

# **Berechnung des bordvollen und schadensrelevanten Abflusses und Bedeutung für das Hochwasser Risikomanagement**

**Masterarbeit - Universität Bern, Geographisches Institut**

Dominik Ummel

31. Mai 2022

Betreuung: Markus Mosimann

Leitung: Andreas Zischg

## **Abstract**

Hochwasser verursachen in der Schweiz immer wieder Schäden. Eine entsprechende Warnung der Bevölkerung ist deshalb sehr wichtig. Dazu ist es notwendig verschiedene Abflusskenngrößen, wie den bordvollen und den schadensrelevanten Abfluss, bestimmen zu können. Diese Kenngrößen wurden in dieser Arbeit anhand eines bereits vorhandenen hydraulischen Modells berechnet. Während diesem Prozess wurden anhand verschiedener Filter Fehler im Modell gesucht und das Modell validiert und optimiert. Die Filter lassen sich anhand verschiedener Parameter steuern, um verschiedene Arten typischer Fehler finden zu können. Die erhöhte Genauigkeit des Modells ermöglicht dann eine fehlerbereinigte Berechnung des bordvollen und schadensrelevanten Abflusses. Anhand der berechneten Abflusskenngrößen wurde eine Schutzzielkartierung für das Hauptgewässernetz der Schweiz durchgeführt und anschliessend ein Vergleich zu den BAFU Gefahrenstufen gemacht. Die Hochwassergefahr in der Schweiz ist sehr heterogen. Bestimmte Flüsse (Oberlauf der Emme, Reuss, Tessin, Oberlauf der Thur) zeigen in der Schutzzielkartierung allgemein ein erhöhtes Risiko, da die Wiederkehrperioden der betrachteten Abflusskenngrößen tiefer liegen als bei anderen Fliessgewässern. Die BAFU Gefahrenstufen können diese Heterogenität gut verarbeiten und ermöglichen eine national konstante Warnung vor Hochwassergefahren, da die Grenzwerte der Gefahrenstufen nicht nur auf statistischen Werten beruhen, sondern auf Basis von Erfahrungswerten an die lokale Gefahr angepasst wurden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Gefahr und Schadenspotenzial von Hochwasser . . . . .	1
1.2	Schutzziele . . . . .	1
1.3	Bordvoller und Schadensrelevanter Abfluss . . . . .	2
1.4	Herausforderung der Berechnung des bordvollen Abflusses . . . . .	2
1.5	Validierung hydraulisches Modell . . . . .	3
1.5.1	Automatisierung der Validierung . . . . .	3
1.6	Gefahrenstufen BAFU . . . . .	4
1.7	Forschungsfragen . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Methoden</b>	<b>5</b>
2.1	Umrechnung Q-T und Interpolation . . . . .	5
2.2	Auswertung BASEMENT . . . . .	6
2.2.1	Fehlerfilterung bei der Berechnung des bordvollen Abflusses nach Gerinneflächen . . . . .	7
2.2.2	Fehlerfilterung bei der Berechnung des bordvollen Abflusses nach Flood Threshold . . . . .	9
2.2.3	Fehlerfilterung beim schadensrelevanten Abfluss nach Gebäudetyp . . . . .	9
2.3	Vergleich zu BAFU Gefahrenstufen . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Resultate</b>	<b>10</b>
3.1	Schutzzielkarten . . . . .	10
3.1.1	Bordvoller Abfluss . . . . .	10
3.1.2	Bordvoller Abfluss gefiltert . . . . .	10
3.1.3	Schadensrelevanter Abfluss Buildings . . . . .	13
3.1.4	Schadensrelevanter Abfluss Persons Workplaces . . . . .	13
3.2	BAFU Gefahrenstufen . . . . .	14
3.2.1	Verteilung der Gefahrenstufen . . . . .	14
3.2.2	Gefahrenstufen bordvoller Abfluss . . . . .	15
3.2.3	Gefahrenstufen bordvoller Abfluss gefiltert . . . . .	15
3.2.4	Gefahrenstufen schadensrelevanter Abfluss Buildings . . . . .	17
3.2.5	Gefahrenstufen schadensrelevanter Abfluss Persons Workplaces . . . . .	17
3.3	Einfluss der Filterung nach Gerinneflächen und nach Thresholds . . . . .	19
3.3.1	Filterung nach Gerinneflächen . . . . .	19
3.3.2	Filterung nach Thresholds . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>24</b>
4.1	Vor- und Nachteile der verwendeten Filter . . . . .	24
4.2	Verteilung der Wiederkehrperioden und Gefahrenstufen . . . . .	26
4.2.1	Einfluss langer Flussegmente . . . . .	27
4.3	Validierung des hydraulischen Modells . . . . .	27
4.4	Fehlerquellen . . . . .	29

<b>5</b>	<b>Ausblick und Fazit</b>	<b>30</b>
5.1	Berechnung des bordvollen und schadensrelevanten Abflusses . . . . .	30
5.2	Validierung und Optimierung von hydraulischen Modellen . . . . .	30
5.3	Mögliche Verbesserungen der Fehlerfilter . . . . .	31
5.4	Hochwassersituation in der Schweiz . . . . .	31
<b>6</b>	<b>Literatur</b>	<b>33</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>35</b>
7.1	Tabelle mit Interpolationsansätzen für alle Modellinputs . . . . .	35
7.2	Definitionen der Hochwasser Gefahrenstufen des BAFU . . . . .	39

# 1 Einleitung

## 1.1 Gefahr und Schadenspotenzial von Hochwasser

Hochwasser sind in der Schweiz immer wieder eine Gefahr. Einerseits können Sachschäden entstehen, andererseits können auch Personen gefährdet sein. Gemäss Hilker et al. (2008) belief sich beispielsweise der Sachschaden des August-Hochwassers 2005 in der Schweiz auf ca. 3 Milliarden Schweizer Franken. Ausserdem wurden sechs Todesfälle verzeichnet. Andres et al. (2017) bezifferten den Anteil von Todesfällen durch Hochwasser, an der gesamten Anzahl Todesfälle durch Naturgefahren in der Schweiz, zwischen 1946 und 2015 auf 12.1%. Dies entspricht 124 Todesfällen durch Hochwasser während diesem Zeitraum. Hinter Lawinen (37%) und Blitzschlägen (16%) ist Hochwasser damit die dritt tödlichste Naturgefahr in der Schweiz. Die verzeichneten Hochwasser-Todesfälle sind über die ganze Schweiz verteilt, eine leichte Häufung ist nur im Mittelland zu erkennen. Die meisten Todesfälle durch Hochwasser gab es in den Sommermonaten. Besonders gefährdet sind Personen unter 9 Jahren (Andres et al. 2017). Insgesamt zeigt sich also ein grosses Schadenspotenzial. Aufgrund des Klimawandels wird in Zukunft für die Schweiz eine Zunahme in der Intensität von Hochwasser Ereignissen erwartet (Köplin et al. 2014). Ein entsprechender Schutz ist deshalb wichtig.

## 1.2 Schutzziele

Die Nationale Plattform Naturgefahren (PLANAT) erarbeitete im Jahr 2013 eine Strategie zum Sicherheitsniveau für Naturgefahren (PLANAT 2015 & 2013). Die PLANAT (2013) definierte angestrebte Schutzziele für Personen, erhebliche Sachwerte, sowie für die Umwelt auf Basis des schweizerischen Rechts. Im Bezug auf dynamische Überschwemmungen schreibt die PLANAT (2015):

Das Auftreten ist kleinräumiger, die wirkenden Kräfte sind jedoch grösser und die Abläufe wesentlich rascher als bei der statischen Überschwemmung, was auch bei geringen Wassertiefen für Personen in Untergeschossen oder bei höheren Fliessgeschwindigkeiten im Freien zur Bedrohung werden kann. Durch Erosionsprozesse können Fundamente unterspült werden und so die Gebäudestruktur zerstören, oder mitgeführtes Material (Steine, Baumstämme) kann zu Schäden an der Gebäudehülle führen.

Die PLANAT unterscheidet zwischen verschiedenen Schutzgütern, die unterschiedlich geschützt werden sollen. Dies sind Personen, erhebliche Sachwerte (Gebäude, Infrastruktur, Objekte mit erheblicher volkswirtschaftlicher Bedeutung oder Tragweite, Lebensgrundlagen der Menschen, Kulturgüter) und die Natur. Das schlussendlich angestrebte Schutzziel hängt auch davon ab, welche Werte exponiert sind. Beim Schutz von Gebäuden wird grundlegend ein Schutzziel von 100 Jahren angestrebt (PLANAT 2013 & 2015). Dies bedeutet, dass ein Hochwasserereignis mit einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren keinen Schaden an Gebäuden verursachen soll. Um einen allgemeinen Überblick zu erhalten, wie die aktuell umgesetzten Schutzziele in den Hauptflüssen der Schweiz variieren, wird im Rahmen dieser Arbeit eine Schutzzielkarte erstellt.

### 1.3 Bordvoller und Schadensrelevanter Abfluss

Für die Schutzzielkartierung wird einerseits der bordvolle Abfluss, sowie der schadensrelevante Abfluss betrachtet. Der bordvolle Abfluss wird definiert als der Abfluss, bei dem zum ersten Mal Wasser aus dem Fluss in eine Floodplain austritt (vgl. Kapitel 2.2). Der bordvolle Abfluss ist deshalb wichtig, da ab diesem Punkt nicht mehr der ganze Abfluss innerhalb des Gerinnes abfließen kann und somit eine erste Überflutung umliegender Landflächen geschieht.

Die Definition des bordvollen Abflusses ist jedoch an vielen Stellen nicht eindeutig, da Flussläufe oft mehrere morphologische Schwellen aufweisen (Gordon et al. 2004). Bei der Definition dieser Schwellen sind geometrische, sowie auch nach bestimmten Eigenschaften bestimmte Grenzen möglich (Williams 1974). In dieser Arbeit wird diese Schwelle nach gewässerbaulichen Massnahmen definiert. Das heisst, dass die Gerinnefläche als das Gebiet gezählt wird, welches durch Schutzbauten eingegrenzt wird. Falls keine Schutzbauten vorhanden sind, wird das natürliche Flussbett als Gerinnefläche betrachtet.

Um den schadensrelevanten Abfluss zu definieren sind verschiedene Ansätze möglich. In dieser Arbeit wird mit zwei verschiedenen Definitionen gearbeitet. Die erste Definition 'buildings' bezieht sich auf den kleinsten Abfluss, bei dem ein Gebäude betroffen ist. Die zweite Definition 'persons\_workplaces' bezieht sich auf die kleinste Abflussmenge, bei der Wohngebäude oder Arbeitsplätze betroffen sind. Bei der Schutzzielkartierung den schadensrelevanten Abfluss zu betrachten ist wichtig, da Hochwasserschutzmassnahmen unter anderem von den exponierten Werten abhängen. Nur den bordvollen Abfluss zu betrachten wäre problematisch, da es durchaus möglich ist, dass eine Überflutung an den Fluss angrenzender Landschaften in Kauf genommen wird, solange dies zu keinem Schaden führt. In diesem Fall wäre der bordvolle Abfluss erreicht, der schadensrelevante jedoch noch nicht.

Die Definition 'buildings' begründet sich dadurch, dass sich die hier untersuchte Definition des Schutzziels von 100 Jahren der PLANAT auf Gebäude bezieht. Um eine Auswertung machen zu können, muss also im Modell der Spitzenabfluss des Szenarios ausgewertet werden, bei dem zum ersten Mal Gebäude betroffen sind. Da es Gebäude geben kann, die tiefere Schutzziele haben, wird zusätzlich die zweite Definition 'persons\_workplaces' verwendet. Dadurch sollen nur diejenigen Gebäude gezählt werden, die entweder Wohngebäude sind oder in denen es Arbeitsplätze gibt. Dies stellt keine abschliessende Menge an Gebäuden dar, die ein Schutzziel von 100 Jahren haben. Es gibt auch Gebäude mit einem Schutzziel von 100 Jahren, die keine Wohngebäude sind, oder keine Arbeitsplätze beinhalten, dies muss bei der Analyse berücksichtigt werden. Jedoch soll diese Unterscheidung veranschaulichen wie stark die Schutzziele variieren, wenn verschiedene Typen von Gebäuden betrachtet werden.

### 1.4 Herausforderung der Berechnung des bordvollen Abflusses

Bei der Bestimmung des bordvollen Abflusses gibt es nicht nur verschiedene mögliche Definitionen für die Gerinnefläche, sondern auch vielzählige Möglichkeiten, den definierten bordvollen Abfluss zu bestimmen. Schneider et al. (2011) verwendeten einen statistischen

Ansatz über Abflusszeitreihen. Bjerklie (2007) hingegen verwendete Fernerkundungsdaten, um auf der Basis verschiedener Parameter den bordvollen Abfluss zu bestimmen. In dieser Arbeit soll der bordvolle Abfluss aus einem hydraulischen Modell extrahiert werden. Dies soll ermöglichen, dass der bordvolle Abfluss für verschiedene Abschnitte sehr spezifisch, auf Basis der vorherrschenden hydrologischen Gegebenheiten, bestimmt werden kann.

Dieser Ansatz erfordert jedoch eine sehr hohe Genauigkeit des hydraulischen Modells, sowie des zu Grunde liegenden Höhenmodells. Anders als bei der Modellierung grösserer Ereignisse spielen auch kleinere Schutzbauten in diesem Fall eine grosse Rolle, da sie nicht einfach überflutet werden. Sondern ihre exakten Ausmasse bestimmen, ob der bordvolle Abfluss erreicht, beziehungsweise überschritten, wird oder nicht.

Diese Tatsache führt dazu, dass die Berechnung des bordvollen Abflusses aus einem Modell als Validierung für ebendieses Modell verwendet werden kann. Falls sich der bordvolle Abfluss sinnvoll aus dem Modell bestimmen lässt, weist das Modell eine hohe Genauigkeit auf. Die Validierung auf Basis der Bestimmung des bordvollen Abflusses wird hier auf ein hydraulisches Modell von Markus Mosimann angewendet (Zischg et al. 2018). Einerseits soll das Modell validiert werden, andererseits aber auch nach Möglichkeiten gesucht werden mit bestimmten Restungenauigkeiten umgehen zu können, um trotzdem eine sinnvolle Berechnung des bordvollen Abflusses zu ermöglichen.

## **1.5 Validierung hydraulisches Modell**

Um das hydraulische Modell zu optimieren ist eine mehrstufige Validierung nötig. Diese Validierung ist ein iterativer Prozess zwischen Kartierung der Outputdaten, Fehlersuche und Anpassungen im Modell.

### **1.5.1 Automatisierung der Validierung**

Da das hydraulische Modell sich über die ganze Schweiz erstreckt, ist der zeitliche Aufwand kleinste Fehler zu finden sehr gross. Es besteht deshalb ein grosses Interesse daran typische Fehler automatisch filtern zu können. Die typischen Fehler unterscheiden sich bei der Modellierung des bordvollen und des schadensrelevanten Abflusses. Deshalb unterscheiden sich auch die Ansätze, wie diese Fehler gefiltert werden können.

Ein typisches Problem bei der Berechnung des bordvollen Abflusses liegt darin, dass die Gerinneflächen im Modell für die Berechnung des bordvollen Abflusses nicht perfekt angegeben sind. So kann es sein, dass gewisse Flächen als überflutet gekennzeichnet werden, obwohl sie eigentlich innerhalb des Gerinnes liegen. Das heisst, es werden bereits vor dem Erreichen des bordvollen Abflusses Gebiete als überflutet gekennzeichnet.

Ein typisches Problem beim schadensrelevanten Abfluss ist, dass Gebäude mit tieferen Schutzzielen, wie beispielweise überdachte Grillstellen, sehr früh betroffen sind. Dadurch tritt der schadensrelevante Abfluss deutlich früher auf als definiert. Um mit dieser Herausforderung umzugehen werden die Definitionen 'buildings' und 'persons\_workplaces' verwendet.

