
Bericht Nr. 1918009.1

Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

BAFU, Pilotprojekt Anpassung Klima- wandel 2018-2020

**Technischer Bericht zur Gefahren- und Schadenausmass-
analyse entlang der Aare unter einem sich verändernden
Klima**

Zollikofen, 28. April 2023

GEOTEST AG
BERNSTRASSE 165
CH-3052 ZOLLIKOFEN
T +41 (0)31 910 01 01
F +41 (0)31 910 01 00
zollikofen@geotest.ch
www.geotest.ch

Autor(en)	Bearbeitete Themen / Fachbereiche
Severin Schwab	Einleitung, Synthese
Mattia Brughelli	Analyse der Schadenausmasse
Matthias Pfäffli	Hydraulische Modellierung, Synthese
Daniel Viviroli	Klima & Hydrologie, Synthese
Marco Lang	Hydraulische Modellierung
Supervision	Visierte Inhalte
Severin Schwab	Gesamtbericht
Roni Hunziker	Gesamtbericht
Hinweise	

GEOTEST AG / Hunziker, Zarn und Partner AG / Universität Zürich



Severin Schwab



Mattia Brughelli

Inhaltsverzeichnis

0.	Zusammenfassung.....	6
1.	Einleitung.....	8
1.1	Klimaveränderung heute und bis Ende des 21. Jahrhundert.....	8
1.2	Anpassungsstrategie des Bundes	11
1.3	Umgang mit Klimaänderung in Hochwasserfragen im Ausland.....	11
1.4	Grundlage: Studie Extremhochwasser an der Aare (EXAR).....	12
2.	Projektorganisation und -finanzierung	14
3.	Fragestellung und Projektziele.....	15
3.1	Arbeitshypothese	15
3.2	Leitfragen	15
3.3	Projektziele.....	15
3.4	Untersuchte Prozesskette und Workflow	16
3.4.1	Prozesskette	16
3.4.2	Workflow für das Jahr 2020	17
3.4.3	Workflow für das Jahr 2040	18
3.4.4	Workflow für das Jahr 2100	19
3.4.5	Limiten und Unsicherheiten	19
4.	Grundlagen Hydrologie und Klima	22
4.1	Auswahl der Ereignisse	22
4.2	Schätzung der Klimasensitivität	23
4.3	Vergleich der Spitzenabflüsse	28
5.	Hydrodynamische Modellierung im Einzugsgebiet der Aare	30
5.1	Hydronumerisches Modell	30
5.2	Modellaufbau.....	30
5.2.1	Modellgrundlagen aus der Studie Extremhochwasser an der Aare (EXAR).....	30
5.2.2	Aktualisierungen der Gerinnegeometrie	31
5.3	Untersuchte Szenarien	32
5.3.1	Grundkonfiguration.....	32
5.3.2	Unterteilung in verschiedene Abschnitte	32
5.3.3	Szenarienganglinien.....	34
5.4	Auswertung der Resultate.....	35
5.5	Einordnung der Resultate	36
6.	Methodik zur Analyse der Schadenausmasse.....	39

6.1	Untersuchte Raumeinheiten	39
6.1.1	Untersuchungsgebiet und Perimeter der Hotspots	39
6.1.2	Verkehrszonen des Nationalen Personenverkehrsmodells der Schweiz (NPVM)	40
6.1.3	Berechnung und Visualisierung als Rastergitter	40
6.2	Verwendete Modelle	41
6.2.1	Nationales Personenverkehrsmodell (NPVM)	41
6.2.2	Modell zur Berechnung der Siedlungsentwicklung (MBS).....	41
6.2.3	Modell für die Ausweisung der Flächenreserve (MAF)	41
6.3	Schadenpotenzial und Schadenausmass.....	43
6.3.1	Schadenpotenzial und Schadenausmass im Ist- Zustand.....	43
6.3.2	Schadenpotenzial und Schadenausmass im Jahr 2040.....	45
6.3.2.1	Siedlungsentwicklung.....	45
6.3.2.2	Gesamtattraktivität einer Verkehrszone 2040 auf Basis der Bevölkerungs- und Erwerbsbevölkerungsentwicklungsszenarien.....	45
6.3.2.3	Zunahme des Schadenpotenzials bis 2040	46
6.3.2.4	Objektschutzmassnahmen.....	46
6.3.2.5	Zuverlässigkeit der Objektschutzmassnahmen	48
6.3.2.6	Gefahregrundlagen	48
6.3.2.7	Berechnung des Schadenausmasses	48
6.3.2.8	Zunahme des Schadenausmasses bis 2040	49
6.3.3	Schadenpotenzial und Schadenausmass im Jahr 2100	51
6.3.3.1	Siedlungsentwicklung.....	51
6.3.3.2	Bevölkerungs- und Erwerbsbevölkerungsentwicklungsszenarien 2100.....	51
6.3.3.3	Zunahme Schadenpotenzial	53
6.3.3.4	Gefahregrundlagen im Jahr 2100	54
6.3.3.5	Objektschutzmassnahmen.....	54
6.3.3.6	Zuverlässigkeit der Objektschutzmassnahmen	55
6.3.3.7	Zunahme des Schadenausmasses bis 2100	55
7.	Resultate	55
7.1	Entwicklung der Abflüsse heute – 2040 – 2100.....	55
7.2	Entwicklung des Schadenpotenzials heute – 2040 – 2100.....	56

7.3	Entwicklung des Schadenausmasses heute – 2040 – 2100	60
7.4	Entwicklung des Schadenausmasses durch die Veränderung des Schadenpotenzials	62
7.5	Entwicklung des Schadenausmasses durch die Erstellung von Objektschutzmassnahmen	63
7.6	Entwicklung des Schadenausmasses durch die Entwicklung der Gefahrensituation	64
7.7	Entwicklung des Schadenausmasses durch den Klimawandel	64
7.7.1	Entwicklung des Schadenausmasses bei einem HQ100	66
7.7.2	Entwicklung des Schadenausmasses bei einem HQ300	67
7.7.3	Entwicklung des Schadenausmasses bei einem EHQ	67
7.7.4	Fazit Entwicklung des Schadenausmasses durch den Klimawandel	68
7.8	Vergleich der Entwicklung des Schadenausmasses aus der Siedlungsentwicklung und dem Klimawandel	69
8.	Handlungsempfehlungen	71
9.	Schlussfolgerungen und Ausblick	72
9.1	Generelles	72
9.2	Hydrologie	72
9.3	Hydraulik	72
9.4	Siedlungsmodell	73
9.5	Gefahrengrundlagen und Objektschutz	73
9.6	Schadenausmass	74
9.7	Kritik	74
9.8	Ausblick	75
10.	Verwendete Grundlagen	76

Anhang

Anhang 1	Glossar und Abkürzungen
Anhang 2	Vergleich der Hochwasserstatistiken
Anhang 3	Berechnungen Schadenausmass
Anhang 4	Hotspotanalyse
Anhang 5	Kartenanhänge

0. Zusammenfassung

Gemäss aktueller Forschung ist es wahrscheinlich, dass Hochwasserabflüsse aufgrund des sich verändernden Klimas in vielen Einzugsgebieten der Schweiz bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zunehmen werden. Im vorliegenden Bericht wird der Frage nachgegangen, in welcher Bandbreite solche Veränderungen an der Aare zwischen Thun und der Mündung in den Rhein möglich sind und welche Auswirkungen sie auf die Entwicklung der Hochwasserschäden, berechnet mit Schadenausmassen pro untersuchtem Szenario, für die Zeitpunkte 2040 und 2100 hat.

In einem ersten Schritt wurde eruiert, mit welchen Veränderungen der Hochwasserabflüsse seltener Wiederkehrperiode in der Aare gerechnet werden muss. Es zeigte sich, dass genaue Prognosen auf der Basis der aktuell verfügbaren wissenschaftlichen Publikationen und Datensätze nicht möglich sind. Es wurden deshalb statistische Bandbreiten mit Quantilen ausgewiesen und für die weiteren Modellschritte verwendet. Die hier untersuchten Abflusszunahmen bis zum Jahr 2040 decken einen grossen Bereich von +0 % bis +20 % ab. Noch grösser wird die Bandbreite der möglichen Abflüsse bis zum Jahr 2100, wobei die Unsicherheiten bzw. Bandbreiten für beide Zeitpunkte gross sind. Die eruierten Werte eignen sich deshalb explizit nicht als Prognose, sondern nur für «was-wäre-wenn»-Szenarien.

In einem zweiten Schritt wurde das vollständig kalibrierte und validierte hydrodynamische 2D-Modell aus dem Projekt EXAR übernommen und mittels der aus dem ersten Schritt erhaltenen Bandbreiten in Bezug auf die Hochwasserspitzen entlang der Aare operationalisiert. Es zeigte sich, dass je nach Abschnitt an der Aare die angenommenen Erhöhungen der Abflussspitzen bereits zu erheblichen Zunahmen der Überflutungsflächen führen können.

In einem dritten Schritt wurde mittels verschiedener Modelle untersucht, wie sich die Siedlungsentwicklung im Projektperimeter in acht ausgewählten «Hotspots» bis zu den Zeitpunkten 2040 und 2100 gestalten wird. Hierzu wurden verschiedene Modelle (Siedlungsentwicklungsmodell nach Schwaab et al. (2020), Modell Bauzonenreserven des MobiLab Uni Bern) miteinander verknüpft. Das resultierende Attraktivitätsraster konnte sodann als Basis für die Siedlungsentwicklung für die Jahre 2040 und 2100 verwendet werden. Damit konnte das potenziell vorhandene Schadenpotenzial berechnet werden. Für das Jahr 2040 ist im Gesamtperimeter mit einer Schadenpotenzialzunahme von 14 % zu rechnen. Auch für das Jahr 2100 nimmt das Schadenpotenzial für alle verwendeten Bevölkerungs- und

Beschäftigtenszenarien zu. Die Zunahme des Schadenpotenzials 2040 bis 2100 fällt aber gemäss Modell weniger stark aus als die Zunahme von heute bis ins Jahr 2040.

In einem vierten Schritt wurden das berechnete Schadenpotenzial und die Überflutungsflächen für verschiedene Szenarien mittels eines geographischen Informationssystems (GIS) verschnitten und so das Schadenausmass szenarienbasiert ausgeschieden. Die Untersuchungen wurden mit verschiedenen Annahmen zur Umsetzung von Objektschutzmassnahmen ergänzt.

Diese GIS-basierten Berechnungen zeigen: Das Schadenausmass wird allein aufgrund der Siedlungsentwicklung bis 2040 je nach Berücksichtigung von Objektschutzmassnahmen rund 10 bis 15 % zunehmen. Eine Wertesteigerung der Sachwerte wurde nicht berücksichtigt. Weiter zeigen die «was-wäre-wenn»-Szenarien, dass je nach Ausmass des Klimawandels und einer damit verbundenen Zunahme der Spitzenabflüsse das Schadenausmass kaum bis wesentlich mehr gegenüber der Siedlungsentwicklung zunehmen kann.

1. Einleitung

1.1 Klimaveränderung heute und bis Ende des 21. Jahrhundert

Gemäss dem neusten IPCC-Bericht [1] lag die atmosphärische CO₂-Konzentration im Jahr 2019 höher als je zuvor in den letzten 2 Mio. Jahren. Es ist aus wissenschaftlicher Sicht praktisch sicher, dass Hitzeextreme (inklusive Hitzewellen) seit 1950 zugenommen haben. Weiter ist es wahrscheinlich, dass auch die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlagsereignissen zugenommen haben.

Die globale Erwärmung wird sich im 21. Jahrhundert als Reaktion auf die weiteren Treibhausgasemissionen fortsetzen [1], wobei natürliche Schwankungen die Erwärmung regional überdecken, dämpfen oder verstärken können. Gemäss den aktuellen Klimaszenarien von CH2018 [2] werden sich die Temperaturen in der Schweiz bei einem Szenario mit Klimaschutz (RCP2.6) im Bereich von 2.1–3.4 °C über vorindustriellem Niveau bewegen. Bezogen auf die Referenzperiode 1981–2010 wird in diesem Szenario eine Erwärmung von 0.6–1.9 °C erwartet. Bei ungebremster Erwärmung (RCP8.5) muss in der Schweiz bis Ende Jahrhundert mit einer Erwärmung von bis zu 6.9 °C gegenüber vorindustriellem Niveau resp. bis zu 5.4 °C gegenüber 1981–2010 gerechnet werden.

Langfristig wird der ungebremste Klimawandel wahrscheinlich dazu führen, dass der mittlere Niederschlag in der Schweiz in den wärmeren Jahreszeiten abnehmen und in den kälteren Jahreszeiten zunehmen wird. Bis zum Ende des Jahrhunderts wird die Veränderung im Sommer ausserhalb der Alpen voraussichtlich -43 % bis +2 % betragen, die winterliche Veränderung dürfte landesweit zwischen +2 % und +24 % betragen. In tieferen Lagen (unterhalb 2'000 m ü. M.) wird sehr wahrscheinlich ein Rückgang der Schneedecke stattfinden [2].

Als Folge der Erwärmung werden sich CH2018 [2] folgend auch Häufigkeit, Intensität und Art vieler Extremereignisse verändern. Dies schliesst auch Starkniederschlagsereignisse mit ein: Bei erheblicher Erwärmung wird es insgesamt mit grosser Sicherheit zu häufigeren und intensiveren Starkniederschlägen kommen. Den Projektionen zufolge werden sich die Starkniederschläge in allen Jahreszeiten verstärken, besonders aber im Winterhalbjahr, und zwar über alle Ereigniskategorien hinweg, von stündlichen bis hin zu mehrtägigen Ereignissen. Die Intensität der Spitzenereignisse wird deutlich stärker zunehmen als der mittlere Niederschlag, und eine Zunahme der Spitzenintensitäten kann sogar in Jahreszeiten mit abnehmendem mittlerem Niederschlag auftreten. Auf der Skala der Schweiz ist dabei aber über Zeiträume von Jahren und Jahrzehnten eine erhebliche Variabilität

zu berücksichtigen, und Starkniederschlagsereignisse werden weiterhin unregelmässig auftreten. Künftige Änderungen von Wettermustern und Gewittern sind unklar. Die Klimaszenarien CH2018 haben sich gegenüber der vorherigen Version CH2011 [3] zwar wesentlich weiterentwickelt und können etwa neue Starkniederschlagsextreme erzeugen, jedoch sind beispielsweise Veränderungen in Zirkulationsmustern und Ereignistypen nicht abgebildet.

Betreffend Auswirkungen der Klimaänderung auf das Hochwassergeschehen im Generellen bestehen zurzeit noch bedeutende Unsicherheiten. Zwar kann von einer zukünftigen Zunahme der Starkniederschläge ausgegangen werden, jedoch muss dies nicht unbedingt eine allgemeine Zunahme der Hochwasser bewirken. Zu berücksichtigen sind auch Faktoren wie geringere Vorfeuchte im Boden, geringere Ausdehnung und Lebensdauer von Gewitterzellen und Veränderungen der Landoberfläche. Insbesondere könnte auch der Rückgang der Schneeschmelze zu einem bedeutenden Ausmass die Zunahme der Niederschläge kompensieren, zumindest für grössere Gebiete, welche heute noch stark schneedominiert sind [42]. Abhängig vom betrachteten Skalen- und Wahrscheinlichkeitsbereich sind deshalb sowohl Zu- wie auch Abnahmen der Hochwasser möglich [4]. Zunahmen sind v. a. bei seltenen Ereignissen zu erwarten, welche den durch Beobachtungen abgedeckten Rahmen sprengen, also deutlich seltener sind als ein HQ50. Ab welcher Wiederkehrperiode von Zunahmen ausgegangen werden muss, hängt unter anderem auch von Gebietshöhe, Jahreszeit und Ereignistyp ab [5]. Weiter dürften Zunahmen in kleinen Einzugsgebieten stärker ausfallen als in grossen Einzugsgebieten [4] (Abbildung 3).

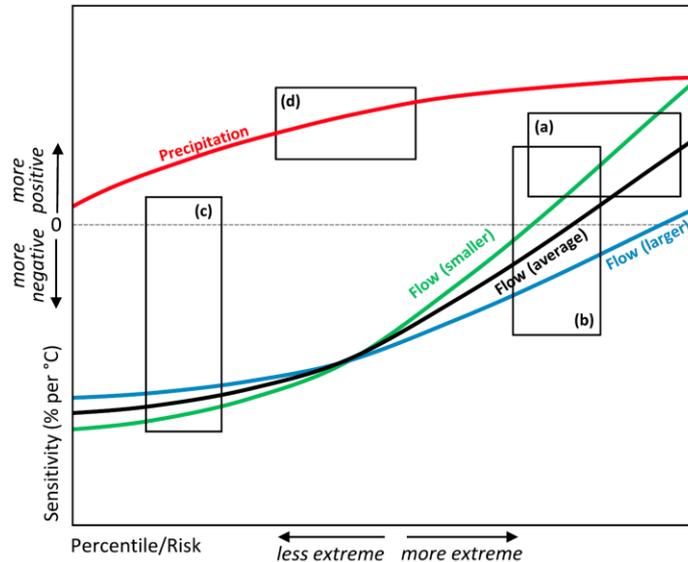


Abbildung 1: Schematische Klimasensitivität des Niederschlags (rot) sowie des Abflusses in kleinen (grün), mittelgrossen (schwarz) und grossen (blau) unbeeinflussten Einzugsgebieten (Ausschnitt aus Abbildung 2 in [4]). Hervorhebungen: (a) Je seltener das Hochwasserereignis, desto grösser die erwartete Abflusszunahme; (b) für kleine Gebiete wird bei seltenen Ereignissen eine grössere Abflusszunahme erwartet als für grosse Gebiete; (c) bei häufigen Ereignissen wird generell eine Abnahme des Spitzenabflusses erwartet, trotz Zunahme der Niederschlagsintensitäten; (d) Generelle Zunahme der Niederschlagsintensitäten als Reaktion auf erhöhte Temperaturen (im Mittel geschätzte 6–7% höhere Intensität pro Grad C höherer Temperatur).

Für die Schweiz liegt mit Hydro-CH2018 [11] eine aktuelle Studie vor, welche mögliche Auswirkungen der Klimaänderung auf die Gewässer untersucht. Bezüglich Hochwasser zeigen die hydrologischen Szenarien kein klares Signal, und die projizierten Veränderungen sind wegen der grossen zeitlichen Variabilität sehr unsicher, insbesondere bei konsequentem Klimaschutz (RCP2.6) [12]. Ohne Klimaschutz (RCP8.5) ergeben die Projektionen bis Ende 21. Jahrhundert zwar eine leichte Zunahme von Häufigkeit und Intensität der Hochwasser, jedoch fallen diese projizierten Trends nicht signifikant aus [13]. Weiter ist in den Projektionen auch eine grosse räumliche Variabilität festzustellen: Während einige Einzugsgebiete sehr empfindlich auf Veränderungen der Niederschläge und der Lufttemperatur reagieren und merklich grössere Hochwasser produzieren, fallen die projizierten Hochwasseränderungen andernorts vernachlässigbar aus oder zeigen sogar eine deutliche Abnahme, etwa in vergletscherten Einzugsgebieten [12]. Bei grossen Hochwasserereignissen bleibt unsicher, ob diese häufiger auftreten werden. Zu berücksichtigen sind dabei unter anderem die Limiten der Klimaszenarien CH2018, welche möglicherweise grossräumige Extremniederschläge unterschätzen. Die Untersuchungen von Hydro-CH2018 deuten insgesamt trotzdem darauf hin, dass

Hochwasser in der Schweiz in Zukunft tendenziell zunehmen werden, in einem grob geschätzten Bereich von 0–10 %. In Anbetracht der hohen natürlichen Variabilität sind Veränderungen der Hochwasserspitzen aber äusserst unsicher, insbesondere bei sehr grossen Hochwassern [12]. Wegen des komplexen Zusammenspiels zahlreicher und teilweise gegenläufiger Einflussfaktoren ist es insgesamt sehr schwierig, robuste und quantitative Aussagen über das zukünftige Hochwassergeschehen zu machen, insbesondere auch für grossräumige Ereignisse [11].

1.2 Anpassungsstrategie des Bundes

Versuche, den Ausstoss von klimarelevanten Treibhausgasen weltweit zu verringern, haben bisher nicht die gewünschte Wirkung gebracht. Aus diesem Grund haben viele Staaten erkannt, dass eine Klimastrategie nicht nur auf der Seite der Emissionen, sondern auch im Bereich der Anpassung an die sich verändernden Umweltbedingungen ansetzen muss.

Der Bundesrat hat mit seiner Anpassungsstrategie aus dem Jahre 2012 den Rahmen für das Vorgehen in der Schweiz vorgegeben. Im neusten Aktionsplan für die Jahre 2020 bis 2025, der ebenfalls Teil der Anpassungsstrategie ist, sind 75 Massnahmen auf Bundesebene erfasst worden. Diese umfassen Aktivitäten in den verschiedensten Sektoren, u.a. auch im Bereich Umgang mit Naturgefahren.

Das im Rahmen der genannten Strategie ins Leben gerufene **Pilotprogramm Anpassung an den Klimawandel** umfasst wiederum 50 Projekte in allen Landesteilen und in Bezug auf viele Themen. Es werden beispielhafte, innovative Vorhaben der Kantone, Regionen, Städte und Gemeinden unterstützt.

Der hier vorliegende Bericht beschreibt die Ziele, die Vorgehensweise und die Resultate des Projekts **C.02 «Hochwassergefährdung und Risikoentwicklung entlang der Aare unter einem sich verändernden Klima»**, das im Rahmen des erwähnten Pilotprogramms vom BAFU bewilligt und mitfinanziert wurde.

