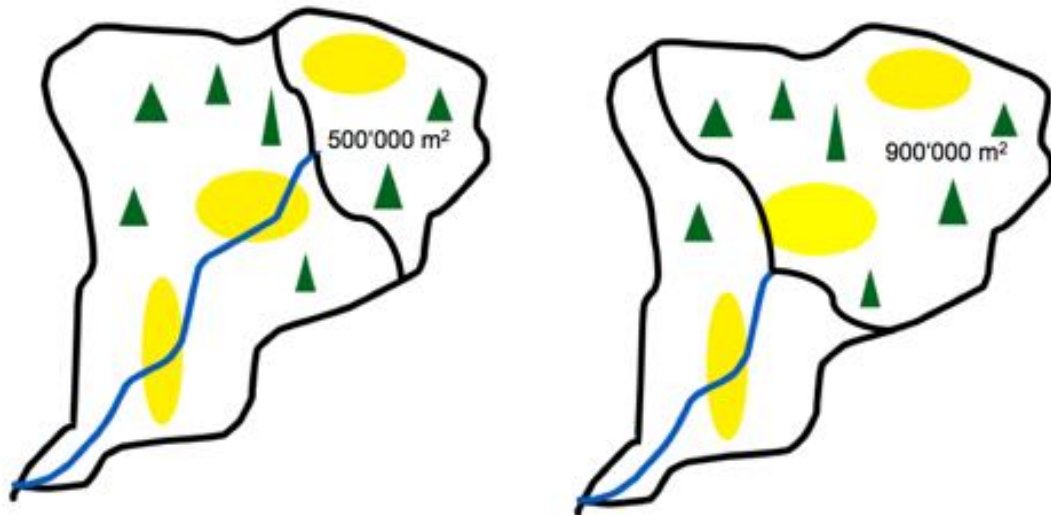


Abbildung 5-1: Visualisierung der Bedeutung des River Thresholds. Im linken fiktiven Beispiel entspricht der River Threshold 500'000 m², im rechten Beispiel entspricht der River Threshold 900'000 m². Je grösser der River Threshold gewählt wird, je kleiner ist die Länge des Hauptgerinnes.

6 Generierte EZG/GParameter

Nach der Durchführung der sieben Arbeitsschritte (vgl. Kapitel 5) werden die Resultate des EZG/GP-Tool in dem Workindirectory (vgl. Kapitel 5) gespeichert. Die Form der Resultate können in drei Gruppen – **Textfiles, Georaster, und R-Plots** - aufgeteilt werden. Im Folgenden werden sämtliche Ergebnisse aufgelistet und anschliessend die Ergebnisse für das Beispiel des Eistlenbach in Brienz (BE) vorgestellt.

Übersicht über sämtliche Ergebnisse gruppiert nach dem Format

- 1) **Textfiles** (Format .txt): Ergebnissen des EZG/GP-Tool in Textform.
 - **Name_Bach.txt**: In dem Textfile sind sämtliche generierten Parameter in Textform enthalten (vgl. Tabelle 6-1).
 - **river_point**: Textfile mit den x- und y-Koordinaten jeder Rasterzelle des Hauptgerinnes (maximale Auflösung für ein Längsprofil).
 - **macro_profil**: Textfile mit den z-Koordinaten für ein Längsprofil mit konstantem Abstand von 2.83 m (1.41 multipliziert mit Zellenlänge).

- 2) **Georaster** (Format .tiff) generierte Raster mit entsprechenden Informationen zum Einzugsgebiet. Folgenden Georaster werden erstellt:
 - **catch_height.tif**: Raster mit Höhenwerten (nach Fill-Sink) für sämtliche Zellen innerhalb des EZG.
 - **TLM_sub.tif**: Raster mit GDB-Code (Bodenbedeckung vgl. Tabelle 4-1) des TLM3dv1.shp Files.
 - **geotec_sub.tif**: Raster mit Code der geotec Karte (vgl. Tabelle 4-2).
 - **main_river.tif**: Raster mit dem Hauptgerinne. Der Rasterwert entspricht dem Gerinne.

- 3) **R-Plots** (Format .pdf) mit einer möglichen Visualisierung der Resultate.
 - **Plot_Chatchment_Height_EZG.pdf** (vgl. Abbildung 6-1)
 - **Plot_Geotec.pdf** (vgl. Abbildung 6-2)
 - **Plot_Longitudial_Profil.pdf** (vgl. Abbildung 6-5: Längsprofil des Hauptgerinnes)
 - **Plot_Precipitation.pdf** (vgl. Abbildung 6-4)
 - **Plot_TLM3D.pdf** (vgl. Abbildung 6-3)

Tabelle 6-1: Im EZG/GP-Tool generierte Daten mit einem Kurzbeschreibung. Als Beispiel sind die EZG/G-Parameter des Eistlenbach in Brienz dargestellt.

Name	Beispiel	Beschreibung
DTM abgeleitete EZG/GP-Parameter		
catchment area [m ²]	3'512'384	Fläche des EZG
middle catchment height [m]	1'551	Mittelwert sämtlicher DTM Rasterzellen innerhalb des EZG.
maximum catchment height [m]	2'204	Maximaler Rasterzellenwert des DTM innerhalb des EZG
minimum catchment height [m]	809	Minimaler Rasterzellenwert des DTM innerhalb des EZG
melton number [m]	0.74	Differenz zwischen maximaler und minimaler Höhe des EZG dividiert durch die Wurzel der Fläche.
channel length [m]	2'099	Länge des Hauptgerinnes wobei das Hauptgerinne dem Gerinneverlauf entspricht, welcher das Haupteinzugsgebiet entwässert. Falls die EZGfläche oberhalb des letzten Gerinnepunktes kleiner als der River Threshold (vgl. Kapitel 5) ist, ist das Hauptgerinne zu Ende.
slope mainchannel [%]	33	Neigung des Hauptgerinnes berechnet mit der Steigung der linearen Regression des Längsprofils (def. Längsprofil vgl. Kapitel 7.2.8).
macroroughness moving average	0.57	Standardabweichung der Residuen des gleitenden Mittels des Längsprofils.
macroroughness linear regression	17.4	Standardabweichung der Residuen der linearen Regression des Längsprofils.
RhiresD und HADES abgeleitete Werte		
extrem precip. 1h 100a [mm]	48	Über die EZGfläche gemittelter Wert des extremen Punktniederschlags aus den HADES Daten (vgl. Kapitel 4.5)
extrem precip. 1h 233a [mm]	22	Über die EZGfläche gemittelter Wert des extremen Punktniederschlags aus den HADES Daten (vgl. Kapitel 4.5).
extrem precip. 24h 100a [mm]	130	Über die EZGfläche gemittelter Wert des extremen Punktniederschlags aus den HADES Daten (vgl. Kapitel 4.5).
extrem precip. 24h 233a [mm]	65	Über die EZGfläche gemittelter Wert des extremen Punktniederschlags aus den HADES Daten (vgl. Kapitel 4.5).
annual mean precip [mm]	2198	Über die EZGfläche gemittelter, mittlere jährliche Niederschlag aus den HADES Daten (vgl. Kapitel 4.5).
precip. event day [mm]	108	Über die EZGfläche gemittelter Tagesniederschlags des Ereignistages aus den RhiresD Daten (vgl. Kapitel 4.4).
precip. one day before event [mm]	102	Über die EZGfläche gemittelter Tagesniederschläge der Tage vor dem Ereignis (bis 20 Tage vor dem Ereignis).
TLM^{3D} abgeleitete Werte (vgl. Kapitel 4.2)		
rock [%]	9	Prozentualer Anteil Fels im EZG
flowing waters [%]	0	Prozentualer Anteil Fließgewässer im EZG
brushland [%]	4	Prozentualer Anteil Gebüschwald im EZG
unconsolidated sediments [%]	11	Prozentualer Anteil Lockergestein im EZG
glacier [%]	0	Prozentualer Anteil Gletscher im EZG
standing waters [%]	0	Prozentualer Anteil stehende Gewässer im EZG
wetland [%]	0	Prozentualer Anteil Feuchtgebiet im EZG
forest [%]	24	Prozentualer Anteil Wald im EZG
open forest [%]	0	Prozentualer Anteil Wald offen im EZG
rock channel [%]	9	Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über Fels
flowing waters channel [%]	0	Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über Fließgewässer
brushland channel [%]	0	Prozentualer Anteil des Gerinnes über Gebüschwald

Generierte EZG/GParameter

Name	Beispiel	Beschreibung
glacier channel [%]	0	Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über Gletscher
standing waters channel [%]	0	Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über stehende Gewässer
wetland channel [%]	0	Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über Feuchtgebiete
forest channel [%]	10	Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über Wald
open forest channel [%]	0	Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über offenen Wald
geotec abgeleitete Werte (vgl. Kapitel 4.3)		
unconsolidated rock [%]	12	Prozentualer Anteil Lockergestein im EZG
easy wetherable [%]	13	Prozentualer Anteil leicht verwitterbares Gestein im EZG
medium wetherable [%]	0	Prozentualer Anteil mittel verwitterbares Gestein im EZG
poorly wetherable [%]	75	Prozentualer Anteil schwer verwitterbares Gestein im EZG
waters [%]	0	Prozentualer Anteil Gewässer im EZG
glacier [%]	0	Prozentualer Anteil Gletscher im EZG
unconsolidated rock channel [%]	13	Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über Lockergestein
easy wetherable channel [%]	0	Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über leicht verwitterbares Gestein
medium wetherable channel [%]	0	Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über mittel verwitterbares Gestein
poorly wetherable channel [%]	87	Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über schwer verwitterbares Gestein
waters channel [%]	0	Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über Gewässer
glacier channel [%]	0	Prozentualer Anteil des Gerinneverlaufs über Gletscher

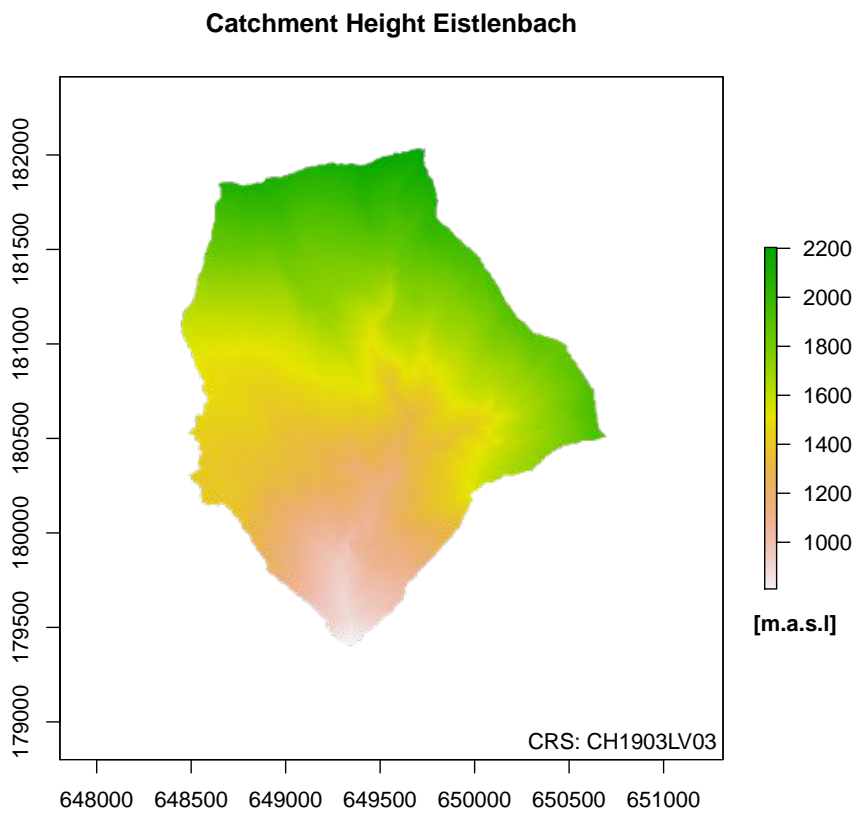


Abbildung 6-1: Höhe des untersuchten Wildbacheinzugsgebiet in Meter über Meer.