## 1.6 Gefahrenstufen BAFU

Für einen umfassenden Hochwasserschutz sind nicht nur verschiedene Abflussmengen und Schutzbauten entscheidend, sondern auch die Warnung der Bevölkerung. Bei der Warnung vor Hochwasserereignissen unterscheidet das Bundesamt für Umwelt (BAFU) zwischen 5 Gefahrenstufen (siehe Tabelle 1). Auf der Basis von Wetter- und Abflussprognosen können so die Gefahrenstufen für die Flussabschnitte bestimmt und die Bevölkerung entsprechend gewarnt werden. Die Schwellwerte zwischen den Gefahrenstufen basieren grundsätzlich auf den angegebenen Wiederkehrperioden. Eine Anpassung der Schwellwerte, aufgrund von Erfahrungswerten dieser Gewässer, ist durch eine Absprache von Bund und Kantonen möglich. Die Liste wird ungefähr alle fünf Jahre aktualisiert. (BAFU)

Diese Anpassung der Gefahrenstufen, basierend auf der tatsächlichen Gefahr, exponierten Werten, Vulnerabilität und dem daraus resultierenden Risiko, entspricht den Guidelines der World Meteorological Organization (WMO 2015). Die Abkopplung der Gefahrenstufen von rein statistischen Daten bedeutet, dass die Gefahrenstufen nicht nur nach bestimmten Wiederkehrperioden definiert werden, sondern nach dem Hochwasserrisiko, das von einem bestimmten Spitzenabfluss ausgeht. Wenn man annimmt, dass der bordvolle, sowie der schadensrelevante Abfluss beim Hochwasserrisiko entscheidende Schwellwerte darstellen bedeutet dies, dass wenn die Wiederkehrperioden dieser beiden Abflüsse über verschiedene Flussabschnitte stark variieren, die Wiederkehrperioden der in den Gefahrenstufen definierten Abflusswerte genauso stark variieren sollten. Nur dann wird die tatsächliche Gefahr durch die Gefahrenstufen ausgedrückt.




	Gefahrenstufe 1	keine oder geringe Gefahr	ca. HQ2
	Gefahrenstufe 2	mässige Gefahr	ca. HQ2-HQ10
	Gefahrenstufe 3	erhebliche Gefahr	ca. HQ10-HQ30
	Gefahrenstufe 4	grosse Gefahr	ca. HQ30-HQ100
	Gefahrenstufe 5	sehr grosse Gefahr	ca. HQ100

Tabelle 1: Die 5 Gefahrenstufen des BAFU (BAFU)

Um eine effiziente Hochwasserwarnung zu gewährleisten ist es wichtig, dass die Gefahrenstufen die Realität widerspiegeln. Das bedeutet, dass beispielweise der schadensrelevante Abfluss nicht bereits bei der ersten Gefahrenstufe auftreten sollte, weil dann keine ausreichend starke Warnung für die anstehende Gefahr eines Schadens ausgesprochen wird. Andererseits sollte der bordvolle Abfluss nicht erst der fünften Gefahrenstufe entsprechen, da eine zu häufige und starke Warnung dazu führen könnte, dass künftige Warnungen weniger ernst genommen werden. Die Definitionen der Gefahrenstufen (Kapitel 7.2) gehen fließend ineinander über. Mit höher werdender Gefahrenstufe wird die Wahrscheinlichkeit für Ausuferung und Schäden grösser. In welcher Gefahrenstufe der bordvolle und schadensrelevante Abfluss liegen sollte ist somit nicht klar definiert. Allerdings sollten



beide nicht in der ersten Gefahrenstufe liegen, denn in dieser sollten gemäss Definition normalerweise keine Schäden zu erwarten sein.

## 1.7 Forschungsfragen

Aus dem beschriebenen Kontext ergeben sich mehrere Forschungsfragen. Das übergeordnete Ziel ist es, den bordvollen und schadensrelevanten Abfluss aus einem hydraulischen Modell bestimmen zu können. Dies soll möglichst automatisiert geschehen. Die Ergebnisse sollen anschliessend einerseits zur Validierung des verwendeten Modells von Zischg et al. (2018) verwendet werden. Andererseits soll der allgemeine Stand des Hochwasserschutzes in der Schweiz kartiert und die BAFU Gefahrenstufen evaluiert werden. Im Detail bedeutet dies, dass folgende Fragen beantwortet werden sollen:

- Wie kann der bordvolle und der schadensrelevante Abfluss aus einem hydraulischen Modell bestimmt werden?
- Lässt sich die Berechnung des bordvollen Abflusses als Validierung für ein hydraulisches Modell verwenden?
- Wie stark lässt sich die Fehlerfilterung bei einem hydraulischen Modell zur Bestimmung des bordvollen und schadensrelevanten Abflusses automatisieren?
- Wie gross ist die Variabilität des Schutzzieles Hochwasser in den Hauptflüssen der Schweiz?
- Wie gut wird das angestrebte Schutzziel Hochwasser für Gebäude von 100 Jahren entlang der Hauptflüsse der Schweiz erreicht?
- Bei welchen BAFU Gefahrenstufen tritt der schadensrelevante und der bordvolle Abfluss, in den Hauptflüssen der Schweiz, auf?
- Variieren die den BAFU Gefahrenstufen entsprechenden Wiederkehrperioden in einem ähnlichen Ausmass wie der bordvolle und schadensrelevante Abfluss?

## 2 Methoden

### 2.1 Umrechnung Q-T und Interpolation

Da die Spitzenabflusswerte im Modell in  $m^3/s$  ausgegeben werden und die Schutzziele als Wiederkehrperioden definiert sind, muss für einen Vergleich eine Umrechnung von Abflusswerten auf Wiederkehrperioden gemacht werden. Für diese Umrechnung wird eine allgemeine Extremwertverteilung verwendet. Die dafür benötigten Parameter ergeben sich aus dem Block-Maximum-Ansatz nach Baumgartner et al. 2013.

Da ausreichend lange Zeitreihen benötigt werden, um mit der allgemeinen Extremwertverteilung zuverlässige Umrechnungen zu machen, sind die Parameter nur an bestimmten Orten im Hauptgewässernetz der Schweiz verfügbar. Da es Inputpunkte des hydraulischen Modells an Stellen gibt, die keine solchen Parameter zur Verfügung haben, ist ein

Verfahren zur Inter-/ oder Extrapolation notwendig. Dazu wird analog zu Ummel (2021) vorgegangen. Eine bis zwei Referenzstationen, oberhalb oder unterhalb im gleichen Flusslauf, werden verwendet, um den Abflusswert beim Inputpunkt auf einen entsprechenden Abflusswert bei einer Station mit Extremwertparametern umzurechnen. Die Umrechnung wird proportional zu der Veränderung der Einzugsgebietsgrösse gemacht. Anschliessend wird mittels der allgemeinen Extremwertverteilung die Wiederkehrperiode berechnet.

Je nach Verfügbarkeit von geeigneten Referenzstationen werden eine oder zwei Referenzstationen verwendet. Falls zwei Referenzstationen verwendet werden, liegt immer eine flussaufwärts des Inputpunktes und eine flussabwärts. Falls nur eine Station verwendet wird, kann diese flussaufwärts oder flussabwärts liegen. Bei der Auswahl geeigneter Referenzstationen wird darauf geachtet, dass zwischen Inputpunkt und Referenzstation keine Seen, grössere Zuflüsse oder eine zu grosse Abweichung (i.d.R Faktor 4) der Grösse des Einzugsgebietes vorhanden sind. Eine Tabelle für welchen Inputpunkt welche Methode angewendet wurde findet sich im Anhang (Tabelle 2).

## 2.2 Auswertung BASEMENT

Als Grunddaten für die Schutzzielkartierung dienen Überschwemmungsflächen, die mit dem gekoppelten 1D/2D Modell BASEMENT-ETH (Vetsch et al. 2017) berechnet wurden. Dabei wurden die Gewässer von nationalem Interesse (gemäss Definition des BAFU) in Abschnitte zwischen 1 bis 30 km unterteilt. Pro Flusssegment gibt es einen hydrologischen Inputpunkt, der dazu dient, den Abfluss in das 1D-Modell zu bestimmen. Die Menge wird in  $m^3/s$  Abfluss an dieser Stelle im Flusslauf angegeben. Um einen Vergleich zwischen verschiedenen Abflussmengen zu machen, wird die Abflussspitze synthetischer Hydrographen von Szenario zu Szenario schrittweise gesteigert. Je nach Gerinnekapazität nur um  $5m^3/s$ , oder bei grösseren Flüssen auch um bis zu  $200m^3/s$  pro Schritt (Zischg et al. 2018). Basierend auf dieser Inputmenge wird der Abfluss in einem 1D Flusslauf bestehend aus Querprofilen simuliert. Sobald die Gerinnekapazität überschritten wird, tritt Wasser in das 2D Modell aus. Das 2D-Modell ist ein Berechnungsgitter bestehend aus Dreieckselementen (ca.  $100m^2$ ) aufgeteilt, die als überflutet gekennzeichnet werden, sobald ihr Mittelpunkt unter Wasser steht. Die überfluteten Dreiecke werden schliesslich mit einem Gebäudedatensatz abgeglichen, um zu bestimmen wie viele Gebäude und welche Gebäudetypen, sowie wie viele Personen betroffen sind.

Output ist schlussendlich ein JSON File, das für jeden Abschnitt die simulierten Spitzenabflüsse aller Szenarien beinhaltet, beginnend mit dem kleinsten Spitzenabfluss, der zu einem Austritt des Wassers aus dem 1D Flussmodell geführt hat. Weiter sind für jedes dieser Szenarien die Anzahl betroffener Personen, Gebäude und Gebäudetypen in den entsprechenden Floodplains angegeben. Ausserdem wird für jedes überschwemmte Dreieckselement die Information abgespeichert, ab welchem Spitzenabfluss eine Überschwemmung stattfindet. So lassen sich die Ausmasse der Überflutung zu jedem Szenario bzw. zu jedem Spitzenabfluss kartieren. Für die Optimierung der Schutzzielkartierung werden anschliessend verschiedene Filter angewendet.

### 2.2.1 Fehlerfilterung bei der Berechnung des bordvollen Abflusses nach Gerinneflächen

Ein verwendeter Ansatz besteht darin, dass die überfluteten Flächen mit dem Topografischen Landschaftsmodell (TLM) Bodenbedeckung (Swisstopo 2020) abgeglichen werden. So können beispielsweise Überflutungen in Bereichen, die im TLM als Fließgewässer markiert sind ignoriert werden. Der Ansatz ignoriert alle überfluteten Gebiete, die sich mit den im TLM markierten Feuchtgebieten, Fließgewässern, Gebüschwäldern, Gehölzflächen, stehenden Gewässern, Wäldern und offenen Wäldern überschneiden. Ignoriert werden nicht nur Dreieckselemente, die komplett vom TLM überdeckt sind, sondern auch solche, welche die entsprechenden Bereiche des TLM nur berühren. Dies ist wichtig, da ein Dreieck nicht vollständig überflutet sein muss, um vom Modell als überflutet gekennzeichnet zu werden. Es kann also sein, dass ein Teil eines Dreiecks innerhalb einer Gerinnefläche ist und ein anderer Teil ausserhalb. Dieses kann dann als überflutet gekennzeichnet werden, wenn auch nur der Teil innerhalb der Gerinnefläche unter Wasser steht. Weiter gibt es manchmal zwischen den verschiedenen TLM Kategorien kleine Lücken, z.B zwischen einem Fließgewässer und einem angrenzenden Feuchtgebiet. Dreieckselemente, die teilweise in diesen Lücken zu liegen kommen, würden nicht ignoriert werden, falls sie ganz vom TLM bedeckt sein müssten.

In Abbildung 1 ist dargestellt, wie die Filterung aussehen kann. Zu sehen sind die gekennzeichneten Überflutungsflächen vor und nach der Filterung. Darübergelegt ist das TLM mit den ausgewählten Kategorien sichtbar. Die Wichtigkeit, dass auch nur teilweise durch das TLM bedeckte Dreieckselemente ignoriert werden sollten, wird in der Abbildung sichtbar. Einerseits am Beispiel des kleinen Zubringers, welcher von der rechten Seite her in die Reuss fliesst. Im TLM ist dieser Zubringer nur als dünne Linie hinterlegt, trotzdem sollten alle dortigen Dreieckselemente ignoriert werden, da sie in der Gerinnefläche dieses Zubringers liegen. Weiter ist an den Hochwasser Schutzwällen auf der linken Flussseite zu erkennen, dass der durch das TLM abgedeckte Bereich nicht exakt bis zur oberen Kante des Schutzwalles reicht. Einige Dreieckselemente, die auf der rechten Seite des Schutzwalles und somit innerhalb des Gerinnes liegen, schauen unter dem TLM hervor, sollen aber auch ignoriert werden.

Die Abbildung zeigt, wie der Filter Überflutungen, welche innerhalb der nach Schutzbauten definierten Gerinnefläche liegen, erkennt. Überflutungen innerhalb der beidseitig des Ufers verlaufenden Schutzdämme werden ignoriert, währenddem die Überflutungen ausserhalb beibehalten werden.

Dieser Filter arbeitet als Python Skript direkt im GIS. Output sind Shapefiles der gefilterten Überflutungsgebiete für jedes Floodplain. Diese können dann zu einem neuen gesamtschweizerischen Shapefile aggregiert werden, welches nur noch die überfluteten Dreieckselemente enthält, welche die ausgewählten TLM Flächen nicht berühren. Wichtig ist, dass dieser Filter also ein neues, gefiltertes Shapefile liefert, das weiter verwendet werden kann.

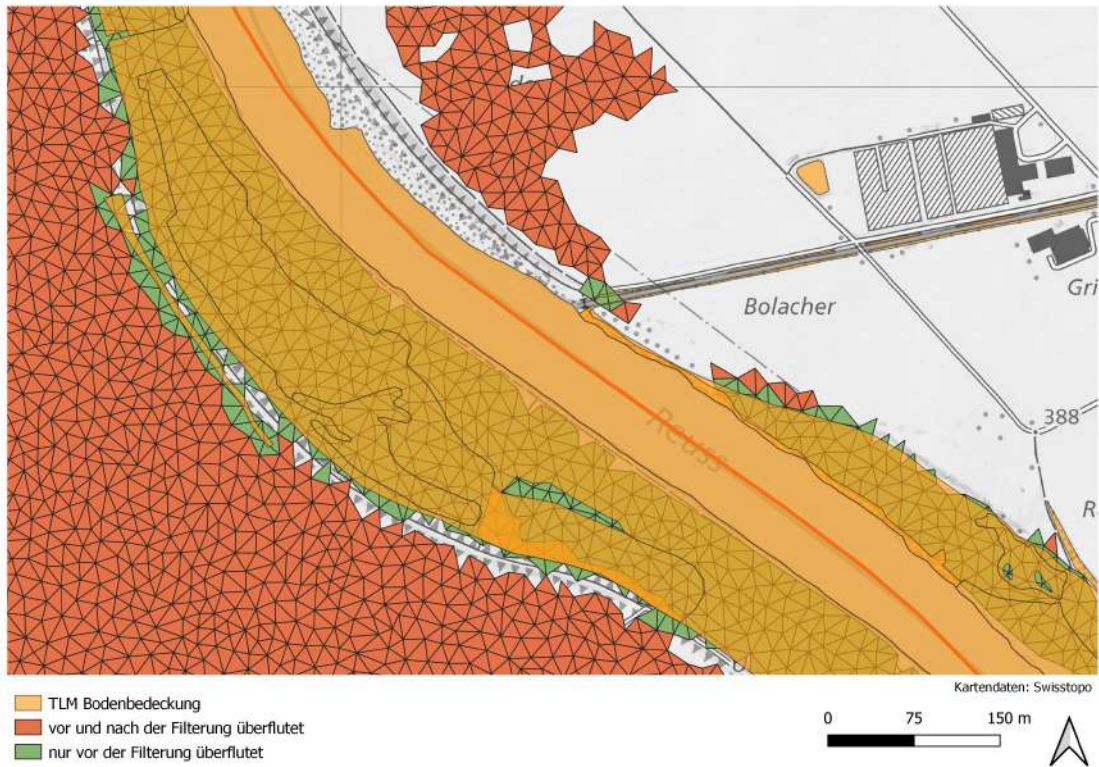


Abbildung 1: Veranschaulichung der Filterung mit dem TLM Bodenbedeckung am Beispiel der Reuss bei Jonen

### 2.2.2 Fehlerfilterung bei der Berechnung des bordvollen Abflusses nach Flood Threshold

Ein weiterer Filteransatz ist die Filterung nach bestimmten Schwellwerten. Dazu durchläuft ein Python Script alle überfluteten Dreieckselemente. Für jeden Flussabschnitt werden die fünf kleinsten Spitzenabflüsse mit Überschwemmungen herausgeschrieben. Ausserdem für jeden dieser Spitzenabflüsse die Anzahl Dreieckselemente, die betroffen sind. Aus diesen Daten ergeben sich zwei Parameter, mit denen der Filter gesteuert werden kann. Erstens die Anzahl betroffener Dreieckselemente bei diesem Szenario. Hier wird davon ausgegangen, dass je kleiner die Anzahl betroffener Dreieckselemente, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um einen kleinräumigen Fehler handelt. Zweitens die Anzahl im Modell simulierter Spitzenabflüsse beziehungsweise Szenarien, die zwischen diesem und dem nächsten Szenario mit einem betroffenen Dreieckselement liegen. Als Beispiel kann ein Flussabschnitt angesehen werden, bei dem der kleinste gefundene Spitzenabfluss mit überfluteten Dreieckselementen  $200m^3/s$  beträgt und alle  $15m^3/s$  eine Simulation gemacht wird. Wenn der zweit kleinste Spitzenabfluss mit überfluteten Dreieckselementen  $275m^3/s$  beträgt, resultiert daraus eine Schrittzahl von 5 Schritten. Bei diesem Parameter wird davon ausgegangen, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler im Modell höher ist, wenn die Schrittzahl hoch ist.