1.3 Umgang mit Klimaänderung in Hochwasserfragen im Ausland

In anderen Ländern wird die Klimaänderung in Hochwasserfragen gegenwärtig unterschiedlich einbezogen [14]. In Grossbritannien etwa wird auf die mittels konventioneller Extremwertstatistik geschätzten Hochwasserkennwerte ein Sicherheitsfaktor von +20 % für erwartete Veränderungen bis Ende Jahrhundert (2085) dazuzuschlagen. Weitere Regionen und Länder in Europa kennen ebenfalls solche Faktoren für Bemessungshochwasser, wie etwa Flandern (+30 %), Bayern (+15 % für

das HQ100), Baden-Württemberg (+0 % bis +75 % in Abhängigkeit von Ort und Wiederkehrperiode) oder Norwegen (+0 %, +20 % oder +40 % in Abhängigkeit von Region, Hochwassersaisonalität und Einzugsgebietsgrösse). Teilweise werden solche Sicherheitsfaktoren auch den Bemessungsniederschlägen zugeschlagen, im Umfang von bis zu +40 % (siehe Übersicht in [14]). Ob solche Faktoren im Einzelfall zu konservativ oder zu optimistisch sind, kann auf Grund der grossen Unsicherheiten in den Projektionen kaum eingeschätzt werden.

1.4 Grundlage: Studie Extremhochwasser an der Aare (EXAR)

Das vorliegende Projekt baut auf den Resultaten des Projektes EXAR (Extremhochwasser an der Aare) auf (siehe [36]). Insbesondere die dort erarbeiteten hydrologischen und hydraulischen Grundlagen waren für die vorliegende Arbeit ein wichtiger Bestandteil. Das Projekt C.02 versteht sich aber nicht als weiterführende Arbeit aus EXAR, da nachfolgend nicht extrem seltene Ereignisse und deren Wasserstände – ohne Einfluss des Klimawandels – im Zentrum stehen, sondern die Entwicklung der des Schadenausmasses verschiedener Hochwasserereignisse unter dem Einfluss des Klimawandels.

Die hydrologischen Resultate von EXAR stammen aus einer hydrometeorologischen Modellkette, welche einen stochastischen Wettergenerator, ein konzeptuelles hydrologisches Modell sowie ein hydrologisches Routing beinhalten. Mit dieser Modellkette wurden in EXAR ca. 300'000 Jahre lange Simulationen für 79 Teileinzugsgebiete der Aare in stündlicher Auflösung erstellt und anschliessend zu einem Gesamtsystem Aare kombiniert [15].

Der grosse Vorteil der EXAR-Simulationen ist, dass ihre Hochwasserereignisse räumlich und zeitlich konsistent sind, da sich der meteorologische Antrieb über das gesamte Aaregebiet hinweg erstreckt. Betrachtet man hingegen Abflussmessungen an verschiedenen Messstellen und leitet daraus Hochwasserstatistiken ab, ist die Konsistenz bei Vergleichen nicht immer gegeben, da die verwendeten Messreihen oft unterschiedlich lange sind, eventuell unterschiedliche Messperioden abdecken und zudem fallweise noch zusätzlich verkürzt werden müssen, um homogene Auswertungsperioden zu erhalten (Abbildung 2). Des Weiteren kann eine individuelle hydrologische Auswertung – wie etwa für Gefahrenkarten (siehe dazu auch Kapitel 4.3) vorgenommen – je nach verwendeter Methodik zu unterschiedlichen Hochwasserabschätzungen führen. Demgegenüber bildet sich die Konsistenz der EXAR-Resultate auch in den aus EXAR abgeleiteten Hochwasserstatistiken ab, wobei selbstverständlich die Limitationen und Unsicherheiten der Simulationen selbst berücksichtigt werden müssen [16].

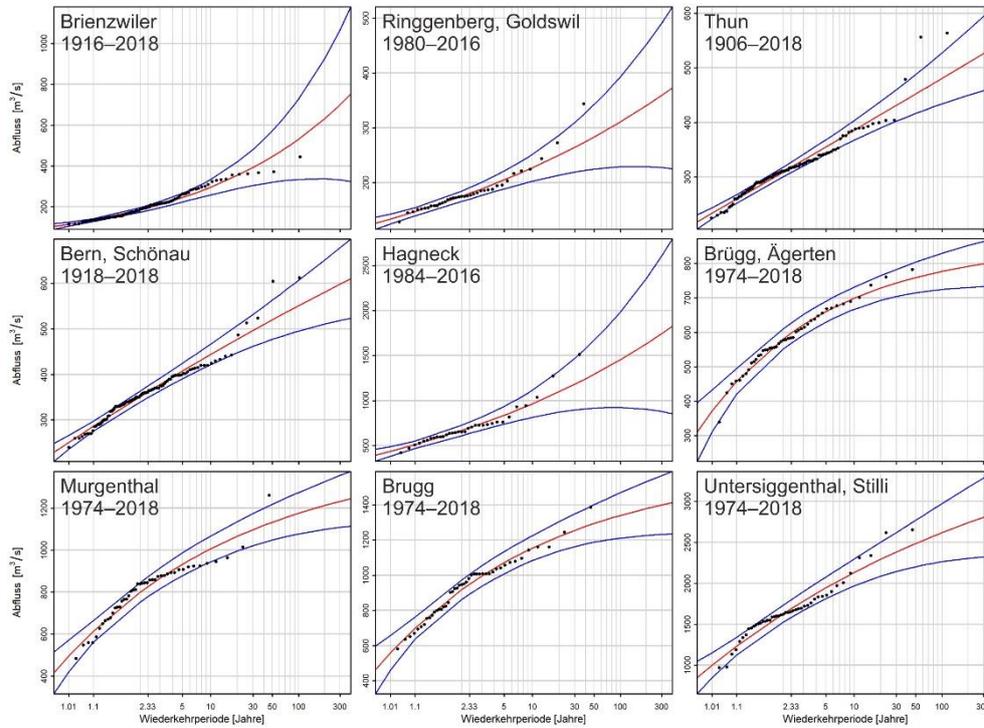


Abbildung 2: Hochwasserstatistiken des BAFU für Messstationen entlang der Aare (Datenstand Oktober 2021 [17], Methoden siehe [18]).

2. Projektorganisation und -finanzierung

Das Projekt war wie folgt organisiert (Abbildung 3):

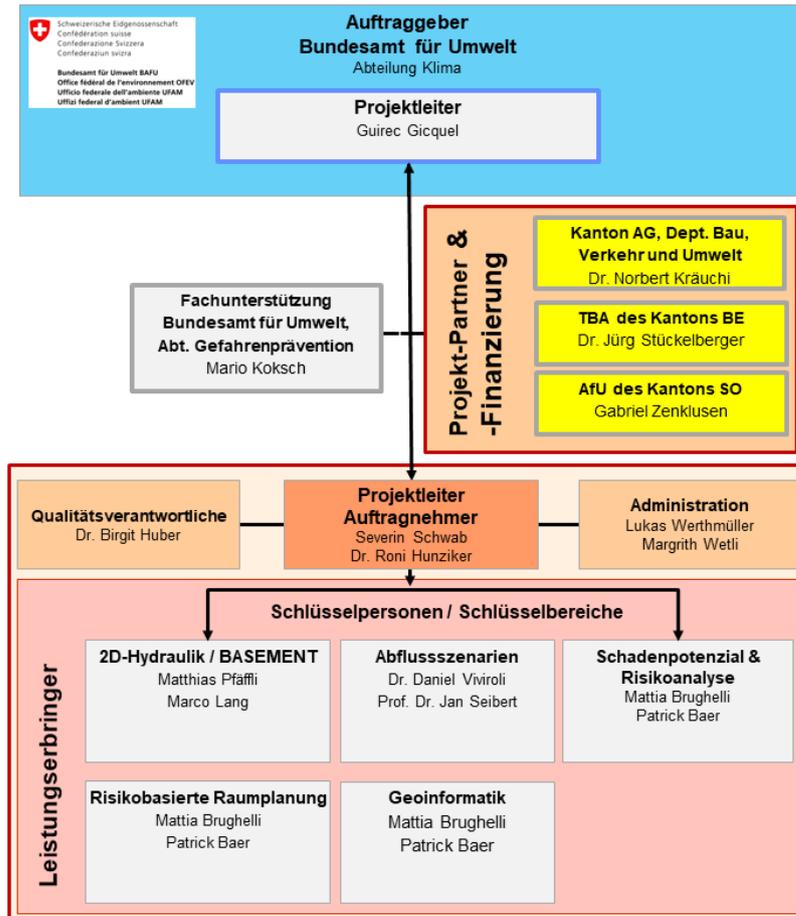


Abbildung 3: Projektorganisation.

Die Projektfinanzierung wurde durch folgende Ämter sichergestellt:

- Bundesamt für Umwelt (BAFU)
- Tiefbauamt des Kantons Bern, Oberingenieurkreis II
- Amt für Umwelt des Kantons Solothurn
- Departement für Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau

3. Fragestellung und Projektziele

3.1 Arbeitshypothese

Die dieser Arbeit zugrunde liegende Arbeitshypothese wurde auf der Basis der Szenarien gemäss CH2018 [41] erstellt. Die Autoren gehen davon aus, dass die veränderten klimatischen Bedingungen bis zum Jahre 2040 und zum Jahre 2100 mit recht hoher Wahrscheinlichkeit zu einer erhöhten Hochwassergefahr führen. Gleichzeitig wird erwartet, dass auch das Schadenpotenzial in Bezug auf Gebäude und Sachwerte in Überschwemmungsgebieten bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zunimmt, wobei diese Zunahme durch raumplanerische (Flächen freihalten, Objektschutz umsetzen) und technische Massnahmen (Hochwasserschutz) voraussichtlich vermindert wird. Letztere wirken sich nicht direkt auf das Schadenpotenzial, aber auf Schadenausmasse aus.

3.2 Leitfragen

Die Leitfragen der vorliegenden Arbeit können wie folgt formuliert werden:

- Wo und wie stark können im Untersuchungsgebiet für die Zeitschritte 2020 – 2040 – 2100 die **Überflutungsgebiete durch den Klimawandel** zunehmen?
- Wo und wie stark wächst im gleichen Zeitraum das **Schadenpotenzial** an?
- Wie wirken sich beide Parameter – Zunahme der Überflutungsflächen und Zunahme des Schadenpotenzials – auf die **Hochwasserschadenausmasse** aus?
- Können für die genannten Zeitschritte die **Treiber der Zunahme der Schadenausmasse** eruiert werden (Klimawandel bzw. Zunahme Schadenpotenzial)? Wenn ja, welchen Anteil haben sie an der Zunahme der Schadenausmasse?
- Welchen Einfluss haben Massnahmen zum **Objektschutz**?
- Welche **Handlungsempfehlungen** können basierend auf den Ergebnissen vermittelt werden?

3.3 Projektziele

Zwecks Beantwortung der Leitfragen wurden folgende Projektziele definiert:

- Modellierung und Ausscheidung von Überflutungskarten für verschiedene Abflüsse (HQ100 aus der EXAR-Statistik bis zu einem EHQ mit Berücksichtigung des Klimawandels als Bandbreite)
- Bestimmung des Schadenpotenzials für die Zeitschritte 2020 – 2040 – 2100
- Berechnung der Schadenausmasse für die Zeitschritte 2020 – 2040 – 2100
- Formulierung von Handlungsempfehlungen auf Basis der Projektergebnisse

3.4 Untersuchte Prozesskette und Workflow

3.4.1 Prozesskette

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurde die gesamte Prozesskette ***Klima & Hydrologie – Abfluss – Hydraulik – Szenarien – Überflutungsmodellierung – Entwicklung Schadenpotenzial und Schadenausmasse pro untersuchtes Hochwasserereignis – Handlungsempfehlungen zur Reduktion der Schadenausmasse*** durchlaufen. Damit sollen für die untersuchten Zeitschritte (2020 – 2040 – 2100) die wichtigsten **Gebiete** in den untersuchten Kantonen eruiert und **Strategien** für die Verhinderung von Schäden evaluiert werden.

Die einzelnen Workflows pro Zeitschritt (2020 – 2040 – 2100) werden nachfolgend kurz erläutert und anschliessend detailliert methodisch beschrieben.

3.4.2 Workflow für das Jahr 2020

Für das Jahr 2020 wurde bezüglich des Workflows wie folgt vorgegangen (Abbildung 4):

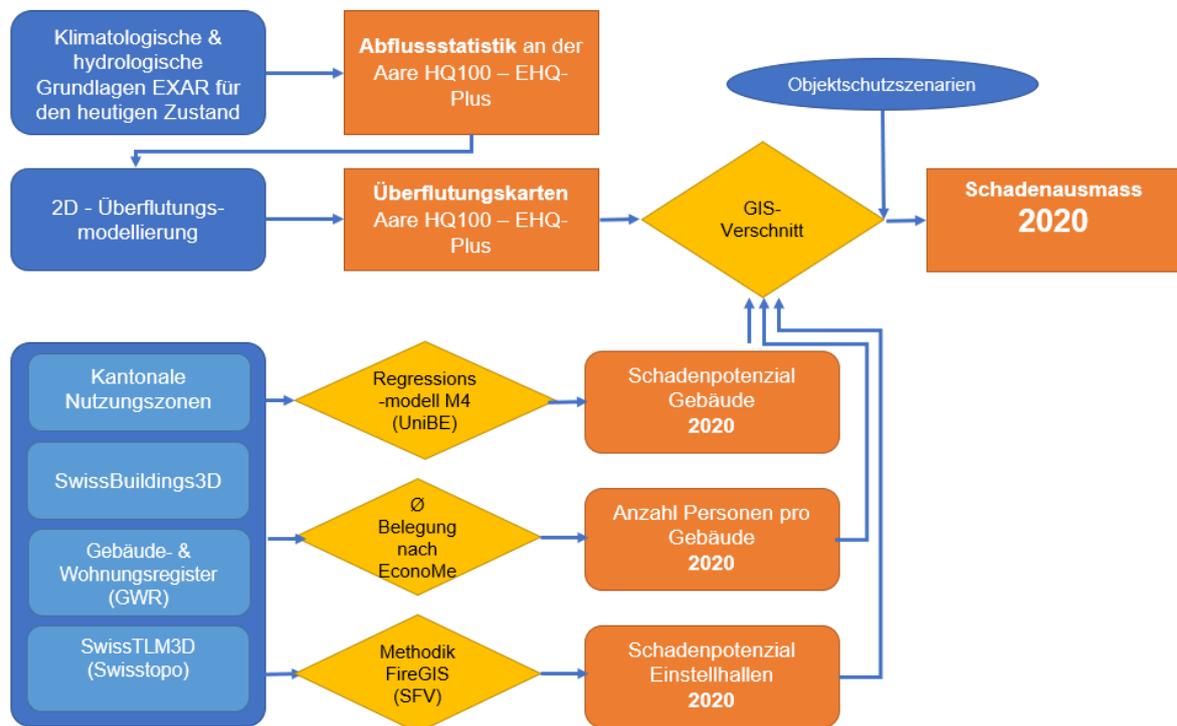


Abbildung 4: Workflow zur Berechnung der Schadenausmasse für das Jahr 2020.

Die verwendete Methodik ist in folgenden Kapiteln beschrieben:

- Klimatologische & hydrologische Grundlagen: **Kapitel 4**
- 2D-Hydraulik und Überflutungskarten: **Kapitel 5**
- Schadenpotenzial und Schadenausmasskarten: **Kapitel 6.1**

Die verwendeten Modelle sind in **Kapitel 6.2** beschrieben.

3.4.3 Workflow für das Jahr 2040

Für das Jahr 2040 wurde bezüglich des Workflows wie folgt vorgegangen (Abbildung 4):

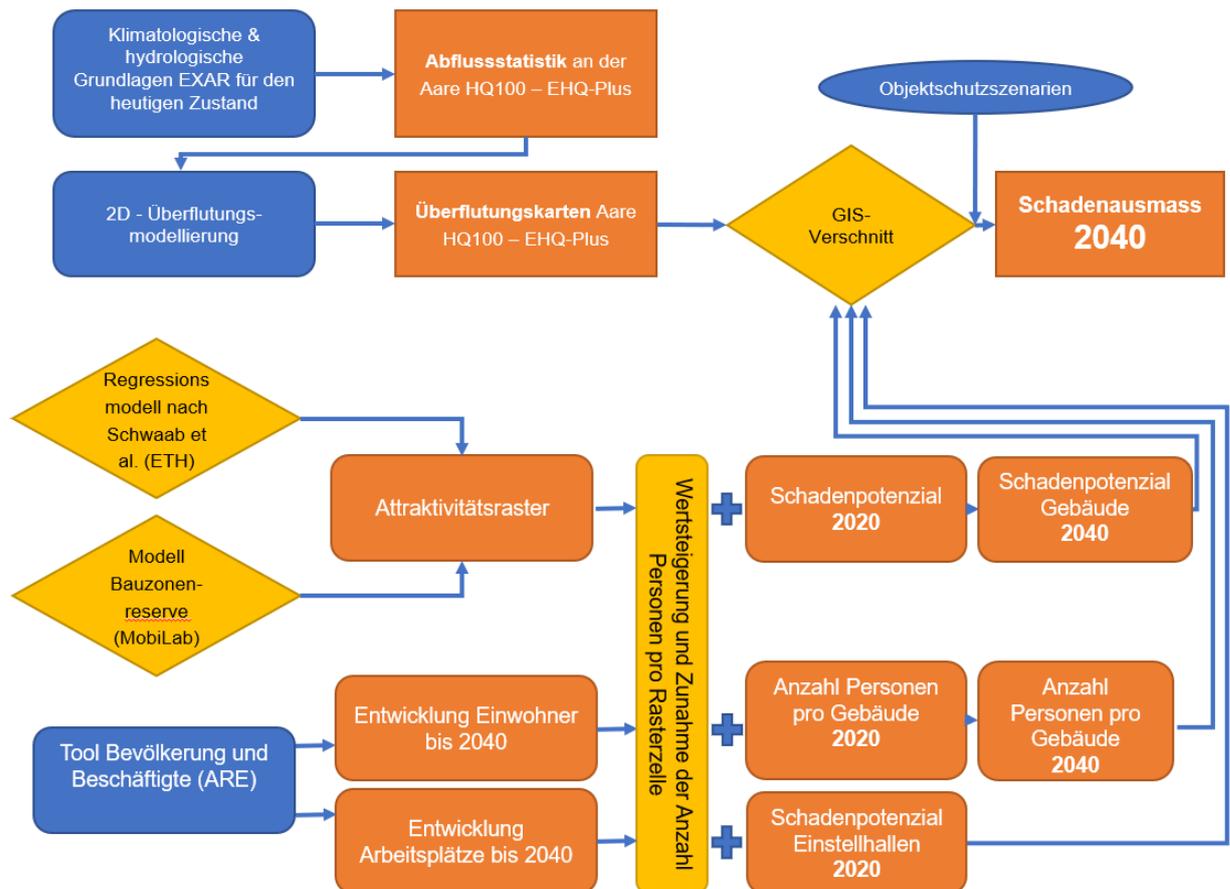


Abbildung 5: Workflow zur Berechnung der Schadenausmasse für das Jahr 2040.

3.4.4 Workflow für das Jahr 2100

Für das Jahr 2100 wurde bezüglich des Workflows wie folgt vorgegangen (Abbildung 4):

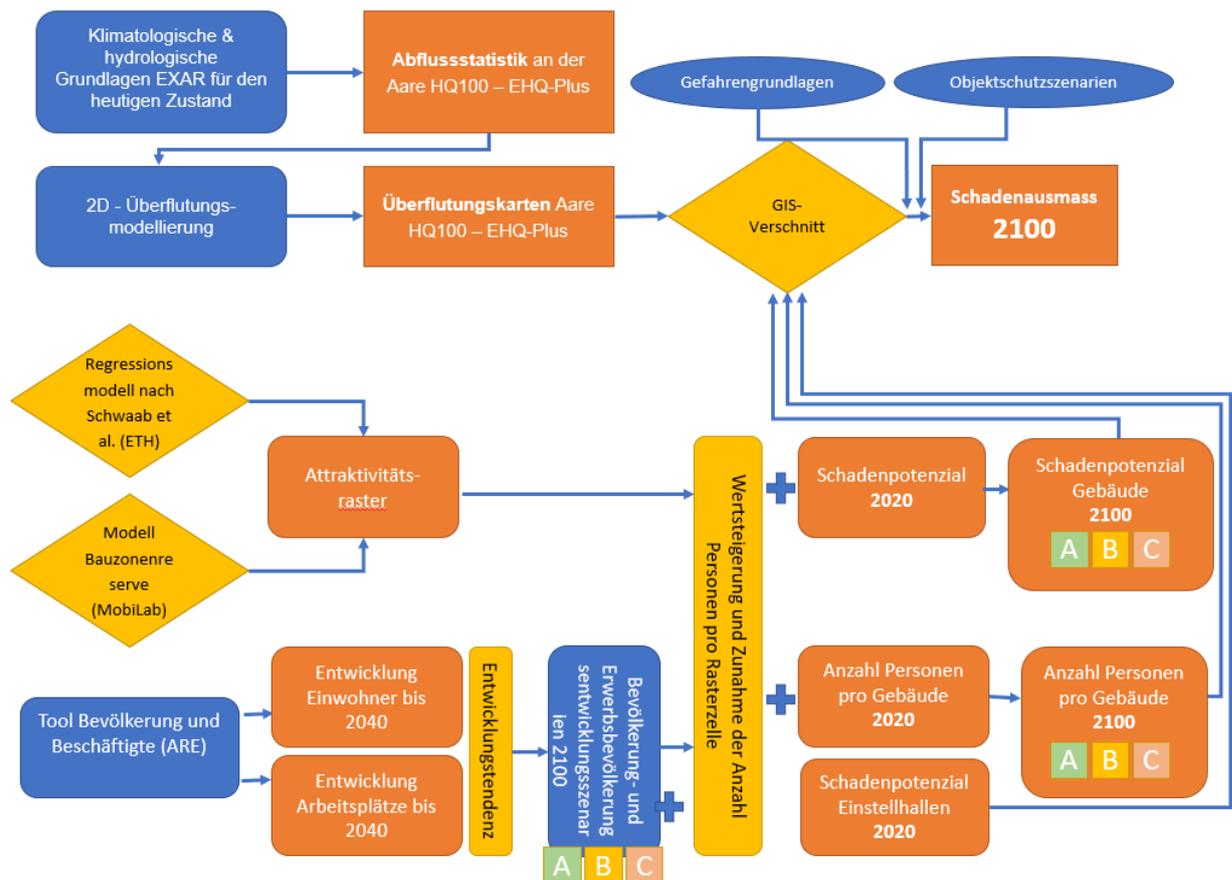


Abbildung 6: Workflow zur Berechnung der Schadenausmasse für das Jahr 2100.