Aggregated Geotechnical Map in Eistlenbach Catchment

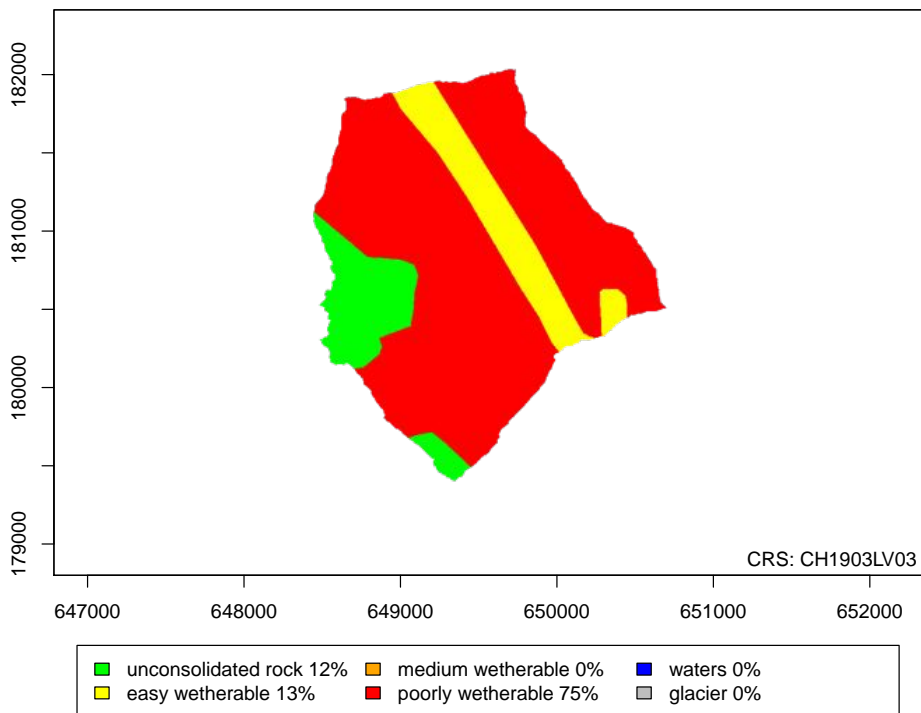


Abbildung 6-2: Verteilung der vier Kategorien der aggregierten geotechnischen Karte (vgl. Kapitel 4.3) im EZG

Land Cover Map (TLM3D) Eistlenbach Catchment

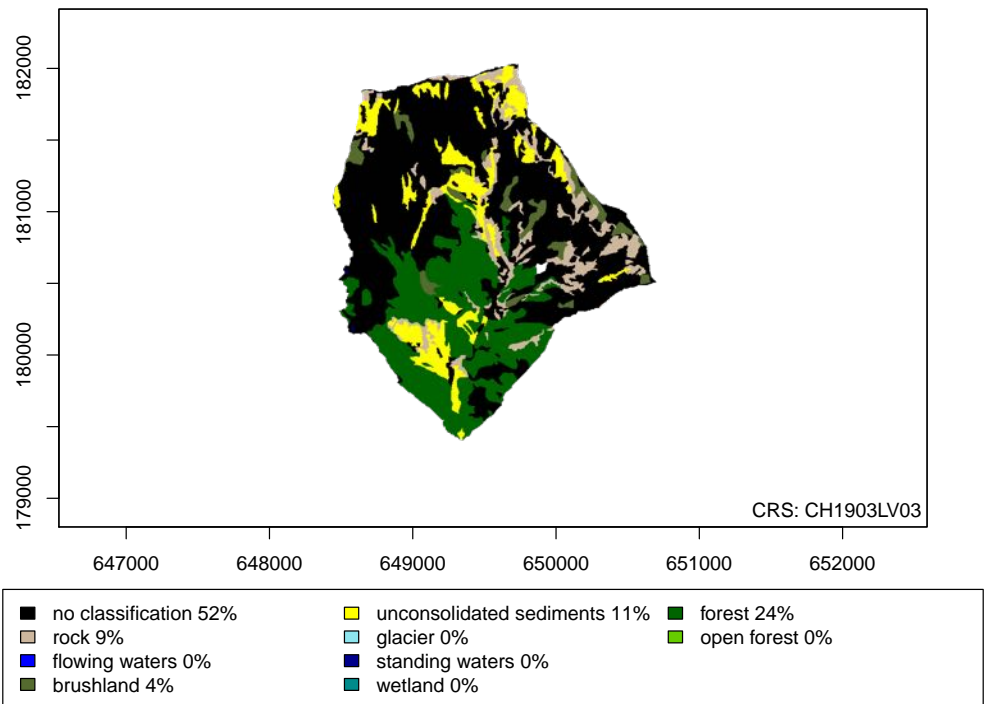


Abbildung 6-3: Verteilung der acht Klassen der Bodenbedeckungskarte (vgl. Kapitel 4.2) im EZG.

Mean Daily Precipitation Eistlenbach Catchment

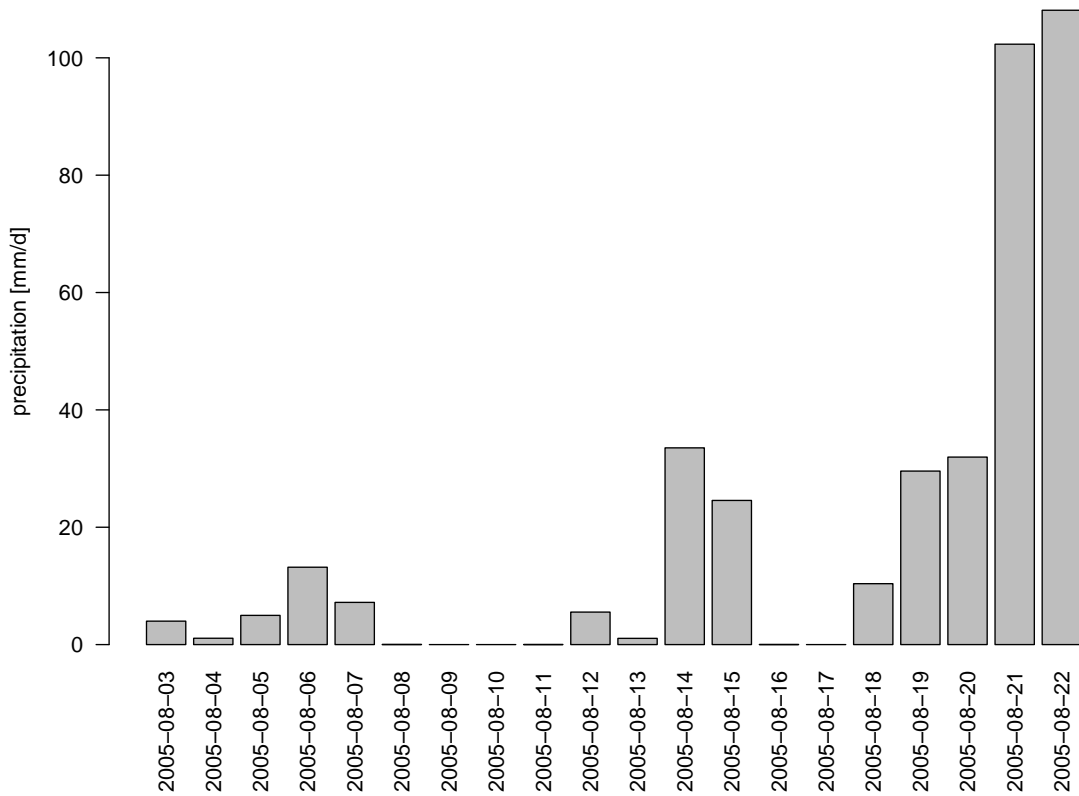


Abbildung 6-4: Tagesniederschlag gemittelt über das EZG für den Ereignistag und 20 Tage davor.

Longitudinal Profile Eistlenbach

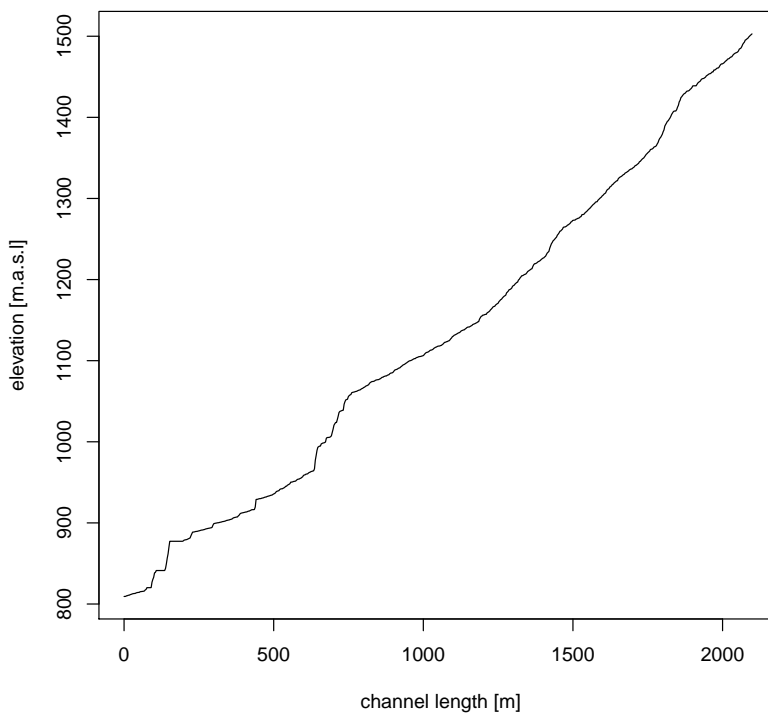


Abbildung 6-5: Längsprofil des Hauptgerinnes

7 Programmierschritte des EZG/GP-Tools

Der Aufbau des EZG/GP-Tool kann in zwei Teile geliedert werden: In einem ersten Teil (vgl. Kapitel 7.1) werden die Inputdaten des Tools so vorbereitet, dass die Daten in einem R-Skript (vgl. Kapitel 7.2) verarbeitet werden können. Im folgenden Kapitel werden die Berechnungsschritte Schritt für Schritt erläutert. Der Inhalt des Kapitels ist **nicht** essentiell für die Anwendung des EZG/GP-Tool sondern soll eine Möglichkeit zur Vertiefung darstellen. Bei einer allfälligen Modifikation des Skripts, gibt die detaillierte Beschreibung einen Überblick über die den Aufbau des Skripts. Ein Grundlagenwissen von GIS-Algorithmen sowie ein Basiswissen der R-Programmierungsumgebung ist von Vorteil, um die Beschreibungen in Kapitel sieben folgen zu können.

7.1 Struktur des EZG/GP-Tool und Preprocessing

In Abbildung 7-1 ist die Struktur des Preprocessings als Flussdiagramm dargestellt. Dieses Preprocessing sowie die Verknüpfung des R-Skriptes mit den Zwischenresultaten wird für das EZG/GP-Tool in der Verarbeitungsmodellierung von QGIS umgesetzt. Die Verarbeitungsmodellierung ist eine Plattform, in der Gealgorithmen miteinander verknüpft werden (ähnlich wie im Model Builder von ArcGis). Dieses Preprocessing in der Verarbeitungsmodellierung wird durchgeführt, weil die notwendigen SAGA-Algorithmen teilweise nicht über R angesteuert werden konnten und weil alternative Gealgorithmen in R eine längere Rechenzeit zu Folge hätten.

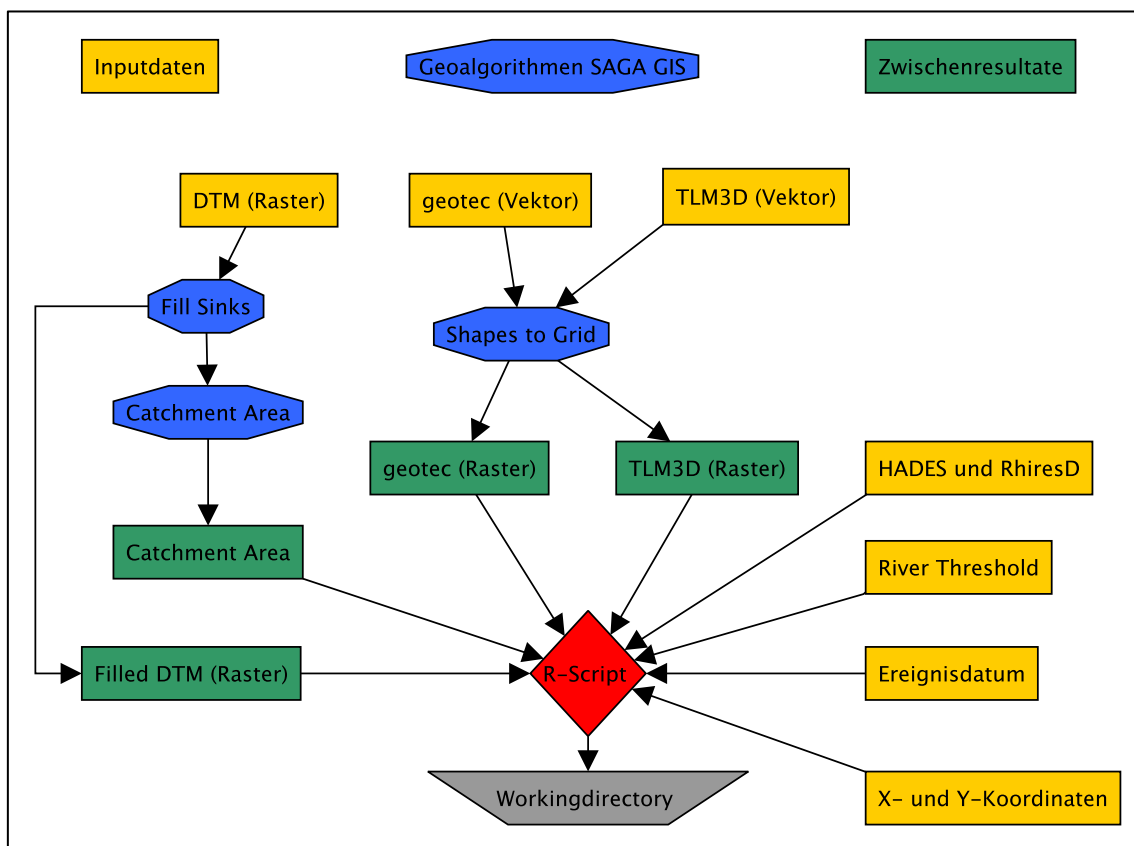


Abbildung 7-1: Flussdiagramm des Preprocessing des EZG/GP-Tool. Damit die Anwendung von Fließalgorithmen möglich ist, müssen die Senken im DTM mit dem Algorithmus Fill Sinks (SAGA GIS) gefüllt werden. Der Algorithmus Catchment Area (SAGA GIS) ist eine Verknüpfung der Flow

Direction und Flow Accumulation Berechnung und gibt für jede Zelle die entsprechende EZGfläche an. Die Funktion Shapes to Grid (SAGA GIS) wandelt die Vektorinputdaten in Rasterformat um.