Gefiltert werden sollen alle Dreieckselemente, die überflutet werden, wenn nur sehr kleine Gebiete betroffen sind und dies bei deutlich geringeren Spitzenabflüssen geschieht, als weitere Überflutungen in diesem Flussabschnitt. Die Stärke des Filters kann mit den beiden Parametern Stepsize und Anzahl Dreieckselemente gesteuert werden.

Dieser Filter arbeitet nicht mehr direkt im GIS. Output ist somit auch kein Shapefile mit neuen, gefilterten Dreieckselementen, sondern eine Liste mit den neu nach den Filterkriterien bestimmten Spitzenabflüssen, sowie deren Wiederkehrperioden. Als Input kann jedoch eine beliebige Liste von überfluteten Dreieckselementen gewählt werden. Entweder direkt die Liste der Dreieckselemente aus dem Modell-Output oder die bereits durch den TLM-Filter gefilterte. So lassen sich die beiden Filter beliebig zusammen oder getrennt anwenden.

### 2.2.3 Fehlerfilterung beim schadensrelevanten Abfluss nach Gebäudetyp

Bei der Berechnung des schadensrelevanten Abflusses sind verschiedene Filterkriterien möglich. Dies hängt von der Definition des schadensrelevanten Abflusses ab. Je nach hier verwendeter Definition, kann der schadensrelevante Abfluss der kleinste Spitzenabfluss, bei dem Gebäude betroffen sind, sein (Definition 'buildings') oder erst der kleinste Spitzenabfluss, bei dem Arbeitsplätze oder Gebäude mit Wohnzweck betroffen sind (Definition 'persons\_workplaces').

Nur Gebäude mit Arbeitsplätzen oder Wohnzweck zu betrachten, erlaubt es Gebäude mit möglicherweise tieferen Schutzzielen als betroffene Gebäude weg zu filtern. Dazu wird beim Herauslesen der Abflusswerte aus den JSON Modell Outputdaten jeweils der Spitzenabfluss des Szenarios gelesen, bei dem zum ersten Mal die definierten Gebäude betroffen sind. Weitere Möglichkeiten zur Wahl der relevanten Gebäude sind vorhanden,

dies umfasst beispielsweise Schulen oder Spitäler.

### **2.3 Vergleich zu BAFU Gefahrenstufen**

Der Vergleich zu den BAFU Gefahrenstufen ist nur bei den Flussabschnitten möglich, die eine BAFU Station mit definierten Gefahrenstufen beinhalten. Dies umfasst hauptsächlich die Abschnitte, deren Input an derselben Stelle wie eine BAFU Station liegt (vgl. Interpolationsansatz 'direct' in Tabelle 2 im Anhang). Rechnerisch wäre es zwar möglich die Gefahrenstufe, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, auf andere Einzugsgebiete zu übertragen, dies würde jedoch wenig Sinn machen, da die Gefahrenstufen spezifisch für einen Abschnitt definiert sind. Für alle Flussabschnitte wird dann die Gefahrenstufe des berechneten bordvollen bzw. schadensrelevanten Abflusses bestimmt und anschliessend kartiert.

## **3 Resultate**

### **3.1 Schutzzielkarten**

Die Abbildungen 2 bis 5 zeigen die berechneten Schutzziele für die verschiedenen Flusssegmente. Bei einigen Segmenten sind die Wiederkehrperioden als Fehlwerte eingetragen. Dies betrifft Segmente, für die keine passenden Referenzstationen gefunden werden konnten. Ausserdem Segmente, deren Abflüsse in Pegelhohen angegeben wurden und keine entsprechenden P-Q Beziehungen erstellt werden konnten.

#### **3.1.1 Bordvoller Abfluss**

Abbildung 2 zeigt die Schutzzielkarte für den bordvollen Abfluss. Die meisten Segmente sind rot oder orange, was gleichbedeutend ist mit einer Wiederkehrperiode des bordvollen Abflusses von 0-10 Jahren (rot), bzw. 10-30 Jahren (orange). Vereinzelt hat es auch dunkelgrüne (über 300 Jahre) oder hellgrüne (100-300 Jahre) Segmente. Die dunkelgrünen Segmente sind hauptsächlich im Rhein zu finden. Ansonsten können keine Muster erkannt werden. Die Wiederkehrperiode scheint in keinem Zusammenhang mit dem Fluss oder der Grösse des Flusses zu stehen.

#### **3.1.2 Bordvoller Abfluss gefiltert**

Auch in Abbildung 3, die den bordvollen Abfluss nach der Filterung mit den Gerinneflächen und Thresholds zeigt, sind orange und rot die vorherrschenden Farben. Allerdings hat die Variation durch die beiden Filter deutlich zugenommen. Insgesamt nahm vor allem die Anzahl roter Segmente ab, also Segmente mit sehr tiefen Wiederkehrperioden des bordvollen Abflusses. Weiterhin lassen sich keine spezifischen Muster in der Verteilung der Wiederkehrperioden erkennen. Allerdings gibt es einige Flüsse, wie den Rhein, die Sihl und die Maggia, die besonders hohe Wiederkehrperioden des (gefilterten) bordvollen Abflusses aufweisen.

## Wiederkehrperioden bordvoller Abfluss

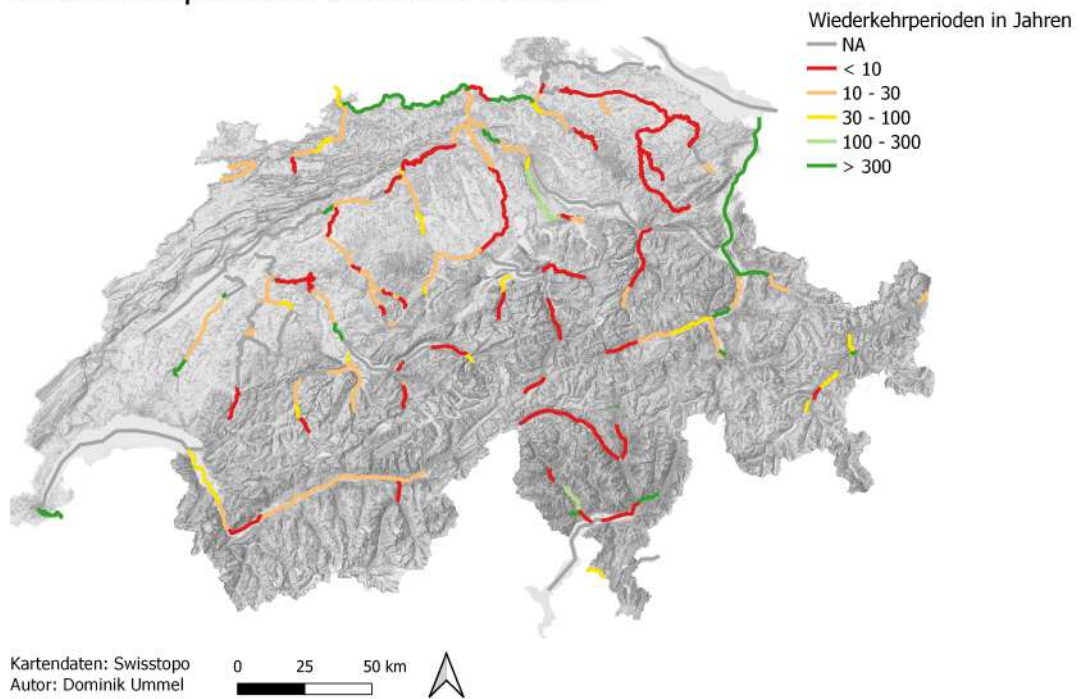


Abbildung 2: Schutzzielkarte für den bordvollen Abfluss

### Wiederkehrperioden bordvoll gefiltert

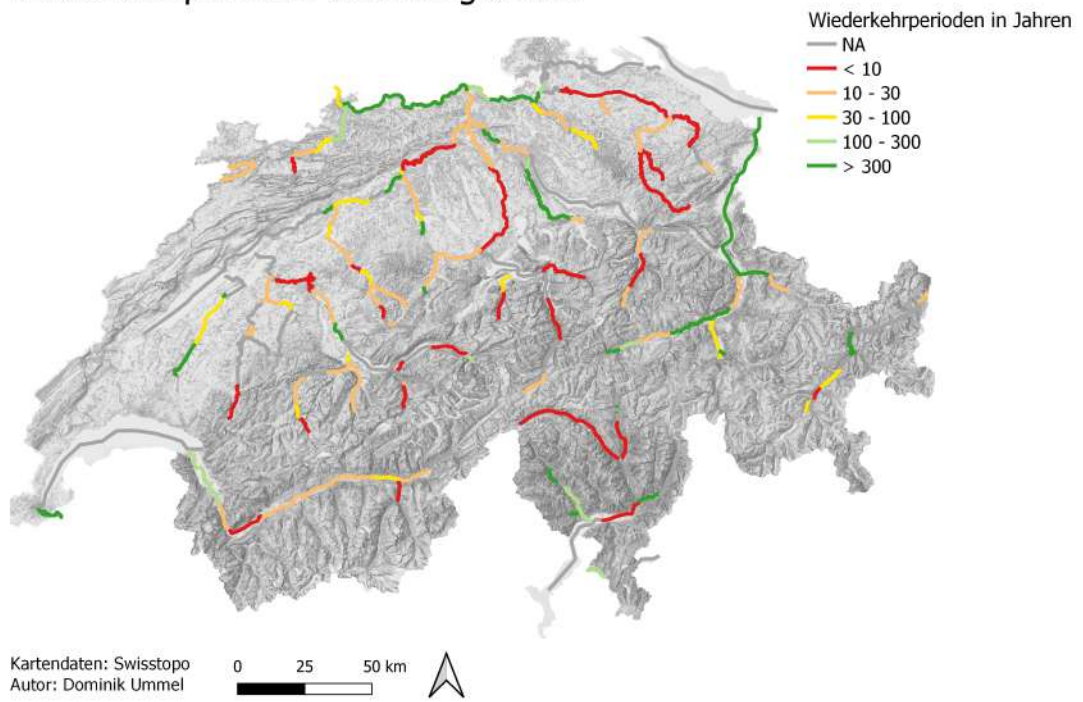


Abbildung 3: Schutzzielkarte für den bordvollen Abfluss nach Filterung durch Gerinne-  
flächen und Thresholds



## Wiederkehrperioden "buildings"

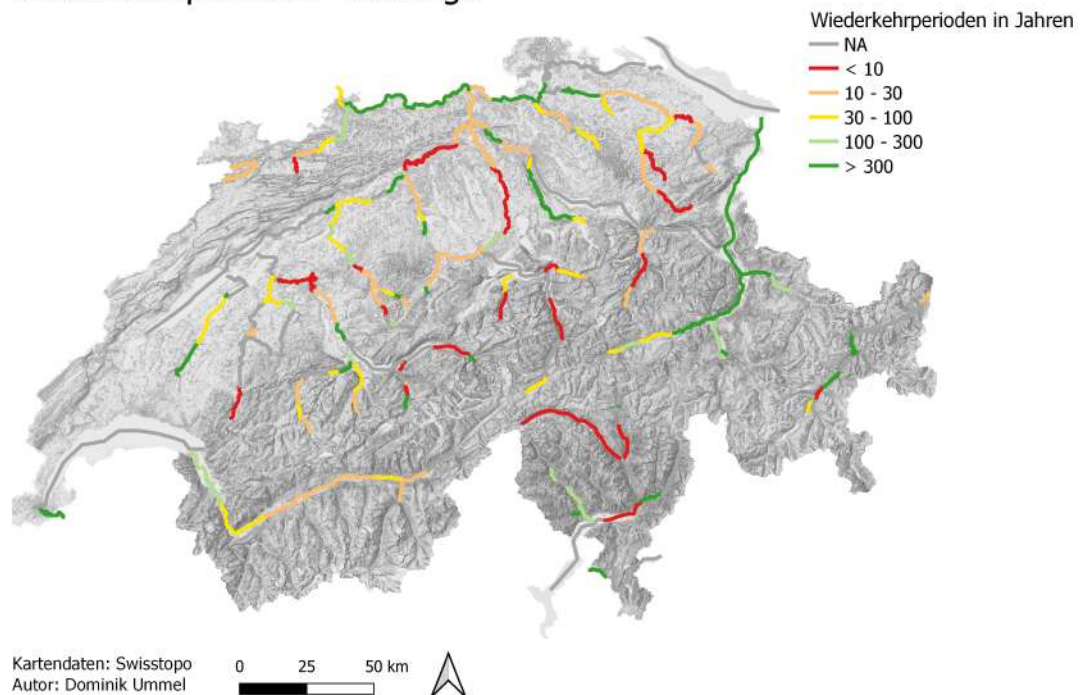


Abbildung 4: Schutzzielkarte für den schadensrelevanten Abfluss im Bezug auf Gebäude

### 3.1.3 Schadensrelevanter Abfluss Buildings

Abbildung 4 zeigt den schadensrelevanten Abfluss bezüglich der Definition "building", also wann Gebäude betroffen sind. Im Vergleich zu den Karten mit dem bordvollen Abfluss hat die Anzahl roter Segmente deutlich abgenommen, trotzdem sind noch immer viele vorzufinden. Auch gelbe und orange Segmente bleiben sehr häufig. Hellgrüne und dunkelgrüne Segmente, also Segmente mit Wiederkehrperioden des schadensrelevanten Abflusses von über 100 Jahren, sind zwar einige vorzufinden, sie bilden aber keine Mehrheit. Die Variabilität ist weiterhin sehr hoch.