3.4.5 Limiten und Unsicherheiten

Bezüglich der Interpretation der Modellresultate müssen gewisse Modellgrenzen beachtet werden. Hervorzuheben sind folgende Aspekte:

Hydrometeorologische Grundlagen

Die Limiten in Bezug auf die hydrometeorologischen Grundlagen sind in Kapitel 4.2 beschrieben.

Hydrodynamische Modellierung

Die Unsicherheiten aus der hydraulischen Modellierung wurden in EXAR detailliert untersucht [37]. Bei Hochwasserereignissen, die grösstenteils im Gerinne abgeleitet werden, wurde eine **Unsicherheit der Wasserspiegellage** in der numerischen Modellierung von rund +/- 10 bis maximal +/- 40 cm ermittelt.

- Sämtliche Berechnungen von Ausuferungen und Überströmungen wurden mit der **bestehenden Gerinnegeometrie und ohne Freibord** berechnet.
- In EXAR wurden die morphologischen Veränderungen bei extremen Hochwasserereignissen untersucht [38] und es konnten keine signifikanten Sohlenveränderungen oder Seitenerosionen festgestellt werden, die die Überflutung beeinflussen.
- In EXAR wurden die Versagenswahrscheinlichkeiten von Längs- und Querbauwerken untersucht [39]. Ein Versagen ist in der betrachteten Wiederkehrperiode dieser Studie von ca. 1'000 Jahren sehr unwahrscheinlich und wird deshalb nicht berücksichtigt.

Neben diesen Unsicherheiten und Annahmen spielt auch die **Auflösung des unstrukturierten Netzes** eine wichtige Rolle, ob vorhandene strömungslenkende Strukturen korrekt abgebildet werden. Dies spielt insbesondere bei lokalen, aber auch bei teils übergeordneten Hochwasserschutzmassnahmen (z. B. Ufermauern, lokal verschliessbare Durchgänge, etc.) eine Rolle. Die entlang der Aare vorhandenen, übergeordneten Hochwasserschutzmassnahmen sind in der verwendeten Modellgeometrie vorhanden und anhand von Wasserspiegel- und Überflutungsberechnungen verifiziert worden. Die zahlreichen lokalen und kleinräumig wirksamen Hochwasserschutzmassnahmen sind hingegen unvollständig berücksichtigt. Dadurch ist die dargestellte Überflutungsfläche tendenziell etwas zu gross.

Analyse der Schadenausmasse

Auflösung der Resultate:

- Die Ergebnisse der Modelle werden aggregiert und auf einem 50x50-Meter-Rastergitter dargestellt. Diese Darstellung ermöglicht einen engmaschigen Überblick über die Verteilung des Schadenpotenzials und des Schadenausmasses in jedem Hotspot. Die gewählte Einheit und die hochauflösende kartografische Darstellung ermöglichen zudem eine detaillierte Auswertung. Zu detaillierte Auswertungen sind jedoch nicht zulässig, da auf

dieser Ebene Einzelfälle, die von den Modellen nicht erfasst werden, eine entscheidende Rolle spielen können.

- Die Überflutungsflächen sind detaillierter aufgelöst als das 50x50-m-Raster des Schadenpotenzials. Beim Verschnitt kann es deshalb zu einem Informationsverlust kommen, da für die Auswertung des Schadenausmasses immer die gröber aufgelöste Information massgebend ist. Zwischen den Rasterzellen kann es zu Lücken kommen, wodurch die Ergebnisse nicht zu detailliert interpretiert werden dürfen.

Siedlungsentwicklung in den Szenarien 2040 – 2100:

- Die Bevölkerungs- und Erwerbsbevölkerungszunahmen für die Jahre 2040 und 2100 basieren auf Siedlungsentwicklungsszenarien, die wiederum auf mehreren Parametern beruhen [32], [22] und unterschiedlich aufgelöst sind (Verkehrszonenauflösung [32], schweizweite Auflösung [22]). Die Resultate der Siedlungsentwicklung müssen anschliessend auf das 50x50-Meter-Rastergitter herunterskaliert werden. Die Verteilung der Personen wird von zwei Modellansätzen (siehe Kapitel 6.2.2.1) gesteuert und ist auf zahlreiche Annahmen gestützt (vgl. Kapitel 6.3.2 und 6.3.3). Die Verteilung der Bevölkerung und der Arbeitskräfte in den Jahren 2040 und 2100 ist somit mit grösseren Unsicherheiten behaftet.
- Die «Bauzonenstatistik der Schweiz» und die «harmonisierten Bauzonen der Schweiz» [22] bilden die Grundlage für die bauzonengerechte Verteilung von Bevölkerung und Erwerbstätigen. Die Bauzonen sind in den Datensätzen schweizweit harmonisiert, was zu einem Informationsverlust führt. Das Attribut "weitere Bauzonen" der Bauzonenstatistik enthält zum Beispiel verschiedene Sonderbauzonen wie die "Zone mit Planungspflicht (ZPP)", "Überbauungsordnungen" oder die "Zone für militärische Nutzung". Nicht alle dieser Zonen sind bebaubar. Es ist daher möglich, dass die Modelle Verdichtungspotenziale in nicht bebaubaren Gebieten vorsehen, was zu Fehlaussagen bezüglich des zukünftigen Schadenpotenzials und zu einer nicht genau quantifizierbaren Überschätzung des zukünftigen Schadenausmasses führen kann.
- Überbauungsordnungen ersetzen in der Regel die geltende kommunale Nutzungsplanung. Auf solchen Flächen können zum Beispiel höhere Gebäude gebaut werden. Trotzdem muss die Ausnutzungsziffer den kommunalen Vorschriften entsprechen. Es werden somit höhere Gebäude gebaut, wobei der Abstand zwischen den Gebäuden in der Regel zunehmen muss. Der resultierende Abstand wird vom Modell als Baulücke erkannt und als Baureserve gekenn-

zeichnet. In diesen Fällen erkennt das Modell ein Siedlungsentwicklungspotenzial, wo keines ist. Es besteht somit ein sogenanntes Modellartefakt, das letztlich auch zu einer Überschätzung der Schadenausmasse führt.

Die methodischen Unsicherheiten prägen die Ergebnisse der Untersuchungen und müssen bei der Analyse berücksichtigt werden. Sie haben unterschiedliche Ursachen und Besonderheiten. So ist die Berücksichtigung des Klimawandels in hydrologischen Szenarien mit gewissen Unsicherheiten verbunden, die sich auf die zukünftigen Rahmenbedingungen beziehen (wie wird sich das Klima tatsächlich verändern und welchen Einfluss wird es auf die Hydrologie der Einzugsgebiete haben). Bei der Modellierung der Zunahme des Schadenpotenzials hingegen können die künftigen Rahmenbedingungen (Raumplanung, Landnutzung, Mobilität, usw.) auf der Grundlage der bestehenden strategischen Planung besser abgeschätzt werden. Die aktuelle COVID-19-Pandemie zeigt uns jedoch, dass sich die Situation schnell ändern und das Verhalten der Bevölkerung stark beeinflussen kann.

4. Grundlagen Hydrologie und Klima

4.1 Auswahl der Ereignisse

Das vorliegende Projekt basiert auf EXAR-Daten in stündlicher Auflösung. Als Grundlage für die weiteren Analysen wurden daraus Ganglinien für Wiederkehrperioden von 30, 100, 300 und 1'000 Jahren bestimmt. Die Wiederkehrperiode von 1'000 Jahren entspricht dabei einem Extremhochwasser (EHQ).

Dafür wurden in einem ersten Schritt die entsprechenden Spitzenabflüsse für jeden der betrachteten 10 Bezugspunkte aus der gesamten 300'000 Jahre langen EXAR-Simulation geschätzt. Anschliessend wurden pro Bezugspunkt und Wiederkehrperiode diejenigen 10 Ereignisse extrahiert, welche dem gewünschten Spitzenabfluss jeweils am nächsten kommen. Die Wiederkehrperiode eines extrahierten Ereignisses bezieht sich also immer auf den betrachteten Bezugspunkt und nicht auf das gesamte Aaregebiet. Zu beachten ist, dass die hier bestimmten Ereignisse aus methodischen Gründen nicht genau dieselben Spitzenabflüsse haben wie die in EXAR verwendeten Initialereignisse. Dies liegt darin begründet, dass in EXAR aus Zeitgründen zuerst Ganglinien aus einer provisorischen Simulation extrahiert wurden. Die genauen Wiederkehrperioden der extrahierten Ereignisse wurden in EXAR dann erst später auf Basis der definitiven Simulationen statistisch bestimmt.

Aus diesen jeweils 10 Ereignissen wurde schliesslich pro Bezugspunkt und Wiederkehrperiode ein repräsentatives Ereignis für die weitere Verwendung bestimmt. Als Hilfestellung dazu wurden Karten der 24 h- und 72 h-Niederschlagssummen für jedes Ereignis erstellt, und es wurden anschliessend Ereignisse ausgewählt, die einen möglichst grossen Teil des Aaregebiets betreffen und nicht extrem stark lokalisiert sind. Zudem wurden Ereignisse mit grossem Abflussvolumen bei der Auswahl bevorzugt. Für diese Ereignisse wurden dann die EXAR-Simulationsergebnisse aus allen 79 Teileinzugsgebieten ausgeschrieben und an die hydraulische Modellierung (Kapitel 5) weitergegeben.

4.2 Schätzung der Klimasensitivität

Wie in Kapitel 1.1 beschrieben, bestehen massgebliche Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Veränderungen im Hochwassergeschehen. Deshalb werden im vorliegenden Projekt ausdrücklich keine Projektionen für Hochwasser an der Aare unter Klimaänderung vorgenommen. Vielmehr wird von „was-wäre-wenn“-Szenarien ausgegangen, welche im Sinne von Sensitivitätsanalysen aufzeigen sollen, wie stark sich Veränderungen der Hochwasserereignisse in einem definierten Bereich auf das Schadenausmass auswirken und wie bedeutsam angenommene klimabedingte Veränderungen im Vergleich zu angenommenen Veränderungen im Schadenpotenzial sind. Ob in Zukunft genauere Projektionen zu Klimaänderung und Hochwasser möglich sein werden, hängt unter anderem von Prozessstreuung und Auflösung der verfügbaren Klimaszenarien ab. Dabei müsste insbesondere ein besseres Wissen über die Variabilität des Hochwassergeschehens heute und in einem wärmeren Klima vorliegen.

Trotzdem muss für die hier vorzunehmenden Sensitivitätsanalysen ein Bereich bestimmt werden, welcher eine mögliche Bandbreite relevanter Änderungen abdeckt. Als Grundlage für die Bestimmung dieses Bereichs wurde ein frei verfügbarer Simulationsdatensatz [7] verwendet, welcher die Schweiz in 307 mesoskalige Einzugsgebiete unterteilt. Diese Einzugsgebiete sind den Bilanzierungsgebieten des Hydrologischen Atlas der Schweiz [19] ähnlich und stellen nicht immer Kopfeinzugsgebiete dar. Der Datensatz beinhaltet Simulationen mit PREVAH [20] für den Zeitraum 1981–2100 in täglicher Auflösung und verwendet die Klimaszenarien CH-2018 als Antrieb [21]. Es wurden 39 Modellketten von globalen Klimamodellen (General Circulation Models GCMs) und Regionalen Klimamodellen (Regional Climate Models RCMs) eingesetzt, welche je nach Kombination eine Rasterweite von 0.11° (ca. 12 km für die Schweiz, 10 Modellketten) oder 0.44° (ca. 49 km, 29 Modellketten) aufweisen. Jede einzelne dieser GCM-RCM-Modellketten läuft unter Annahme eines bestimmten Repräsentativen Konzentrationspfads für

Treibhausgase (Representative Concentration Pathway RCP), wobei 8 Ketten das Szenario RCP2.6 abdecken (konsequenter Klimaschutz), 13 das Szenario RCP4.5 (begrenzter Klimaschutz) und 18 das Szenario RCP8.5 (kein Klimaschutz).

Aus dem beschriebenen Datensatz wurden diejenigen 125 mesoskaligen Einzugsgebiete ausgewählt, welche das Einzugsgebiet der Aare abdecken. Sie haben eine mediane Gebietsfläche von 119.6 km² und umfassen eine Bandbreite an Flächen von 21.0–460.3 km². Nach Bestimmung der jährlichen Spitzenabflüsse (Annual Maximum Floods AMFs) für jedes Einzugsgebiet wurden die Simulationen in drei Perioden 1980–2009, 2025–2054 und 2070–2099 unterteilt. Pro Einzugsgebiet und Periode wurde dann angenommen, dass das grösste AMF der jeweils 30-jährigen Simulation dem HQ30 entspricht. Schliesslich wurde mit der Periode 1980–2009 als Referenz bestimmt, wie gross die prozentualen Veränderungen im HQ30 für die Perioden 2025–2054 und 2070–2099 ausfallen.

Diese Betrachtung erfolgte jeweils separat für die Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 sowie für alle RCPs gemeinsam. Dabei wurde pro Einzugsgebiet immer der Mittelwert aller relevanten Modellketten betrachtet; bei RCP2.6 also etwa das mittlere HQ30 aus allen 8 Modellketten, welche unter diesem Szenario laufen. Bei gemeinsamer Betrachtung aller RCPs wurde pro Gebiet das mittlere AMF aller 39 Modellketten verwendet, ohne eine Gewichtung nach RCP vorzunehmen. Dieses Vorgehen erfolgte mit dem Ziel, eine hinreichend robuste Bandbreite zu erhalten (siehe z. B. [21]). Das gewählte Vorgehen bringt es mit sich, dass die Bandbreite aller RCPs in der gemeinsamen Betrachtung etwas schmaler ausfällt als die Bandbreiten der einzelnen RCPs 2.6, 4.5 und 8.5.

Die Ergebnisse dieser gebietsweisen Auswertung sind in Abbildung 7 ersichtlich. Darauf aufbauend weist Abbildung 8 summarisch aus, welche Bandbreite die 125 betrachteten Teilgebiete der Aare betreffend den projizierten Veränderungen im HQ30 abdecken.

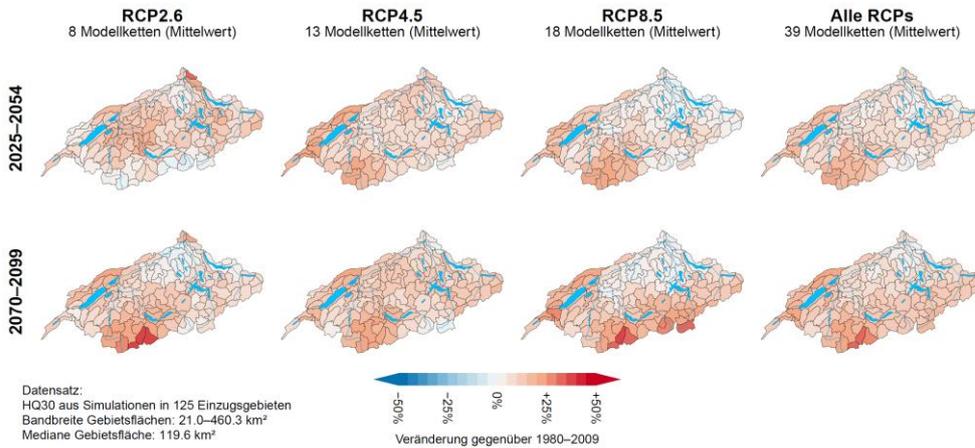


Abbildung 7: Karten zur mittleren projizierten Veränderung des simulierten HQ30 in 125 mesoskaligen Einzugsgebieten der Aare (Referenzperiode 1980–2009). Pro Einzugsgebiet wurde jeweils der Mittelwert aller relevanten Modellketten verwendet. Siehe auch Abbildung 8. Datengrundlage: Simulationen aus [7].

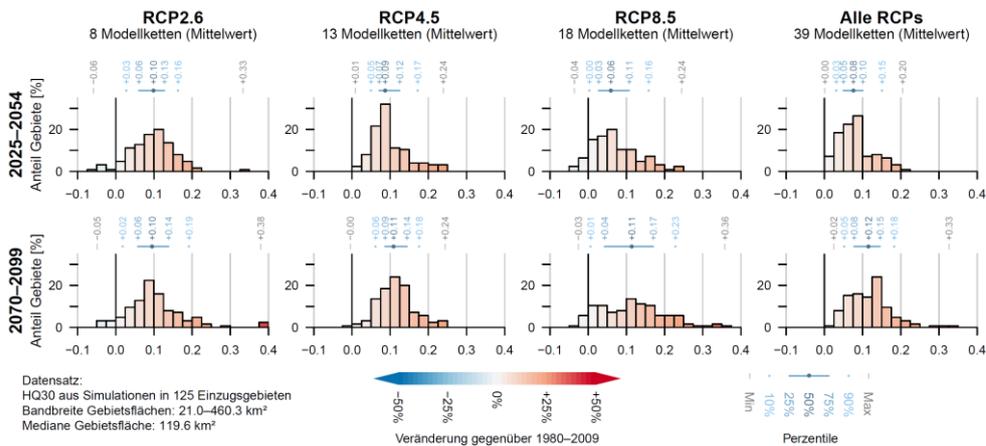


Abbildung 8: Histogramme zur projizierten Veränderung des simulierten HQ30 in 125 mesoskaligen Einzugsgebieten der Aare (Referenzperiode 1980–2009). Pro Einzugsgebiet wurde jeweils der Mittelwert aller relevanten Modellketten verwendet, die angegebenen Spannweiten (Min/Max) und Perzentile (10%, 25%, 50%, 75%, 90%) beziehen sich dann auf die Resultate aller 125 Gebiete. Die räumlichen Muster sind in Abbildung 7 ersichtlich. Datengrundlage: Simulationen aus [7].

Zur Ergänzung wurde auch ausgewertet, welches 25%- und welches 75%-Perzentil die jeweils relevanten Modellketten pro Einzugsgebiet zeigen (Abbildung 9, Abbildung 10). Dabei ist ersichtlich, dass die Klimaänderungsszenarien in diesem Interquartilsbereich ungeachtet des RCP eine beachtliche Bandbreite von moderaten Hochwasserabnahmen (Median bei allen RCPs im Bereich von 10 %) bis hin zu deutlichen Hochwasserzunahmen (Median bei allen RCPs im Bereich von +25 %) in den Teilgebieten abdecken.

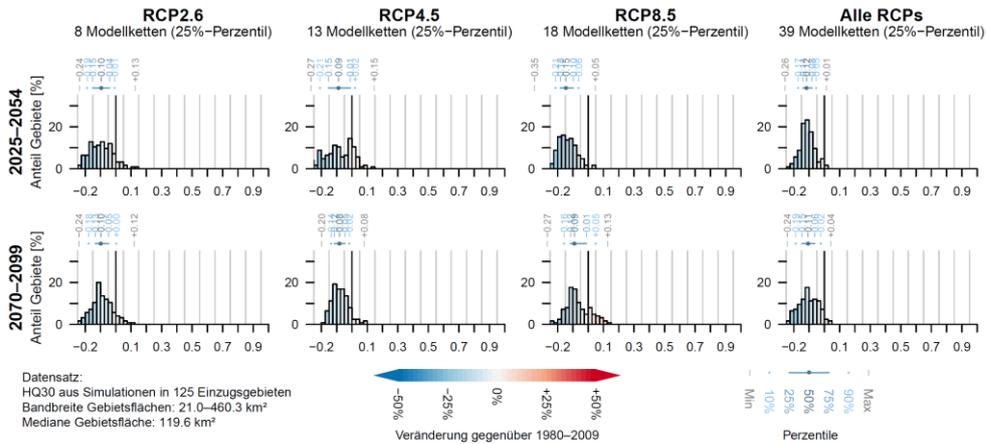


Abbildung 9: Histogramme zur projizierten Veränderung des simulierten HQ30 in 125 mesoskaligen Einzugsgebieten der Aare (Referenzperiode 1980–2009). Pro Einzugsgebiet wurde jeweils das 25%-Perzentil aller relevanten Modellketten verwendet, die angegebenen Spannweiten (Min/Max) und Perzentile (10 %, 25 %, 50 %, 75 %, 90 %) beziehen sich dann auf die Resultate aller 125 Gebiete. Datengrundlage: Simulationen aus [7].