7.2 R Skript

In dem folgenden Kapitel wird versucht der Ablauf des EZG/GP-Tool R-Skript zu erläutern. Für eine bessere Übersicht hilft Abbildung 7-2. In der Abbildung 7-2 sind die einzelnen Abschnitte mit Nummern in Klammern versehen. Diese Abschnitte werden in diesem Kapitel genauer erläutert. Die Abschnitte entsprechen ausgewählten Arbeitsschritten im R-Skript. Dabei werden diejenigen Arbeitsschritte detaillierter erläutert, welche nicht direkt mit einer vorhandenen R-Funktion durchgeführt werden konnte. Die Reihenfolge der Arbeitsschritte entspricht dem Ablauf im R-Skript. Für Details oder Überarbeitungen des Skripts kann unter **Verarbeitungswerkzeuge** → **R scripts** → **User R scripts** → mit Rechtsklick auf **EZG_GP_Tool_R** unter editiere Skript das gesamte R-Skript nachvollzogen werden. Weiter ist das gesamte R-Skript im Anhang aufgelistet. Mit # sind die Kommentare gekennzeichnet. Verwendete R-Funktionen werden mit „Funktionsname-Funktion“ angegeben. Befinden sich diese Funktionen in einem bestimmten R-Package wird der Packagename in Klammern angegeben.

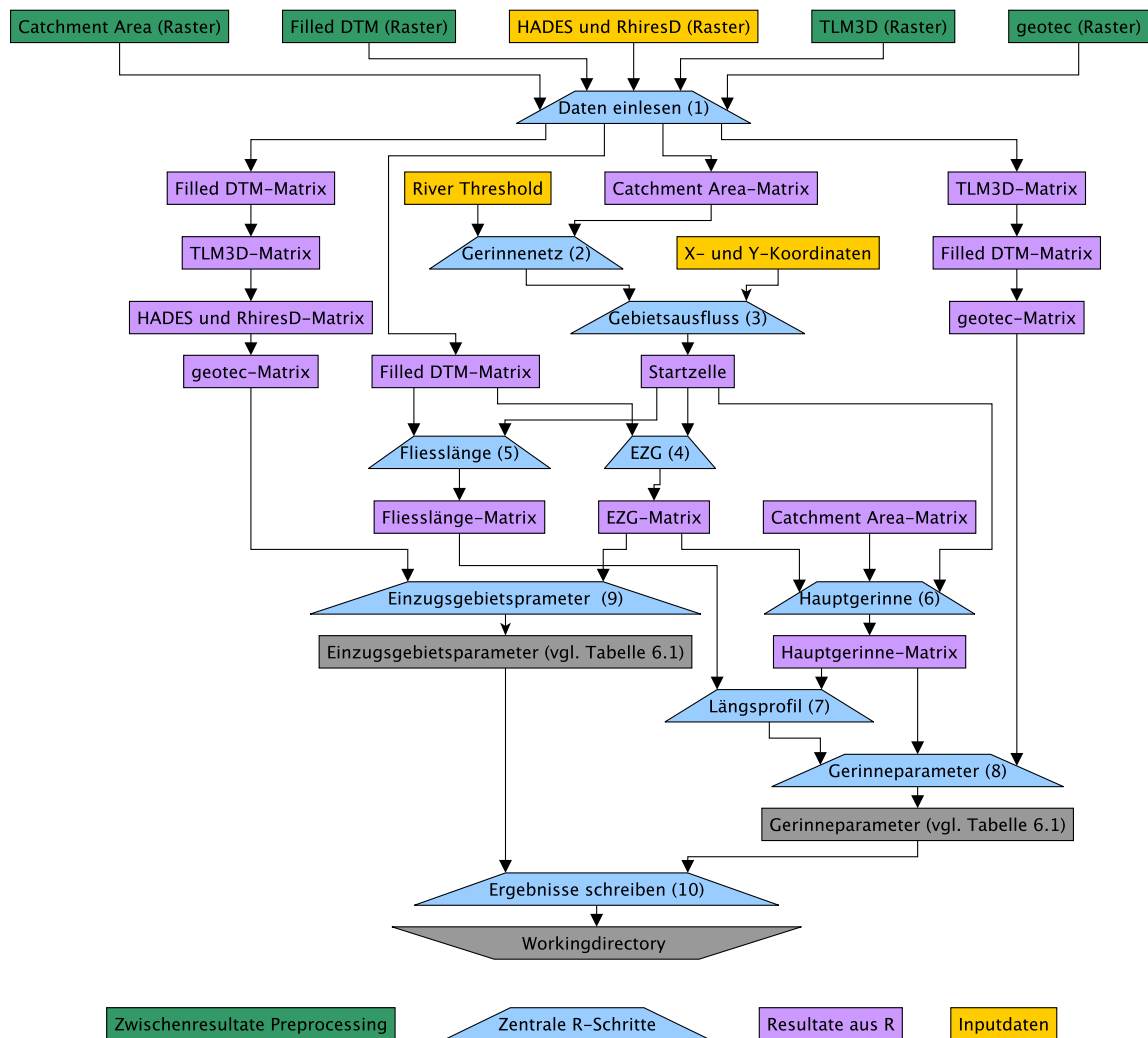


Abbildung 7-2: Flowchart des R-Skripts. Unterteilung in die wichtigsten Arbeitsschritte.

7.2.1 Daten einlesen

Über die Benutzeroberfläche (vgl. Kapitel 3) wird ein Ordner als Workingdirectory (vgl. Tabelle 5-1) eingelesen. Der Pfadname dieses Ordners wird mittels der `setwd()` Funktion als Arbeitsumgebung in R gesetzt. Dadurch werden sämtliche generierten Resultate aus dem R-Skript in diesem Ordner abgelegt. Der letzte Teil des Pfades (bis zum letzten Backslash) wird als Name des Wildbaches abgespeichert. Dieser Name soll dem Name des Wildbaches entsprechen (vgl. Tabelle 5-1). Weil der Name als Variable abgespeichert ist, kann er für Titel der Grafiken und der Beschriftung der Resultate eingesetzt werden. Die HADES und Rhires Daten werden aus dem data Ordner mit der R Function `brick()` (Raster-Package) eingelesen. Danach werden die Raster Filled DTM, Catchment Area, geotec und TLM3D aus dem Preprocessing (vgl. Abbildung 7-1) in eine Matrix umgewandelt. Dabei entsprechen die Zeilen und Spaltennamen der Matrix dem Koordinatenmittelpunkt der entsprechenden Rasterzellen. Die Umwandlung der Georaster in R-Matrix erfolgt mit der R-Funktion `as.matrix()`. Aufgrund dieser Umwandlung von Georastern in Matrizen wird in den weiteren Abschnitten zur Erläuterung des R-Skripts der Begriff „Matrix“ und nicht „Georaster“ verwendet. Weiter haben sämtliche Matrizen des gleichen Wildbaches dieselbe Anzahl Zeilen und Spalten. So können die Matrizen miteinander multipliziert werden. Die Zeilen- und Spaltennummer entsprechen somit den Koordinaten der Zellen.

7.2.2 Gerinnenetz

Die Catchment Area-Matrix entspricht einem Flow Accumulation-Raster. Einziger Unterschied ist, dass bei der Catchment Area-Matrix die Zellenwerte nicht der Anzahl der entwässerten Zellen entspricht, sondern der Anzahl entwässerten Zellen multipliziert mit der Zellenfläche. Ein kleiner Catchment Area-Wert bedeutet somit, dass nur wenige Zellen in diese Zelle entwässern. Die grössten Zellenwerte in der Catchment Area-Matrix befinden sich in einem Wildbacheinzugsgebiet auf dem Kegel und entsprechen dem Gebietsausfluss des gesamten EZG. Um das Gerinnenetz zu bestimmen, werden alle Zellen grösser als der River Threshold (vgl. Tabelle 5-1) bestimmt. Diese Zellen enthalten den Wert eins, alle Zellen kleiner als der River Threshold enthalten den NA-Wert (vgl. Abbildung 7-3). Weist eine Zelle den NA-Wert auf, entspricht das EZG dieser Zelle nur einem kleinem Teileinzugsgebiet des gesamten Wildbacheinzugsgebietes.

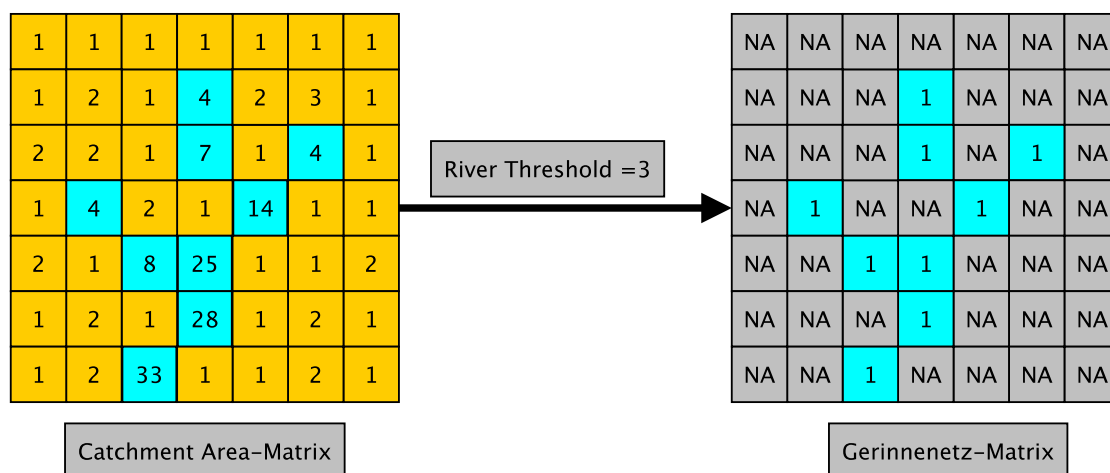


Abbildung 7-3: Berechnung des Gerinnenetzes mithilfe von Catchment Area.