### 3.1.4 Schadensrelevanter Abfluss Persons Workplaces

Betrachtet man Abbildung 5 mit den Wiederkehrperioden des schadensrelevanten Abflusses bezüglich der Definition "persons\_workplaces" fällt auf, dass Grüntöne nun häufiger geworden sind. Die Variabilität ist aber weiterhin sehr hoch und es gibt weiterhin viele Abschnitte mit Wiederkehrperioden von weniger als 10 Jahren. Die Anzahl Flüsse, deren Segmente ausschliesslich oder zumindest grösstenteils Wiederkehrperioden von über 100 Jahren aufweisen, hat weiter zugenommen. Dies umfasst nun den Rhein, die Sihl, die Maggia, die Thur unterhalb von Bischofszell und die Broye. Im Vergleich zu den anderen

## Wiederkehrperioden "persons\_workplaces"

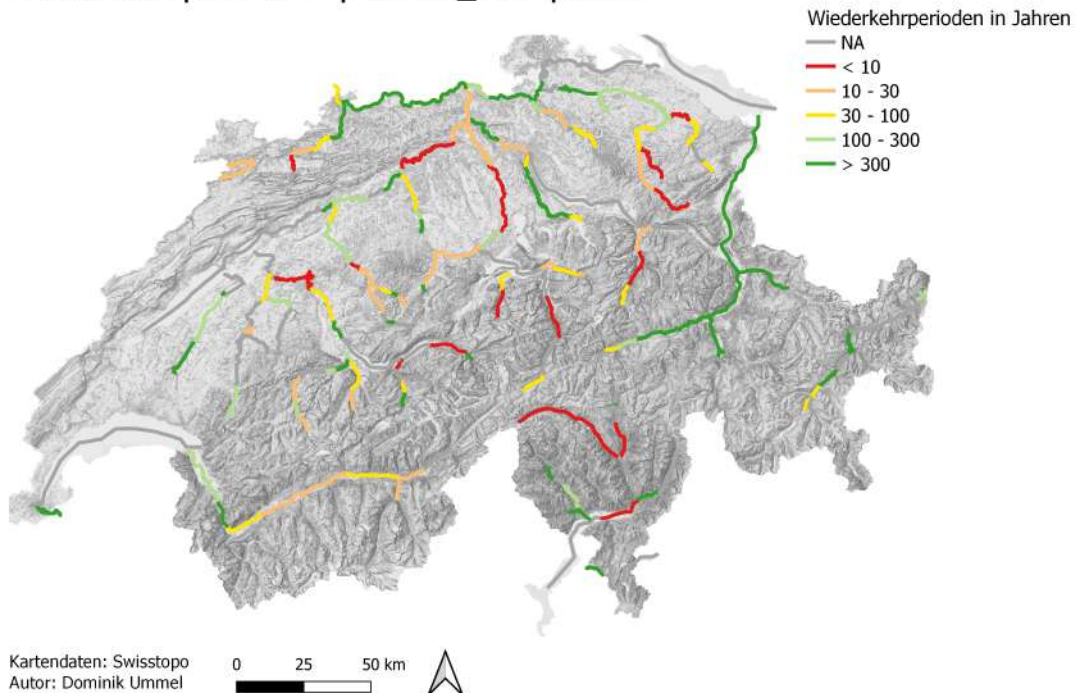


Abbildung 5: Schutzzielkarte für den schadensrelevanten Abfluss im Bezug auf betroffene Personen und Arbeitsplätze

drei Schutzzielkarten (Abbildungen 2 bis 4) sind hier die höchsten Wiederkehrperioden vorzufinden. Eine Ausnahme stellt die Sihl bei Zürich dar. Dort liegt die Wiederkehrperiode für den bordvollen Abfluss und beide Definitionen des schadensrelevanten Abflusses bei 32.8 Jahren (gelbe Kategorie). Beim gefilterten bordvollen Abfluss sind es 246.2 Jahre (hellgrüne Kategorie). Dieser Abschnitt ist der einzige, bei dem die Wiederkehrperiode nicht beim Ansatz schadensrelevant 'persons\_workplaces' am höchsten ist.

## 3.2 BAFU Gefahrenstufen

### 3.2.1 Verteilung der Gefahrenstufen

Abbildung 6 zeigt die Verteilung der Untergrenzen der BAFU Gefahrenstufen bei den verschiedenen Stationen. Gemäss Definitionen sollte die Untergrenze der Gefahrenstufe 2 ca. bei einer Wiederkehrperiode von 2 Jahren liegen. Die Untergrenze der Gefahrenstufe 3 bei 10 Jahren, bei Gefahrenstufe 4 bei 30 Jahren und bei Gefahrenstufe 5 bei 100 Jahren.

Die Abbildung zeigt, dass dies für den Median der jeweiligen Grenzen sehr genau zutrifft. Auch das erste und dritte Quartil sind nahe an diesen definierten Werten. Ausserhalb der Quartile ist aber eine grosse Streuung zu erkennen. Einige Untergrenzen sind weit von der

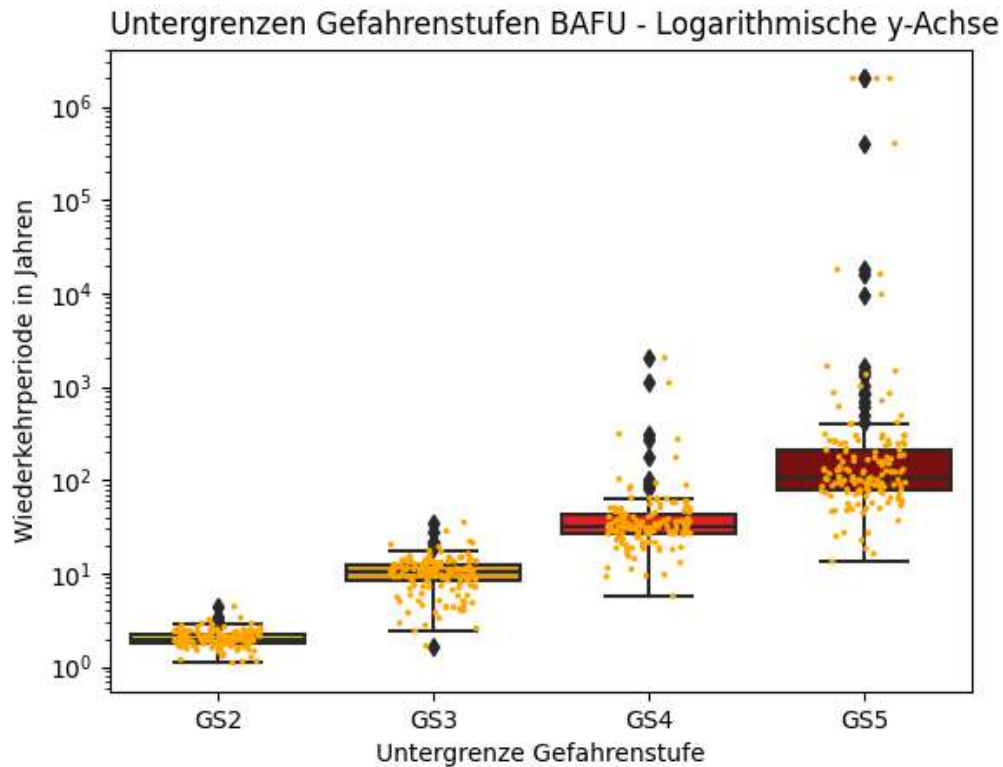


Abbildung 6: Verteilung der Untergrenzen der BAFU Gefahrenstufen

Allgemeindefinition entfernt. Nach der statistischen Definition der Gefahrenstufen anhand von Wiederkehrperioden hat also bei manchen Stationen eine deutliche Anpassung der Gefahrenstufen aufgrund von Erfahrungswerten stattgefunden.

### 3.2.2 Gefahrenstufen bordvoller Abfluss

Anders als bei den Wiederkehrperioden (Abbildung 2) ist die Variabilität zwischen den verschiedenen Gefahrenstufen (Abbildung 7) relativ gering. Für die meisten Segmente liegt der bordvolle Abfluss in der dritten Gefahrenstufe. In vielen Segmenten wird der bordvolle Abfluss aber erst in der fünften Gefahrenstufe erreicht. Grosse Sprünge, bei denen ein grünes Segment direkt in ein oranges übergeht, gibt es keine. Bei den Schutzzielkarten mit Wiederkehrperioden waren solche Sprünge noch häufig zu finden.

### 3.2.3 Gefahrenstufen bordvoller Abfluss gefiltert

Abbildung 8 zeigt die Verteilung der Gefahrenstufen, innerhalb deren der gefilterte bordvolle Abfluss liegt (TLM- und Threshold Filter kombiniert). Im Vergleich zu den Unterschieden vor und nach der Filterung bezüglich der Wiederkehrperioden (Abbildungen

## Gefahrenstufen bordvoller Abfluss

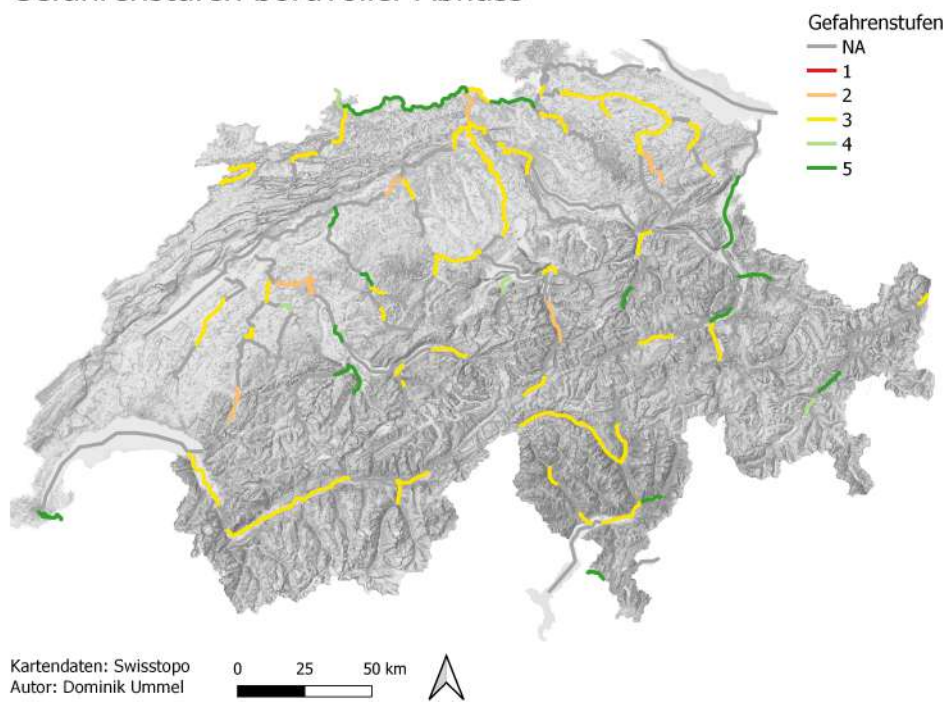


Abbildung 7: BAFU Gefahrenstufen für den bordvollen Abfluss

## Gefahrenstufen bordvoll gefiltert

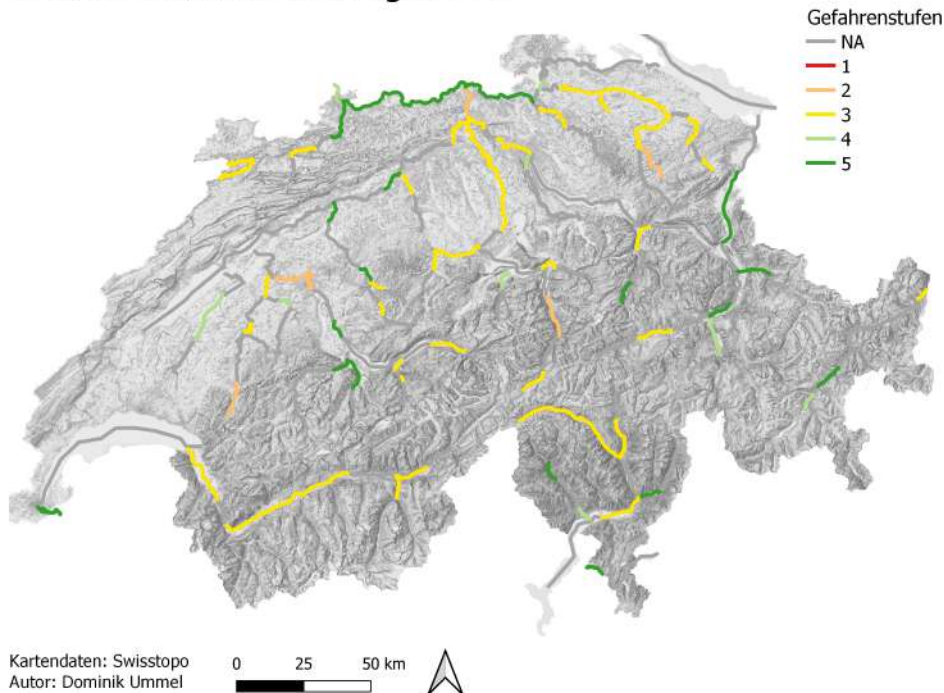


Abbildung 8: BAFU Gefahrenstufen für den bordvollen Abfluss nach Filterung durch Gerinneflächen und Thresholds

2 und 3), gibt es hier weniger Unterschiede vor und nach der Filterung. Die leicht höhere Wiederkehrperiode nach der Filterung bedeutet also für viele Abschnitte keine Veränderung der Gefahrenstufe.

Die grösste Auswirkung hat der Filter auf die Aare bei Rothrist. Dort wechselt die Gefahrenstufe des bordvollen Abflusses durch den Filter von 2 auf 5.

### 3.2.4 Gefahrenstufen schadensrelevanter Abfluss Buildings

Die Gefahrenstufen beim schadensrelevanten Abfluss bezüglich Gebäuden (Abbildung 9) unterscheiden sich nicht stark von den Gefahrenstufen beim bordvollen Abfluss (Abbildungen 7 und 8). Die Gefahrenstufen 3 und 5 sind die häufigsten, aber auch die Gefahrenstufe 4 kommt oft vor. Nur bei fünf Segmenten sind Gebäude bereits in der zweiten Gefahrenstufe betroffen.

### 3.2.5 Gefahrenstufen schadensrelevanter Abfluss Persons Workplaces

Auch beim schadensrelevanten Abfluss bezüglich Personen und Arbeitsplätzen (Abbildung 10) ist die dritte Gefahrenstufe noch häufig vertreten. Die Gefahrenstufen 4 und 5 sind



## Gefahrenstufen "buildings"

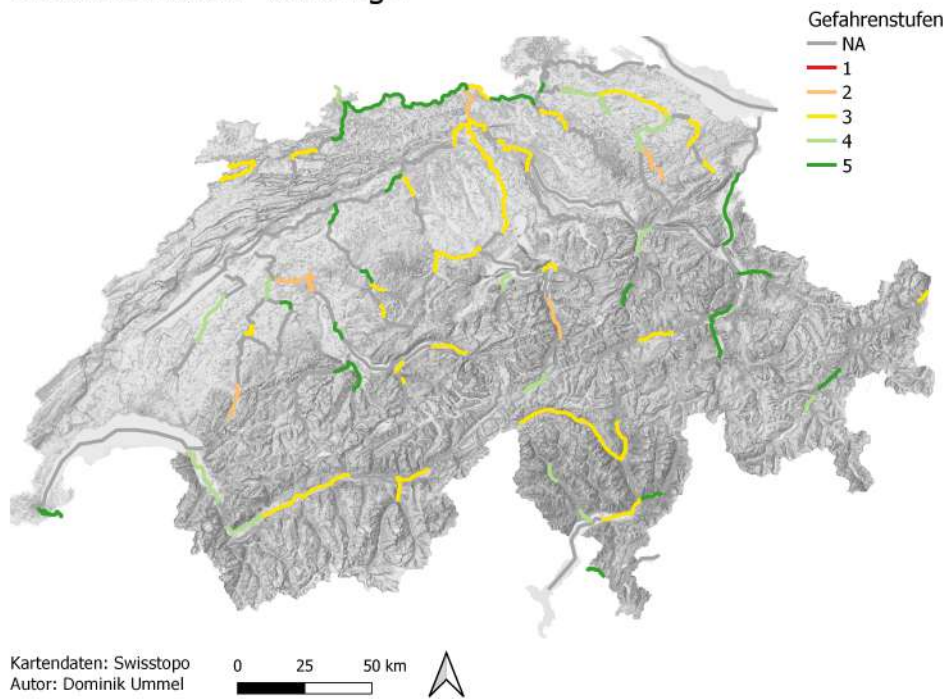


Abbildung 9: Schutzzielkarte für den schadensrelevanten Abfluss im Bezug auf Gebäude

## Gefahrenstufen "persons\_workplaces"

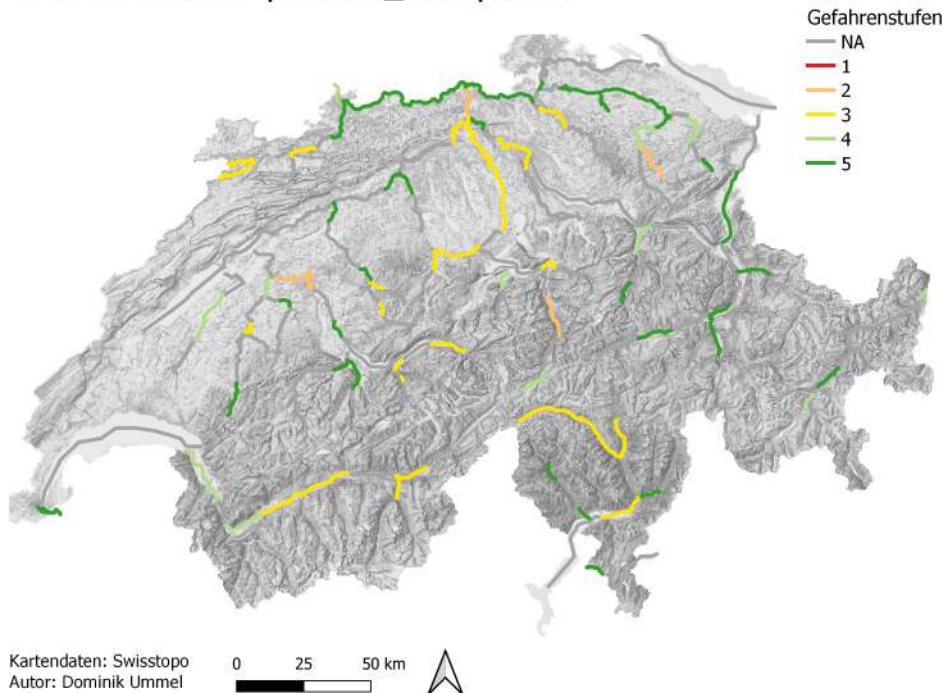


Abbildung 10: Schutzzielkarte für den schadensrelevanten Abfluss im Bezug auf betroffene Personen und Arbeitsplätze

hier aber klar am häufigsten. Die Anzahl Segmente mit Gefahrenstufe 2 sinkt auf vier. Wie beim schadensrelevanten Abfluss bezüglich Gebäuden ist auch hier die Variabilität der Gefahrenstufen höher als bei den Gefahrenstufen des bordvollen Abflusses.