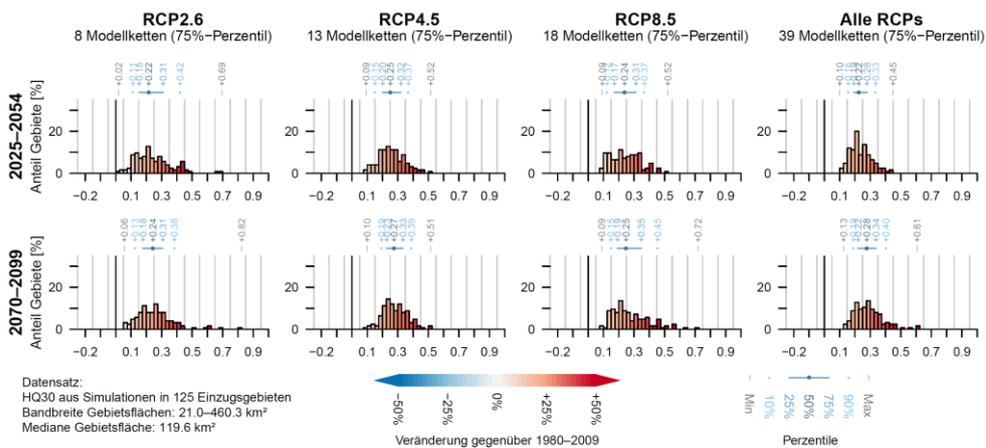


Abbildung 10: Histogramme zur projizierten Veränderung des simulierten HQ30 in 125 mesoskaligen Einzugsgebieten der Aare (Referenzperiode 1980–2009). Pro Einzugsgebiet wurde jeweils das 75%-Perzentil aller relevanten Modellketten verwendet, die angegebenen Spannweiten (Min/Max) und Perzentile (10 %, 25 %, 50 %, 75 %, 90 %) beziehen sich dann auf die Resultate aller 125 Gebiete. Datengrundlage: Simulationen aus [7].

Als Gesamtsensitivität für das vorliegende Projekt wurde schliesslich die in Abbildung 8 ganz rechts ersichtliche Bandbreite für alle RCPs angenommen. Sie bezieht sich auf die projizierten Veränderungen im HQ30 pro Einzugsgebiet, wenn der Mittelwert aller Modellketten verwendet wird, also alle RCPs ohne Gewichtung ausgewertet werden.

Für die Periode 2025–2054 umfasst die Gesamtsensitivität einen Bereich von 0 % (min) bis +20 % (max) mit einem Median von +8 % und Perzentilsbereichen von +5 % bis +10 % (25-%-/75-%-Perzentil) und +3 % bis +15 % (10-%-/90-%-Perzentil). Für die Periode 2070–2099 umfasst die Gesamtsensitivität einen Bereich von +2 % (min) bis +33 % (max) mit einem Median von +12 % und Perzentilsbereichen von +8 % bis +15 % (25-%-/75-%-Perzentil) und +5 % bis +18 % (10-%-/ 90-%-Perzentil). Es ist zu beachten, dass es sich bei Zahlen nicht um Prognosen handelt, sondern um Orientierungswerte, mit welchen die zu untersuchende Bandbreite festgelegt wurde. Eine quantitative Interpretation für die Hochwasser der Aare unter Klimaänderung ist nicht zulässig.

Diese angenommene Gesamtsensitivität bezieht sich auf das HQ30, wird aber auch für die anderen untersuchten Hochwasserkennwerte (HQ100, HQ300, HQ1'000/EHQ) verwendet. Dies ist eine stark vereinfachende Annahme, welche sich auf Grund der beschränkten Datenlage kaum umgehen lässt. Sie vernachlässigt, dass klimabedingte Veränderungen in den Hochwassern mit grosser Wahrscheinlichkeit von der betrachteten Wiederkehrperiode abhängen [4] [5].

Zusammenfassend ist die hier angenommene Gesamtsensitivität unbedingt nur als eine Eingrenzung zu verstehen, welche die im vorliegenden Projekt zu untersuchende Bandbreite festlegen soll. Die hier angegebenen Werte dürfen aber keinesfalls quantitativ für die Hochwasser der Aare unter Klimaänderung interpretiert werden.

Der Klarheit halber sind im Folgenden nochmals die **Limiten** der hier verwendeten Gesamtsensitivität zusammengefasst. Sie ergeben sich aus den Limiten der aktuellen Klimaszenarien sowie aus denjenigen Einschränkungen, welche wegen der grossen natürlichen Variabilität des Hochwassergeschehens zu beachten sind.

- Die Klimaszenarien CH2018 und die darauf basierenden hydrologischen Simulationen liegen nur im Tagesschritt vor. Sie decken zudem keine Veränderungen in Zirkulationsmustern und Ereignistypen ab.
- Es werden nur die grössten simulierten Hochwasser aus Perioden mit einer Länge von 30 Jahren (angenommen als HQ30) betrachtet und nicht seltenere Hochwasser. Eine Extrapolation ist auf Grund der grossen Unsicherheiten nicht empfehlenswert.
- Es werden 125 mesoskalige Einzugsgebiete der Aare betrachtet und nicht das gesamte Aaregebiet.

- Pro Einzugsgebiet wird das mittlere HQ30 aller verfügbaren Modellketten und somit aller RCPs gemeinsam betrachtet. Eine Gewichtung nach RCPs wurde ebenso wenig vorgenommen wie eine Interpretation der einzelnen RCPs, da die Unsicherheiten der individuellen Modellketten sowie die Variabilität des Hochwassergeschehens beträchtlich sind.

Trotz dieser Limiten können die aus EXAR verfügbaren Grundlagen mit einem grossen Mehrwert eingesetzt werden, da eine räumlich konsistente, auf stündlichen Ganglinien basierende Betrachtung über das gesamte Aaregebiet hinweg möglich ist. Sollten zu einem späteren Zeitpunkt genauere und differenziertere Aussagen über die Klimasensitivität der Hochwasser möglich sein, können die im Folgenden erarbeiteten Resultate ganz einfach mit einer aktualisierten Bandbreite interpretiert werden.

4.3 Vergleich der Spitzenabflüsse

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die Spitzenabflüsse aus EXAR für die gängigen Jährlichkeiten HQ30 bis EHQ mit den heute verbreitet verwendeten Hochwasserstatistiken (BAFU-Statistik und hydrologische Grundlagen für die Gefahrenkartierung) verglichen.

Eine vollständige Übersicht der Spitzenabflüsse ist in tabellarischer Form im Anhang 2 dargestellt. Die nachfolgende Abbildung 11 zeigt beispielhaft für die charakteristischen Ereignisse HQ100 und HQ300 die prozentuale Abweichung der Spitzenabflüsse aus der BAFU-Statistik und den EXAR-Abflüssen zu den Abflüssen aus den Gefahrenkarten.

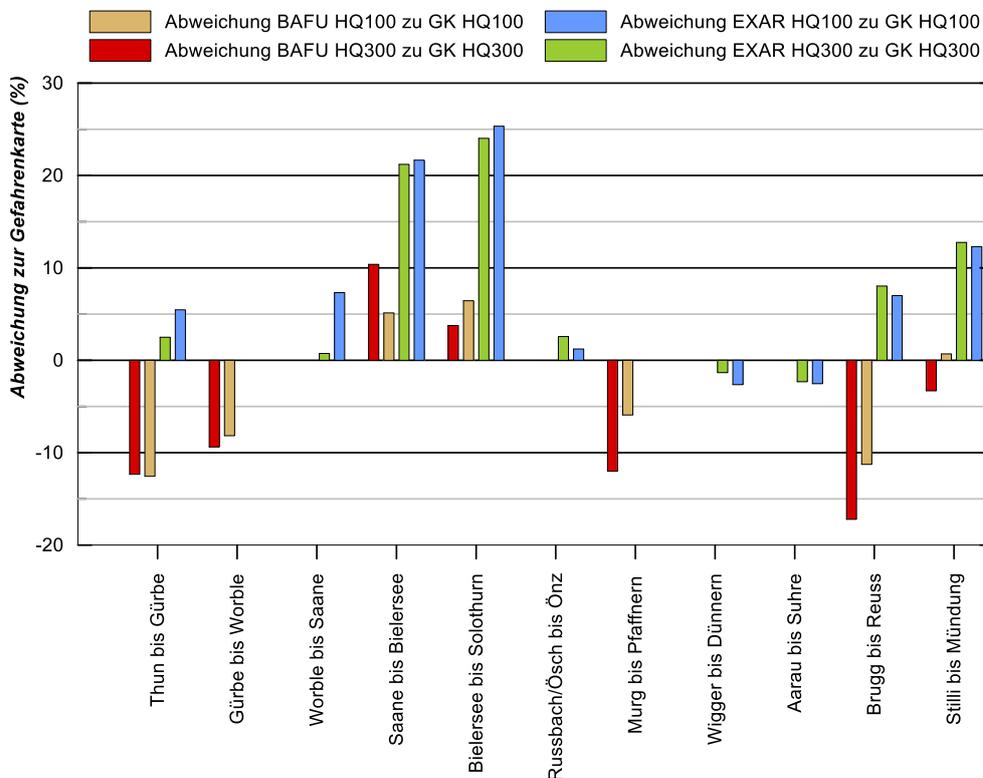


Abbildung 11: Vergleich der Abflüsse aus der Gefahrenkarte, die für die heutige Praxis der Gefahrenprävention massgebend sind mit den Werten aus der BAFU-Statistik (braun HQ100 und rot HQ300) und aus der EXAR-Studie (blau HQ100 und grün HQ300).

Der Vergleich zeigt, dass die Abflüsse aus dem BAFU-Frequenzdiagramm in mehreren Teilstrecken der Aare über 10 % niedriger ausfallen als die Angaben in der Gefahrenkarte. Insbesondere zwischen Thun und Bern, aber auch weiter im Unterlauf (Aare bei der Murg-Mündung oder bei Brugg) sind die Abweichungen ausgeprägt. Für diese Abschnitte sind sowohl bei der Gefahrenkartierung als auch bei der EXAR-Studie hydrologische Gegebenheiten berücksichtigt worden, die in den bestehenden Messreihen kaum oder gar nicht abgebildet sind.

Dem gegenüber stehen die Abflüsse aus EXAR, welche in gewissen Abschnitten (Saanemündung bis Solothurn/Emme-Mündung und Brugg bis Mündung in den Rhein) deutlich höher liegen als in der Gefahrenkarte definiert wurde. Besonders der Abschnitt von der Saanemündung bis Solothurn weist einen über 20 % höheren Spitzenabfluss auf. Die Unterschiede in diesen Abschnitten ergeben sich zum Teil durch die in EXAR angewendete Modellkette, welche den Extrapolationsschritt beim Niederschlag macht und nicht beim Abfluss. Damit wird in den EXAR-Simulationen ein sehr viel breiteres Spektrum an möglichen Ereignissen ausgelotet als in den

vergleichsweise kurzen Abflussmessreihen. Andererseits enthalten die Abflussmessreihen der Aare unterhalb des Bielersees eine Inhomogenität, welche durch das etwas andere Abflussverhalten nach Abschluss der zweiten Juragewässerkorrektur 1974 bedingt ist (siehe z. B. [6]). Diese Inhomogenität dürfte auch die in den Gefahrenkarten hergeleiteten Werte beeinflussen, hingegen tritt sie in den EXAR-Simulationen nicht auf. Eine Auswertung der homogenen Reihe ab 1974 führt bei Extrapolation auf seltene Ereignisse zu etwas höheren Hochwasserabschätzungen, welche den Werten von EXAR sehr viel ähnlicher sind.

Es gilt zu beachten, dass für wasserbauliche Einrichtungen zur Gewährleistung des Hochwasserschutzes von übergeordneten Schutzbauten bis zu einzelnen Objektschutzmassnahmen auf den Dimensionierungsabfluss immer ein Freibord berücksichtigt wird, welches auch Unsicherheiten in der Hydrologie berücksichtigt. Dennoch sind Abweichungen von über 20 % erwähnenswert – einerseits für die künftige Planung von Hochwasserschutzmassnahmen und andererseits für die Prüfung bestehender Schutzbauwerke.

5. Hydrodynamische Modellierung im Einzugsgebiet der Aare

5.1 Hydronumerisches Modell

Für die zweidimensionalen Berechnungen wurde die Software BASEMENT v3.0.2 (VAW ETH Zürich) eingesetzt. Die im Modell verwendeten numerischen Methoden basieren auf einer Diskretisierung der Modelltopografie in unstrukturierte Dreieckselemente. Diese Elemente sind Kontrollvolumen für die Berechnung der tiefengemittelten Flachwassergleichungen (Finite-Volumen-Verfahren, 1. Ordnung). Die Elementkanten definieren die Grenze des Kontrollvolumens und die Verbindung zwischen den benachbarten Elementen. Die Lösung der numerischen Gleichungen erfolgt mit dem HLLC-Riemann-Verfahren.

5.2 Modellaufbau

5.2.1 Modellgrundlagen aus der Studie Extremhochwasser an der Aare (EXAR)

Die bestehenden Modellgrundlagen aus dem Projekt EXAR konnten für die vorliegende Untersuchung übernommen werden. Sie wurden jedoch auf Veränderungen gegenüber dem in EXAR festgelegten Zustand (Stand 2015) überprüft und an mehreren Stellen aktualisiert oder verfeinert (vgl. Kapitel 5.2.2).

Die Grundlagen beinhalten ein detailliertes Höhenmodell für das Umland und das Gerinne (mit einer mittleren Sohlenlage des Gerinnes, basierend auf den BAFU-Querprofilaufnahmen), die Standorte der Stauanlagen, die Pegel-Abfluss-Beziehungen der jeweiligen Anlagen sowie die Rauigkeitsbeiwerte für das Gerinne und das Umland gemäss den Resultaten aus der Kalibrierung und Validierung¹.

5.2.2 Aktualisierungen der Gerinnegeometrie

Für die Aufbereitung der Modelle wurden Veränderungen der Gerinnegeometrie, welche seit der Modellerstellung für das Projekt EXAR (Stand: 2015) umgesetzt wurden, berücksichtigt. Zudem wurden die Anlagekennwerte (Stauziel, Wehrgeometrie und Pegel-Abfluss-Beziehung für die Wehrsegmente) detailliert geprüft.

Für die vorliegende Untersuchung wurden folgende Anpassungen im Modellperimeter vorgenommen:

- Abgleich der HWS-Mauer oberhalb der Stauanlage Niederried mit Plänen des ausgeführten Bauwerks.
- Berücksichtigung des neuen Emme-Laufs aus dem Hochwasserschutzprojekt Emme Biberist bis Mündung Aare [8] inkl. den Anpassungen in der Umgebung, insbesondere der Hochwasserschutzdämme [9].
- Anpassungen des rechtsseitigen Ufers oberhalb der Brücke Jurastrasse im Gebiet Attisholz.
- Detailliertere geometrische Umsetzung des Kraftwerks Flumenthal.
- Anpassungen im Bereich des Rohrer Schachens (Gemeinden Aarau und Rupperswil).
- Detailliertere geometrische Umsetzung des Kraftwerks Rupperswil.
- Anpassung der PQ-Beziehung in Rupperswil aufgrund neuer Grundlagen.
- Anpassungen und Korrekturen an den rechtsseitigen HWS-Dämmen und -mauern entlang des Klingnauer Stausees.

¹ Die Modelle wurden im Rahmen des Projekts EXAR anhand des Hochwassers 2005 kalibriert und anhand des Hochwasser 2007 validiert [40]. Die detaillierten Modelleigenschaften werden in [37] erörtert.

5.3 Untersuchte Szenarien

5.3.1 Grundkonfiguration

In einem ersten Schritt wurden mit dem hydraulischen Modell flächendeckend Überflutungsflächen verschiedener Wiederkehrperioden berechnet.

Der betrachtete Bereich der Wiederkehrperioden umfasst das hundertjährige Ereignis (HQ100), das dreihundertjährige Ereignis (HQ300), das Extremereignis (EHQ, entspricht bei der EXAR-Statistik dem 1000-jährlichen Ereignis) und einem EHQ, bei welchem der maximal mögliche Einfluss des Klimawandels berücksichtigt wurde (EHQ-Plus). Bei diesem Szenario wurde der Abfluss aus der EXAR-Statistik für das 1000-jährliche Ereignis um 20% erhöht.

Die Überflutungsflächen umspannen den gesamten Verlauf der Aare zwischen dem Thunersee und der Mündung in den Rhein. Diese Fläche dient als Grundlage für die Bestimmung von Hotspot-Gebieten, welche ein hohes Schadenpotenzial aufweisen (vgl. Kapitel 6.1.1). Für die Berechnungen wurde folgende Grundkonfiguration verwendet:

- Sämtliche Stauanlagen (Kraftwerke und Stauwehre) sind in einem nach dem jeweiligen Reglement vorgesehenen Hochwasserbetrieb. Die Wehrfelder können alle geöffnet werden (Berücksichtigung des n-0-Zustands) und die Kraftwerke sind entweder in einem Segelbetrieb oder abgestellt.
- Während dem Hochwasserereignis kommt es zu keinen Versagensszenarien von Schutzbauten wie z. B. von Dämmen.
- Es gibt keine Verklausungen von Brücken oder von Wehrquerschnitten.

In einer zweiten, iterativen Phase wurden in den definierten Hotspots (vgl. Kapitel 6.1.1) weitere Abflüsse gerechnet, damit Unstetigkeiten, wie beispielsweise ein plötzlicher, starker Anstieg des Schadensausmasses, in Abhängigkeit des Abflusses möglichst genau dargestellt werden konnten.

5.3.2 Unterteilung in verschiedene Abschnitte

Für die Berechnung einer flächendeckenden Überflutung für eine spezifische Wiederkehrperiode (z. B. HQ100) wurde das System der Aare in mehrere Unterabschnitte aufgeteilt. Eine erste Unterteilung richtete sich nach den in EXAR definierten Transferpunkten, an welchen die Abflüsse aus den ca. 300'000 Jahren Simulationsdauer statistisch ausgewertet wurden (vgl. Abbildung 12).

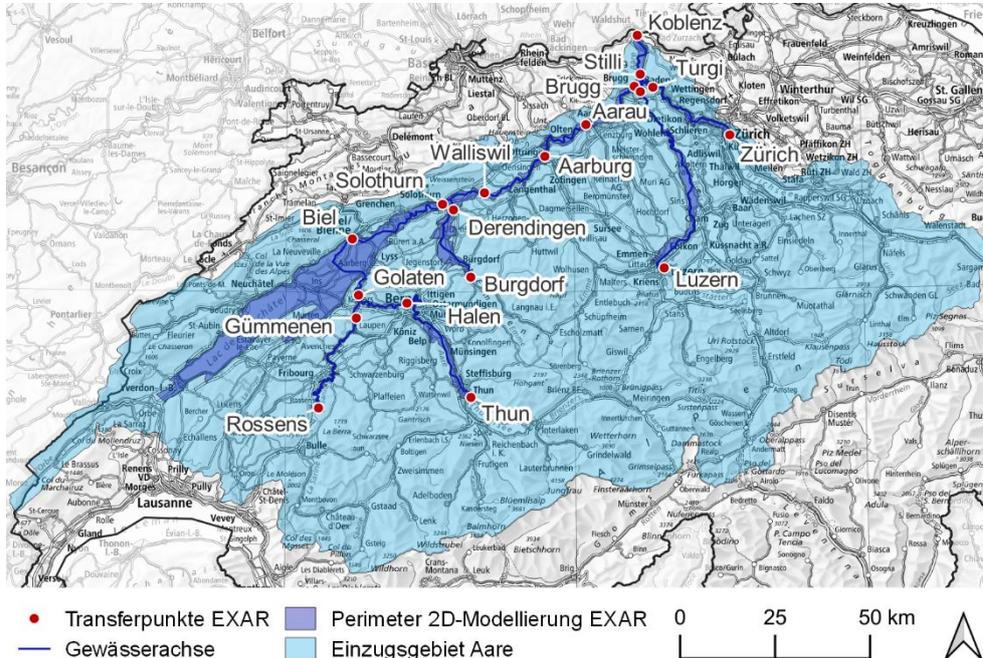


Abbildung 12: Übersicht des Projektgebiets aus EXAR mit Angabe der Lage der Transferpunkte.

Um die Kontinuität der Abflusserhöhung zwischen zwei Transferpunkten zu gewährleisten, wurde eine weitere Unterteilung der Abschnitte jeweils bei grösseren Seitenzuflüssen vorgenommen. Bei den Seitenzuflüssen wird der Abfluss in der Aare jeweils um einen gewissen Anteil erhöht, sodass der Spitzenabfluss am unterstrom liegenden Transferpunkt erreicht wird. Die Festlegung der Abflusserhöhungen durch die Seitenzuflüsse erfolgte iterativ, da in einigen Fällen Retentionsräume zu einer Dämpfung der Abflussganglinie geführt haben. Die Bestimmung der Abflussanteile der Seitenzuflüsse orientierte sich an deren Einzugsgebietsgrösse. Beispielsweise wurde entlang der Aare zwischen Thun und Bern (vgl. Abbildung 13) an diversen Zuflüssen ein Abflussanteil zugegeben, damit die ausgewertete Hochwasserganglinie am nächsten Transferpunkt (Halen) bezüglich des an dieser Stelle ausgewerteten Spitzenabflusses erreicht wurde.