7.2.3 Gebietsausfluss

Nach der Definition des Gerinnenetzes (vgl. Abbildung 7-3) kann die Gerinnenetz-Matrix mit der Catchment Area-Matrix multipliziert werden. Die Matrix, die bei dieser Multiplikation entsteht, ist in Abbildung 7-4 dargestellt. Als nächster Schritt muss die Zelle („Startzelle“) definiert werden, von welcher die Ausdehnung des EZG berechnet wird. Über die Benutzeroberfläche werden bei der Anwendung des EZG/GP-Tool die X- und Y-Koordinaten von dem Punkt eingegeben, von welchem die Ausdehnung des EZG berechnet werden soll. Diesem Startpunkt kann eine Zelle im Raster zugeordnet werden. Die ursprünglich definierte Startzelle auf dem Kegel des Wildbaches liegt in der Regel aber nicht auf dem Gerinnenetz (vgl. Abbildung 7-4, grüne Zelle). Damit die Berechnung des EZG jedoch durchgeführt werden kann, muss diese Startzelle auf dem Gerinnenetz liegen. Falls die Startzelle nicht auf dem Gerinnenetz liegt, ist der entsprechende Catchment Area-Wert der Zelle gleich NA. Ein Zellenwert von NA bedeutet, dass diese Zelle höchstens ein kleines Teileinzugsgebiet entwässert (vgl. Kapitel 7.2.2). Aus diesem Grund muss diese definierte Startzelle auf das definierte Gerinnenetz verschoben werden. Wie diese Verschiebung im R-Skript umgesetzt wird, ist im nächsten Abschnitt beschrieben. Damit die Umsetzung nachvollzogen werden kann ist der R-Code und die Abbildung 7-4 detailliert beschrieben.

```
# river entspricht der Matrix mit dem Gerinne und den Catchment Area
Werten
for(i in 1:100) {
  xy_pour<-river[(yc-i):(yc+i),(xc-i):(xc+i)]
  if(max(xy_pour)>0){
    index<-which(xy_pour==max(xy_pour),arr.ind=T)
    break("found Pourpoint")
  }
}
```

R-Code: Ausschnitt aus dem R-Skript EZG_GP_Tool.rsx zur Berechnung des Gebietsausflusses. river entspricht der Matrix mit dem Gerinne und den Catchment Area Werten (vgl. Abbildung 7-4). xc und yc entsprechen der Zeilennummer (xc) und Spaltennummer (yc) des Startpunktes (vgl. Abbildung 7-4 grünes Feld).

In einem ersten For-Schleifendurchgang (vgl. R-Code) wird rund um die ursprüngliche Startzelle eine Matrix mit dem Namen „xy_pour“ definiert. Diese „Suchmatrix“ (vgl. Abbildung 7-4, rotes Quadrat) hat eine Ausdehnung von 3x3 Zellen um die Startzelle (vgl. Abbildung 7-4, links). Wenn sich in dieser 3x3 Matrix eine Zelle mit einem Catchment Area-Wert grösser als NA befindet, existiert eine Gerinnezelle in der Suchmatrix. In diesem Fall ist die If-Bedingung erfüllt (vgl. R-Code). Wenn die If-Bedingung erfüllt ist, wird der Vektor mit dem Namen „index“ definiert. Dieser Vektor index enthält den Zeilen- und Spaltennamen der Gerinnezelle mit dem grössten Catchment Area-Wert innerhalb der Suchmatrix (vgl. Abbildung 7-4, rechts). Diese Zelle wird dann als neue Startzelle definiert, welche für die Berechnung des EZG verwendet wird (vgl. Kapitel 7.2.4).

Ist die If-Bedingung nicht erfüllt, beginnt der zweite Durchlauf der For-Schleife. Im zweiten Durchlauf wird die xy_pour Suchmatrix um ein weiteres Feld in jede Richtung (5x5) vergrössert (vgl. Abbildung 7-4, mitte). Anschliessend wird wiederum geprüft, ob die If-Bedingung zutrifft. Trifft die If-Bedingung nicht zu, wird die Suchmatrix um ein weiteres Feld vergrössert. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis die If-Bedingung erfüllt ist.

Die Startzelle wird nicht zwingend auf die Gerinnenetz-Zelle verschoben, welche sich am nächsten von der ursprünglich definierten Startzelle befindet, sondern immer auf die Zelle mit dem maximalen Catchment Area-Wert innerhalb der Suchmatrix. Dadurch befindet sich die definitive Startzelle in der Regel topographisch etwas tiefer auf dem Kegel als die ursprünglich definierte Startzelle. Die hier programmierte Lösung ist einfacher umzusetzen, als wenn die ursprüngliche Startzelle auf die Zelle mit dem geringsten Abstand dazu verschoben werden würde. Weiter kann durch diese Umsetzung verhindert werden, dass die EZGfläche unterschätzt wird. Die EZGfläche wird durch diese Verschiebung nur sehr geringfügig (Promillebereich) beeinflusst.

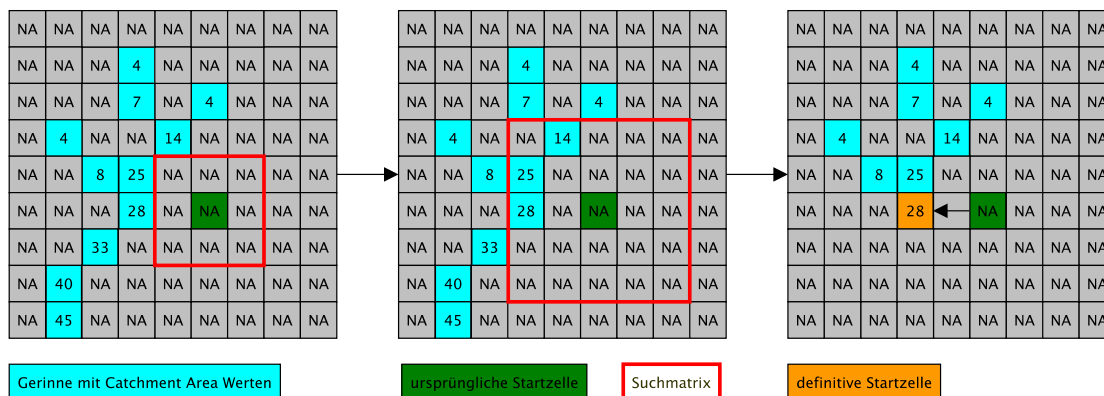


Abbildung 7-4: Visualisierung der Berechnung des Pouppoints.

7.2.4 EZG

Die EZG-Matrix besteht aus Zellen mit Zellenwerten eins und Zellenwerten NA. Zellen welche zum EZG gehören, haben einen Zellenwert eins alle anderen Zellen weisen den NA-Wert auf. Die EZG-Matrix wird mithilfe der subcatch-Funktion (topmodel Package) berechnet. Diese Funktion erfordert zwei Variablen, welche definiert werden müssen. Eine Variable ist die Filled DTM-Matrix, die zweite Variable entspricht der Spalten- und Zeilennummer des Gebietsausfluss. Die Berechnung der zweiten Variable wird in Kapitel 7.2.3 beschrieben.

7.2.5 Fließlänge

Die Berechnung der Fließlänge funktioniert analog zu der Berechnung des EZG (vgl. Kapitel 7.2.4). Bei der Berechnung der Fließlänge wird allerdings die flowlength-Funktion (Package Topmodel) verwendet. Die beiden Variablen, welche für die Verwendung dieser Funktion notwendig sind, entsprechen der subcatch-Funktion (vgl. Kapitel 7.2.4). Das Resultat der flowlength-Funktion ist eine Matrix mit den jeweiligen Fließlängen bis zum Gebietsausfluss, als Zellenwerte. Der Gebietsausfluss entspricht dabei der Startzelle aus Kapitel 7.2.3.

7.2.6 Hauptgerinne

In Kapitel 7.2.2 wird gezeigt, wie das Gerinnenetz berechnet wird. Sämtliche zu bestimmenden Gerinneparameter wie z.B. Neigung, Makrorauheit des Gerinnes beziehen sich jedoch auf das Hauptgerinne. Aus diesem Grund muss ein Algorithmus entwickelt werden, welcher aus dem Gerinnenetz das Hauptgerinne extrahiert. Dieser Algorithmus wird im Folgenden detailliert erläutert. Damit der Ablauf des Algorithmus nachvollzogen werden kann, empfiehlt es sich in einem ersten Schritt die Abbildung 7-5 mit den Erläuterungen der fünf Schritte genau zu studieren. In einem zweiten Schritt kann im R-Code die gesamte Umsetzung mit den entsprechenden Kommentaren (in grün) nachgelesen werden.

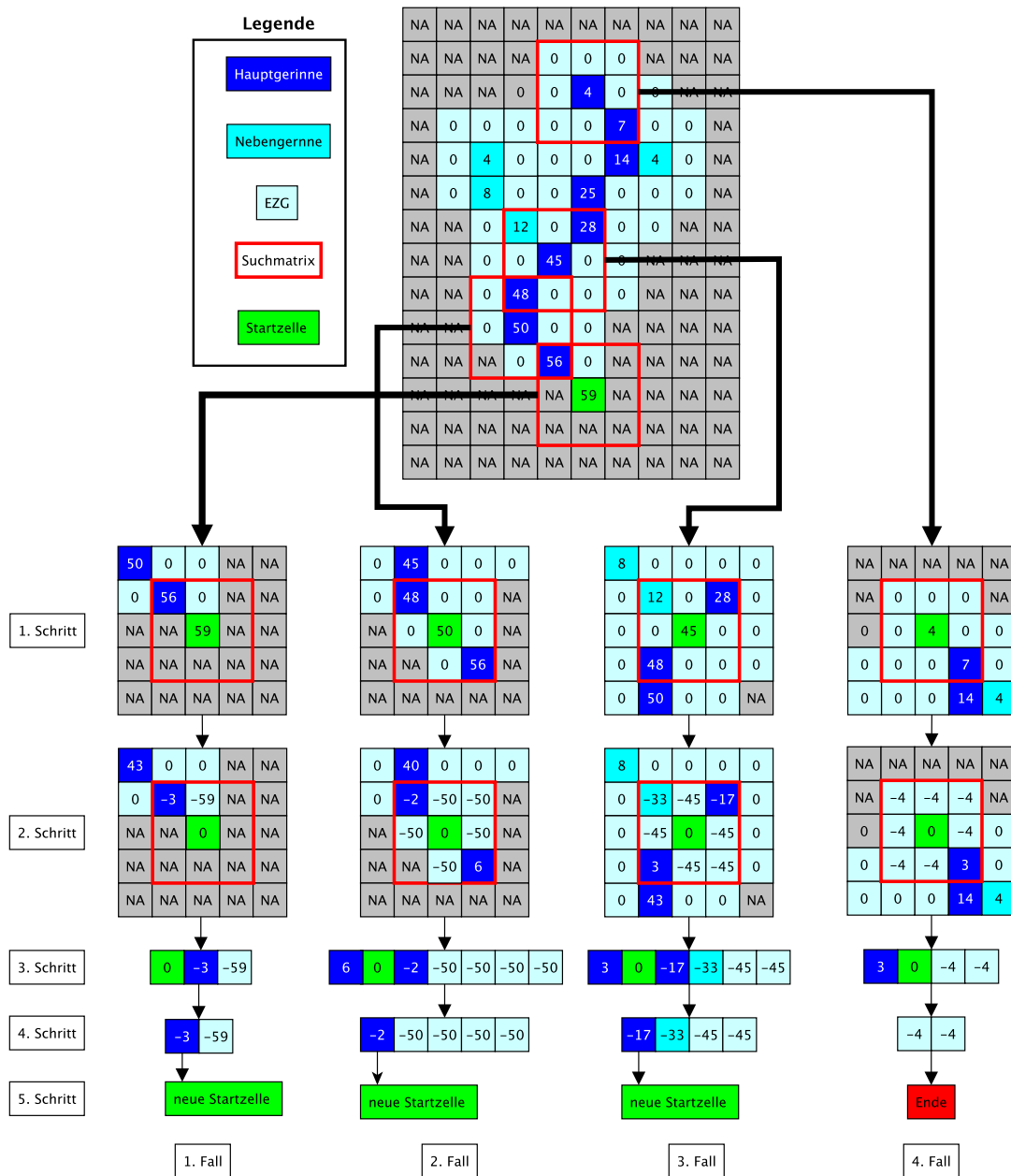


Abbildung 7-5: Flowchart des Algorithmus für die Definition des Hauptgerinnes.

In Abbildung 7-5 ist der Ablauf des Algorithmus zur Definition des Hauptgerinnes dargestellt. Die Abbildung besteht aus einer Matrix, welche das Gerinnenetz für einen fiktiven Wildbach aufzeigt. Die Zellenwerte des Gerinnenetzes entsprechen den Catchment Area-Werten (vgl. Kapitel 7.2.2). Zellen, welche zum definierten EZG des Wildbaches (vgl. Kapitel 7.2.4) gehören, aber nicht Teil des Gerinnenetzes sind, weisen den Zellenwert Null auf. Für die Berechnung der Gerinneparameter soll das Hauptgerinne definiert werden. Das Hauptgerinne entspricht dabei dem Gerinneverlauf, welcher das Haupteinzugsgebiet entwässert. Bei einer Verzweigung folgt (bachaufwärts betrachtet) das Hauptgerinne somit dem Gerinnearm mit dem grösseren oberliegenden EZG. In der Abbildung 7-5 ist das Hauptgerinne dunkelblau dargestellt. Unterhalb der Gerinnenetz-Matrix ist in Abbildung 7-5 in fünf Schritten visualisiert, wie der Algorithmus funktioniert. Diese fünf Schritte werden so lange wiederholt, bis das gesamte Hauptgerinne definiert ist. Dabei entspricht ein Durchgang der fünf Schritte einer neu definierten Zelle des Hauptgerinnes. Falls das Hauptgerinne 100 Zellen durchfließt, werden die fünf Schritte 100-fach repetiert. Diese fünf Schritte werden in der Abbildung 7-5 an vier Beispielen aufgezeigt. Diese vier Beispiele umfassen sämtliche Spezialfälle, welche auftreten können. Der erste Fall entspricht dem Startzenario, der zweite dem Normalfall, der dritte dem Fall einer Gerinneverzweigung und der letzte Fall entspricht der Definition der Quellzelle (letzte Zelle des Hauptgerinnes). Bei der Beschreibung der fünf Schritte wird bei jedem einzelnen Schritt auf sämtliche Spezialfälle eingegangen.