Bei vielen Segmenten liegen alle vier betrachteten Abflüsse in der dritten Gefahrenstufe. Hierbei handelt es sich oft um Segmente, die für alle vier betrachteten Abflüsse tiefe Wiederkehrperioden aufweisen, wie zum Beispiel der Oberlauf der Tessin, die Rhône im Oberwallis oder die Reuss bei Bremgarten. Bei anderen Flussegmenten gibt es Sprünge von 2-3 Gefahrenstufen. Die Gefahrenstufen verändern sich also, wie auch die Wiederkehrperioden, nicht überall gleich. Die Variabilität zwischen den verschiedenen Kategorien ist bei den Gefahrenstufen jedoch geringer. Ausserdem ist der Anteil roter und oranger Segmente deutlich tiefer als bei den Wiederkehrperioden.

### 3.3 Einfluss der Filterung nach Gerinneflächen und nach Thresholds

#### 3.3.1 Filterung nach Gerinneflächen

Abbildung 11 zeigt die Wiederkehrperioden des bordvollen Abflusses, wenn nur nach Gerinneflächen gefiltert wird. Der Einfluss des Filters auf verschiedene Segmente ist

## Wiederkehrperioden bordvoller Abfluss nur TLM Filter

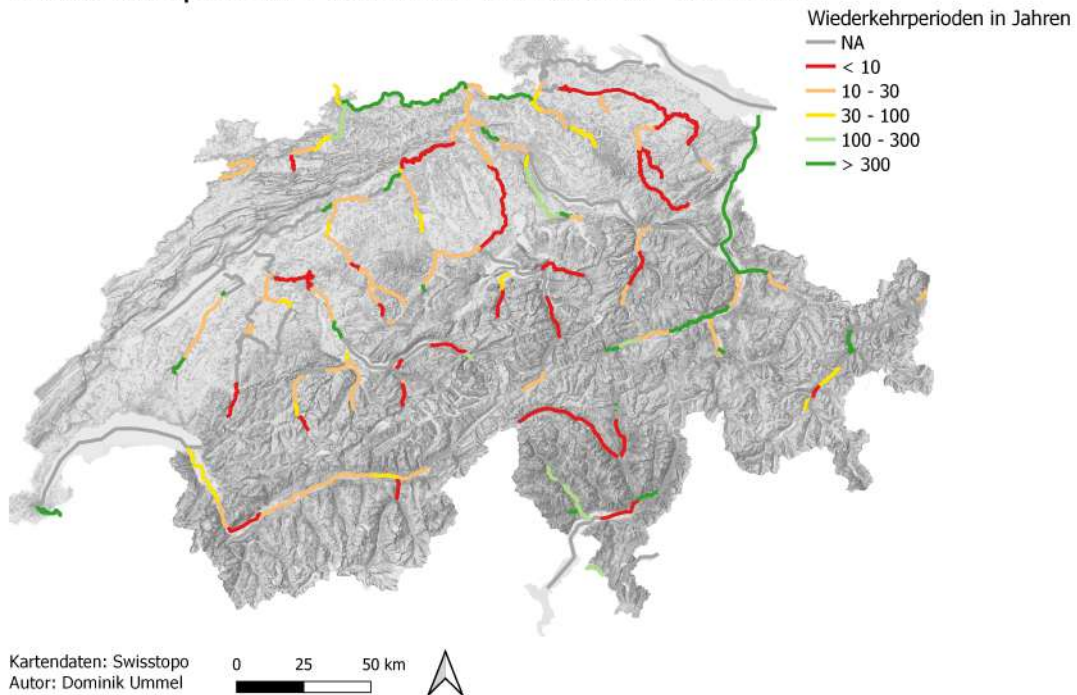


Abbildung 11: Schutzzielkarte für den bordvollen Abfluss, nur nach Gerinneflächen gefiltert

sehr variabel (vgl. ungefilterter bordvoller Abfluss, Abbildung 2). Es gibt Segmente im Vorderrhein oder in der Maggia, welche durch den Filter von rot zu grün wechseln. Hier wurden also alle Überschwemmungsgebiete, welche bei einem Abfluss mit einer so geringen Wiederkehrperiode bereits geflutet werden, weggefiltert und die übrigbleibenden Überschwemmungsgebiete nach dem Filter haben alle höhere Wiederkehrperioden.

Zusätzlich gibt es auch einige Segmente, deren Kategorie der Wiederkehrperiode sich um 1-2 Stufen erhöht. Bei vielen Segmenten ändert sich durch den Filter jedoch nichts an der Wiederkehrperiode des bordvollen Abflusses. Insgesamt werden durch den Filter knapp 400'000 der insgesamt ca. 1'800'000 Dreieckselemente entfernt.

Ein Beispiel für eine starke Filterung zeigt sich beim Zufluss des Rein da Sumvitg in den Vorderrhein bei Somvix (Abbildung 12). Die Kiesbänke im Bereich des Zuflusses werden bereits bei einem Szenario mit einem Spitzenabfluss von  $100\text{m}^3/\text{s}$  im Vorderrhein überschwemmt. In diesem Abschnitt entspricht das einer Wiederkehrperiode von 1.11 Jahren. Durch die TLM-Filterung werden diese Dreieckselemente entfernt, da sie innerhalb einer Gerinnefläche liegen und somit für den bordvollen Abfluss nicht relevant sind. Ohne diese Gebiete auf den Kiesbänken treten in diesem Flusselement bis zu einem simulierten Szenario mit Spitzenabfluss von  $400\text{m}^3/\text{s}$  keine weiteren Überschwemmungen mehr auf,



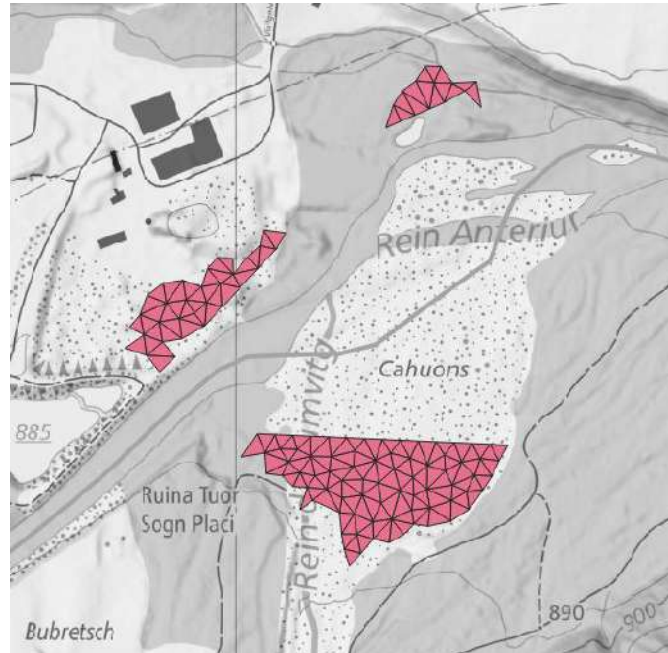


Abbildung 12: Beispiel für den Einfluss der Filterung nach Gerinneflächen (TLM-Filterung)

das Segment liegt somit nach der Filterung nach Gerinneflächen in der grünen Kategorie, also bei einer Wiederkehrperiode des bordvollen Abflusses von über 300 Jahren.

### 3.3.2 Filterung nach Thresholds

Die Einstellung der Filterparameter hat einen grossen Einfluss auf die Stärke des Threshold Filters. Wird zum Beispiel die Stepsize zu gross eingestellt, hat dies zur Folge, dass Fehler nicht erkannt werden, wenn es in den nächsthöheren simulierten Abflüssen zu grösseren Überschwemmungen kommt. Ist die Stepsize zu klein, ist es möglich, dass eine Überschwemmung als Fehler gekennzeichnet wird, obwohl es sich dabei um den Beginn einer Überschwemmung handeln könnte, die dann erst bei der nächsthöheren Simulationsstufe grösser ausfällt. Wird die Anzahl Dreieckselemente, die für die Fehlerkennzeichnung vorausgesetzt werden zu tief angesetzt, werden grössere Fehler nicht erkannt. Wird die Anzahl Dreiecke zu gross angesetzt, besteht die Gefahr, dass kleinräumige, früh auftretende Überschwemmungen irrtümlicherweise als Fehler gekennzeichnet werden.

Eine optimale Einstellung, die für alle Flusssegmente passt, zu definieren ist sehr schwierig. Als eine gute Einstellung hat sich eine Stepsize  $\geq 2$  und eine Anzahl Dreieckselemente  $\leq 10$  ergeben. Diese Einstellung ist relativ restriktiv in Bezug darauf, welche Überschwemmungen als Fehler gekennzeichnet werden. Nur sehr kleinräumige Überschwemmungen werden als Fehler gekennzeichnet. Eine Erhöhung des Anzahl Dreieckselemente Parameters führt aber sehr schnell dazu, dass bestimmte Gebiete irrtümlicherweise als Fehler gekennzeichnet werden. Diese Einstellung filtert starke,

## Wiederkehrperioden bordvoller Abfluss nur Threshold Filter

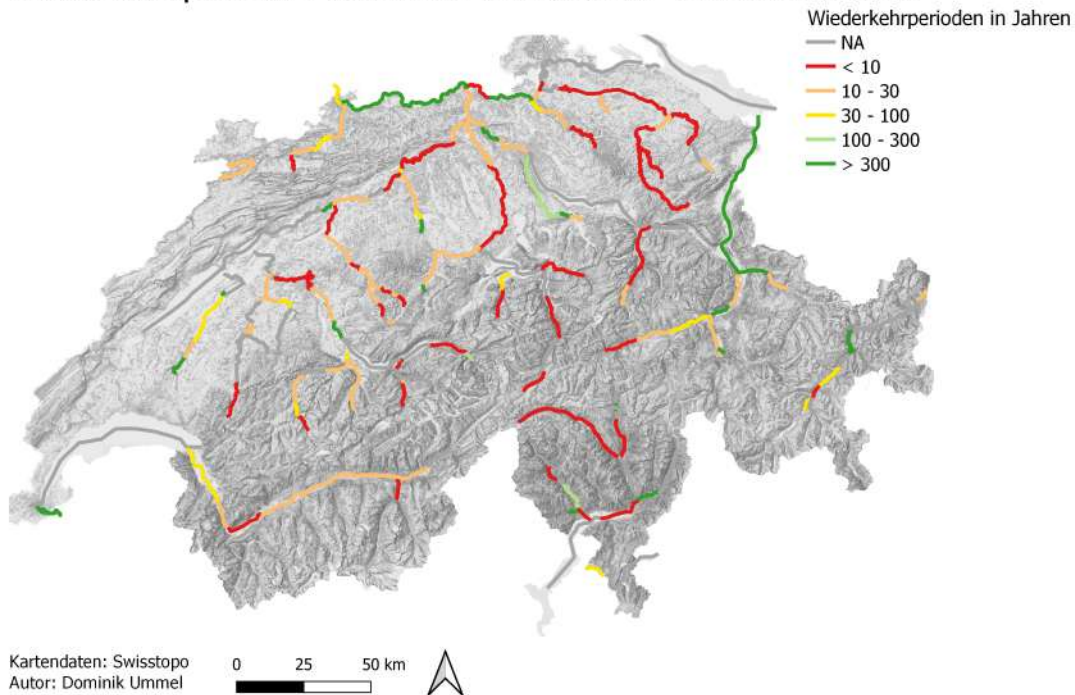


Abbildung 13: Schutzzielkarte für den bordvollen Abfluss, nur nach Thresholds gefiltert

kleinräumige Fehler, währenddem die Gefahr, irrtümlicherweise Überschwemmungen als Fehler zu kennzeichnen, sehr gering ist. Die Tatsache, dass dabei einige Fehler übersehen werden können, wird in Kauf genommen.

Abbildung 13 zeigt den Einfluss dieses Filters auf die Wiederkehrperioden des bordvollen Abflusses (vgl. zu den ungefilterten Wiederkehrperioden, Abbildung 2). Insgesamt werden durch diesen Filter weniger Segmente beeinflusst als durch den TLM Filter. Nur bei 13 Segmenten greift der Filter, woraus bei nur 8 Segmenten ein Wechsel der Kategorie folgt. Wenn der Filter aber greift, führt dies oft zu einer starken Veränderung für das Segment und die Kategorie erhöht sich oft direkt um 2 Stufen. Insgesamt werden durch diesen Filter nur ca. 50 Dreieckselemente weggefiltert. Der Filter arbeitet also sehr punktuell. Wird nur der Threshold Filter angewendet, sind die berechneten Wiederkehrperioden fast ausschliesslich tiefer, als wenn nur der TLM-Filter angewendet wird. Eine Ausnahme bildet die Sihl bei Zürich. Die berechnete Wiederkehrperiode nach dem TLM-Filter beträgt 32.8 Jahre, bei der Anwendung des Threshold Filters 246.2 Jahre.

Abbildung 14 zeigt den Inn bei Zernez als Beispiel für die Wirkung dieses Filters. Oben im Bild ist ein einzelnes Dreieckselement zu sehen, das auf einer Kiesbank liegt. Dieses Dreieck wird bereits bei einem Szenario mit einem Spitzenabfluss von  $290\text{m}^3/\text{s}$  überschwemmt. Dies entspricht einer Wiederkehrperiode von 81 Jahren. Der nächstgrössere Spitzenabfluss,

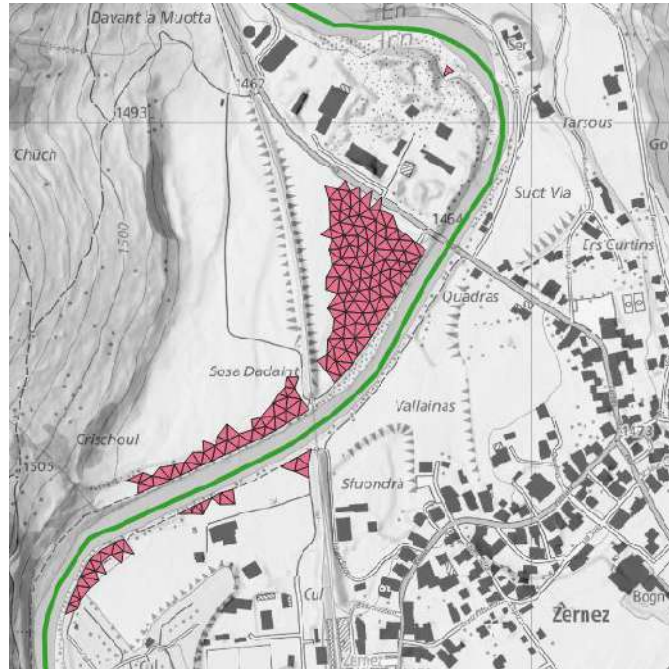


Abbildung 14: Beispiel für den Einfluss der Threshold-Filterung.

bei dem ein anderes Dreieckselement in diesem Segment überschwemmt wird, liegt bei  $430\text{m}^3/\text{s}$ , was einer Wiederkehrperiode von 391 Jahren entspricht. Die Erhöhungsschritte des Spitzenabflusses zwischen den verschiedenen Simulationen betragen hier  $20\text{m}^3/\text{s}$ . Die Stepsize beträgt also 7 und beim Szenario mit dem kleinsten Spitzenabfluss ist nur ein Dreieckselement betroffen. Das Dreieck wird also weggefiltert, was in diesem Fall richtig ist, da es auf einer Kiesbank liegt und somit für den bordvollen Abfluss nicht relevant ist. Beim Beispiel in Abbildung 12 greift der Threshold Filter hingegen nicht, da die Anzahl Dreieckselemente, die beim Szenario mit dem kleinsten Spitzenabfluss überschwemmt werden, bereits zu gross ist.