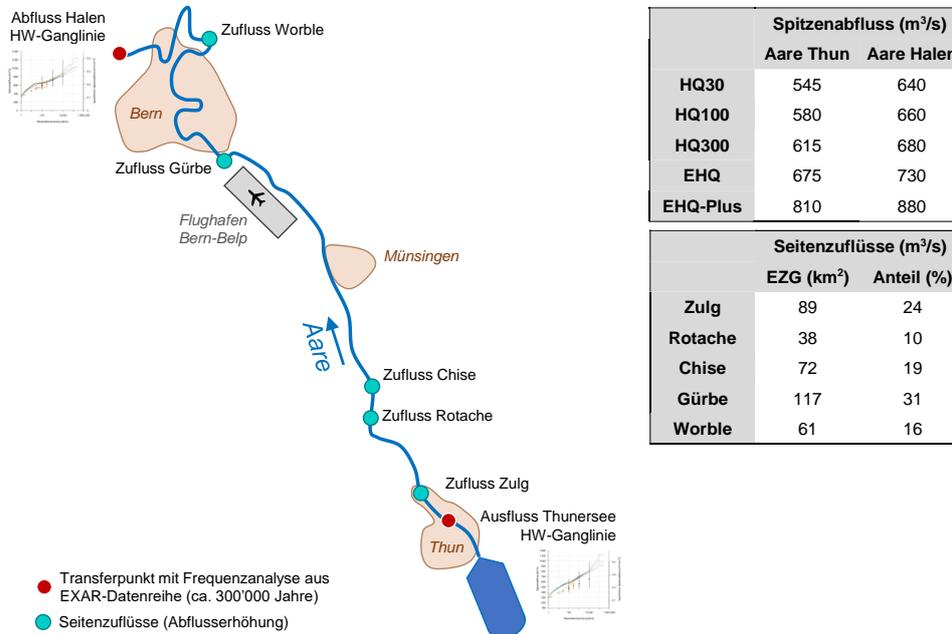


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Zuflüsse für die Hochwasserszenarien an der Aare zwischen Thun und Bern

5.3.3 Szenarienganglinien

Sobald durch ein Hochwasser in der Talebene Ausuferungen entstehen, werden je nach Topographie der Talsohle Retentionsräume aktiviert und allmählich aufgefüllt. Der Grad der Ausdehnung der Überflutung im Retentionsraum ist abhängig vom Volumen, das während dem Ereignis in die Fläche austritt. Bei extremen Hochwasserereignissen spielt deshalb neben dem Spitzenabfluss auch die Dauer der Hochwasserganglinie eine Rolle. Aus diesem Grund wurden die Überflutungsberechnungen mit instationären, vereinfachten Ganglinien durchgeführt (Ausnahme: Hotspot Biel).

Die Abflüsse an den Transferpunkten wurden als synthetische Trapezganglinien vereinfacht, damit sie beliebig skaliert werden konnten. Basis für die Vereinfachung war jeweils eine berechnete, charakteristische Ganglinie aus dem Langzeitmodell RS-Minerve der Hydrologie aus EXAR (vgl. Abbildung 14).

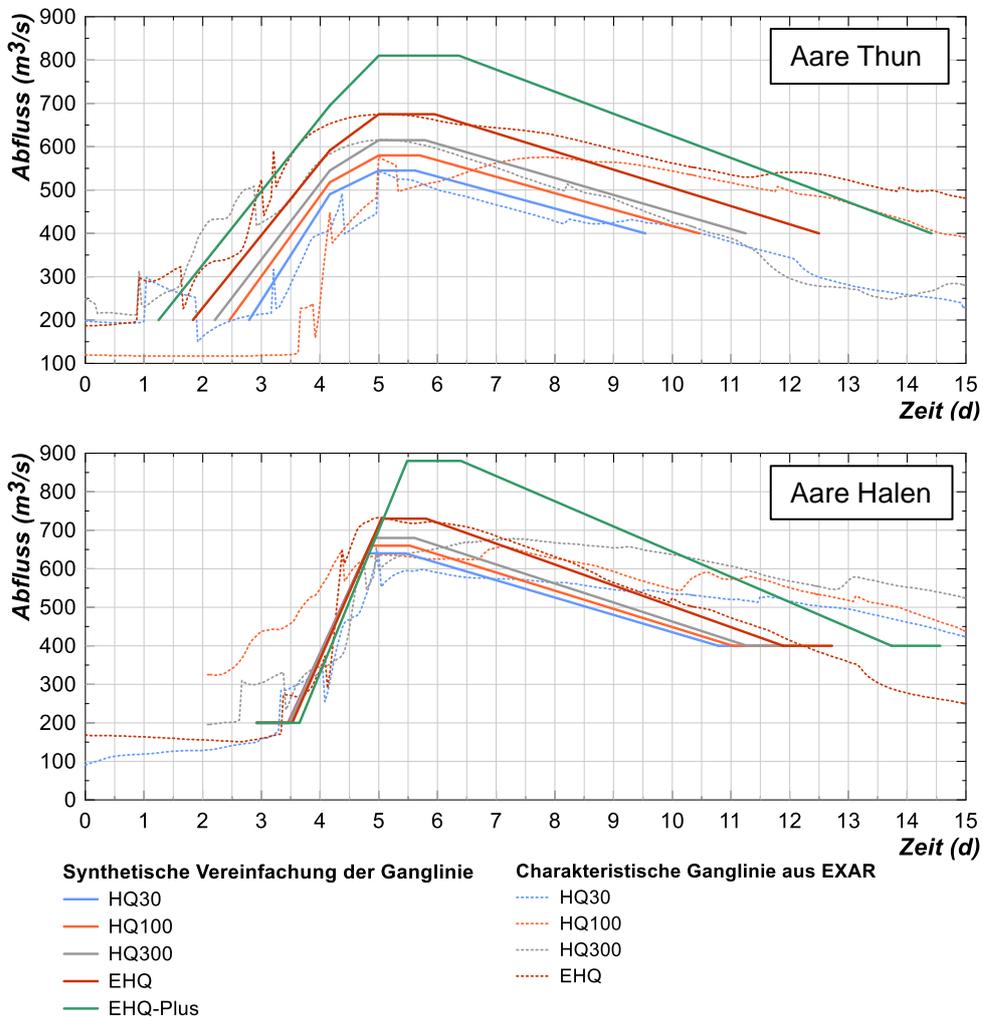


Abbildung 14: Synthetische Zuflussganglinien in der Aare bei den Transferpunkten Thun (oben) und Halen (unten) basierend auf charakteristischen EXAR-Ganglinien (gepunktete Linien).

5.4 Auswertung der Resultate

Für die kartographische Darstellung der Modellresultate wurden die maximalen Fliesstiefen, die maximalen Fließgeschwindigkeiten und die maximale Intensität flächendeckend berechnet und ausgegeben. Dabei wurde für jedes Element der maximale Wert über die gesamte Dauer der Abflussganglinie berechnet. Die benetzte Fläche stellt also eine Umhüllende über das ganze Szenario dar.

5.5 Einordnung der Resultate

In einer Gesamtschau der Überflutungen der spezifischen Wiederkehrperioden HQ100, HQ300, EHQ und der oberen Grenze EHQ-Plus (vgl. Abbildung 15) können folgende Punkte festgehalten werden:

**Ausschnitt 1:
Thun bis Bern** Zwischen Rubigen und der Gürbemündung kommt es bei einem HQ100 zu rechts- und linksseitigen Austritten. Die Überflutungsflächen nehmen mit zunehmendem Abfluss zu. Bei einem EHQ kommt es im Gebiet von Münsingen zu rechtsseitigen Austritten. Bei einem EHQ-Plus treten bereits auf der Höhe von Wichtrach rechtsseitige Austritte auf.

**Ausschnitt 2:
Brügg bis
Solothurn** Im Bereich der Mündung der Alten Aare kommt es bei einem HQ100 zu grossflächigen Überflutungen. Bei zunehmendem Abfluss nehmen die Überflutungsflächen zu, insbesondere im Bereich zwischen Grenchen und Solothurn.

**Ausschnitt 3:
Seeland/Biel** Unterhalb der Saane-Mündung kommt es bei einem HQ100 zu Überflutungen im eingeschnittenen Tal zwischen Golaten und Aarberg. Im unterhalb liegenden Hagneckkanal wird das Kontrollbauwerk für die Entlastung ins Umland (überströmbarer Damm, "Sollbruchstelle") bei einem HQ100 aktiviert. Das Bauwerk ist auf einen Abfluss von 1'640 m³/s dimensioniert [10] – bei einem HQ100 entsteht gemäss EXAR ein Spitzenabfluss von 1'685 m³/s. Bei zunehmenden Abflüssen nimmt die Überflutungsfläche im Umland des Hagneckkanals weiter zu: Bei einem HQ300 wird linksseitig die Fläche zwischen Aarberg und dem Unterwasserkanal KW Kallnach überflutet. Ab einem EHQ kommt es auch rechtsseitig zu Ausuferungen. Bei einem EHQ-Plus wird die rechtsseitige Ebene bis auf die Höhe von Studen überflutet. Das Wasser fliesst anschliessend der alten Aare entlang weiter bis in den Nidau-Büren Kanal.

**Ausschnitt 4:
Emmemün-** Bei einem HQ100 kommt es im Bereich von Wangen a. A. zu beidseitigen Überschwemmungen. Ab einem HQ300 kommt es

**ung bis
Walliswil** im Gebiet von Attisholz zu kleineren Überflutungen. Ab einem
EHQ kommt es rechtsseitig zu grösseren Überflutungsflächen
und zu einer Umströmung der Stauanlage Flumenthal.

**Ausschnitt 5:
Klingnau/Mün-
dungsbereich
Aare - Rhein** Unterhalb der Stauanlage Klingnau kommt es bei einem
HQ100 zu seitlichen Austritten. Ab einem EHQ kommt es
rechtsufrig, im Bereich Klingnau und linksufrig in Kleindöttingen
zu Überströmungen von Siedlungsgebiet. Die Flächen nehmen
bei einem EHQ-Plus beidseitig des Stausees zu, wobei bei
diesem Abfluss auch ein grösserer Teil des Siedlungsgebiets
von Döttingen überschwemmt wird.

**Ausschnitt 6:
Olten bis
Wasserschloss** Zwischen Olten und der Mündung der Limmat gibt es in
mehreren Abschnitten bereits bei einem HQ100 Überflutungen.
Die Überflutungsflächen sind meist in natürlichen Korridoren
und weisen nur ein geringes Schadenpotenzial auf. Mit zuneh-
mendem Abfluss nimmt die Überflutungsfläche zu.

Die Gesamtschau zeigt, dass an zahlreichen Stellen an der Aare zwischen Thun und
Bern Ausuferungen und damit auch grössere Überflutungsflächen entstehen
können. Die Überflutungen entstehen dabei nicht nur bei sehr seltenen Extrem-
ereignissen (EHQ), sondern auch bei Abflüssen der Grössenordnung HQ100 und
HQ300.

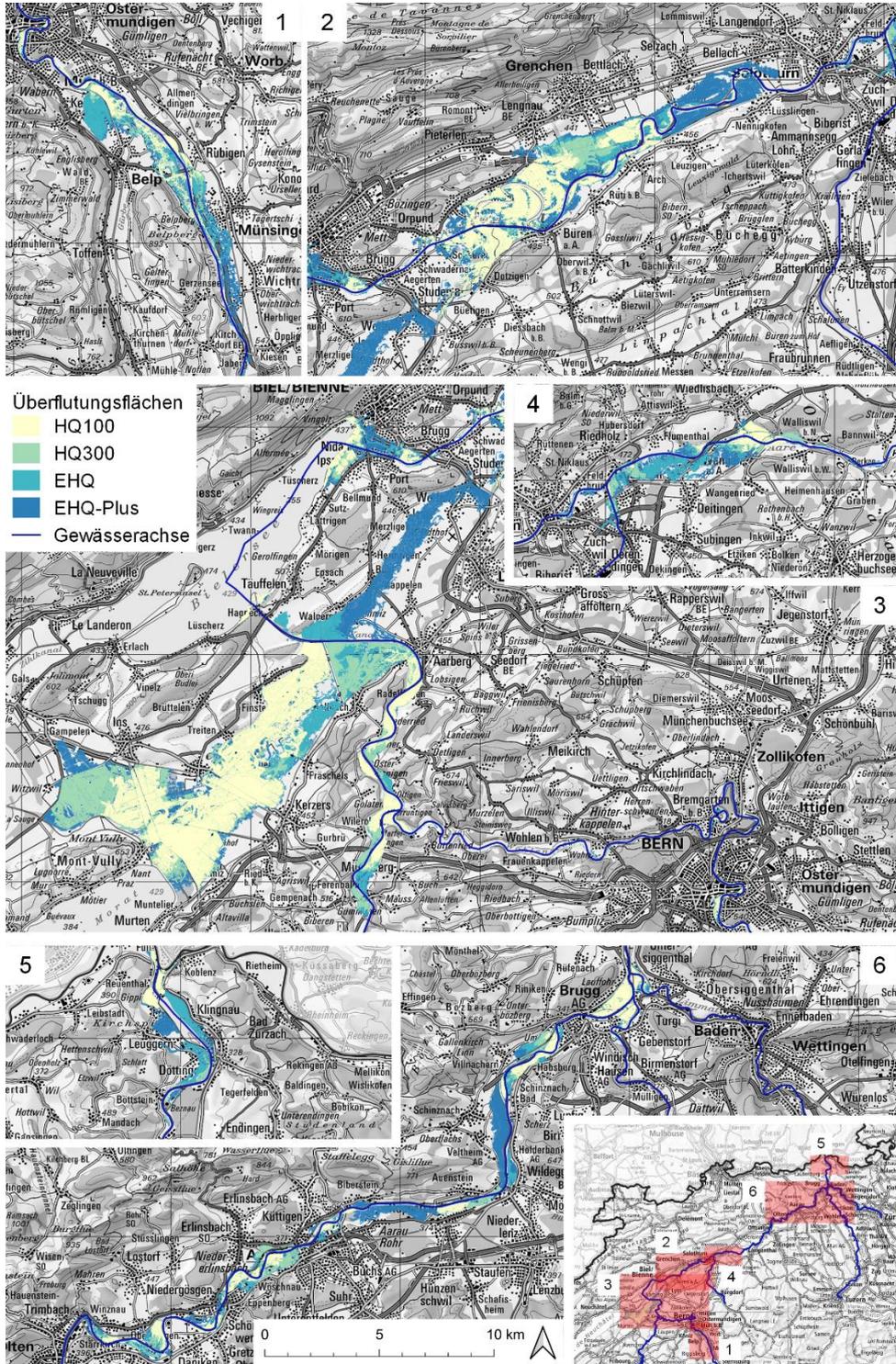


Abbildung 15: Übersicht der berechneten Überflutungsflächen HQ100 bis EHQ-Plus entlang der Aare zwischen Thun und der Mündung in den Rhein. Die Nummerierung entspricht den im Text beschriebenen Abschnitten.

6. Methodik zur Analyse der Schadenausmasse

6.1 Untersuchte Raumeinheiten

6.1.1 Untersuchungsgebiet und Perimeter der Hotspots

Wie bereits vorgängig erwähnt, umfasst der Projektperimeter die Aare auf ihrer gesamten Fliesstrecke zwischen dem Ausfluss aus dem Thunersee bis zu ihrer Mündung in den Rhein. Untersucht wurden alle Bereiche beidseits des Gewässerlaufs, die bei einem extremen Hochwasser der Aare von Überflutungen betroffen sein können.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden ausserdem verschiedene Gebiete ausgeschieden, in denen im Vergleich mit benachbarten Bereichen potenziell markant höhere Überflutungsschäden (berechnet mit dem Schadenausmass) vorliegen. Diese werden nachfolgend «**Hotspots**» genannt und im Anhang separat und detailliert beschrieben.

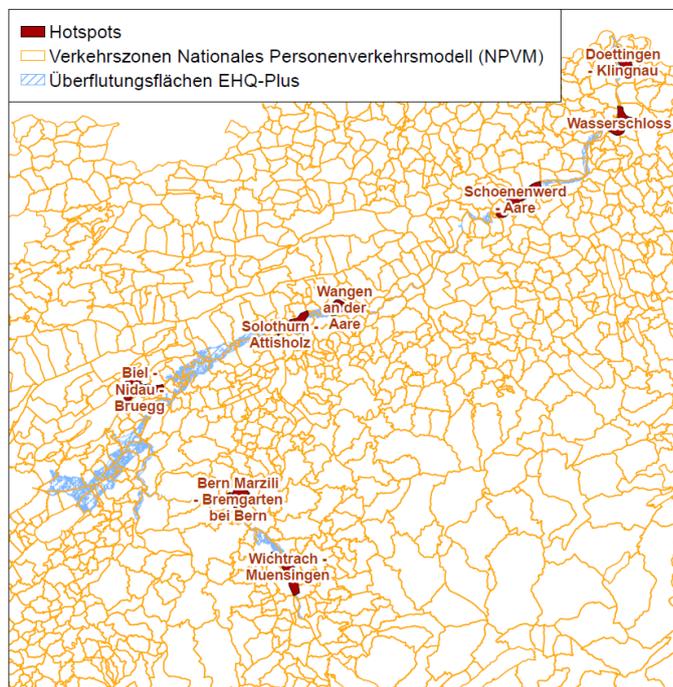


Abbildung 16: Überflutungsflächen, untersuchte Hotspots entlang der Aare und Verkehrszonen des Modells des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE).

6.1.2 Verkehrszonen des Nationalen Personenverkehrsmodells der Schweiz (NPVM)

Das Nationale Personenverkehrsmodell (NPVM) des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE) [30] stellt solide Grundlagen in Bezug auf die zukünftige Verkehrsentwicklung zur Verfügung (weiterführende Informationen im Kapitel 6.2.1).

Die Informationen des NPVM sind auf Ebene Verkehrszone aggregiert. Diese umfassen «...eine Gebietseinheit, im NPVM umgesetzt als georeferenzierte Fläche, die eindeutig einer Schweizer Gemeinde zugeordnet werden kann.» (vgl. [30]).

Die Grenzen der Verkehrszonen entsprechen ausserhalb der dichtbesiedelten und verkehrintensiven Gebiete meistens den Gemeindegrenzen. Bei starken Verkehrsbelastungen und/oder bei Sonderobjekten (Flughäfen, Shoppingcenter usw.), werden die Verkehrszonen hingegen räumlich feiner aufgliedert (siehe 6.2.1).

6.1.3 Berechnung und Visualisierung als Rastergitter

Alle Grunddaten, Berechnungen und Ergebnisse wurden auf einem 50x50-Meter-Raster aggregiert und als Rasterbasis im gesamten Projekt verwendet. Diese räumliche Auflösung erlaubt einen guten Überblick über die Ergebnisse. Ein Beispiel ist in Abbildung 17 dargestellt.

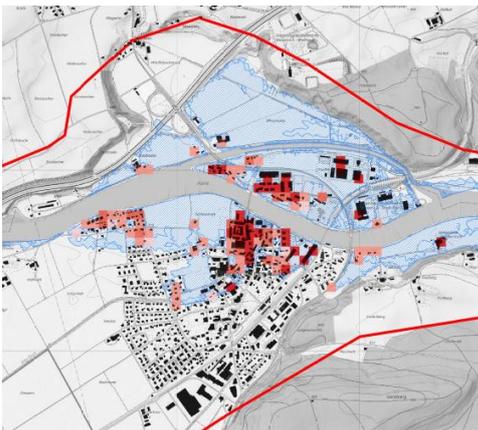


Abbildung 17: Beispiel eines Rastergitters in Bezug auf das heutige Schadenausmass (HQ100) in Wangen an der Aare. Die Rasterauflösung beträgt 50 x 50 Meter.

6.2 Verwendete Modelle

6.2.1 Nationales Personenverkehrsmodell (NPVM)

Das nationale Personenverkehrsmodell NPVM des Bundesamtes für Raumentwicklung [30] dient dazu, das Mobilitätsverhalten von Menschen zu analysieren und zu prognostizieren. Zwecks Erstellung des nachfolgend beschriebenen Modells zur Berechnung der Schadenausmasse wurden die Entwicklung und Verteilung von Bevölkerung und Arbeitsplätzen bis ins Jahr 2040 benötigt. Diese Grundlagen hat das ARE im Rahmen des Projektes «Tool Bevölkerung Beschäftigte (TBB)» [32] erstellt. Die Resultate stehen für knapp 3'000 Verkehrszonen öffentlich zur Verfügung und wurden für die Erstellung der Szenarien in diesem Projekt verwendet.

6.2.2 Modell zur Berechnung der Siedlungsentwicklung (MBS)

Die Wissenschaft setzt sich seit mehreren Jahren mit der Entwicklung von Vorhersagemethoden für die Siedlungsentwicklung auseinander. Die Vorhersagen basierend mehrheitlich auf Szenarien und Modellierungsansätzen, die die Komplexität der Realität möglichst adäquat abbilden sollten.

Im Rahmen dieser Studie wurde für die Berechnung der zukünftigen Siedlungsentwicklung und den Aufbau von möglichen Schadenpotenzialszenarien ein von Schwaab et al. an der ETH Zürich entwickeltes Regressionsmodell angewendet (siehe [24]). Im genannten Modell wurden verschiedene Einflussfaktoren identifiziert, die einen Einfluss auf die Ansiedelung von Wohn- und Erwerbsaktivitäten haben können. Die Korrelation und die Mitwirkungen der Faktoren werden anschliessend anhand einer mathematischen Gleichung abgebildet und bilden die zukünftige Entwicklung in Bezug auf die genannten Faktoren mittels eines Faktors zwischen 0 und 1 ab.

6.2.3 Modell für die Ausweisung der Flächenreserve (MAF)

Die Siedlungsentwicklung ist einer der wichtigsten Treiber in Bezug auf das Schadenausmass, weil sie sich direkt auf das in Zukunft vorhandene Schadenpotenzial auswirkt. Verfügbare Entwicklungsszenarien [1] gehen mehrheitlich davon aus, dass die Schweizer Bevölkerung in den nächsten Jahren zunehmen wird, was einen entsprechenden Flächenbedarf nach sich zieht.

Die Raumplanungspolitik der Schweiz hat aber das Ziel, die Zersiedelung in Grenzen zu halten. Aus diesem Grund werden seit einigen Jahren keine neuen

Bauzonen mehr (oder nur noch unter bestimmten Bedingungen) ausgewiesen. Die steigenden Bedürfnisse an Wohnfläche müssen deshalb möglichst über das bereits eingezonte Bauland gedeckt werden. Verdichtung in Form von Anbauten und Aufstockungen im bestehenden Siedlungsgebiet ist somit zentral, weil sie dazu beiträgt, zumindest einen Teil des zunehmenden Flächenbedarfs der Bevölkerung im Innern des Siedlungsgebietes zu decken [27].