1) Schritt:

Im ersten Schritt wird um die Startzelle eine 3x3 Suchmatrix gebildet. Im Startzenario entspricht diese Zelle der in Kapitel 7.2.3 definierten, definitiven Startzelle. Bei den restlichen Fällen entspricht die Startzelle der im vorhergegangenen Durchlauf neu definierten Zelle des Hauptgerinnes.

2) Schritt:

Im zweiten Schritt wird von sämtlichen Zellenwerten in der Suchmatrix der Catchment Area-Wert der Startzelle subtrahiert. Befindet sich eine Zelle innerhalb der Suchmatrix, jedoch ausserhalb des EZG, entspricht der Wert nach der Subtraktion dem NA-Wert. Dieser Schritt führt in keinem der vier Fälle zu einem Sonderresultat.

3) Schritt:

Im dritten Schritt werden sämtliche Zellenwerte innerhalb der Differenzen-Suchmatrix der Grösse nach sortiert. Im Startzenario entspricht der grösste Wert immer Null. In den restlichen Fällen existiert in der Differenzen-Suchmatrix mindestens ein positiver Zellenwert.

4) Schritt

Im vierten Schritt werden sämtliche sortierten Werte, welche kleiner oder gleich Null sind, entfernt.

5) Schritt

Im fünften Schritt wird die Zelle mit dem grössten Differenzenwert (kleinste negative Zahl) als neue Startzelle ausgewählt. Diese Zelle entspricht in sämtlichen Fällen der nächsten Zelle des Hauptgerinnes. Weil ein Nebengerinne das kleinere EZG entwässert als das Hauptgerinne, weist die Zelle des Nebengerinnes bei einer Verzweigung den kleineren

Catchment Area-Wert auf, als die Zelle des Hauptgerinnes. Dadurch wird der Differenzwert auf der ersten Zelle des Nebengerinnes kleiner als bei der Zelle des Hauptgerinnes. Bevor die Startzelle neu definiert wird, wird die Reihen- und Spaltennummer der alten Startzelle in der Hauptgerinne-Matrix abgespeichert. Die Hauptgerinne-Matrix besteht aus zwei Spalten mit den Zeilen- und Spaltennummern der Hauptgerinnezellen. Die Anzahl Zeilen der Hauptgerinne-Matrix entspricht der Anzahl Hauptgerinnezellen im EZG.

Nach dem fünften Schritt ist eine neue Startzelle definiert, mit welcher der Ablauf der fünf Schritte wieder von neuem beginnt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis der grösste mit dem zweitgrössten Differenzwert (nach Schritt 4) identisch ist. In diesem Fall gibt es keine Zelle des Gerinnenetzes innerhalb der Suchmatrix, welche nicht in der Hauptgerinne-Matrix erfasst ist. In diesem Fall wird die Schleife abgebrochen, weil das gesamte Hauptgerinne in der Hauptgerinne-Matrix definiert ist. Der nachfolgende R-Code zeigt eine mögliche Umsetzung dieses Vorgangs:

```
# flow_acc entspricht der Catchment Area-Matrix
# sub_dem entspricht der EZG-Matrix
# river entspricht der Gerinnenetz-Matrix
b<-flow_acc*river*sub_dem

# st_index ist ein Vektor dessen Werte sich während des Ablaufs ändern
# zu Beginn wird dem Vektor die Reihen und Zeilennummer der Startzelle
# zugewiesen
st_index<-c()
st_index<-which(b== max(b, na.rm=T), arr.ind=T)
# Der erste Eintrag entspricht der der river_index-Matrix entspricht der
# Zeilen und Spaltennummer der st_index-Zelle
river_index<-matrix(st_index,ncol=2)
# river_point ist eine Matrix mit den X- und Y-Koordinaten
# sämtlicher Zellen des Hauptgerinnes (vgl. unten)
river_point<-matrix( c(colnames(b)[st_index[2]],
                      rownames(b)[st_index[1]]), ncol=2)
# nv ist ein Hilfsvektor (vgl. weiter unten)
nv<-c(1,2)
# In der while Schleife wird geprüft ob der erste Eintrag des nv-Vektors
# dem zweiten Eintrag entspricht. Die Schleife läuft so lange bis die
# Werte identisch sind.
while(nv[1] != nv[2]){
# acc_search entspricht einer 3x3 Suchmatrix um die st_index Zelle
  acc_search<-b[ (st_index[1]-1):(st_index[1]+1),
                (st_index[2]-1):(st_index[2]+1)]
# von der acc search Matrix wird der Wert der Zelle des st_index
# subtrahiert
  acc_search<-acc_search-b[st_index[1],st_index[2]]
# die Werte der neuen acc_search matrix werden der Grösse nach
# (absteigend) in dem nv-Vektor sortiert
  nv<-sort(as.vector(acc_search), decreasing = T)
```

```

# sämtliche null und negativen Werte des nv-Vektors werden gelöscht
nv<-nv[-which(nv>=0)]
# ist die Länge des nv-Vektors gleich eins, wird das zweite Element des
# Vektors als null definiert (für die Startsznarien, bei welchen in der
# Suchmatrix nur eine Hauptgerinnezelle und keine EZG-Zelle befindet
if(length(nv)==1) { nv[2]<-0 }
# die neue st_index Zelle entspricht der Zelle in der acc_search Matrix
# mit der geringsten positiven Differenz zu dem Zellenwert der st_index
# Zelle
st_index<-which(acc_search== nv[1], arr.ind=T)
# unter point werden die X- und Y-Koordinaten der aktuellen st_index
# Zelle gespeichert
point<-c(colnames(acc_search)[st_index[2]],
         rownames(acc_search)[st_index[1]])
# in der Matrix river_point werden zeilenweise die X- und Y-Koordinaten
# der Zellen des Hauptgerinnes hinzugefügt
river_point<-rbind(river_point,point)
# die Zeilen und Spaltennummer der neuen st_index-Zelle werden definiert
st_index<-c(which(rownames(b)==point[2]),
            which(colnames(b)==point[1]))
# river_index ist eine Matrix mit den Zeilen- und Spaltennummer
# sämtlicher Zellen des Hauptgerinnes.
river_index<-rbind(river_index,st_index)
}

```

R-Code:Algorithmus zu der Definition des Hauptgerinnes.

7.2.7 Längsprofil

Für ein Längsprofil eines Gerinnes müssen die Höhenwerte [m.ü.M] der einzelnen Hauptgerinnezellen bekannt sein. Diese können bestimmt werden, indem die Werte der Filled DTM-Matrix für alle Zellen des Hauptgerinnes ausgelesen werden. Die Spalten- und Zeilennummer des Hauptgerinnes sind in der Hauptgerinne-Matrix abgespeichert. Mit der which-Funktion können die Filled DTM-Werte für die Zellen des Hauptgerinnes ausgelesen werden. Wird die gleiche Vorgehensweise auf die Flowlength-Matrix (vgl. Kapitel 7.2.5) angewendet, können die Fliesslängen bis zum Gebietsausfluss für die Hauptgerinne-Zellen bestimmt werden. Mit der Fliesslänge (X-Achse) und den Höhenwerten [m.ü.M] (Y-Achse) kann ein Längsprofil gebildet werden. Dieses Längsprofil weist zwischen den Höhenwerten [m.ü.M] den Abstand der Zellenlängen **oder** den Abstand der Zellendiagonalen auf. Für die Berechnung der Makrorauheit (vgl. Tabelle 6-1) muss der Abstand zwischen den Höhenwerten jedoch konstant den gleichen Wert aufweisen. Entspricht dieser konstante Abstand der Zellendiagonale, weist das Profil die höchstmögliche Auflösung auf, ohne dass Höhenwerte doppelt verwendet werden. Damit der Abstand zwischen den Höhenwerten [m.ü.M] konstant der Distanz der Zellendiagonalen entspricht, wird in einem ersten Schritt der X-Achsen-Vektor (des Längsprofils) mit konstantem Abstand definiert. Anschliessend werden die Höhenwerte mithilfe einer Nearest-Neighbour Interpolation aus dem ursprünglichen Profil interpoliert.

7.2.8 Gerinneparameter

Mit Hilfe der Hauptgerinne-Matrix und dem Längsprofil können sämtliche Gerinneparameter aus Tabelle 6-1 bestimmt werden. Für die Bestimmung der Neigung des Hauptgerinnes wird eine lineare Regression (lm-Funktion) für das Längsprofil (vgl. Kapitel 7.2.7) berechnet. Die Neigung und der y-Achsenabschnitt der linearen Regression ist unter `lm$coeff` gespeichert. Die Makrorauheit wird berechnet, indem in einem ersten Schritt ein gleitendes Mittel des Längsprofils berechnet wird (Mittelung über zwei folgende Höhenwerte). Anschliessend werden die Residuen zwischen dem Längsprofil und dem geglätteten Längsprofil berechnet. Die Standardabweichung dieser Residuen entspricht der Makrorauheit des Gerinnes. Mit den Residuen der linearen Regression wird eine zweite Makrorauheit berechnet, welche eine grössere räumliche Auflösung aufweist. Die Länge des Hauptgerinnes wird durch den grössten Flowlength-Wert bestimmt. In Tabelle 6-1 sind Gerinneparameter aufgelistet, welche der prozentuale Anteil der Fließlänge über einen bestimmten Bodenbedeckungstyp oder Geologie angeben. Dieser prozentuale Anteil wird berechnet, indem die Hauptgerinne-Matrix (vgl. Abbildung 7-6, rechts) mit der TLM3D-Matrix oder der geotec-Matrix multipliziert wird. Das Resultat dieser Multiplikation ist in Abbildung 7-6 (rechts) für ein fiktives Beispiel dargestellt. Wird auf diese resultierende Matrix die table-Funktion angewendet, wird die Anzahl Zellen der unterschiedlichen Kategorien (hier Wald, Lockermaterial und Fels) angegeben. Unter Berücksichtigung der gesamten Anzahl Zellen des Hauptgerinnes (im Beispiel sechs Zellen) können die prozentualen Anteile berechnet werden.

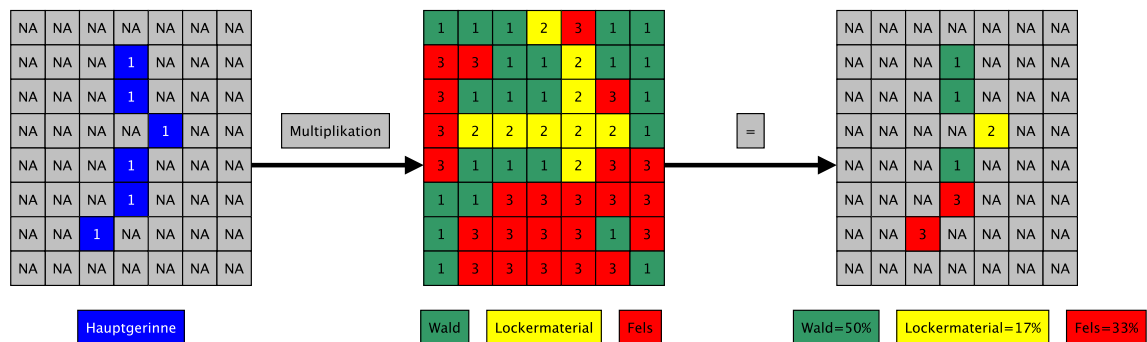


Abbildung 7-6: Visualisierung der Berechnung der prozentualen Anteile von Bodenbedeckung über dem Hauptgerinne.