Wird der Threshold Filter auf die bereits mit dem TLM-Filter gefilterten Dreieckselemente angewendet, verändert sich dessen Einfluss. Beim Beispiel aus Abbildung 14 ist kein Eingreifen des Threshold Filters mehr nötig, da das Dreieckselement auf der Kiesbank bereits vom TLM-Filter entfernt wird. Trotzdem erhöht sich die Anzahl Segmente, bei denen der Threshold Filter greift, von 13 auf 17 und die Anzahl Segmente, deren Kategorie sich durch den Threshold Filter verändert, von 8 auf 13. Somit erhöht vorgängige Anwendung des TLM-Filters die Aktivität des Threshold Filters.

## 4 Diskussion

### 4.1 Vor- und Nachteile der verwendeten Filter

Die verwendeten Filteransätze haben unterschiedliche Vor- und Nachteile. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Stärken und Schwächen.

Der TLM Filter arbeitet sehr grossflächig und entfernt viele Dreieckselemente. Dadurch hat er auch einen sehr starken Einfluss und die berechneten Wiederkehrperioden verändern sich vielerorts, da viele Überschwemmungsgebiete, die eigentlich innerhalb der definierten Gerinneflächen liegen, ignoriert werden können. Die Grösse dieser Flächen spielen dabei keine Rolle, was bedeutet, dass grössere Korrekturen durchgeführt werden können. Der TLM Filter hat aber auch Nachteile. Bei ca. 400'000 gefilterten Dreieckselementen muss davon ausgegangen werden, dass durchaus Fehler passieren. Das heisst, dass Überschwemmungsgebiete ignoriert werden, obwohl es sich dabei nicht um Gerinneflächen handelt. Zum Beispiel, wenn ein Waldgebiet überflutet wird, würde dies durch den TLM Filter, so wie er hier definiert ist, ignoriert werden. Ein Lösungsansatz wäre es, die Filterdefinition anzupassen. So könnten beispielweise nur die TLM Kategorien Feuchtgebiete und Fliessgewässer als Filterbereiche definiert werden. Überflutungen in Waldgebieten würden dann nicht mehr herausgefiltert werden. Hier braucht es aber eine gute Abwägung zwischen zu starkem und zu schwachem Filtern. Diese Abwägung auf der Ebene des ganzschweizerischen Untersuchungsgebiets genau zu finden ist eine Herausforderung. Die Anwendung eines eher starken Filters empfiehlt sich aber dadurch, dass die genannten Herausforderungen mit Waldflächen Ausnahmesituationen sind, da es im Untersuchungsgebiet nur wenige Flussabschnitte gibt, die über längere Strecken durch Wälder verlaufen. Ausserdem ist der Einfluss von fälschlicherweise gefilterten Dreieckselementen beim TLM Filter vergleichsweise eher gering. Da für den bordvollen Abfluss immer der kleinste Spitzenabfluss mit mindestens einem überfluteten Dreieckselement genommen wird, hat die Filterung eines Dreiecks erst dann einen Einfluss auf die berechneten Wiederkehrperioden, wenn alle Dreieckselemente dieses Szenarios in diesem Segment gefiltert werden. In diesem Fall wiederum müsste der gleiche Fehler für mehrere Dreieckselemente passieren, was zwar möglich ist, wenn sie sehr nahe beieinander liegen, aber mit zunehmender Anzahl Dreieckselemente unwahrscheinlicher wird. Die Wahrscheinlichkeit grossflächige Fehler zu machen ist dadurch eingeschränkt.

Nur nach den Gerinneflächen zu filtern reicht nicht aus, um alle grösseren Fehler herauszufiltern. Einerseits ist es möglich, dass die Gerinneflächen nicht komplett mit dem TLM abgedeckt sind und somit einzelne Dreieckselemente vollständig unter dem TLM heraussehen können und nicht gefiltert werden. Andererseits ist es möglich, dass durch kleine Ungenauigkeiten im Modell einige Dreieckselemente bereits sehr früh als überflutet gekennzeichnet werden, obwohl dies in Wirklichkeit bei diesen Abflüssen nicht der Fall ist. Zur Filterung solcher Fehler empfiehlt sich der Threshold Filter. Dieser greift sehr punktuell ein und kann deshalb mit dem Entfernen weniger Dreieckselemente bereits grosse Veränderungen in den berechneten Wiederkehrperioden verursachen. Auch hier muss die Stärke des Filters genau abgewogen werden. Wie auch beim TLM Filter lässt sich nicht eine für alle Flusssegmente optimale Lösung finden, die alle Fehler erkennt, aber trotzdem

nicht zu viel filtert. Anders als beim TLM Filter muss hier aber beachtet werden, dass der Einfluss eines Fehlers im Filter auf die berechneten Wiederkehrperioden viel stärker ist. Da der Filter immer alle Dreieckselemente eines als Fehler eingestuften Szenarios entfernt, führt jeder Eingriff des Filters direkt zu einer Veränderung der berechneten Wiederkehrperiode für dieses Flussegment. Beim Threshold Filter empfiehlt sich deshalb eher ein vorsichtiger Ansatz, um zu verhindern, dass zu viel gefiltert wird. Durch diesen vorsichtigen Ansatz ergibt sich dann aber auch die Schwäche des Threshold Filters. Es werden nur sehr kleinräumige Fehler erkannt. Die Überflutung eines kleinen Flussdeltas wie in Abbildung 12 ist bereits zu gross für den Threshold Filter. Hinzu kommt die Problematik, dass die Filterkriterien immer auf der Ebene eines ganzen Flussegmentes evaluiert werden. Wenn also im gleichen Szenario an zwei verschiedenen Stellen in diesem Flussegment ein Fehler über beispielsweise 6 Dreieckselemente passiert, beträgt die Gesamtzahl Dreiecke in dieser Stufe bereits 12. Bei den hier gewählten Filtereinstellungen würden diese beiden Fehler also bereits nicht mehr erkannt werden.

Die Stärken und Schwächen dieser beiden Filter ergänzen sich sehr gut. Optimalerweise werden sie also kombiniert angewendet. Dies vereint die grossflächige Filterung des TLM Filters sowie die punktuelle Filterung des Threshold Filters. Zusätzlich ergibt sich aus der Kombination ein weiterer Vorteil des Threshold Filters. Die Resultate haben gezeigt, dass die vorgängige Anwendung des TLM Filters die Aktivität des Threshold Filters erhöht. Dies ist dadurch begründet, dass es an einigen Stellen kleine Lücken zwischen verschiedenen TLM-Flächen geben kann. Dreieckselemente, die genau in diesen Lücken liegen, bleiben dann als einzelne Dreiecke zurück. Diese werden dann vom Threshold Filter erkannt und gefiltert. Der Threshold Filter kann also zusätzlich zu seiner eigenen Filterfunktion auch als Cleanup für den TLM Filter verwendet werden.

Auch die Fehlerfilterung nach Gebäudetyp zur Bestimmung des schadensrelevanten Abflusses bringt gewisse Herausforderungen mit sich. Zwar vereinfacht dieser Filter das Ignorieren leerstehender Scheunen, überdachter Grillstellen und ähnlichen Gebäuden, die zur Bestimmung des schadensrelevanten Abflusses nach der Definition hier nicht relevant sind. Die Problematik dabei ist aber, dass beachtet werden muss, dass nicht alle wichtigen Gebäude Arbeitsplätze oder Wohnzweck haben. Ausserdem können Schäden nicht nur an Gebäuden entstehen, sondern auch an anderen Schutzgütern, wie Personen, Infrastruktur oder an der Natur (PLANAT 2015).

Eine Kombination der Filter für den bordvollen Abfluss mit dem Filter nach Gebäudetyp wäre grundsätzlich möglich. In der Praxis macht dies jedoch wenig Sinn. Die betrachteten TLM-Flächen wie Wald, Gehölz oder auch Fliessgewässer überschneiden sich nicht oder nur sehr selten mit Gebäuden. Dort wo der TLM Filter greift, stehen also auch keine Gebäude, der Filter würde somit den hier definierten schadensrelevanten Abfluss nicht beeinflussen. Der Threshold Filter würde zwar überall greifen, die Untersuchungen haben aber gezeigt, dass die durch den Threshold Filter korrigierten Bereiche sich nicht mit Gebäuden überlagern. Der einzige Abschnitt, bei dem der gefilterte bordvolle Abfluss in den Resultaten eine höhere Wiederkehrperiode bekommt als der schadensrelevante Abfluss, ist die Sihl bei Zürich. Dort hat es im Stadtgebiet einige Dreieckselemente, die vom Threshold Filter als Fehler markiert werden. Für den gefilterten bordvollen Abfluss werden diese dann ignoriert, für den schadensrelevanten Abfluss jedoch nicht,

da dort die ungefilterten Überschwemmungsgebiete betrachtet werden. Solche Probleme lassen sich anschliessend am besten direkt im hydraulischen Modell korrigieren. Wenn die Überflutung bei diesem Szenario durch die Korrektur im Modell verschwindet, wird der Einfluss der Korrektur auch auf die Bestimmung des schadensrelevanten Abflusses übertragen. Tritt die Überflutung an dieser Stelle weiterhin bereits bei diesem Szenario auf, handelt es sich mit grosser Wahrscheinlichkeit tatsächlich um eine lokale, kleinräumige Überschwemmung.

## 4.2 Verteilung der Wiederkehrperioden und Gefahrenstufen

Die Resultate haben gezeigt, dass die berechneten Wiederkehrperioden des bordvollen, sowie des schadensrelevanten Abflusses stark variieren. Die hydrologischen Gegebenheiten sowie die Umsetzung der Schutzziele sind schweizweit gesehen heterogen. Bei der Betrachtung des schadensrelevanten Abflusses werden aber bestimmte räumliche Muster erkennbar. Meist ist die Variabilität innerhalb eines gesamten Flusses kleiner als die Variabilität zwischen verschiedenen Flüssen. Beispiele für Flüsse mit eher tiefen Wiederkehrperioden der betrachteten Abflüsse sind die Reuss oder die Tessin. Beispiele für Flüsse mit höheren Wiederkehrperioden der Rhein oder die Broye. Gleichzeitig gibt es aber auch Flüsse wie die Aare, die eine grosse Variabilität aufweisen. Dennoch kann tendenziell gesagt werden, dass wenn ein Fluss in einem Abschnitt tiefe Wiederkehrperioden der betrachteten Abflüsse hat, ist dies auch in den weiteren Abschnitten dieses Flusses so. Es gibt also Flüsse, die aufgrund ihrer Morphologie regelmässiger zu Überschwemmungen führen.

Ähnlich zu den Wiederkehrperioden sind auch die Definitionen der Gefahrenstufen sehr variabel. Dies zeigt sich einerseits durch die hohe Variabilität der Grenzen der Gefahrenstufen. Ausserdem dadurch, dass die Gefahrenstufen, bei denen der bordvolle und der schadensrelevante Abfluss auftritt, trotz variabler Wiederkehrperioden, relativ homogen sind. Die Gefahrenstufen sind also von den reinen Wiederkehrperioden losgelöst und viel mehr an die tatsächlichen lokalen Auswirkungen verschiedener Abflussmengen gebunden.

Gemäss den Definitionen wurde erwartet, dass sowohl der bordvolle Abfluss als auch der schadensrelevante Abfluss für kein Segment in der ersten Gefahrenstufe liegen. Dies hat sich so bestätigt. Vereinzelt tritt der bordvolle Abfluss in der zweiten Gefahrenstufe auf, am häufigsten in der dritten. An einigen Stellen erst in der vierten oder sogar erst in der fünften. Im Grossen und Ganzen stimmt dies mit den Definitionen überein. Allerdings könnte es problematisch sein, wenn der bordvolle Abfluss erst in der fünften Gefahrenstufe auftritt. In diesem Fall treten also während den ersten vier Gefahrenstufen ausserhalb des Gerinnes keine Schäden auf. Für solche Abschnitte könnte eine Anpassung der Gefahrenstufe sinnvoll sein. Allerdings handelt es sich bei diesen Abschnitten oft um solche, bei denen die Wiederkehrperiode des bordvollen Abflusses bereits weit über 1000 Jahren liegt. Bei solch hohen Wiederkehrperioden noch Unterscheidungen zwischen verschiedenen Gefahrenstufen zu machen, würde wohl auch nur wenig Sinn ergeben.

Ganzheitlich betrachtet liegen der bordvolle und der schadensrelevante Abfluss am häufigsten in der dritten Gefahrenstufe. Bei vielen Flussabschnitten liegen sowohl der

bordvolle als auch der schadensrelevante Abfluss in dieser Stufe. Dass die beiden Abflüsse oft in derselben Stufe liegen, folgt daraus, dass in der dicht besiedelten Schweiz das Überschreiten des bordvollen Abflusses oftmals direkt zu Schäden führt, da dicht an die Gewässer gebaut wurde.

#### **4.2.1 Einfluss langer Flussegmente**

Bei der Auswertung der Schutzzielkarten ist zu beachten, dass die berechnete Wiederkehrperiode sich immer auf den Spitzenabfluss des Szenarios bezieht, bei dem entlang des gesamten Flussabschnitts eine erste Überschwemmung oder ein erster Schaden auftritt. Tritt an einer Stelle Wasser aus dem Flussbett oder ist ein Gebäude betroffen, wird die aus diesem Spitzenabfluss berechnete Wiederkehrperiode für das ganze Flussegment gesetzt. Es ist also vor allem bei längeren Flussabschnitten möglich, dass auf weiten Strecken im Flusslauf lange keine Überschwemmungen verzeichnet werden, die Wiederkehrperiode dieses Abschnittes aber trotzdem sehr tief ist, wenn es an einer exponierten Stelle bereits früh zu einer Überschwemmung kommt.

Ein klarer Bias, dass für längere Flussabschnitte tiefere Wiederkehrperioden berechnet werden, lässt sich jedoch nicht erkennen. Es gibt lange Abschnitte, mit sehr hohen Wiederkehrperioden (z.B Rhein zwischen Koblenz und Basel), sowie kurze Abschnitte mit sehr tiefen Wiederkehrperioden (z.B die Birs bei Delémont). Abbildung 15 zeigt in welchem Verhältnis die Segmentlängen zu den dazugehörigen Wiederkehrperioden stehen. Die Wiederkehrperioden sind dabei auf 500 Jahre beschränkt. Die Regressionsgerade zeigt zwar eine leichte Steigung, ein t-Test kann allerdings keine statistische Signifikanz feststellen. Der Einfluss der unterschiedlichen Segmentlängen muss zwar im Auge behalten werden, ein Standardisieren der Segmentlängen ist jedoch nicht erforderlich.

### **4.3 Validierung des hydraulischen Modells**

Um einen Überblick über die Modellergebnisse zu bekommen, haben sich die Schutzzielkarten als sehr hilfreich erwiesen. Rote Flussegmente können genauer unter die Lupe genommen werden, weshalb der bordvolle oder schadensrelevante Abfluss so früh auftritt. Generell werden die Outputdaten des Modells dadurch gut visualisiert, da für die im Modell simulierten Szenarien Wiederkehrperioden berechnet werden, was die Daten untereinander vergleichbarer macht. Auch die Visualisierung der Gefahrenstufen hilft die Daten weiter zu validieren, da hier nicht nur rein statistisch berechnete Wiederkehrperioden abgebildet werden, sondern die mit Einfluss von lokalen Erfahrungen erstellten Gefahrenstufen. Dass die Variabilität bei den Gefahrenstufen deutlich geringer ist als bei den Wiederkehrperioden hat gezeigt, dass diese grosse Variabilität der Wiederkehrperioden nicht zwingend ein Anzeichen von einem ungenauen Modell ist. Vielmehr ist diese Variabilität tatsächlich vorhanden und wird vom Modell reproduziert.