Die Flächenreserven, die innerhalb der Bauzone liegen, können in vier Kategorien eingeteilt werden: innere unbebaute Reserven, Aussenreserven, Geschossflächenreserven sowie bebaute Potenziale [28] (siehe Abbildung 18):

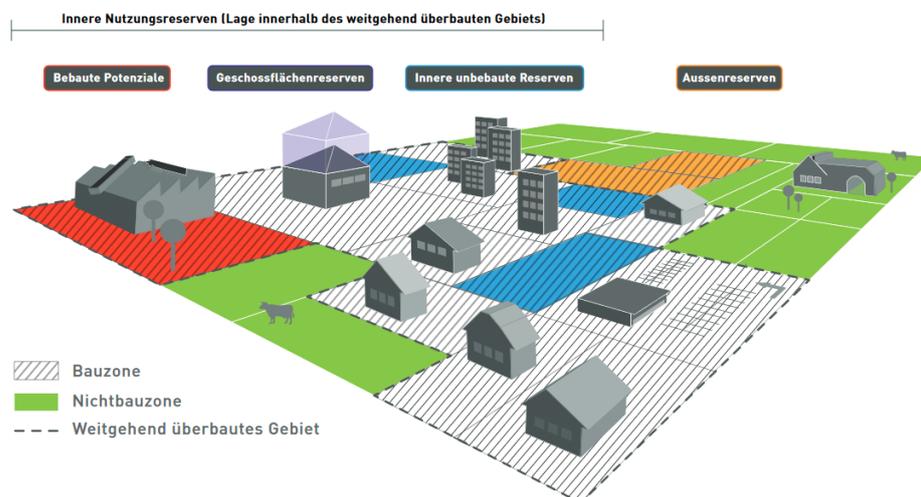


Abbildung 18: Kategorien der Flächenreserve und Angrenzung zwischen innere Nutzungsreserven von Aussenreserven. Quelle: [28].

Für die Identifizierung dieser Flächenreserven wird eine im Jahr 2020 durch das Mobiliar Lab für Naturrisiken der Universität Bern entwickelte Methodik verwendet [29]. Damit können nicht nur die heutigen Flächenreserven ausgewiesen, sondern auch die mögliche zukünftige Überbauung der Bauzonenreserven abgeschätzt werden. Sie basiert auf geometrischen und raumplanerischen Analysen und ermöglicht eine parzellenscharfe Identifizierung der Flächenreserven. Die Resultate des Modells fließen in das Regressionsmodell von Schwaab et al. [24] (vgl. Kapitel 6.2.2) ein. Mit diesem Vorgehen wird sichergestellt, dass die heute propagierte verdichtungsorientierte Raumplanungspolitik in den durchgeführten Analysen zum Schadenausmass berücksichtigt wird.

6.3 Schadenpotenzial und Schadenausmass

6.3.1 Schadenpotenzial und Schadenausmass im Ist-Zustand

Gemäss PLANAT [35] beschreibt das Schadenpotenzial den Schaden, der an Personen, an Sachwerten und an der Landschaft eintreten könnte (hier in Bezug auf Überflutungsereignisse). Um das Schadenpotenzial berechnen zu können, müssen somit Informationen über Menschen und Sachwerte, die sich innerhalb eines bestimmten Perimeters befinden, erhoben werden.

Die wichtigste Quelle bezüglich des Ist-Zustandes des Schadenpotenzials ist das Gebäude- und Wohnungsregister (GWR) des BfS [25]. Es enthält Informationen zu Bauprojekten, Gebäuden, Wohnungen, Gebäudeeingängen und Strassen. Mit Hilfe des GWR können wohnhafte Personen in der gesamten Schweiz punktgenau lokalisiert werden. Die geometrische (GIS-basierte) Überlagerung der wohnhaften Personen mit dem Gebäudemodell der Schweiz (SwissBUILDING^{3D}) ermöglicht die Zuordnung derselben zu einem bestimmten Gebäude. Aus SwissBUILDING^{3D} wurde schliesslich mit Hilfe von GIS-Analysen das Volumen jedes Gebäudes berechnet. Parallel zur automatischen Datenverarbeitung wurden verschiedene Qualitätskontrollen durchgeführt, die die Berücksichtigung von Sonderfällen ermöglichen.

Gleichzeitig erfolgte die Harmonisierung und das Zusammenfügen der kantonalen Nutzungsplanungen in einen einzigen Datensatz. Die anschliessende Zuordnung der Gebäude zu einer bestimmten Bauzone ermöglicht die Anwendung eines zonenspezifischen Kubikmeterpreises bei der Berechnung der Neubauwerte. Dies erfolgte anhand des Regressionsmodells M4 von Röthlisberger et al. [26], dass aufgrund der oberirdischen Gebäudevolumen, der Nutzungszone, in welcher das Gebäude sich befindet und der Funktion des Gebäudes (Wohnnutzung ja/nein) eine gute Abschätzung der Neubauwerte und somit des Schadenpotenzials pro Gebäude ermöglicht. Für die Analysen wurden die Kategorien öffentliche Nutzung, Wohnzone, Zentrumszone, Mischzone, Arbeitszone, übrige Bauzonen und ausserhalb Bauzone berücksichtigt.

Die Anzahl Personen pro Gebäude wird durch die Multiplikation der durchschnittlichen Belegungen pro Gebäudetyp und die Anzahl Wohnungen eines Gebäudes (GWR [22]) berechnet.

Das Schadenpotenzial von Einstellhallen wurde mit der FireGIS-Methode geschätzt. Die Daten der amtlichen Vermessung enthalten Informationen über unterirdische Gebäude. Nicht alle unterirdischen Gebäude sind Einstellhallen. Deshalb wird ein geometrischer Ansatz gewählt, welcher die unterirdischen Gebäude herausfiltert, die

voraussichtlich keine Einstellhallen sind. Anschliessend wird angenommen, dass die Einstellhalle mit einer flächenskalierten Anzahl Fahrzeuge belegt ist. Der Wert der Fahrzeuge wird auf den Wert der Einstellhalle aufsummiert.

Das Flussdiagramm in Abbildung 19 zeigt das beschriebene Verfahren bildhaft.

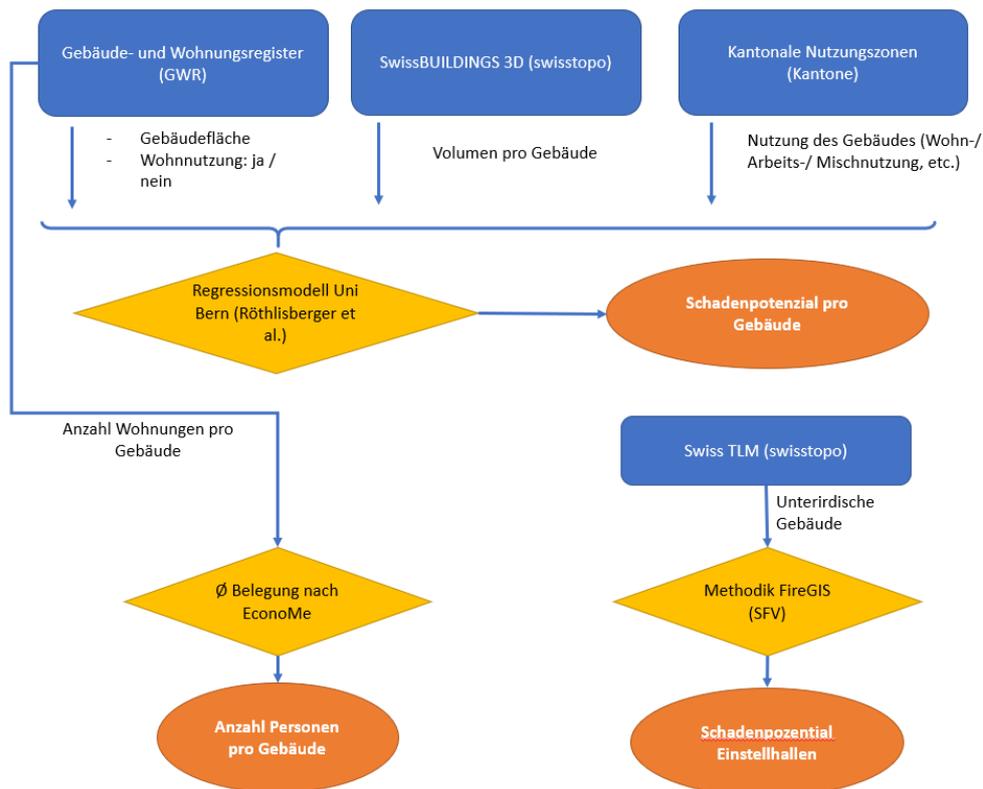


Abbildung 19: Flussdiagramm zur Methodik der Ermittlung des heutigen Schadenpotenzials pro Rasterzelle.

Mit dem beschriebenen Vorgehen liegen damit Angaben zur Anzahl Personen und zum gesamten Gebäudewert im untersuchten Gebiet, sprich zum Schadenpotenzial pro Gebäude im Ist-Zustand vor. Die Überlagerung dieser Parameter mit den Prozessräumen der Überflutungsmodellierungen erlaubt anschliessend Rückschlüsse zu den Schäden pro untersuchtem Ereignis

6.3.2 Schadenpotenzial und Schadenausmass im Jahr 2040

6.3.2.1 Siedlungsentwicklung

Für die Modellierung der Siedlungsentwicklung für das Jahr 2040 wurden zwei Modelle verwendet:

1. das Regressionsmodell von Schwaab et al. [24] (vgl. Kapitel 6.2.2)
2. der Modellierungsansatz für die Identifizierung der Flächenreserven (Bauzonenreserven) des Mobiliar Lab für Naturrisiken [29] (vgl. Kapitel 6.2.3), gekoppelt angewendet.

Regressionsmodell nach Schwaab et al.

Gebiete mit einem niedrigen Attraktivitätsfaktor haben eine geringe Wahrscheinlichkeit, verdichtet zu werden und zu wachsen. Gebiete mit einem hohen Attraktivitätsfaktor haben dagegen eine hohe Wahrscheinlichkeit, in Zukunft besiedelt zu werden.

Modell zur Identifizierung der Bauzonenreserve (MobiLab)

In einem zweiten Schritt wurde das Modell zur Ermittlung von **Flächenreserven** [29] angewendet. Mit diesem wurden die inneren unbebauten Reserven (Baulücken) sowie die Aussenreserven identifiziert. Die identifizierten Flächenreserven wurden anschliessend mit den Ergebnissen des Regressionsmodells von Schwaab et al. [24] überlagert. Gebiete, die freie Flächenreserven aufweisen, werden mit einem Attraktivitätsfaktor von 0.9 versehen und erscheinen damit als besonders attraktiv für eine zukünftige Besiedlung. Für Gebiete, die über keine Flächenreserven verfügen, wird weiterhin der bereits berechnete Attraktivitätsfaktor verwendet.

In einem letzten Schritt wurden die Ergebnisse mit den modellierten Überflutungskarten überlagert. In stark gefährdeten Gebieten (hohe Intensitäten) gelten bereits heute bauliche oder raumplanerische Einschränkungen, die eine Bebauung der Grundstücke erschweren oder verunmöglichen. Den Flächen, die hohe Intensitäten aufweisen, wurde deshalb ein niedriger Attraktivitätsfaktor von 0.1 zugeordnet.

6.3.2.2 Gesamtattraktivität einer Verkehrszone 2040 auf Basis der Bevölkerungs- und Erwerbsbevölkerungsentwicklungsszenarien

Mittels der berechneten Attraktivitätsfaktoren wurde für jede Rasterzelle eine gewichtete **Abschätzung der Zunahme der Bevölkerung und der Arbeitsplätze**

vorgenommen. Grundlage für die Abschätzung war das Tool Bevölkerung Beschäftigte (TBB) [32] des ARE, dass - wie bereits erwähnt - eine Abschätzung der räumlichen Entwicklung und Verteilung von Bevölkerung und Arbeitsplätzen bis 2040 auf der Ebene von Verkehrszonen enthält.

Um die Bevölkerung und die Arbeitsplätze korrekt auf die Gebiete bzw. die Verkehrszonen zu verteilen, wurden in einem ersten Schritt die Attraktivitätsfaktoren jeder Rasterzelle auf Ebene der Verkehrszone addiert. Die Summe ergibt die **Gesamtattraktivität einer Verkehrszone**. Mit Hilfe des Attraktivitätsfaktors jeder Rasterzelle und der Gesamtattraktivität einer Verkehrszone konnte anschliessend das Attraktivitätsverhältnis jeder Rasterzelle im Verhältnis zur Gesamtattraktivität der Verkehrszone ermittelt werden. Dieses Verhältnis ermöglicht die attraktivitätsgewichtete Verteilung von Bevölkerung und Arbeitsplätzen auf die Rasterzellen. Da sich die Wohnbevölkerung und die Beschäftigten nicht in den gleichen Gebieten konzentrieren, wurde eine zonenspezifische Verteilung beider Grössen vorgenommen: Den Wohnzonen wurden nur Einwohner, den Mischzonen 50 % Einwohner und 50 % Arbeitsplätze und den Gewerbegebieten ausschliesslich Arbeitsplätze zugeordnet.

6.3.2.3 Zunahme des Schadenpotenzials bis 2040

Mit den oben beschriebenen Verfahren konnte der Bevölkerungs- und Arbeitskräftezuwachs jeder Rasterzelle bis 2040 abgeschätzt werden. Diese Informationen wurden direkt für die **personenbedingte Zunahme des Schadenpotenzials 2040** verwendet. Der daraus resultierende Anstieg der Immobilienwerte wurden auf Basis dieser Informationen berechnet. Für das **Schadenpotenzial der Sachwerte 2040** wurde angenommen, dass dieses proportional zur Bevölkerungs- und Erwerbsentwicklung 2020 – 2040 ansteigt. Das Schadenpotenzial für Sachwerte für das Jahr 2040 errechnet sich daher durch Multiplikation des heutigen Schadenpotenzials für Sachwerte mit dem anteilmässigen Anstieg von Bevölkerung und Arbeitsplätzen in der Periode 2020 bis 2040.

6.3.2.4 Objektschutzmassnahmen

Das Mobiliar Lab für Naturrisiken hat im Jahr 2019 aufgrund einer gross angelegten Umfrage [33] eine Abschätzung der Anteile baulicher Objektschutzmassnahmen (OSM) gegen Überschwemmung an Gebäuden in den Hochwassergefahrenzonen erstellt. Die befragten Personen mussten im Rahmen der Studie abschätzen, welchen Anteil an Gebäuden heute und im Jahr 2040 über Objektschutzmassnahmen verfügen bzw. verfügen werden. Grundsätzlich kann davon ausgegangen

werden, dass wegen der zukünftigen Bautätigkeit der Anteil an OSM zunehmen wird. Die Resultate aus der Studie flossen wie folgt in unsere Modelle ein:

- Der derzeitige Anteil baulicher Objektschutzmassnahmen gegen Überschwemmung an Gebäuden im **Szenario OSM-heute**:
 - Gelber Gefahrenbereich: 2 %
 - Blauer Gefahrenbereich: 11 %
 - Roter Gefahrenbereich: 10 %
- Der Anteil baulicher Objektschutzmassnahmen gegen Überschwemmung im Jahr 2040 an Gebäuden im **Szenario OSM-2040**:
 - Gelber Gefahrenbereich: 2.5 %
 - Blauer Gefahrenbereich: 22 %
 - Roter Gefahrenbereich: 26 %

Die Studienautoren [33] gingen davon aus, dass die gesetzlichen Grundlagen, die die Installation von Objektschutzmassnahmen fordern, in Zukunft unverändert bleiben. Die oben genannten Werte zeigen u.a., dass in den gelben Gefahrengebieten deutlich weniger Objektschutzmassnahmen realisiert sind und in Zukunft realisiert werden, als dies in blauen oder roten Gebieten der Fall ist. Dieser Umstand ist insofern bemerkenswert, als dass insbesondere im gelben Gefahrenbereich infolge der geringen Prozessintensität Objektschutzmassnahmen sehr wirksam und kostengünstig sein können.

Um die Wirkung weitergehender OSM aufzeigen zu können, wurde ein zusätzliches Objektschutzszenario **Szenario OSM-2040-Plus** erstellt. Für die Erarbeitung dieses Szenarios wurde angenommen, dass der Anteil baulicher Objektschutzmassnahmen im Jahr 2040 in gelben Gefahrenbereichen gleich hoch ist wie in den blauen Gefahrenbereichen. Die Gefahrenbereiche beziehen sich dabei auf die aktuellen, d.h. heutigen Gefahrengrundlagen, vgl. Kapitel 6.3.2.6. Weiter wurde angenommen, dass sich aufgrund der steigenden Anforderungen in Bezug auf die energetische Sanierung von Gebäuden die Geschwindigkeit der Umbautätigkeiten und damit auch der Umsetzung von Objektschutzmassnahmen verdoppeln. Dies wirkt sich auf die Objektschutzanteile wie folgt aus:

- Der Anteil baulicher Objektschutzmassnahmen gegen Überschwemmung an Gebäuden im Jahr im **Szenario OSM-2040-Plus**:
 - Gelber Gefahrenbereich: 23 %
 - Blauer Gefahrenbereich: 32 %
 - Roter Gefahrenbereich: 42 %

6.3.2.5 Zuverlässigkeit der Objektschutzmassnahmen

Objektschutzmassnahmen (OSM) werden in der Regel auf ein bestimmtes Hochwasserereignis dimensioniert. Die Dimensionierungsgrössen und Schutzziele können von Kanton zu Kanton variieren. Bei Überschreitung des Dimensionierungsabflusses ist davon ausgehen, dass die Wirkung der OSM abnimmt und ein Teil der umgesetzten Massnahmen versagt. Um diesen Effekt in den Modellen zu berücksichtigen, wurde angenommen, dass alle OSM bis HQ300 vollständig wirksam sind. Gebäude, die durch OSM geschützt sind, werden daher bis HQ300 kaum Schäden aufweisen. Weiter wurde angenommen, dass die Wirksamkeit von OSM zwischen HQ300 und EHQ um 50 % und zwischen EHQ und EHQ-Plus um 90 % abnimmt, d.h. die Wirkung der OSM ist nur noch minimal.

6.3.2.6 Gefahregrundlagen

Für die Berechnung der Schadenausmasse 2040 wurde davon ausgegangen, dass die heute gültigen Gefahrenkarten auch im Jahr 2040 noch Bestand haben. Es wurde deshalb darauf verzichtet, hypothetische Intensitäts- und Gefahrenkarten für das Jahr 2040 zu kompilieren. Es ist zu erwarten, dass diese Annahme eher zu einer Überschätzung des Schadenausmasses 2040 führt. Weiter wurde auch die Wirkung von Objektschutzmassnahmen auf der Basis der heute gültigen Gefahrenkarten berechnet. Dies bewirkt, dass Gebäude, die heute noch keiner Gefährdung unterliegen, aber gemäss den in dieser Studie modellierten, abflussbasierten Intensitätskarten in Zukunft betroffen sein können, keinen Objektschutz aufweisen und damit einen höheren Schaden erleiden als Objekte, die bereits heute in Gefahrengebieten liegen und zu den in Kapitel 6.3.2.4 angegebenen Anteilen durch Objektschutzmassnahmen geschützt werden.

6.3.2.7 Berechnung des Schadenausmasses

Gemäss den Anforderungen des Bundesamtes für Umwelt [34] erfolgte die Ermittlung der Schadenausmasse durch die Überlagerung der Gefahregrundlagen (Intensitätskarten gemäss heutigem Stand) mit dem Schadenpotenzial. Es wurden individuelle und kollektive Schadenausmasse (Wohnbevölkerung und Beschäftigte) sowie Schadenausmasse für Gebäude berücksichtigt. Für weiterführende methodische Informationen sei auf [34] verwiesen.

6.3.2.8 Zunahme des Schadenausmasses bis 2040

Die mögliche Zunahme des Schadenausmasses bis zum Jahr 2040 wird durch die Veränderung des Schadenpotenzials (siehe Kapitel 6.3.2) und die Veränderung des Hochwasserabflusses im Rahmen der untersuchten Bandbreite des Klimawandels (siehe Kapitel 5) verursacht. Die Wirkung der Einflussfaktoren auf das resultierende Schadenausmass kann der Beispielgrafik in Abbildung 20 wie folgt entnommen werden:

- **Punkt 1 in Abbildung 20:** Auf der Y-Achse kann der Einfluss der Veränderung des Schadenpotenzials 2020 - 2040 auf das relative Schadenausmass abgelesen werden. Im Lesebeispiel in Abbildung 20 kann sich das relative Schadenausmass durch das Signal der Schadenpotenzialänderung um etwa 15 % erhöhen.
- **Punkt 2 in Abbildung 20:** Auf der X-Achse kann die Bandbreite der potenziellen Abflussveränderungen gemäss Gesamtsensitivitätsanalyse alle RCPs abgelesen werden. Aus der zugrundeliegenden Abschätzung der Gesamtsensitivität (siehe Kapitel 4) sind der Median, die 10%-, 25%-, 75%- und 90%-Quantile sowie die untere und obere Grenze gezeigt.
- **Punkt 3 in Abbildung 20:** Der Einfluss der Abflussänderung innerhalb eines Basisszenarios (z. B. Szenario 2020 - OSM2020) kann durch die Verschiebung des Abflusswertes für jeden Punkt auf der Linie abgelesen werden. Die Einbeziehung eines weiteren Basisszenarios (z. B. Szenario 2040 - OSM2040) ermöglicht eine zweidimensionale Betrachtung des Einflusses der beiden Einflussfaktoren (Schadenpotenzial, Abfluss) auf die Resultierenden relative Schadenausmasses auslesen (Punkt 3 in Abbildung 20).