7.2.9 Einzugsgebietsparameter

Für die Berechnung der Einzugsgebietsparameter wird die EZG-Matrix (vgl. Kapitel 7.2.4) verwendet. Die Summe der Zellenwerte der EZG-Matrix multipliziert mit der Fläche einer Zelle entspricht der EZG-Fläche. Die Multiplikation der EZG-Matrix mit der Filled DTM-Matrix ergibt eine Matrix, in der sämtliche Zellen innerhalb des EZG den Zellenwert der Höhe [m.ü.M] aufweisen. Der Mittelwert, der maximale Wert und der minimale Wert dieser Matrix entsprechen der mittleren, maximalen und minimalen Höhe des EZG. Die Berechnung der prozentualen Anteile der Bodenbedeckungstypen oder der Verwitterungskategorien erfolgt identisch zu der Berechnung der prozentualen Anteile im Hauptgerinne (vgl. Kapitel 7.2.8). Der Unterschied ist, dass nicht die Hauptgerinne-Matrix, sondern die EZG-Matrix (vgl. Abbildung 7-7) verwendet wird. Bei der Berechnung der mittleren Tagesniederschläge und der Niederschlagsstatistik über dem EZG werden die HADES und Rhires-Daten mit der resample-Funktion (Raster-Package) auf eine Auflösung von 100 m geändert (Nearest Neighbour Interpolation). Die EZG-Matrix wird

mit der aggregate-Funktion ebenfalls auf eine Auflösung von 100 m geändert. Ein resampling der HADES und RhiresD Daten auf eine Auflösung von zwei Metern würde zu viel Rechenleistung und Speicherplatz benötigen. Nach Veränderung der Zellengröße werden die aggregierte EZG-Matrix und die HADES und Rhires-Matrix multipliziert. Der Mittelwert der resultierenden Matrix entspricht dem mittleren Wert über die EZGfläche. Die „Unschärfe“, welche aufgrund der groben EZG-Matrix-Auflösung entsteht, ist unter Anbetracht der effektiven Auflösung der Niederschlagsdaten (vgl. Kapitel 4.4) vernachlässigbar.

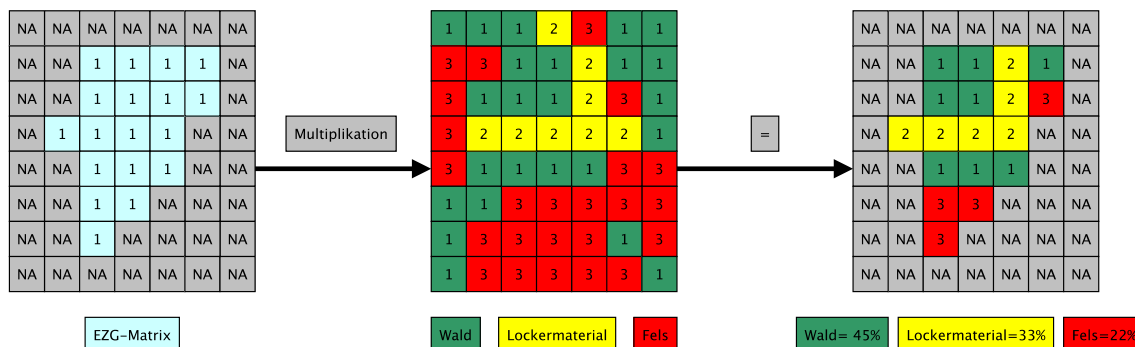


Abbildung 7-7: Visualisierung der Berechnung der prozentualen Anteile von Bodenbedeckung über dem EZG.

7.2.10 Ergebnisse schreiben

Sämtliche Einzugs- und Gerinneparameter werden bei der Berechnung (vgl. Kapitel 7.2.8 und 7.2.9) als Variable gespeichert. Mit dem Befehl write kann in R ein Textfile erstellt werden, in welchem der Inhalt der Variablen gespeichert wird. Das Textfile wird in dem Workingdirectory abgespeichert. Der Name des Files entspricht dabei dem Namen des Wildbaches. Die Georaster werden exportiert, indem mit Hilfe der raster-Funktion (Raster-Package) die Matrizen in ein Raster umgewandelt und anschliessend mit der writeRaster-Funktion in die Workingdirectory geschrieben werden. Sämtliche Abbildungen werden mit der plot- oder barplot-Funktion erstellt und mit der pdf-Funktion im Workingdirectory gespeichert.

8 Literaturverzeichnis

BWG, 1997: Vereinfachte Geotechnische Karte der Schweiz, Bundesmat für Wasser und Geologie / Bundesamt für Umwelt, Wald Landschaft.

HADES, 2015a: Tafel 2.2 Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen 1951-1980, Erläuterungstext, <http://www.hadesdaten.unibe.ch/downloads/datentabellen/niederschlag>, (Zugriff 5.11.2015)

HADES, 2015b: Tafel 2.4² Extreme Punktregegen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden, Erläuterungstext, <http://www.hadesdaten.unibe.ch/downloads/daten tabellen/niederschlag>, (Zugriff 5.11.2015)

MeteoSwis, 2013: Documentation of MeteoSwiss Grid-Data Products, Daily Precipitation (final analysis): RhiresD, Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss.

Sevruk, B., 1985: Systematischer Niederschlagsmessfehler in der Schweiz. In: Der Niederschlag in der Schweiz. (Ed. Sevruk B.), *Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie*, **31**, 65-75.

Swisstopo, 2014: Objektkatalog swissTLM^{3D}1.2, Bundesamt für Landestopografie swisstopo.

Swisstopo 2015a, Produkte: swissALTI^{3D}:
<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/swissALTI3D.html> (Zugriff: 2.11.15)

Swisstopo 2015b, Produkte > Landschaftsmodelle:
swissTLM^{3D}:<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/landscape/swissTLM3D.html> (Zugriff: 2.11.15)

9 Anhang

```
# read in QGIS
options("repos"="http://cran.at.r-project.org/")
tryCatch(find.package("topmodel"),error=function(e)
install.packages("topmodel", dependencies=TRUE))
tryCatch(find.package("raster"),error=function(e)
install.packages("raster", dependencies=TRUE))
tryCatch(find.package("rgdal"),error=function(e)
install.packages("rgdal", dependencies=TRUE))
tryCatch(find.package("raster"),error=function(e)
install.packages("raster", dependencies=TRUE))
library("raster")
library("rgdal")

fill_dem_in = brick("foldername to fill dem")
flow_acc_in = brick("foldername to fill dem")
TLM_in = brick("foldername to fill dem")
geotec_in = brick("foldername to fill dem")
river_threshold=500000
y_koord= user interface QGIS
x_koord= user interface QGIS
event_day= user interface QGIS
Folder =("foldername to workingdirectory")
setwd(Folder)

# Package
library(topmodel)
library(raster)

# name of torrent is the name of the workingdir folder
widir_split<-      strsplit( getwd() , "/")[[1]]
fluss_name<-widir_split[length(widir_split)]

# RhriesD daily percip- data 1km from folder
Sys.setenv(TZ='UTC')
rb <- brick("../data/rhires_grd/RhiresD_19610101_20141231.grd");rb

# HADES precip statistics 100m from folder
HA_1h100a <- brick("../data/HADES_precip_stat/HA_1h100a.tif")
HA_1h233a <- brick("../data/HADES_precip_stat/HA_1h233a.tif")
HA_24h100a <- brick("../data/HADES_precip_stat/HA_24h100a.tif")
HA_24h233a <- brick("../data/HADES_precip_stat/HA_24h233a.tif")
prec_mean <- brick("../data/HADES_precip_stat/prec_mean.tif")
```



```
#----- Inputvalues Qgis-----
# date of event
date<-event_day
event_year<-substr(date, 1, 4)
event_month<-substr(date, 5, 6)
event_day<-substr(date, 7, 8)
event_datum<-as.POSIXlt(paste(event_year,event_month,event_day,sep="-"))

# koordinates on the fan
xy<-c(x_koord, y_koord)

# ---convert input format tif or ascii to raster format in matrix

#-----Fill dem raster -----
fill_dem<-as.matrix(fill_dem_in)
fill_dem<-matrix(nrow=nrow(fill_dem_in),
ncol=ncol(fill_dem_in),fill_dem, byrow=T)
cellsize <- res(fill_dem_in)[1]

# define dem names
xtmp <- seq(xmin(fill_dem_in),xmin(fill_dem_in) + ((ncol(fill_dem_in)-
1)*cellsize),cellsize)
ytmp <- seq(ymin(fill_dem_in),ymin(fill_dem_in) + ((nrow(fill_dem_in)-
1)*cellsize),cellsize)
ytmp <- rev(ytmp)

grids <- c("fill_dem")
for(g in 1:length(grids)){
tmp <- get(grids[g])
rownames(tmp) <- ytmp
colnames(tmp) <- xtmp
assign(grids[g], tmp)
};rm(grids, g, tmp)

#-----Flow accumulation raster -----
flow_acc<-as.matrix(flow_acc_in)
flow_acc<-matrix(nrow=nrow(flow_acc_in),
ncol=ncol(flow_acc_in),flow_acc, byrow=T)

grids <- c("flow_acc")
for(g in 1:length(grids)){
tmp <- get(grids[g])
rownames(tmp) <- ytmp
```

```
colnames(tmp) <- xtmp
assign(gridsg, tmp)
};rm(gridsg, g, tmp)

#-----TLM_in_Raster -----
TLM<-as.matrix(TLM_in)
TLM<-matrix(nrow=nrow(TLM_in), ncol=ncol(TLM_in),TLM, byrow=T)

gridsg <- c("TLM")
for(g in 1:length(gridsg)){
tmp <- get(gridsg[g])
rownames(tmp) <- ytmp
colnames(tmp) <- xtmp
assign(gridsg[g], tmp)
};rm(gridsg, g, tmp)

TLM[is.na(TLM)] <- 0

#----- geotec_in Raster -----
geotec<-as.matrix(geotec_in)
geotec<-matrix(nrow=nrow(geotec_in),ncol=ncol(geotec_in),geotec,byrow=T)

gridsg <- c("geotec")
for(g in 1:length(gridsg)){
tmp <- get(gridsg[g])
rownames(tmp) <- ytmp
colnames(tmp) <- xtmp
assign(gridsg[g], tmp)
};rm(gridsg, g, tmp)

#----- River Raster -----
river_bin<-flow_acc>river_threshold
river<-river_bin*flow_acc

gridsg <- c("river")
for(g in 1:length(gridsg)){
tmp <- get(gridsg[g])
rownames(tmp) <- ytmp
colnames(tmp) <- xtmp
assign(gridsg[g], tmp)
};rm(gridsg, g, tmp)

river_ras<-raster(river, xmx=xmax(fill_dem_in), xmn=xmin(fill_dem_in),
ymx=ymax(fill_dem_in), ymn=ymin(fill_dem_in))
```

```

#-----Calculate Pourpoint-----
# Get column for the x-coordinate
xdist <- abs(xtmp + cellsize * 0.5 - xy[1])
xc    <- which(xdist == min(xdist))[1]
# Get row for the y-coordinate
ydist <- abs(ytmp + cellsize * 0.5 - xy[2])
yc    <- which(ydist == min(ydist))[1]

# Snap to river_dem Point with value >0 nearest to xc and yc
# in the first step a "search circle" around the chosen cell is define
with xy_pour
# the biggest value in this circle is the poupoint
index<-c()

for(i in 1:100){
# define search circle around Point
xy_pour <- river[(yc-i):(yc+i), (xc-i):(xc+i)]
if (max(xy_pour)>0){
index<-which(xy_pour== max(xy_pour), arr.ind=T)
break("found Pourpoint")
}
}

# define koordinates from pourpoint
pourpoint<-c(colnames(xy_pour)[index[2]], rownames(xy_pour)[index[1]])
pourpoint[2]

# river value only for manual control
river[pourpoint[2],pourpoint[1] ]

#----- Define Catchment -----
# define the outlet koordinates which can use in several TOPMODEL
function e.g. subcatch
outlet<-c(which(rownames(fill_dem)==pourpoint[2]),
which(colnames(fill_dem)==pourpoint[1]))

# -----define subcatch from outlet point raster with 0/1-----

sub_dem<-subcatch(fill_dem, outlet=outlet)
sub_dem_ras<-raster(sub_dem,xmx=xmax(fill_dem_in),
xmn=xmin(fill_dem_in), ymx=ymax(fill_dem_in), ymn=ymin(fill_dem_in))

sub_dem[sub_dem == 0]<-NA