Manuelle Untersuchungen einzelner verdächtiger Flussabschnitte erfordern viel Zeit. Besonders dann, wenn sehr viele Flussabschnitte untersucht werden müssen. Eine grosse Abhilfe konnte die automatisierte Fehlersuche mit Hilfe der verwendeten Filter schaffen. Die Filter sind eingestellt, um typische Fehler zu finden. Dadurch können Unterschiede in

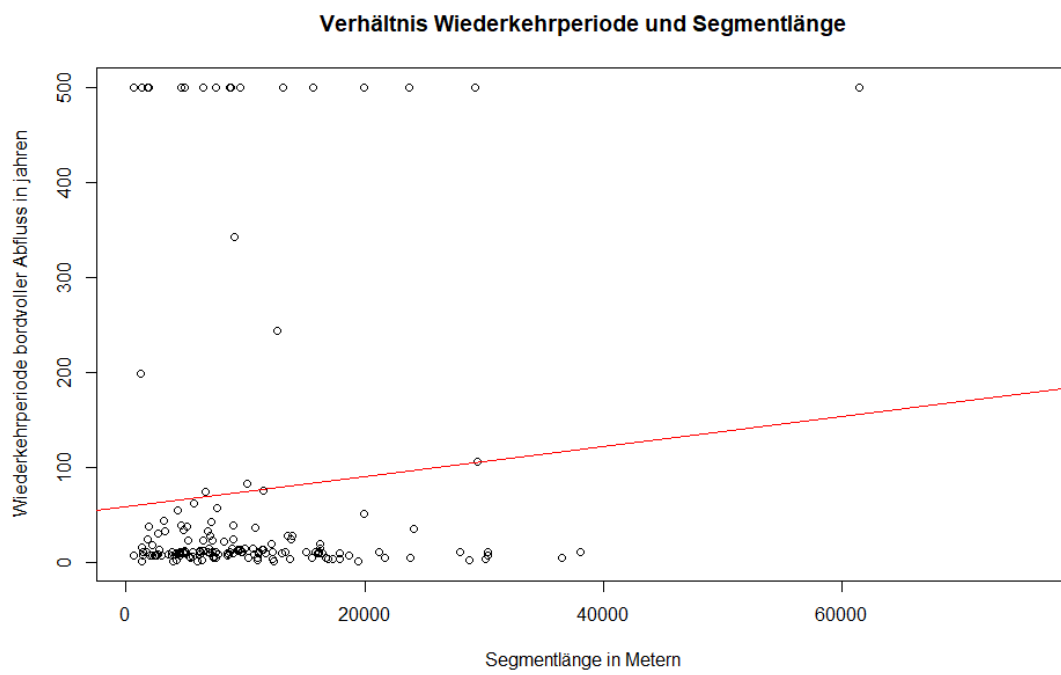


Abbildung 15: Zwischen der Segmentlänge und der Wiederkehrperiode des bordvollen Abflusses des jeweiligen Segments ist keine Korrelation zu erkennen.



den Schutzzielkarten vor und nach der Filterung als Indiz für mögliche Fehler in diesem Flussabschnitt gesehen werden. Dies schränkt die zu untersuchenden Flussabschnitte stark ein und erspart viel Zeit. Ausserdem zeigen die Filter welche Art von Fehler gesucht werden muss. Gibt es Gebäude, die nahe am Gewässer stehen aber nicht zum schadensrelevanten Abfluss gezählt werden müssen, führt der Filter nach Gebäudetyp zu einer Veränderung. Sind einige Dreiecke ungünstig gesetzt, wodurch sie bei zu tiefen Abflüssen bereits überflutet werden, wirkt der Threshold Filter. Wenn grössere Gebiete der eigentlich definierten Gerinnefläche als Überschwemmungsgebiete gezählt werden, greift der TLM-Filter. Fehler können durch dieses semi-automatisierte Vorgehen viel schneller gefunden und behoben werden, was sich positiv auf die Gesamtqualität des Modells auswirkt. Manuelle Korrekturen am Modell und eine Überprüfung der gekennzeichneten Fehler sind jedoch weiterhin notwendig.

#### 4.4 Fehlerquellen

Bei der Erstellung der hier gezeigten Schutzzielkarten gibt es verschiedene Fehlerquellen. Eine zentrale Fehlerquelle sind mögliche Ungenauigkeiten im verwendeten hydraulischen Modell. Werden Überschwemmungsgebiete hier falsch berechnet, wirkt sich das direkt auf die Schutzzielkarten aus. In Kombination mit den verschiedenen hier durchgeführten Optimierungen kann aber davon ausgegangen werden, dass die Genauigkeit des Modells relativ hoch ist. Eine genaue Quantifizierung der möglichen Fehlerausmasse gestaltet sich jedoch schwierig.

Eine weitere Fehlerquelle sind die durchgeführten Umrechnungen zwischen Abflusswerten und Wiederkehrperioden mittels der allgemeinen Extremwertverteilung. Insbesondere bei sehr hohen und sehr tiefen Wiederkehrperioden kann es hier zu Ungenauigkeiten kommen (vgl. Baumgartner et al. 2013). Auch hier ist eine generelle Quantifizierung des Fehlerausmasses schwierig, da es von Situation zu Situation stark variieren kann. Die Genauigkeit hängt von den Gegebenheiten im Flusslauf, sowie von der verfügbaren Zeitreihe zur Berechnung der Extremwertverteilung ab. Je länger die verfügbare Zeitreihe, desto kleiner werden die Konfidenzintervalle (Baumgartner et al. 2013). Ausserdem haben Baumgartner et al. (2013) gezeigt, dass die Modellwahl zur Bestimmung der Parameter der Extremwertverteilung eine entscheidende Rolle spielt. So können sich die absoluten Werte der berechneten Wiederkehrperioden je nach Modellansatz stark unterscheiden. Relativ gesehen hat dies in dieser Arbeit aber nur einen geringen Einfluss, da flächendeckend der gleiche Ansatz angewendet wurde.

Bei gewissen Inputpunkten liegen die Modellparameter der Extremwertverteilung nicht direkt an dieser Stelle vor. Dies betrifft alle Inputpunkte mit den Ansätzen FF und EF (vgl. Tabelle 2). Bei der Interpolation der Abflusswerte auf kleinere und grössere Einzugsgebiete kann es zu Ungenauigkeiten kommen. Wird bei der Wahl der Interpolationsansätze jedoch darauf geachtet, geeignete Referenzstationen, sowie einen geeigneten Ansatz zu wählen, kann die Trefferquote der Konfidenzintervalle bei der Interpolation erhöht werden (Ummel 2021). Wiederum unterscheidet sich die Auswirkung und das mögliche Ausmass dieser Fehlerquelle stark zwischen den verschiedenen betrachteten Flussegmenten. Wenn beim Inputpunkt die Modellparameter zur Berechnung der Extremwertfunktion direkt vorliegen,

wird keine Interpolation durchgeführt, der Fehler beträgt somit null. Muss der Abfluss aber über grössere Strecken umgerechnet werden, kann das mögliche Fehlerausmass deutlich ansteigen. Da die unterschiedlichen Interpolationsansätze je nach Segment zu unterschiedlichen Fehlern führen können, wäre es möglich, dass dadurch eine Variabilität entsteht, welche es in der Wirklichkeit gar nicht gibt. Dieser Verdacht hat sich jedoch nicht bestätigt, da die Variabilität gleichermassen vorhanden ist, wenn nur die Segmente mit dem Ansatz 'direct', also ohne Interpolation der Abflusswerte, betrachtet werden.

Aufgrund dieser möglichen Fehlerquellen können einige Wiederkehrperioden deutlich unter- bzw. überschätzt werden. Gerade bei höheren Wiederkehrperioden sind Abweichungen von 100 Jahren oder mehr möglich. Extreme Fehler können jedoch aufgrund der Validierung mit den BAFU Gefahrenstufen gefunden werden, da so eine gewisse Anknüpfung an Erfahrungswerte möglich ist. Ausserdem führen die Fehler nicht dazu, dass hohen Abflusswerten plötzlich eine sehr tiefe Wiederkehrperiode zugewiesen wird oder umgekehrt. Hohe Abflusswerte für ein Flussegment erhalten trotz der Fehlerquellen eine höhere Wiederkehrperiode als tiefere. Die möglichen Fehler führen also lediglich dazu, dass die absoluten Wiederkehrperioden mit Vorsicht zwischen verschiedenen Flussegmenten verglichen werden müssen.

## **5 Ausblick und Fazit**

### **5.1 Berechnung des bordvollen und schadensrelevanten Abflusses**

Hauptziel dieser Arbeit war es, aus einem hydraulischen Modell den bordvollen und den schadensrelevanten Abfluss berechnen zu können. Dass dies möglich ist, hat sich im Verlauf der Arbeit gezeigt, da die erhaltenen Werte im Vergleich zu den BAFU Gefahrenstufen plausibel sind. Die Berechnung erfordert aber ein sehr genaues Modell. Dieses aufzubauen ist mit einem hohen Zeitaufwand verbunden, da iterativ Fehler korrigiert werden müssen, um das Modell bis zur erforderlichen Genauigkeit zu optimieren. Aufgrund des hohen Aufwandes ist die Erstellung eines hydraulischen Modells, nur um bestimmte Abflussgrössen zu bestimmen, zu gross. Eingebettet mit anderen Zielen ist die Berechnung des bordvollen und schadensrelevanten Abflusses aus einem Modell aber möglich und durchaus sinnvoll, da das Modell sich dadurch validieren lässt.

### **5.2 Validierung und Optimierung von hydraulischen Modellen**

Die Untersuchungen in dieser Arbeit haben gezeigt, dass die Berechnung des bordvollen und schadensrelevanten Abflusses aus einem hydraulischen Modell dazu dienen können ebendieses Modell zu validieren und zu optimieren. Dies begründet sich dadurch, dass die Modellierung solcher eher kleineren Ereignisse eine höhere Modellgenauigkeit erfordern, damit auch kleine Überschwemmungen korrekt im Modell simuliert werden. Gibt es Ungenauigkeiten wird das durch unerwartete Werte der Wiederkehrperioden der definierten Abflüsse sichtbar. Ausserdem können typische Fehler mit Hilfe der verwendeten Filter automatisiert gefunden und anschliessend korrigiert werden.

Da die Filter ihre Vor- und Nachteile haben und teilweise auch 'überkorrigieren' können, sind sie vor allem als Tool zu sehen, um das hydraulische Modell zu optimieren. Die Genauigkeit der Berechnung sollte nicht von der anschliessenden Filterung abhängen, sondern die Filter sollten dazu verwendet werden die Genauigkeit des Modells zu erhöhen, indem gefundene Fehler korrigiert werden. Dadurch ist es auch nicht mehr zwingend notwendig optimale Filtereinstellungen für die ganze Schweiz zu finden, sondern es kann mit verschiedenen Filtereinstellungen experimentiert und die gefundenen Fehler untersucht werden.

### **5.3 Mögliche Verbesserungen der Fehlerfilter**

Im Bereich der verwendeten Filter gibt es noch Optimierungspotenzial. Der Threshold Filter könnte dahingehend optimiert werden, dass nicht auf der Ebene ganzer Flussegmente nach möglichen Fehlerbildern gesucht wird, sondern viel lokaler. Fehlermarkierungen könnten überall gesetzt werden, wo nur eine bestimmte Anzahl im gleichen Szenario überschwemmter Dreieckselemente zusammenhängen, anstatt alle Dreieckselemente dieses Szenarios im ganzen Segment zu betrachten. So wäre unter Umständen eine noch bessere Fehlersuche möglich. Dies würde aber dazu führen, dass viel mehr Stellen als Fehler markiert werden. Werden diese markierten Stellen automatisch weggefiltert besteht jedoch die Gefahr einer Überkorrektur. Werden die Markierungen nur genutzt, um das Modell weiter zu optimieren ist viel manuelle Arbeit nötig, um erstens zu kontrollieren, ob es sich tatsächlich um Fehler handelt und zweitens um die Korrekturen im Modell zu machen. Hier gibt es also einen klaren Tradeoff zwischen weiterer Optimierung und Aufwand. Ausserdem muss gefragt werden, bis zu welchem Ausmass weitere Optimierungen überhaupt sinnvoll sind, mit Berücksichtigung der möglichen Genauigkeit des Modells und anderen Fehlerquellen.

Sinnvoller wäre es die Filterung nach Gebäudetyp zu optimieren, um im Bereich des schadensrelevanten Abflusses eine Verbesserung der Schutzzielkarten zu erreichen. Dazu bräuchte es eine Erweiterung der Definition des schadensrelevanten Abflusses, damit auch weitere Schutzgüter berücksichtigt werden. Ausserdem würden dann weitere Datengrundlagen benötigt, die eine solche Auswertung in Bezug auf verschiedene weitere Schutzgüter ermöglichen.

### **5.4 Hochwassersituation in der Schweiz**

Die erstellten Schutzzielkarten für den schadensrelevanten Abfluss haben gezeigt, dass das Schutzziel Hochwasser von einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren für Gebäude in der Schweiz nicht flächendeckend erfüllt ist. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass bei einer anderen Wahl der Parameter der Extremwertverteilung, die Wiederkehrperioden anders ausfallen könnten. Ausserdem reicht ein einziges Gebäude, das sehr früh betroffen ist, um dem ganzen Flussegment eine tiefe Wiederkehrperiode des schadensrelevanten Abflusses zuzuweisen. In den Abschnitten mit Wiederkehrperioden des schadensrelevanten Abflusses von weniger als 100 Jahren sind trotzdem noch viele Gebäude vorhanden, die das Schutzziel von 100 Jahren erreichen.

Weiter hat sich gezeigt, dass die Gefahr durch Hochwasser in der Schweiz sehr variabel ist. Während bei gewissen Flussabschnitten nur eine geringe Gefährdung zu erwarten ist, scheint die Gefährdung an anderen Stellen mit den gleichen Wiederkehrperioden viel grösser zu sein. Allerdings sind in der Verteilung keine räumlichen Muster zwischen den verschiedenen Regionen der Schweiz zu erkennen. Oft sind es aber die gleichen Flüsse, die entlang ihres ganzen Verlaufes tiefe Wiederkehrperioden der betrachteten Abflüsse aufweisen. Dies umfasst beispielweise den Oberlauf der Emme, die Reuss, die Tessin, sowie den Oberlauf der Thur.

Die BAFU Gefahrenstufen ermöglichen es, trotz der hohen lokalen Variabilität der Wiederkehrperioden, ein generelles Tool zur Warnung vor Hochwassergefahren zur Verfügung zu haben. Dies deshalb, weil die Grenzen der Gefahrenstufen nicht an feste statistische Grössen gebunden sind, sondern durch Erfahrungswerte angepasst wurden. Dies entspricht den WMO Guidelines zur Warnung vor Naturgefahren (WMO 2015). Die Variabilität der Gefahrenstufengrenzen entspricht der tatsächlichen Variabilität der Wiederkehrperioden des bordvollen und schadensrelevanten Abflusses.

Der bordvolle sowie der schadensrelevante Abfluss verteilen sich grösstenteils auf die Gefahrenstufen zwei bis vier. Zwischen den Gefahrenstufen gibt es keine klaren Abtrennungen, ab wann genau eine Überschwemmung oder ein Schaden zu erwarten ist, die Wahrscheinlichkeit dafür nimmt jedoch mit steigender Gefahrenstufe zu. Die Höhe der vorhergesagten Gefahrenstufe gibt also bei der Warnung keine klare Auskunft darüber, ob eine Überschwemmung bzw. Schaden zu erwarten ist. Dies ist jedoch sinnvoll, da solch klare Abgrenzungen kaum gemacht werden können. Eine zusätzliche Genauigkeit würde also nur vorgetäuscht werden, aber nicht existieren. Die Warnung ist dadurch besser, da auch bei tieferen Gefahrenstufen mit einer möglichen Überschwemmung gerechnet werden muss, wenn auch mit geringerer Wahrscheinlichkeit. Auch eine klare Abgrenzung der Gefahrenstufe zwischen bordvollem und schadensrelevantem Abfluss würde nur wenig Sinn machen, da diese beiden in der dicht besiedelten Schweiz oft sehr nahe beieinander liegen oder sogar exakt gleich sind.