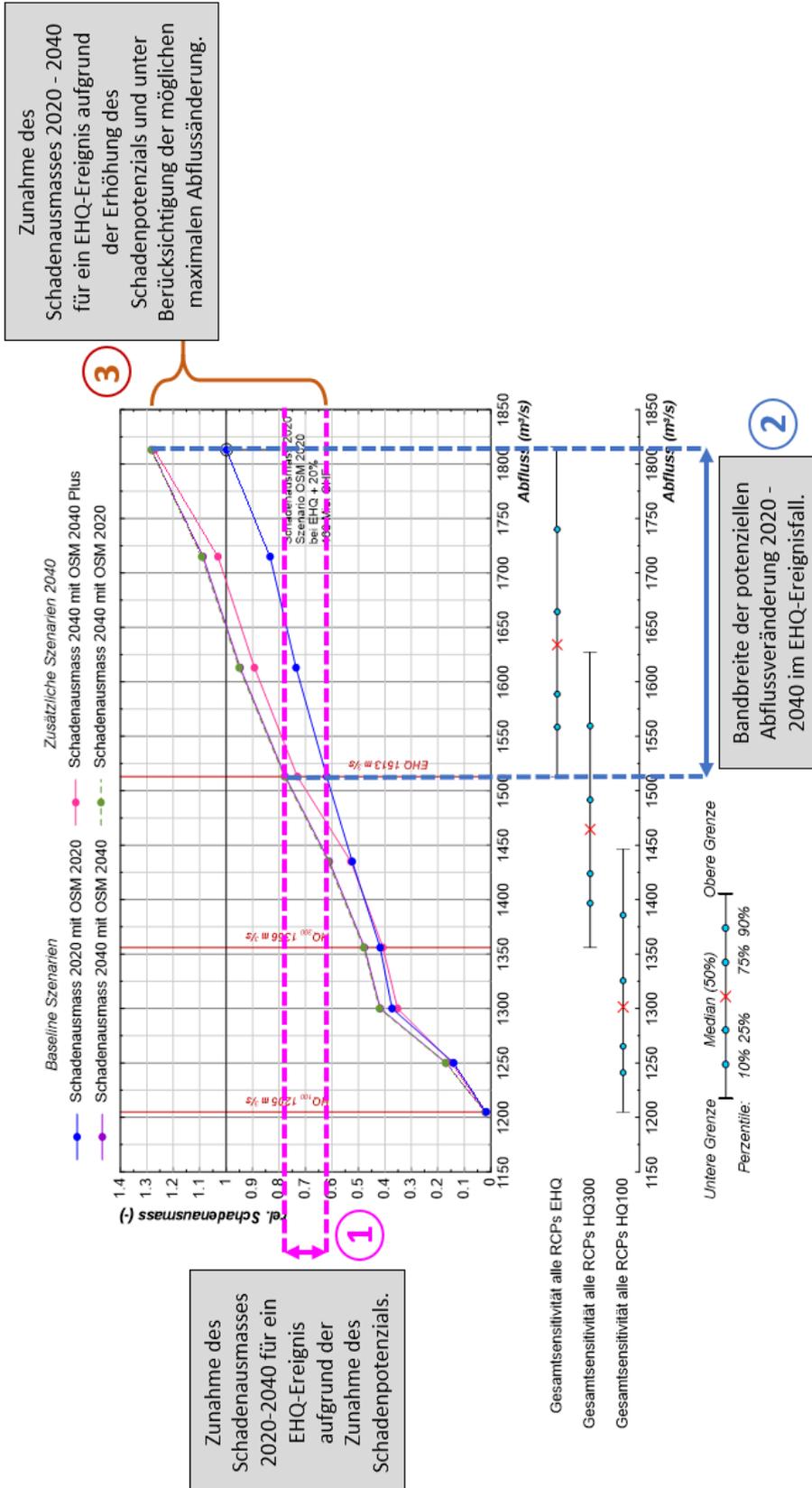


Abbildung 20: Lesebeispiel für die Grafik des relativen Schadenmasses für bestimmte Abflusswerte mit Angabe der Wiederkehrperioden aus EXAR für den Ist-Zustand (2020) und die Klimasensitivität unter den in Kapitel 4.2 definierten Annahmen. Perzentile und Median stellen keine Prognosen dar, sondern nur verschiedene mögliche Werte in der Bandbreite von «was-wäre-wenn»-Szenarien.

6.3.3 Schadenpotenzial und Schadenausmass im Jahr 2100

6.3.3.1 Siedlungsentwicklung

Für die Erstellung des Szenarios 2100 wurden folgende Annahmen getroffen:

- **Gleichbleibende Baulandreserve:** Die für das Szenario 2040 berechneten verfügbaren Flächen der Baulandreserve verändern sich bis zum Jahr 2100 nicht.
- **Gleichbleibende Attraktivitätsfaktoren:** Die Wohn- und Erwerbsattraktivitätsfaktoren der Rasterzellen bleiben gleich wie im Szenario 2040.

Das **Wachstum der Bevölkerung** und der **Erwerbsbevölkerung** musste hingegen für das Szenario 2100 neu geschätzt werden. Die Grundlagen und das Vorgehen werden in den nächsten Kapiteln erläutert.

6.3.3.2 Bevölkerungs- und Erwerbsbevölkerungsentwicklungsszenarien 2100

Das Bundesamt für Statistik (BfS) hat im Jahr 2020 **Bevölkerungsentwicklungsszenarien** [22] für die Schweiz erarbeitet. Drei Grundszenarien wurden berechnet:

- Das **Referenzszenario** (A-00-2020) schreibt die Entwicklungen der letzten Jahre fort.
- Das **«hohe» Szenario** (B-00-2020) beruht auf einer Kombination von Hypothesen, die ein stärkeres Bevölkerungswachstum zur Folge haben.
- Das **«tiefe» Szenario** (C-00-2020) kombiniert Hypothesen, mit denen das Bevölkerungswachstum geringer ausfällt.

Die Ergebnisse dieser drei Szenarien sind auf jährlicher Basis bis ins Jahr 2070 für die gesamte Schweiz verfügbar und in Abbildung 21 abgebildet (siehe Referenzszenarien, ausgezogene Linien). Die mittels polynomialer Regressionsanalyse abgeschätzte Bevölkerungsentwicklung für das Jahr 2100 ist mit gestrichelten Linien dargestellt. Sie entspricht einer Extrapolation auf Basis der berechneten Werte bis 2070. Es ist zu beachten, dass die Ergebnisse mit hohen Unsicherheiten verbunden sind.

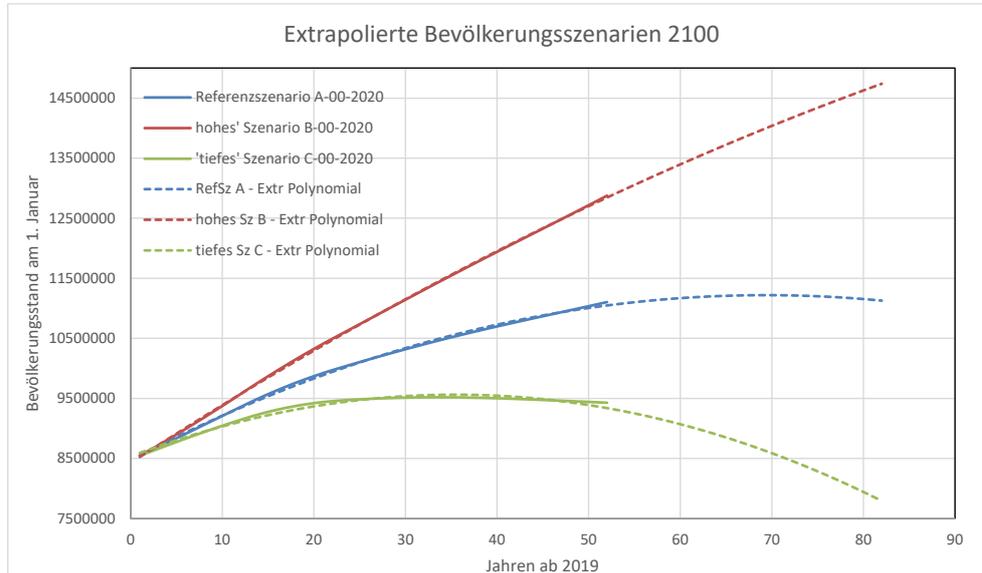


Abbildung 21: Entwicklungsszenarien der Wohnbevölkerung für die Jahre 2020 – 2070 und deren Extrapolation bis ins Jahr 2100. Verändert nach [22].

In Rahmen der Bevölkerungsentwicklungsszenarien [22] hat das BfS ausserdem Entwicklungsszenarien zur **Erwerbsbevölkerung** erarbeitet. Die Schätzung der Erwerbsbevölkerung stützt sich auf projizierten Erwerbsquoten und der Bevölkerungsentwicklung ab. Die geschätzte Erwerbsbevölkerung ergibt sich, indem die beiden vorherigen Abschätzungen kombiniert werden. Auch für diesen Parameter wurden drei Grundscenarien berechnet: Ein Referenzszenario sowie ein "hohes" und ein "tiefes" Szenario, die jeweils Annahmen kombinieren, die für das Wachstum der Erwerbsbevölkerung günstiger oder ungünstiger sind. Dank einer einfachen polynomialen Regressionsfunktion kann auch hier die Erwerbsbevölkerung im Jahr 2100 prognostiziert werden, wenn auch mit grossen Unsicherheiten.

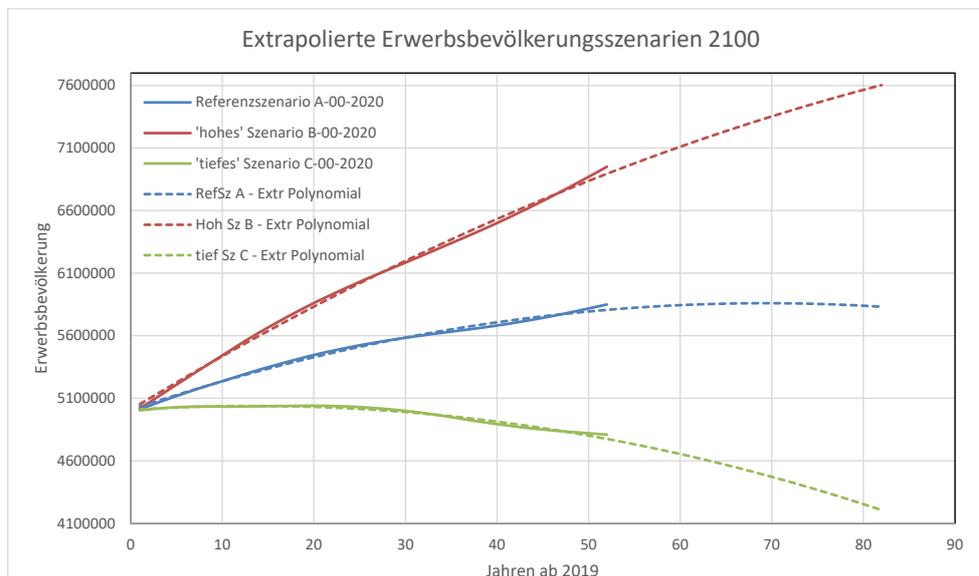


Abbildung 22: Entwicklungsszenarien der Erwerbsbevölkerung für die Jahre 2020 – 2070 und deren Extrapolation bis ins Jahr 2100. Verändert nach [22].

6.3.3.3 Zunahme Schadenpotenzial

Anschliessend an die Abschätzung der Zunahme der Bevölkerung und der Erwerbsbevölkerung auf Ebene Schweiz wurde bestimmt, wie sich diese Zunahme für das Jahr 2100 auf die Ebene des Untersuchungsperimeters herunterskalieren lässt.

Basis bildete das Verhältnis dieser Parameter auf Ebene Schweiz für die Jahre 2040 (CH_{2040}) und 2100 (CH_{2100}). Mit der Anwendung des Faktors $p = CH_{2100}/CH_{2040}$ wird propagiert, dass der Projektperimeter bis ins Jahr 2100 das gleiche relative Wachstum aufweist wie die gesamte Schweiz.

Die Berechnung des Wachstums jeder Verkehrszone (das heisst einer Teilfläche des Projektperimeters) für das Jahr 2100 erfolgte schliesslich durch Multiplikation des normalisierten verkehrszonenspezifischen heutigen Wachstums (2020 – 2040) mit dem erläuterten Verhältnisfaktor p . Mit dem beschriebenen Verfahren war es möglich, das Wachstum von Bevölkerungs- und Erwerbsbevölkerung in jeder Verkehrszone und auch auf Rasterzellenebene zu berechnen.

6.3.3.4 Gefahregrundlagen im Jahr 2100

Wie aus den Überflutungsmodellierungen (vgl. Kapitel 4) ersichtlich ist, werden sich die Überschwemmungsgebiete bis im Jahr 2100 mit recht hoher Wahrscheinlichkeit verändern. Die Erstellung der Gefahrenkarten in den Schweizer Gemeinden fand aber mehrheitlich im Zeitraum der Jahre 2000 bis 2018 statt. Gefahrenkartenrevisionen werden in der Regel frühestens alle 10 bis 15 Jahre durchgeführt. Diverse Gemeinden, die die Erstellung der Gefahrenkarte früh an die Hand nahmen, weisen bereits eine revidierte Gefahrenkarte auf oder werden diese demnächst revidieren. Es ist deshalb davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren und Jahrzehnten verschiedentlich Gefahrenkartenrevisionen erfolgen werden. Dies wird voraussichtlich einen bedeutenden Einfluss auf die Schadenssituation sowie auf die Strategien im Umgang mit potenziellen Hochwasserschäden haben.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden für das Szenario 2100 neue Gefahregrundlagen auf Basis der modellierten Intensitätskarten kompiliert und ins Modell zur Berechnung der Schadenausmasse eingespeist.

6.3.3.5 Objektschutzmassnahmen

Laut dem Mobiliar-Lab für Naturrisiken werden Schweizer Gebäude im Durchschnitt alle 95 Jahre umgebaut [33]. Bis zum Jahr 2100 sollten somit rund 84 % der bestehenden Gebäude umgebaut worden sein. Befinden sich diese Gebäude in einem blauen oder roten Gefahrenbereich, ist damit zu rechnen, dass sie im baurechtlichen Verfahren zur Umsetzung von Objektschutzmassnahmen verpflichtet werden. Befinden sie sich hingegen in einem gelben Gefahrenbereich, wird davon ausgegangen, dass ein nur kleiner Teil der Eigentümer auf freiwilliger Basis Objektschutzmassnahmen ergreifen wird. Basierend auf den Richtwerten gemäss [33] wurden folgende Objektschutzanteile für Umbauten und Neubauten in den verschiedenen Gefahrenbereichen für das Jahr 2100 geschätzt:

- Der Anteil baulicher Objektschutzmassnahmen gegen Überschwemmung an Gebäuden im Jahr 2100 im **Szenario OSM-2100**:
 - Gelber Gefahrenbereich: 3.5 %
 - Blauer Gefahrenbereich: 54 %
 - Roter Gefahrenbereich: 75 %

Zusätzlich wurde, wie für das Jahr 2040, ein Szenario «Plus» festgelegt (siehe hierzu Kapitel 6.3.2.4). Dieses kann bezüglich der Annahmen zu den Objektschutzmassnahmen wie folgt definiert werden:

- Der Anteil baulicher Objektschutzmassnahmen gegen Überschwemmung an Gebäuden im Jahr 2100 im **Szenario OSM-2100-Plus**:
 - Gelber Gefahrenbereich: 53 %
 - Blauer Gefahrenbereich: 62%
 - Roter Gefahrenbereich: 87 %

6.3.3.6 Zuverlässigkeit der Objektschutzmassnahmen

Bezüglich der Wirkung der Objektschutzmassnahmen gelten die gleichen Überlegungen wie für das Jahr 2040 (siehe Kapitel 6.3.2.5).

6.3.3.7 Zunahme des Schadenausmasses bis 2100

Die Methodik zur Berechnung des Schadenausmasses im Jahr 2100 entspricht der in Kapitel 6.3.2.6 beschriebenen Methodik. Das in Kapitel 6.3.2.8 vorgestellte Lesebeispiel gilt auch für die Analysen des Szenarios - 2100.

7. Resultate

Das gesuchte zukünftige Schadenausmass leitet sich aus der Entwicklung der Abflüsse, der daraus folgenden Entwicklung der Überflutungsflächen sowie der Kombination derselben mit dem Schadenpotenzial ab.

7.1 Entwicklung der Abflüsse heute – 2040 – 2100

Die Abschätzung der Klimasensitivität (vgl. Kapitel 4.2) wurde anhand von verschiedenen Annahmen durchgeführt. Die Auswertung der projizierten Veränderungen in mesoskaligen Teileinzugsgebieten der Aare (vgl. Abbildung 8) zeigt bei Betrachtung aller Modellketten und RCPs eine Tendenz zu leicht zunehmenden Hochwasserabflüssen. Der Median für das HQ30 über alle Teileinzugsgebiete liegt bei einer Erhöhung der Hochwasserspitzen bei rund 8 % für die Periode 2025 – 2054, was als Grössenordnung für das Szenario 2040 übernommen wird. Insgesamt wird die Klimasensitivität 2040 im Bereich zwischen einer unveränderten Situation (untere Grenze) und einer Zunahme von 20 % (obere Grenze, vgl. Kapitel 4.2) untersucht.

Je nach Abschnitt an der Aare kann eine angenommene Zunahme der Hochwasserspitzen um 8 % zu deutlich höheren Schadenausmassen führen, da

bestehende Schutzbauwerke nicht für solche Abflüsse dimensioniert wurden. Unter diesen Annahmen nimmt auch das durch den Klimawandel bedingte Schadenausmass in Zukunft tendenziell zu.

Für die Szenarien 2100 bestehen grosse Unsicherheiten in der Entwicklung der globalen Treibhausgasemissionen sowie den daraus folgenden Konsequenzen für das Hochwassergeschehen. Diese Unsicherheiten sind so gross, dass sinnvolle Bandbreiten oder Trends der Klimasensitivität nicht abgeleitet werden können.

7.2 Entwicklung des Schadenpotenzials heute – 2040 – 2100

Die modellierte Zunahme des Schadenpotenzials bis 2040 im gesamten Untersuchungsgebiet beträgt rund 14 % (+ 4,9 Milliarden CHF). Für alle untersuchten Hotspots wird bis 2040 eine relative Zunahme des Schadenpotenzials um +5 % (Hotspot Biel - Nidau - Brugg) bis +27.5 % (Hotspot Wasserschloss) berechnet (siehe Tabelle 1). Die absolute Zunahme des Schadenpotenzials bewegt sich zwischen 0.1 Mia. CHF (Hotspot Wangen an der Aare) und 0.6 Mia. CHF (Hotspot Solothurn – Attisholz und Schönenwerd - Aarau). Die regionalen Unterschiede in der Zunahme des Schadenpotenzials sind auf die regionale Attraktivität, die Flächenreserven, die Gefährdungssituation sowie die geschätzte Zunahme der Bevölkerung und der Erwerbstätigen zurückzuführen (siehe Kapitel 6.3.2) und werden im Anhang 4 für jeden Hotspot detailliert erläutert.

Tabelle 1: Schadenpotenzial 2020 und 2040 für den gesamten untersuchten Perimeter (acht Hotspots) und ausserhalb der Hotspot-Perimeter.

Hotspot	Schadenpotenzial [Mia. CHF] und Schadenpotenzial als Anteil des gesamten Schadenpotenzials [%]		Absolute Zunahme [Mia. CHF]	Relative Zunahme [%]
	2020	2040		
Gesamt	34.8 (100 %)	39.7 (100 %)	4.9	14
Wichtrach-Münsingen	2.2 (6.3 %)	2.6 (6.7 %)	0.4	20
Bern Marzili – Bremgarten bei Bern	2.5 (7.2 %)	2.8 (7 %)	0.3	11.5
Biel – Nidau - Brugg	7.0 (20.1 %)	7.4 (18.5 %)	0.4	5
Solothurn - Attisholz	2.3 (6.6 %)	2.9 (7.2 %)	0.6	24
Wangen an der Aare	1.4 (4 %)	1.5 (3.9 %)	0.1	8
Schönenwerd-Aarau	3.2 (9.2 %)	3.8 (9.6 %)	0.6	19
Wasserschloss	1.7 (4.9 %)	2.2 (5.4 %)	0.5	27.5

Döttingen - Klingnau	1.9 (5.5 %)	2.2 (5.5 %)	0.3	17.2
Ausserhalb der Hotspots	12.6 (36.2 %)	14.4 (36.3 %)	1.8	14

Der Anteil der einzelnen Hotspots am Gesamtschadenpotenzial kann ebenfalls Tabelle 1 entnommen werden. Der Hotspot Biel - Nidau - Brugg stellt mit einem Anteil am Gesamtschadenpotenzial von 20.1 % (Stand Schadenpotenzial 2020) die mit Abstand bedeutendste Konzentration von Schadenpotenzial im Untersuchungsgebiet dar. Die parallele Betrachtung des Anteils der einzelnen Hotspots am gesamten Schadenpotenzial mit der relativen Zunahme des Schadenpotenzials ermöglicht es, jeder Schadenpotenzialzunahme eine Gesamtgewichtung zu geben. Das Wachstum des Schadenpotenzials in Biel ist anteilmässig klein (+5 %), das absolute Wachstum jedoch eher gross (+0.4 Mia. CHF). Innerhalb des Hotspot-Perimeters befinden sich ausserdem nur 2/3 des gesamten Schadenpotenzials des Hotspots. Das restliche Drittel befindet sich ausserhalb des Hotspot-Perimeters. Weitere Gebiete mit höherem Schadenpotenzial, die nicht als Hotspots identifiziert wurden, sind in Abbildung 23 zu erkennen.