```

```
# ----- EZG Parameter -----#
# Area m2
AEZG<-sum(sub_dem, na.rm=T)*(cellsize^2)

# -----define subcatch from outlet point raster with rasterheight-----
catch_height<-sub_dem*fill_dem

catch_height_ras<-raster(catch_height,xmx=xmax(fill_dem_in),
xmn=xmin(fill_dem_in), ymx=ymax(fill_dem_in), ymn=ymin(fill_dem_in))

writeRaster(catch_height_ras,filename="catch_height.tif",format="GTiff",
overwrite=TRUE)

#----- Plot catchment height
pdf(width =7,height = 7, file = "Plot_Catchment_Height_EZG.pdf")
plot(catch_height_ras, main=paste("Catchment Height " , fluss_name,
sep=""), legend.args=list(text=" [m.a.s.l]",font=2,
side=1,line=0.8))
mtext("CRS: CH1903LV03 ", 1 , line=-1.2, adj = 1)
dev.off()

# ----- EZG Parameter -----#
# mean height EZG
mhEZG<-mean(catch_height, na.rm = T)

# max height EZG
maxhEZG<-max(catch_height, na.rm = T)

# min height EZG
minhEZG<-min(catch_height, na.rm = T)

# Melton Zahl
melton<-(maxhEZG-minhEZG)/(sqrt(AEZG))

# -----flowlength and profile Raster -----
flow_length<-matrix(nrow=dim(fill_dem)[1], ncol=dim(fill_dem)[2])

flow_length<-flowlength(fill_dem, outlet=outlet)
flow_length<-sub_dem*flow_length

#----- Define Mainchannel with flowacc-----
b<-flow_acc*river*sub_dem
# Define Vector with start point
st_index<-c()
```

```
# the first start point is the biggest flowacc value is equal to the
flowacc at outlet
st_index<-which(b== max(b, na.rm=T), arr.ind=T)

# define the matrix with the coordinates
river_index<-matrix(st_index, ncol=2)
river_point<-matrix(c(colnames(b)[st_index[2]],
rownames(b)[st_index[1]]),ncol=2)

# nv ist the vector with the sorted difference Values
nv<-c(1,2)

while(nv[1] != nv[2]){
# if in the difference vector the values are the same the actual
st_index cell is the last of the channel

# define a search area around the st_index cell
acc_search<-b[(st_index[1]-1):(st_index[1]+1),(st_index[2]-
1):(st_index[2]+1) ]
# take the difference from the other values
acc_search<-acc_search-b[st_index[1],st_index[2]]
# sort the values
nv<-sort(as.vector(acc_search), decreasing = T)
# delete all poitive values (downstream values)
nv<-nv[-which(nv>=0)]
if(length(nv)==1){
nv[2]<-0
}

# define the new sartpoint for serching area
st_index<-which(acc_search== nv[1], arr.ind=T)
# define the coordinates of the point
point<-c(colnames(acc_search)[st_index[2]],
rownames(acc_search)[st_index[1]])
# write result matrix
river_point<-rbind(river_point,point)
# define the startpoint in the flowaccraster
st_index<-c(which(rownames(b)==point[2]), which(colnames(b)==point[1]))
river_index<-rbind(river_index,st_index)
}
# mainriverraster with 0/1
mainchannel<-matrix( nrow=dim(fill_dem)[1], ncol=dim(fill_dem)[2])
mainchannel[river_index]<-1

# export raster
```

```

mainchannel_ras<-raster(mainchannel, xmx=xmax(fill_dem_in),
xmn=xmin(fill_dem_in), ymx=ymax(fill_dem_in), ymn=ymin(fill_dem_in))
writeRaster(mainchannel_ras, filename="main_river.tif", format="GTiff",
overwrite=TRUE)

# vectors with the heights and distance longprofile
y_lprofile<-fill_dem[river_index]
x_lprofile<-flow_length[river_index]*cellsize

# replace fist value with NA with 0
x_lprofile<-rev(x_lprofile)
x_lprofile<-x_lprofile[-1]
x_lprofile<-rev(x_lprofile)

y_lprofile<-rev(y_lprofile)
y_lprofile<-y_lprofile[-1]
y_lprofile<-rev(y_lprofile)

# the correction with value 1 is to define the middle of the raster cell
river_point_corr<- (matrix(as.numeric(river_point), ncol=2)) +1
write.table( river_point_corr ,file="river_point_corr.txt", sep=";")

# Roughness Profile: the problem is to calculate the roughness the
distance between the profile points
profil<-cbind(x_lprofile,y_lprofile)
x_macro<-seq(from = (0),to = tail(x_lprofile,n=1), by = (2.828))
y_macro<-c()

for(i in 1: length(x_macro)) {
diff<-profil[,1]-x_macro[i]
y_macro[i]<-profil[ which(abs(diff)== min(abs(diff))) , 2]
rm(diff)
}

#----- Plot Longitudial-----
pdf(width =7,height = 7, file = "Plot_Longitudial_Profil.pdf")
plot(x_macro,y_macro, xlab=" channel length [m]", ylab="elevation
[m.a.s.l]", main=paste("Longitudial Profile", fluss_name ), type="l")
dev.off()

profil_macro<-cbind(x_macro,y_macro)

write.table( profil_macro ,file="macro_profil.txt", sep=";")

# ----- EZG Parameter -----#

```

```

# channel length
chan_length<-max(x_lprofile, na.rm=T)

# ----- EZG Parameter -----#
# slope with linear Regression main Channel
lin_reg<-lm(y_macro~x_macro)
slope<-(lin_reg$coeff[2])*100

# Macroroughness with linear regression
rough_linear_reg<-sd(lin_reg$residuals)

# Macroroughness with moving average
mov_aver<-c()
for (i in 1:(length(x_macro) -1 )){
mov_aver[i]<-(y_macro[i]+y_macro[i+1])/2
}
diff_mov_aver<-y_macro[-1]-mov_aver
plot(diff_mov_aver[1:10])
rough_mov_aver<-sd(diff_mov_aver)

# ----- TLM3D_dv1 -----
# TLM to EZG
TLM<- TLM*sub_dem

TLM_ras<-raster(TLM,xmx=xmax(fill_dem_in),xmn=xmin(fill_dem_in),
ymx=ymax(fill_dem_in), ymn=ymin(fill_dem_in))

writeRaster(TLM_ras,filename="TLM_sub.tif",format="GTiff",
overwrite=TRUE)

TLM_t<-table(TLM)

# calculate the different percentage and set 0 if the output is
numeric(0)

if(length((TLM_t[which(names(TLM_t))=="0"])/sum(TLM_t))*100)==0)
{no_data<-0}
else{no_data<-((TLM_t[which(names(TLM_t))=="0"])/sum(TLM_t))*100}
if(length((TLM_t[which(names(TLM_t))=="1"])/sum(TLM_t))*100)==0){rock<-0}
else{rock<-((TLM_t[which(names(TLM_t))=="1"])/sum(TLM_t))*100}
if(length((TLM_t[which(names(TLM_t))=="5"])/sum(TLM_t))*100)==0)
{waters_flow<-0}
else{waters_flow<-((TLM_t[which(names(TLM_t))=="5"])/sum(TLM_t))*100}

```

```

if(length((TLM_t[which(names(TLM_t))=="6"])/sum(TLM_t))*100)==0)
{bushes<-0}
else{bushes<-(TLM_t[which(names(TLM_t))=="6"])/sum(TLM_t))*100}
if(length((TLM_t[which(names(TLM_t))=="7"])/sum(TLM_t))*100)==0)
{unconsoild<-0}
else{unconsoild<-(TLM_t[which(names(TLM_t))=="7"])/sum(TLM_t))*100}
if(length((TLM_t[which(names(TLM_t))=="9"])/sum(TLM_t))*100)==0)
{glacier<-0}
else{glacier<-(TLM_t[which(names(TLM_t))=="9"])/sum(TLM_t))*100}
if(length((TLM_t[which(names(TLM_t))=="10"])/sum(TLM_t))*100)==0)
{waters_stand<-0}
else{waters_stand<-(TLM_t[which(names(TLM_t))=="10"])/sum(TLM_t))*100}
if(length((TLM_t[which(names(TLM_t))=="11"])/sum(TLM_t))*100)==0)
{wetland<-0}
else{wetland<-(TLM_t[which(names(TLM_t))=="11"])/sum(TLM_t))*100}
if(length((TLM_t[which(names(TLM_t))=="12"])/sum(TLM_t))*100)==0)
{forest<-0}
else{forest<-(TLM_t[which(names(TLM_t))=="12"])/sum(TLM_t))*100}
if(length((TLM_t[which(names(TLM_t))=="13"])/sum(TLM_t))*100)==0)
{forest_open<-0}
else {forest_open<-(TLM_t[which(names(TLM_t))=="13"])/sum(TLM_t))*100}

#----- Plot TLM3D
pdf(width =9,height = 7, file = "Plot_TLM3D.pdf")
par(mar=c(9, 4, 4, 0) + 0.1)
col_breaks<-c(0,0.9,4.9,5.9,6.9,8.9,9.9,10.9,11.9,12.9)
my_col= c("black","bisque3","blue","darkolivegreen","yellow",
"cadetblue2","blue4","cyan4","darkgreen","chartreuse3")
plot(TLM_ras, breaks=col_breaks,col=my_col, legend=F, main=paste("Land
Cover Map (TLM3D) ",fluss_name, sep="", " Catchment"))
mtext("CRS: CH1903LV03 ", 1, line=-1.2, adj = 1)
legend('bottom', inset=c(0,-0.35), xpd=T, legend = c( paste("no
classification ", round(no_data), "%", sep = ""),
paste("rock ", round(rock),"%", sep = ""),
paste("flowing waters ", round(waters_flow), "%", sep = ""),
paste("brushland ", round(bushes), "%", sep = ""),
paste("unconsolidated sediments ", round(unconsoild),"%", sep = ""),
paste("glacier ", round(glacier),"%", sep = ""),
paste("standing waters ", round(waters_stand),"%", sep = ""),
paste("wetland ", round(wetland),"%", sep = ""),
paste("forest ", round(forest),"%", sep = ""),
paste("open forest ", round(forest_open), "%", sep = "")) , fill =
my_col, ncol = 3)
dev.off()