## 6 Literatur

Andres N., Badoux A., Techel F., Hegg C. (2017): Todesfälle durch Naturgefahrenprozesse in der Schweiz von 1946 bis 2015. In: Wasser Energie Luft – 109. Jahrgang, 2017, Heft 2.

Baumgartner E., Boldi M.r, Kan C., Schick S. (2013): Hochwasserstatistik am BAFU - Diskussion eines neuen Methodensets. In: Wasser Energie Luft - 105. Jahrgang, 2013, Heft 2: S. 103-110.

Bjerklie D. M. (2007): Estimating the bankfull velocity and discharge for rivers using remotely sensed river morphology information. In: Journal of Hydrology 341 (2007) 144-155.

Bundesamt für Umwelt BAFU: <https://www.naturgefahren.ch/>, Zugriff am 6.2.2021

Gordon N. D., McMahon T. A., Finlayson B. L. (1992). Stream Hydrology an Introduction for Ecologists. Wiley and Sons, New York, New York.

Hilker N., Hegg C., Zappa M. (2008): Unwetterschäden in der Schweiz 1972-2007 - mit besonderer Betrachtung des August-Hochwassers 2005. In: Interprävent 2008, Conference Proceedings Volume 1.

Köplin N., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. (2014): Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change. In: Hydrol. Process. 28, 2567–2578.

PLANAT (2013): Sicherheitsniveau für Naturgefahren. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern.

PLANAT (2015): Sicherheitsniveau für Naturgefahren - Materialien. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern.

Schneider C., Flörke M., Eisner S., Voss F. (2011): Large scale modelling of bankfull flow: An example for Europe. In: Journal of Hydrology 408 (2011) 235–245.

Swisstopo (2020): 3D-Geodaten kurz erklärt.

Ummel D. (2021): Wie gross sind die lokalen Wiederkehrperioden des Abflusses an ausgewählten Punkten im Hauptgewässernetz der Schweiz bei einem Niederschlagsereignis mit einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren? - Bachelorarbeit Universität Bern.

Vetsch, D., Siviglia, A., Ehrbar, D., Facchini, M., Gerber, M., Kammerer, S., Peter, S., Vonwiler, L., Volz, C., Farshi, D., Mueller, R., Rousselot, P., Veprek, R., Faeh, R. (2017) BASEMENT – Basic Simulation Environment for Computation of

Environmental Flow and Natural Hazard Simulation (Zurich).

Williams G.P. (1978). Bank-full discharge of rivers. *Water Resour. Res.* 14 (6), 1141–1153.

World Meteorological Organization (2015): Guidelines on Multi-hazard Impact-based Forecast and Warning Services.

Zischg A. P., Hofer P., Mosimann M., Röthlisberger V., Ramirez J. A., Keiler M., Weingartner R. (2018): Flood risk (d)evolution: Disentangling key drivers of flood risk change with a retro-model experiment.

## 7 Anhang

### 7.1 Tabelle mit Interpolationsansätzen für alle Modellinputs

Nachfolgend sind die Interpolationsansätze für alle Modellinputpunkte aufgelistet. Die Abkürzungen setzen sich immer aus den ersten drei Buchstaben des Gewässers und den ersten drei Buchstaben einer nahegelegenen Ortschaft zusammen. FFu bedeutet, es wurde eine Referenzstation flussabwärts des Inputpunktes verwendet. Bei FFo wurde eine Referenzstation weiter oben im Flusslauf verwendet. Die Methode EF verwendet zwei Inputpunkte, einen oberhalb und einen unterhalb. NA bedeutet, dass keine geeigneten Referenzstationen gefunden werden konnten.

Inputpunkt	Methode	Referenzstation 1	Referenzstation 2
AarAar	FFu	AarBru	
AarBer	direct	AarBer	
AarBez	direct	AarUnt	
AarBie	FFu	AarMur	
AarBru	direct	AarBru	
AarHag	NA		
AarHei	FFo	AarThu	
AarInn	FFu	AarBri	
AarInt	NA		
AarLut	FFu	AarMur	
AarMei	direct	AarBri	
AarMue	EF	AarBer	AarThu
AarOft	FFu	AarBru	
AarOlt	FFu	AarBru	
AarThu	direct	AarThu	
AarVog	EF	AarBru	AarUnt
AlbSil	FFo	AlbTie	
ArvGen	direct	ArvGen	
BavCav	NA		
BirBas	direct	BirMue	
BirDel	FFu	BirSoy	
BirLau	FFo	BirSoy	
BirSoy	direct	BirSoy	
BreMal	direct	BreLod	
BreOli	NA		
BreSco	NA		
BroCha	FFo	BroPay	
BroLuc	FFu	BroPay	

BroMou	FFu	BroPay	
BroPay	FFu	BroPay	
DouStU	direct	DouOco	
EmmAes	FFo	EmmEgg	
EmmBur	EF	EmmEmT	EmmWiT
EmmEgg	direct	EmmEgg	
EmmHas	EF	EmmEmT	EmmWiT
EmmLue	EF	EmmEmT	EmmWiT
EmmSch	FFu	EmmEgg	
EmmUtz	EF	EmmEmT	EmmWiT
EmmZol	direct	EmmEmT	
EmmZuc	direct	EmmWiT	
EngBuo	direct	EnABuo	
EngWol	FFu	EnABuo	
FlaPon	NA		
GerMar	NA		
IlfBla	FFu	IlfLan	
IlfLan	direct	IlfLan	
IlfTru	FFu	IlfLan	
IlfWig	FFu	IlfLan	
InnBev	FFu	InnCin	
InnMar	direct	InnMar	
InnSam	direct	InnStM	
InnZer	FFo	InnCin	
InnZuo	FFu	InnCin	
KanEin	FFo	KanHon	
KanFru	FFu	KanHon	
KanRei	FFu	KanHon	
KleEmm	direct	KIEEmm	
KleSch	FFu	KIEWer	
KleWol	direct	KIEWer	
LanKue	FFu	LanFel	
LanLan	direct	LanFel	
LanSch	FFu	LanFel	
LimBad	direct	LimBad	
LimDie	direct	LimZue	
LimSpr	EF	LimZue	LimBad
LimZue	NA		
LinLin	direct	LinLin	
LinMol	direct	LinMol	
LinSch	EF	LinLin	LinMol



LinZie	direct	LinWee	
LueGst	direct	LueGst	
LueZwe	NA		
MagAsc	direct	MagLoc	
MagMag	EF	MagLoc	MagBig
MagPre	direct	MagBig	
MoeGro	NA		
MoeRov	direct	MoeLum	
MuoBru	direct	MuoIng	
MuoHin	FFu	MuoIng	
MuoMuo	FFu	MuoIng	
MurFra	direct	MurFra	
NecBru	direct	NecMog	
ReuAnd	direct	ReuAnd	
ReuBre	direct	ReuMel	
ReuEmm	FFu	ReuMue	
ReuLuz	direct	ReuLuz	
ReuRic	direct	ReuMue	
ReuUri	direct	ReuSee	
RheBas	FFo	RheBas	
RheBuc	EF	RheDom	RheDie
RheCas	FFo	VorIla	
RheChu	FFo	RheDom	
RheDom	direct	RheDom	
RheEgl	FFu	RheRek	
RheFla	EF	RheNeu	RheRek
RheIla	direct	VorIla	
RheKob	direct	RheRek	
RheKri	FFu	RheDie	
RheRhe	direct	RheRhe	
RheSar	EF	RheDom	RheDie
RheSch	direct	RheNeu	
RheSte	FFu	RheNeu	
RheSur	FFu	VorIla	
RheThu	direct	HinFue	
RheTru	FFu	VorIla	
RhoDor	EF	RhoPor	RhoBra
RhoGen	NA		
RhoMar	direct	RhoBra	
RhoMon	direct	RhoPor	
RhoRar	EF	RhoSio	RhoBri

RhoSio	direct	RhoSio	
RhoTur	EF	RhoSio	RhoBri
RhoVis	direct	RhoBri	
SarBos	FFo	SarFri	
SarBro	FFu	SarBro	
SarFri	direct	SarFri	
SarGra	NA		
SarLau	direct	SaaLau	
SchFeh	NA		
SenLau	FFo	SenTho	
SenTho	direct	SenTho	
SihEgg	FFu	SihZue	
SihSch	FFu	SihZue	
SihSih	FFu	SihZue	
SihZue	direct	SihZue	
SimBol	EF	SimObL	SimObe
SimErl	EF	SimObe	SimLaT
SimMat	FFo	SimObL	
SimStS	EF	SimObL	SimObe
SitApp	direct	SitApp	
SitBis	FFo	SitStG	
SitBru	direct	SitStG	
SLuGri	NA		
SLuZwe	NA		
ThuBis	FFo	ThuJon	
ThuFra	direct	ThuAnd	
ThuNeu	FFu	ThuJon	
ThuSch	direct	ThuJon	
ThuWat	FFu	ThuJon	
ThuWei	direct	ThuHal	
TicAir	direct	TicPio	
TicBel	direct	TicBel	
TicCla	NA		
TicFai	direct	TicPol	
ToeBau	NA		
ToeFre	FFo	ToeNef	
ToeSte	NA		
ToeTur	FFu	ToeNef	
ToeWin	direct	ToeNef	
TrePon	direct	TrePon	
VisVis	FFu	VisVis	

WalBad	FFu	KlEWer
WigAlb	FFu	WigZof
WigNeb	FFu	WigZof
WigSch	FFu	WigZof
WigZof	direct	WigZof
WLuLau	FFu	WLuZwe
WLuSte	FFu	WLuZwe
WLuZwe	direct	WLuZwe
SimDie	direct	SimLaT
AarRot	direct	AarMur
ZihLan	NA	
ZihMar	NA	

Tabelle 2: Die verwendeten Interpolationsansätze für alle Inputpunkte

## 7.2 Definitionen der Hochwasser Gefahrenstufen des BAFU

Hier folgen die Definitionen zu den verwendeten Hochwassergefahrenstufen des BAFU (Webseite BAFU 6.2.2022)

### Gefahrenstufe 1 - keine oder geringe Gefahr

#### Auswirkungen

Verkehrsbehinderungen und Schäden sind normalerweise nicht zu erwarten.

#### Verhalten

- Der Aufenthalt im Bereich von Gewässern ist unproblematisch. Wachsamkeit ist jedoch stets erforderlich.

#### Beschreibung Mess- und Prognosewerte

- Fliessgewässer: Der Abfluss im Fliessgewässer bleibt unter einem Ereignis, das im Schnitt alle zwei Jahre einmal auftritt. Diese Grenzwerte beruhen nicht nur auf statistischen Daten allein, sondern auch auf Erfahrungswerten über das Verhalten der Gewässer.
- Seen: Der Seepiegel liegt unter der Gefahrenschwelle 1.

### Gefahrenstufe 2 - mässige Gefahr

#### Auswirkungen

Bei dieser Wasserführung sind lokale Ausuferungen (das Wasser verlässt das Bachbett) und Überflutungen unwahrscheinlich, aber nicht auszuschliessen. In Ausnahmefällen sind lokal Überflutungen von Strassenunterführungen, Tiefgaragen und Kellerräumen möglich. Lokale Behinderungen an exponierten Verkehrswegen sowie lokale Schäden in kleinerem

Umfang sind unwahrscheinlich aber nicht auszuschliessen.

### **Verhalten**

- Der Aufenthalt im Bereich von Fliessgewässern kann gefährlich sein. Halten Sie vorsichtshalber genügend Abstand.
- Verfolgen Sie die Situation und treffen Sie erste Schutzmassnahmen.
- Weitere Informationen finden Sie unter „Verhalten während eines Hochwassers“

### **Beschreibung Mess- und Prognosewerte**

- Fliessgewässer: Der Abfluss im Fliessgewässer liegt im Bereich eines Ereignisses, das im Schnitt alle 2 bis 10 Jahre (HQ2 - HQ10) einmal auftritt. Diese Grenzwerte beruhen nicht nur auf statistischen Daten allein, sondern auch auf Erfahrungswerten über das Verhalten der Gewässer.
- Seen: Der Seepegel liegt über der Quote um 1/3 der Bereich zwischen dem maximalen Jahreszeitmittel und der Hochwassergrenze aber unter der Gefahrenschwelle 2.

### **Gefahrenstufe 3 - erhebliche Gefahr**

#### **Auswirkungen**

Bei dieser Wasserführung können an exponierten Stellen lokale Ausuferungen (das Wasser verlässt das Bachbett) und Überflutungen auftreten. Lokal sind Überflutungen von Strassenunterführungen, Tiefgaragen und Kellerräumen möglich. An exponierten Verkehrswegen sind lokale Behinderungen möglich und es muss mit lokalen Schäden in kleinerem Umfang gerechnet werden.

### **Verhalten**

- Der Aufenthalt im Bereich von Fliessgewässern ist gefährlich. Halten Sie sich fern.
- Verfolgen Sie die Situation und treffen Sie erste Schutzmassnahmen.
- Weitere Informationen finden Sie unter „Verhalten während eines Hochwassers“

### **Beschreibung Mess- und Prognosewerte**

- Fliessgewässer: Der Abfluss im Fliessgewässer liegt im Bereich eines Ereignisses das im Schnitt alle 10 bis 30 Jahre einmal eintritt (HQ10 - HQ30). Diese Grenzwerte beruhen nicht nur auf statistischen Daten allein, sondern auch auf Erfahrungswerten über das Verhalten der Gewässer.
- Seen: Der Seepegel liegt über der Quote um 2/3 der Bereich zwischen dem maximalen Jahreszeitmittel und der Hochwassergrenze aber unter der Hochwassergrenze.

## **Gefahrenstufe 4 - grosse Gefahr**

### **Auswirkungen**

Bei dieser Wasserführung können vermehrt Ausuferungen (das Wasser verlässt das Bachbett) und Überflutungen auftreten. Dabei können Gebäude und Infrastrukturanlagen betroffen sein. Verkehrsbehinderungen sind möglich und es muss vermehrt mit Schäden gerechnet werden.

### **Verhalten**

- Der Aufenthalt im Bereich von Fliessgewässern ist äusserst gefährlich. Halten Sie sich fern.
- Verfolgen Sie die Situation und treffen Sie die nötigen Schutzmassnahmen.
- Weitere Informationen finden Sie unter „Verhalten während eines Hochwassers“

### **Beschreibung Mess- und Prognosewerte**

- Fliessgewässer: Der Abfluss im Fliessgewässer liegt im Bereich eines Ereignisses, das im Schnitt alle 30 bis 100 Jahre einmal auftritt (HQ30 - HQ100). Diese Grenzwerte beruhen nicht nur auf statistischen Daten allein, sondern auch auf Erfahrungswerten über das Verhalten der Gewässer.
- Seen: Der Seepegel liegt zwischen der Hochwassergrenze und der „Hochwassergrenze + 25 cm“.

## **Gefahrenstufe 5 - sehr grosse Gefahr**

### **Auswirkungen**

Bei dieser Wasserführung können vielerorts Ausuferungen (das Wasser verlässt das Bachbett) und Überflutungen auftreten. Infrastrukturanlagen von nationaler Bedeutung wie zum Beispiel Bahnstrecken, Dörfer und Städte sowie Industrieanlagen können in grossem Masse von Überflutungen betroffen sein. Zum Teil sind massive Verkehrsbehinderungen zu erwarten. Es ist verbreitet mit zum Teil grossen Schäden zu rechnen.

### **Verhalten**

- Der Aufenthalt im Bereich von Fliessgewässern ist äusserst gefährlich. Halten Sie sich fern.
- Verfolgen Sie die Situation und treffen Sie die nötigen Schutzmassnahmen.
- Weitere Informationen finden Sie unter „Verhalten während eines Hochwassers“

### **Beschreibung Mess- und Prognosewerte**

- Fließgewässer: Der Abfluss im Fließgewässer liegt im Bereich eines Ereignisses, das im Schnitt alle 100 Jahre einmal eintritt (HQ100). Diese Grenzwerte beruhen nicht nur auf statistischen Daten allein, sondern auch auf Erfahrungswerten über das Verhalten der Gewässer.
- Seen: Der Seepegel liegt oberhalb des Bereichs „Hochwassergrenze + 25 cm“.