```



```
# TLM calculating the percentage of the different soil cover over along
the mainchannel
TLM_channel<- TLM*mainchannel

TLM_ras_channel<-raster(TLM_channel,xmx=xmax(fill_dem_in),
xmn=xmin(fill_dem_in), ymx=ymax(fill_dem_in), ymn=ymin(fill_dem_in))
TLM_t_ch<-table(TLM_channel)

# calculate the different percentage
if(length((TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="0")]/sum(TLM_t_ch))*100)==0)
{no_data_ch<-0}
else{no_data_ch<(TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="0")]/
/sum(TLM_t_ch))*100}
if(length((TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="1")]/sum(TLM_t_ch))*100)==0)
{rock_ch<-0}
else{rock_ch<-(TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="1")]/sum(TLM_t_ch))*100}
if(length((TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="5")]/sum(TLM_t_ch))*100)==0)
{waters_flow_ch<-0}
else{waters_flow_ch<-(TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="5")]/
/sum(TLM_t_ch))*100}
if(length((TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="6")]/sum(TLM_t_ch))*100)==0)
{bushes_ch<-0}
else{bushes_ch<-(TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="6")]/
/sum(TLM_t_ch))*100}
if(length((TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="7")]/sum(TLM_t_ch))*100)==0)
{unconsoild_ch<-0}
else{unconsoild_ch<-(TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="7")]/
/sum(TLM_t_ch))*100}
if(length((TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="9")]/sum(TLM_t_ch))*100)==0)
{glacier_ch<-0}
else{glacier_ch<-(TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="9")]/
/sum(TLM_t_ch))*100}
if(length((TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="10")]/sum(TLM_t_ch))*100)==0)
) {waters_stand_ch<-0}
else{waters_stand_ch<-(TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="10")]/
/sum(TLM_t_ch))*100}
if(length((TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="11")]/sum(TLM_t_ch))*100)==0)
) {wetland_ch<-0}
else{wetland_ch<-(TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="11")]/
/sum(TLM_t_ch))*100}
if(length((TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="12")]/sum(TLM_t_ch))*100)==0)
) {forest_ch<-0}
else{forest_ch<-(TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="12")]/
/sum(TLM_t_ch))*100}
```

```
if(length((TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="13")]/sum(TLM_t_ch))*100)==0
) {forest_open_ch<-0}
else {forest_open_ch<-(TLM_t_ch[which(names(TLM_t_ch)=="13")]/
/sum(TLM_t_ch))*100}

# ----- geotec -----
# geotec to EZG
geotec<- geotec*sub_dem

geotec_ras<-raster(geotec, xmx=xmax(fill_dem_in), xmn=xmin(fill_dem_in),
ymx=ymax(fill_dem_in), ymn=ymin(fill_dem_in))
writeRaster(geotec_ras, filename="geotec_sub.tif", format="GTiff",
overwrite=TRUE)
geotec_t<-table(geotec)

# calculate the different percentage
if(length((geotec_t[which(names(geotec_t)=="1")]/sum(geotec_t))*100)==0)
{unconsolid_geo<-0}
else{unconsolid_geo<-(geotec_t[which(names(geotec_t)=="1")]/
/sum(geotec_t))*100}
if(length((geotec_t[which(names(geotec_t)=="2")]/sum(geotec_t))*100)==0)
{easy_wetherable<-0}
else {easy_wetherable<-(geotec_t[which(names(geotec_t)=="2")]/
/sum(geotec_t))*100}
if(length((geotec_t[which(names(geotec_t)=="3")]/sum(geotec_t))*100)==0)
{medium_wetherable<-0}
else{medium_wetherable<-(geotec_t[which(names(geotec_t)=="3")]/
/sum(geotec_t))*100}
if(length((geotec_t[which(names(geotec_t)=="4")]/sum(geotec_t))*100)==0)
{poorly_wetherable<-0}
else {poorly_wetherable<-(geotec_t[which(names(geotec_t)=="4")]/
/sum(geotec_t))*100}
if(length((geotec_t[which(names(geotec_t)=="5")]/sum(geotec_t))*100)==0)
{water_geo<-0}
else{water_geo<-(geotec_t[which(names(geotec_t)=="5")]/
/sum(geotec_t))*100}
if( length((geotec_t[which(names(geotec_t)=="6")]/
/sum(geotec_t))*100)==0) {glacier_geo<-0}
else{glacier_geo<-(geotec_t[which(names(geotec_t)=="6")]/
/sum(geotec_t))*100}
```

```

#----- Plot Geotec
pdf(width =9,height = 7, file = "Plot_Geotec.pdf")
par(mar=c(7, 4, 4, 0) + 0.1)
col_breaks<-c(0,1,2,3,4,5,6)
my_col = c("green","yellow","orange","red", "blue", "grey")
plot(geotec_ras,breaks=col_breaks,col=my_col,legend=F,
main=paste("Aggregated Geotechnical Map in ",fluss_name,sep="","
Catchment"))
mtext("CRS: CH1903LV03 ", 1 , line=-1.2, adj = 1)
legend("bottom", inset=c(0,-0.25), xpd=T, legend = c(
paste("unconsolidated rock ", round(unconsolid_geo),"%", sep="") ,
paste("easy wetherable ", round(easy_wetherable),"%", sep=""),
paste("medium wetherable ",round(medium_wetherable),"%", sep="") ,
paste("poorly wetherable ",round(poorly_wetherable),"%", sep="") ,
paste("waters ",round(water_geo),"%", sep=""),
paste("glacier ",round(glacier_geo),"%", sep="") ), fill = my_col, ncol
= 3)
dev.off()

# geotec calculating the percentage of the differnt soil cover over
along the mainchannel
geotec_channel<- geotec*mainchannel
geotec_ras_channel<-raster(geotec_channel,xmx=xmax(fill_dem_in),
xmn=xmin(fill_dem_in), ymx=ymax(fill_dem_in), ymn=ymin(fill_dem_in))
geotec_t_ch<-table(geotec_channel)

# calculate the different percentage
if(length((geotec_t_ch[which(names(geotec_t_ch)=="1")]/sum(geotec_t_ch))
*100)==0) {unconsolid_geo_ch<-0}
else{unconsolid_geo_ch<-(geotec_t_ch[which(names(geotec_t_ch)=="1")]/
sum(geotec_t_ch))*100}
if(length((geotec_t_ch[which(names(geotec_t_ch)=="2")]/
sum(geotec_t_ch))*100)==0){easy_wetherable_ch<-0}
else{easy_wetherable_ch<-(geotec_t_ch[which(names(geotec_t_ch)=="2")]/
sum(geotec_t_ch))*100}
if(length((geotec_t_ch[which(names(geotec_t_ch)=="3")]/sum(geotec_t_ch))
*100)==0) {medium_wetherable_ch<-0}
else{medium_wetherable_ch<-(geotec_t_ch[which(names(geotec_t_ch)=="3")]/
sum(geotec_t_ch))*100}
if(length((geotec_t_ch[which(names(geotec_t_ch)=="4")]/sum(geotec_t_ch))
*100)==0) {poorly_wetherable_ch<-0}
else{poorly_wetherable_ch<-(geotec_t_ch[which(names(geotec_t_ch)=="4")]/
sum(geotec_t_ch))*100}
if(length((geotec_t_ch[which(names(geotec_t_ch)=="5")]/sum(geotec_t_ch))
*100)==0) {water_geo_ch<-0}

```

```

else{water_geo_ch<-(geotec_t_ch[which(names(geotec_t_ch)==="5")]
/sum(geotec_t_ch))*100}
if(length((geotec_t_ch[which(names(geotec_t_ch)==="6")]/sum(geotec_t_ch))
*100)==0) {glacier_geo_ch<-0}
else{glacier_geo_ch<-(geotec_t_ch[which(names(geotec_t_ch)==="6")]
/sum(geotec_t_ch))*100 }

# ----- Perciptation -----
# convert date into strptime from Rhires Data
date.time <- strptime(names(rb),'X%Y.%m.%d')

# set timesteps
start_datum<-event_datum-19*3600*24

# convert the date of the timesteps in the right direcktion
dt.slct <- as.POSIXlt(seq(from=start_datum,to=event_datum,by = 24*3600))

# extract only the 20 layer from Rhires
rb_event<- rb[[which(date.time%in%dt.slct)]]

# set projection
projection(rb_event)<-CRS("+init=epsg:4326")

# change projection
rb_sub_1903<-projectRaster(rb_event, crs = crs("+init=epsg:21781"))

# set extent to fill_dem extent
ext<-extent(fill_dem_in)

# crop the raster of the fill_dem extent
rb_crp <- raster::crop(rb_sub_1903,ext)
# aggregate the sub_dem to 100m
sub_dem_agg50<-aggregate(x= sub_dem_ras, fact=25, fun=modal)
# resample the RhiresD
rb_resamp<-resample(rb_crp,y = sub_dem_agg50,
method="ngb")*sub_dem_agg50
rb_resamp[rb_resamp==0]<-NA
rb_mean<-cellStats(rb_resamp, stat="mean", na.rm=TRUE)
rb_mean[is.na(rb_mean)]<-0
names(x = rb_mean)<-dt.slct

```

```

#----- Plot Precipitation
pdf(width =9,height = 7, file = "Plot_Precipitation.pdf")
par(mar=c(6, 4, 4, 2) + 0.1)
barplot(rb_mean,ylim=c(0, round(max(rb_mean/10))*10), las=2,
main=paste("Mean Daily Precipitation ", fluss_name, sep="", "
Catchment"), ylab="precipitation [mm/d]")
dev.off()
# Text export Percip data
rb_mean_text<-paste(names(rb_mean), round(rb_mean,1), sep=";")

#----- HADES statistics -----
# calc for HA_1h100a
HA_1h100a_crp <- raster::crop(HA_1h100a,ext)
HA_1h100a_resamp<-resample(HA_1h100a_crp,y=sub_dem_agg50,
method="ngb")*sub_dem_agg50
HA_1h100a_resamp[HA_1h100a_resamp==0]<-NA
HA_1h100a_mean<-cellStats(HA_1h100a_resamp, stat="mean", na.rm=T)

# calc for HA_1h233a
HA_1h233a_crp <- raster::crop(HA_1h233a,ext)
HA_1h233a_resamp<-resample(HA_1h233a_crp,y=sub_dem_agg50,
method="ngb")*sub_dem_agg50
HA_1h233a_resamp[HA_1h233a_resamp==0]<-NA
HA_1h233a_mean<-cellStats(HA_1h233a_resamp, stat="mean", na.rm=T)

# calc for HA_24h100a
HA_24h100a_crp <- raster::crop(HA_24h100a,ext)
HA_24h100a_resamp<-resample(HA_24h100a_crp,y=sub_dem_agg50,
method="ngb")*sub_dem_agg50
HA_24h100a_resamp[HA_24h100a_resamp==0]<-NA
HA_24h100a_mean<-cellStats(HA_24h100a_resamp, stat="mean", na.rm=T)

# calc for HA_24h233a
HA_24h233a_crp <- raster::crop(HA_24h233a,ext)
HA_24h233a_resamp<-resample(HA_24h233a_crp,y=sub_dem_agg50,
method="ngb")*sub_dem_agg50
HA_24h233a_resamp[HA_24h233a_resamp==0]<-NA
HA_24h233a_mean<-cellStats(HA_24h233a_resamp, stat="mean", na.rm=T)

# prec_mean
prec_mean_crp <- raster::crop(prec_mean,ext)
prec_mean_resamp<-resample(prec_mean_crp,y=sub_dem_agg50,
method="ngb")*sub_dem_agg50
prec_mean_resamp[prec_mean_resamp==0]<-NA
prec_mean_mean<-cellStats(prec_mean_resamp, stat="mean", na.rm=T)

```

```

#----- Output txt -----
write( c(paste("catchment area [m2]", round(AEZG), sep = ";"),
paste("middle catchment height [m]", round(mhEZG), sep = ";"),
paste("maximum catchment height [m]", round(maxhEZG), sep = ";"),
paste("minimum catchment height [m]", round(minhEZG), sep = ";"),
paste("Melton number [m]", round(melton, 2), sep = ";"),
paste("channel length [m]", round(chan_length), sep = ";"),
paste("slope mainchannel [%]", round(slope), sep = ";"),
paste("macroroughness moving averge", round(rough_mov_aver,2),sep= ";"),
paste("macroroughness linear regression", round(rough_linear_reg,2), sep
= ";"),

paste("no classification [%] ", round(no_data,2), sep = ";"),
paste("rock [%]", round(rock,2), sep = ";"),
paste("flowing waters [%]", round(waters_flow,2), sep = ";"),
paste("brushland [%]", round(bushes,2) , sep = ";"),
paste("unconsolidated sediments [%]", round(unconsoild,2) , sep = ";"),
paste("glacier [%]", round(glacier,2), sep = ";"),
paste("standing waters [%]", round(waters_stand,2), sep = ";"),
paste("wetland [%]", round(wetland,2), sep = ";"),
paste("forest [%]", round(forest,2), sep = ";"),
paste("open forest [%]", round(forest_open,2), sep = ";") ,

paste("unconsolidated rock [%]", round(unconsolid_geo, 2), sep=";" ) ,
paste("easy wetherable [%]", round(easy_wetherable, 2),sep=";" ),
paste("medium_wetherable [%]",round(medium_wetherable, 2),sep=";" ) ,
paste("poorly wetherable [%]",round(poorly_wetherable, 2),sep=";" ) ,
paste("waters [%]",round(water_geo, 2), sep=";" ),
paste("glacier [%]",round(glacier_geo, 2), sep=";" ),

paste("no classification [%]", round(no_data_ch,2), sep = ";"),
paste("rock [%]", round(rock_ch,2), sep = ";"),
paste("flowing waters [%]", round(waters_flow_ch,2),sep = ";"),
paste("brushland [%]", round(bushes_ch,2), sep = ";"),
paste("unconsolidated sediments [%]", round(unconsoild_ch,2),sep = ";"),
paste("glacier [%]", round(glacier_ch,2), sep = ";"),
paste("standing waters [%]", round(waters_stand_ch,2), sep = ";"),
paste("wetland [%]", round(wetland_ch,2), sep = ";"),
paste("forest [%]", round(forest_ch,2), sep = ";"),
paste("open forest channel [%]", round(forest_open_ch,2), sep = ";") ,

paste("unconsolidated rock channel [%]", round(unconsolid_geo_ch,
2),sep=";" ) ,
paste("easy wetherable channel [%]", round(easy_wetherable_ch,
2),sep=";" ),

```

```
paste("medium_wetherable channel [%]",round(medium_wetherable_ch,
2),sep=";") ,
paste("poorly wetherable channel [%]",round(poorly_wetherable_ch,
2),sep=";") ,
paste("waters channel [%]",round(water_geo_ch, 2), sep=";"),
paste("glacier channel [%]",round(glacier_geo_ch, 2), sep=";"),

paste("HADES 1h100a [mm] ", round(HA_1h100a_mean, 1), sep=";") ,
paste("HADES 1h233a [mm] ", round(HA_1h233a_mean,1),sep=";"),
paste("HADES 24h100a [mm] ",round(HA_24h100a_mean,1),sep=";") ,
paste("HADES 24h233a [mm] ",round(HA_24h233a_mean,1),sep=";") ,
paste("mean daily precipitation amount [mm] ",round(prec_mean_mean,1),
sep=";"),
rb_mean_text
)
,file=paste(fluss_name,".txt", sep="")
```

Erklärung

gemäss Art. 28 Abs. 2 RSL 05

Name/Vorname:

Matrikelnummer:

Studiengang:

Bachelor

Master

Dissertation

Titel der Arbeit:

LeiterIn der Arbeit:

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäss aus Quellen entnommen wurden, habe ich als solche gekennzeichnet. Mir ist bekannt, dass andernfalls der Senat gemäss Artikel 36 Absatz 1 Buchstabe r des Gesetzes vom 5. September 1996 über die Universität zum Entzug des auf Grund dieser Arbeit verliehenen Titels berechtigt ist. Ich gewähre hiermit Einsicht in diese Arbeit.

Ort/Datum

Unterschrift