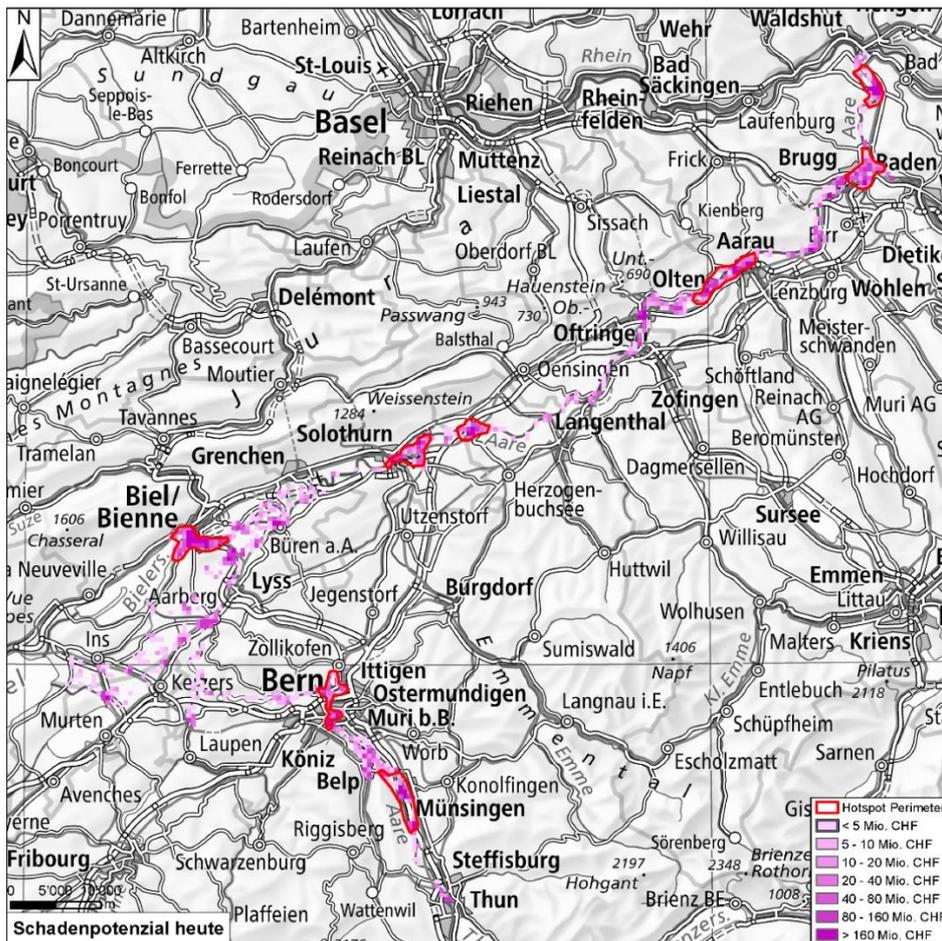


Abbildung 23: Heutiges Schadenpotenzial im gesamtes Untersuchungsgebiet. Die verwendeten Hotspots sind rot markiert. Rasterauflösung: 500 x 500 Meter.

Abbildung 24 zeigt die erwartete *relative* Veränderung des Schadenpotenzials für den gesamten untersuchten Perimeter mit einer Auflösung von 500 x 500 Metern. Damit lassen sich die Gebiete identifizieren, die gemäss Berechnungen bis 2040 einen überdurchschnittlichen relativen Anstieg des Schadenpotenzials aufweisen. Tabelle 1 und Abbildung 23 zeigen ausserdem die absoluten Werte. Dies erlaubt die Identifikation der Schadenpotenzial-Hotspots im Untersuchungsgebiet. Im Hotspot-Perimeter Wichtrach-Münsingen kann das Schadenpotenzial bis 2040 um 0.4 Mia. CHF (+20 %) ansteigen. Im Hotspot-Perimeter Solothurn-Attisholz ist gemäss den angewendeten Modellen eine Zunahme des Schadenpotenzials von rund 0.6 Mia. CHF (+24 %) anzunehmen. Im Hotspot Schönenwerd-Aarau beträgt die modellierte Zunahme bis 2040 rund 0.6 Mia. CHF (+19 %) und im Wasserschloss 0.5 Mia. CHF (+27.5 %).

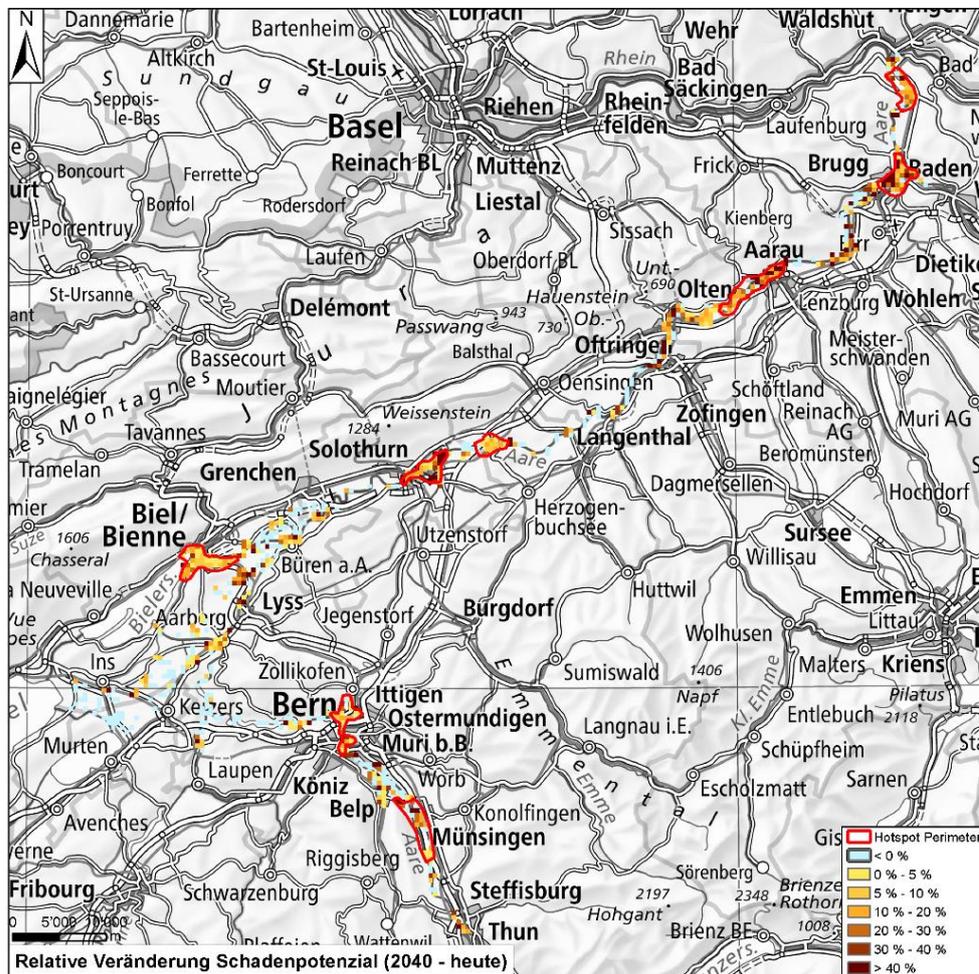


Abbildung 24: Relative Veränderung des Schadenpotenzials (2040 - heute) im gesamten Untersuchungsgebiet. Rasterauflösung: 500 x 500 Meter.

In Abbildung 24 sind auch Gebiete mit einer unterdurchschnittlichen relativen Zunahme des Schadenpotenzials gut erkennbar. Dies sind vor allem die Hotspot-Perimeter Wangen an der Aare (0.1 Mia. CHF, +8 %) und Bern Marzili - Bremgarten b. B. (0.3 Mia. CHF, +11.5 %). Die geringe erwartete Zunahme ist auf die geringe Attraktivität (Wangen an der Aare) beziehungsweise die bereits sehr dichte Siedlungssituation (Bern Marzili - Bremgarten b. B.) zurückzuführen.

Auf eine quantitative Auswertung des Szenarios 2100 wird verzichtet. In einer "Was-wäre-wenn"-Perspektive lässt sich jedoch feststellen, dass der Anstieg des Schadenpotenzials in den Jahren 2040 - 2100 weniger stark ausfällt (-7 % beim Szenario 2100 - Tief/C und + 6 % beim Szenario 2100 - Hoch/B) als der Anstieg in den Jahren 2020 - 2040 (+14 %). Selbst im Szenario 2100 - Tief/C nimmt das

Schadenpotenzial im Vergleich der heutigen Situation um 6 % zu. Da die für die Berechnung des Schadenpotenzials im Jahr 2100 gewählte Modellierungsgrundlage jener für das Jahr 2040 sehr ähnlich ist, ändern sich die Verteilung und die Lage der erwarteten Zunahme der Schadenpotenzial-Hotspots nicht wesentlich.

7.3 Entwicklung des Schadenausmasses heute – 2040 – 2100

Im Folgenden wird die Veränderung des Schadenausmasses isoliert, d. h. nur in Bezug auf die mögliche Siedlungsentwicklung, betrachtet. Als Objektschutzszenario wird jeweils das Referenzszenario eines Jahres gewählt. Somit wird das Schadenausmass des Szenarios "Schadenausmass 2020 mit OSM 2020" mit dem Schadenausmass des Szenarios "Schadenausmass 2040 mit OSM 2040" verglichen. Die Abflusswerte der betrachteten Wiederkehrperioden bleiben auf dem heutigen Stand konstant und stammen aus der EXAR-Statistik.

Das theoretische maximale Schadensausmass, das entlang der gesamten Aare bei einem EHQ-Plus-Ereignis auftreten kann, beträgt rund 3.9 Mia. CHF für die heutige Situation (2020). Im Szenario 2040 läge das theoretische maximale Schadensausmass bei knapp 4.5 Mia. CHF. Der relative Anstieg des theoretischen maximalen Schadensausmasses zwischen 2020 und 2040 beträgt somit rund +12 %.

Das modellierte Schadensausmass verteilt sich unterschiedlich auf die acht Hotspot-Perimeter. Im Hotspot Biel-Nidau-Brügg ist es sehr hoch (1'090 Mio. CHF bei EHQ-Plus im Szenario 2020). Für den genannten Hotspot-Perimeter wird aber gemäss den modellierten Resultaten bis im Jahr 2040 nicht mehr mit einer starken Zunahme des Schadensausmasses (+5 % bei EHQ-Plus) gerechnet. Die Hotspots Solothurn-Attisholz (+22 % bei EHQ-Plus), Schönenwerd-Aarau (+24 % bei EHQ-Plus) und Wasserschloss (+24 % bei EHQ-Plus) weisen hingegen die grössten Zunahmen des Schadensausmasses bis ins Jahr 2040 auf.

Tabelle 2: Schadenausmass in Bezug auf die Veränderung des Schadenpotenzials 2020 und 2040 für den gesamten untersuchten Perimeter, die acht Hotspots und die Gebiete ausserhalb der Hotspot-Perimeter. * Wiederkehrperioden basieren auf EXAR-Resultaten ohne Klimawandel.

Hotspot	Schadenausmass [Mio. CHF] und Schadenausmass als Anteil der Gesamte Schadenausmass [%]					
	HQ100*		Relative Zunahme [%]	HQ300*		Relative Zunahme [%]
	2020_OSM- heute	2040_OSM_ 2040		2020_OSM- heute	2040_OSM_ 2040	
Gesamt	483 - (100 %)	525 - (100 %)	9	1075 - (100 %)	1189 - (100 %)	11
Wichtrach-Münsingen	2.8 - (0.6 %)	2.7 - (0.5 %)	-5	11 - (1.1 %)	13 - (1.1 %)	17
Bern Marzili – Bremgarten bei Bern	59 - (12.2 %)	60 - (11.4 %)	2	86 - (8 %)	87 - (7.3 %)	1
Biel – Nidau - Brügg	158 - (32.6 %)	164 - (31.2 %)	4	277 - (25.8 %)	291 - (24.5 %)	5
Solothurn - Attisholz	2.8 - (0.6 %)	3.6 - (0.7 %)	25	70 - (6.5 %)	80 - (6.8 %)	14
Wangen an der Aare	90 - (18.6 %)	95 - (18.1 %)	6	175 - (16.2 %)	186 - (15.7 %)	7
Schönenwerd-Aarau	5.5 - (1.1 %)	8.7 - (1.7 %)	58	69 - (6.4 %)	92 - (7.7 %)	34
Wasserschloss	29 - (6 %)	47 - (9 %)	62	77 - (7.2 %)	107 - (9 %)	38
Döttingen - Klingnau	0.5 - (0.1 %)	0.7 - (0.1 %)	33	5.2 - (0.5 %)	6.5 - (0.5 %)	26
Ausserhalb der Hotspots	136 - (28.2 %)	144 - (27.4 %)	6	305 - (28.3 %)	326 - (27.4 %)	7

Hotspot	Schadenausmass [Mio. CHF] und Schadenausmass als Anteil der Gesamte Schadenausmass [%]					
	EHQ*		Relative Zunahme [%]	EHQ-Plus*		Relative Zunahme [%]
	2020_OSM- heute	2040_OSM_ 2040		2020_OSM- heute	2040_OSM_ 2040	
Gesamt	1810 - (100 %)	2061 - (100 %)	14	3934 - (100 %)	4486 - (100 %)	14
Wichtrach-Münsingen	59 - (3.3 %)	71 - (3.4 %)	19	210 - (5.3 %)	253 - (5.6 %)	20
Bern Marzili – Bremgarten bei Bern	127 - (7 %)	135 - (6.6 %)	7	191 - (4.9 %)	214 - (4.8 %)	12
Biel – Nidau - Brügg	367 - (20.3 %)	390 - (18.9 %)	6	1090 - (27.7 %)	1148 - (25.6 %)	5
Solothurn - Attisholz	104 - (5.8 %)	130 - (6.3 %)	25	168 - (4.3 %)	214 - (4.8 %)	27
Wangen an der Aare	248 - (13.7 %)	266 - (12.9 %)	7	419 - (10.6 %)	449 - (10 %)	7
Schönenwerd-Aarau	107 - (5.9 %)	144 - (7 %)	35	201 - (5.1 %)	265 - (5.9 %)	32
Wasserschloss	168 - (9.3 %)	211 - (10.2 %)	26	234 - (5.9 %)	306 - (6.8 %)	31
Döttingen - Klingnau	187 - (10.3 %)	221 - (10.7 %)	18	391 - (9.9 %)	470 - (10.5 %)	20
Ausserhalb der Hotspots	443 - (24.5 %)	493 - (23.9 %)	11	1030 - (26.2 %)	1168 - (26 %)	13

Auf eine detaillierte Auswertung des Szenarios 2100 wird verzichtet, da die damit verbundenen Unsicherheiten sehr gross sind. Im Sinne einer "Was-wäre-wenn"-Perspektive lässt sich jedoch feststellen, dass der Anstieg des Schadenausmasses für den Zeitraum 2040 - 2100 weniger stark ausfällt (-4 % beim Szenario 2100 – Tief C und + 8 % beim Szenario 2100 – Hoch B bei EHQ-Plus – siehe Tabelle 3) als der Anstieg für den Zeitraum 2020 – 2040 (+12 %). Bemerkenswert ist, dass die Zunahme des Schadenausmasses für häufigere Ereignisse (HQ100 und HQ300) mit zunehmendem Anteil an Objektschutzmassnahmen kompensiert wird. Da die für die Berechnung des Schadenausmass im Jahr 2100 gewählte Modellierungsgrundlage

jener für 2040 sehr ähnlich ist, ändern sich die Verteilung und die Lage der erwarteten Zunahme der Schadenausmass-Hotspots nicht wesentlich.

Tabelle 3: Schadenausmass in Bezug auf die Veränderung des Schadenpotenzials 2020, 2040 und 2100 für den gesamten untersuchten Perimeter, die acht Hotspots und Gebiete ausserhalb der Hotspot-Perimeter. * Wiederkehrperioden basieren auf EXAR-Resultaten ohne Klimawandel.

	Schadenausmass [Mio. CHF] HQ100*	Relative Zunahme [%] ab 2020	Relative Zunahme [%] ab 2040	Schadenausmass [Mio. CHF] HQ300*	Relative Zunahme [%] ab 2020	Relative Zunahme [%] ab 2040
Szenario 2020_OSM_heute	483	0		1075	0	
Szenario 2040_OSM_2040	525	9	0	1189	11	0
Szenario 2100_OSM_2100						
Szenario Ref. A	482	0	-8	1122	4	-6
Szenario 2100_OSM_2100						
Szenario Hoch B	502	4	-4	1180	10	-1
Szenario 2100_OSM_2100						
Szenario Tief C	465	-4	-11	1071	0	-10

	Schadenausmass [Mio. CHF] EHQ*	Relative Zunahme [%] ab 2020	Relative Zunahme [%] ab 2040	Schadenausmass [Mio. CHF] EHQ-Plus*	Relative Zunahme [%] ab 2020	Relative Zunahme [%] ab 2040
Szenario 2020_OSM_heute	1810	0		3934	0	
Szenario 2040_OSM_2040	2061	14	0	4486	14	0
Szenario 2100_OSM_2100						
Szenario Ref. A	2045	13	-1	4565	16	2
Szenario 2100_OSM_2100						
Szenario Hoch B	2173	20	5	4858	23	8
Szenario 2100_OSM_2100						
Szenario Tief C	1931	7	-6	4301	9	-4

7.4 Entwicklung des Schadenausmasses durch die Veränderung des Schadenpotenzials

In den Kapiteln 7.2 und 7.3 wurde die aktuelle Situation und die mögliche zukünftige Entwicklung des Schadenpotenzials und des Schadenausmasses beschrieben. Das aktuelle Schadenpotenzial hat eine direkte Auswirkung auf das kalkulierte Schadenausmass. Dabei spielen weitere Faktoren wie die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit als auch die Letalität/Schadenempfindlichkeit und die Präsenzwahrscheinlichkeit eine Rolle.

Grosse Ansammlungen von Schadenpotenzial, wie z. B. sehr grosse Unternehmen, die viele Mitarbeiter beschäftigen, oder überdurchschnittlich grosse Gebäude können die Entwicklung des Schadenausmasses erheblich steuern. In den Ergebnissen führen solche Gebiete teils zu einem "Knick" in der Kurve des relativen Schadenausmasses. Beispiele hierfür sind:

- der **Hotspots Biel – Nidau – Brügg** mit der Überschwemmung der Gemeinde Nidau bei einem HQ100 und die zusätzliche Ausdehnung der überschwemmten Flächen auf einen grossen Teil des Perimeters ab EHQ.
- der **Hotspot Solothurn – Attisholz**, der einen ausgeprägten Knick zwischen HQ100 und HQ300 zeigt. Der steilere Anstieg des Schadenausmasses bei häufigen Ereignissen ist auf die fortschreitende Überflutung der Gebäude der Firma Biogen und des Industriegebietes in Attisholz zurückzuführen.
- der **Hotspot Schönenwerd – Aarau**, der ebenso einen ausgeprägten Knick zwischen HQ100 und HQ300 zeigt. Der rasche Anstieg ist auf die Überflutung des Siedlungsgebietes westlich der Aarauer Altstadt, die Überflutungen in Wöschnau und die Ausdehnung der Überflutungsflächen in Schönenwerd sowie Niedergösgen zurückzuführen.

7.5 Entwicklung des Schadenausmasses durch die Erstellung von Objektschutzmassnahmen

Wie in den Kapiteln 6.3.2.4 und 6.3.3.5 erläutert, wurden für die Untersuchung der Auswirkungen von Objektschutzmassnahmen auf das Schadensausmass mehrere Szenarien erstellt. In allen Szenarien wird der Anteil der baulichen Objektschutzmassnahmen pro Gefahrenzone bestimmt. Die Wirksamkeit der Objektschutzmassnahmen wird in Abhängigkeit des zu erwartenden Abflusses bestimmt (siehe Kapitel 6.3.2.5 und 6.3.3.6). Aufgrund der gewählten Methodik ist es schwierig zu unterscheiden, welcher Teil der Reduzierung des Schadensausmasses tatsächlich auf die umgesetzten Objektschutzmassnahmen und welcher auf die gewählte Parametrisierung zurückzuführen ist. Grundsätzlich können aber folgende Aussagen gemacht werden:

- Die Szenarien OSM-2040-Plus und OSM-2100-Plus zeigen, dass ein erhöhter Objektschutzanteil zu einer Reduktion des Schadensausmasses bis 2040 und 2100 bis über HQ300 führen kann. Dieses Verhalten zeigt sich in den Hotspots Bern Marzili - Bremgarten bei Bern und Solothurn - Attisholz. In den Hotspots Schönenwerd - Aarau und Wasserschloss kann das absolute Schadensausmass bis 2040 nicht reduziert werden, aber die relative Zunahme des Schadensausmasses kann verringert werden.
- Aufgrund der postulierten abnehmenden Wirksamkeit der Objektschutzmassnahmen bei steigendem Abfluss erlauben diese eine starke Reduzierung des Schadensausmasses nur bis HQ300. Bei grösseren Abflüssen verlieren Objektschutzmassnahmen stark an Wirksamkeit oder verlieren diese gar vollständig.

7.6 Entwicklung des Schadenausmasses durch die Entwicklung der Gefahrensituation

Im Sinne einer Modellannahme wurde davon ausgegangen, dass die Gefahrengrundlagen für das Jahr 2040 nicht aktualisiert werden, für das Jahr 2100 hingegen schon. Dies hat einen erheblichen Einfluss auf die modellhafte Wirkung von Objektschutzmassnahmen. Es führt dazu, dass im Jahr 2100 – statisch betrachtet – Objektschutzmassnahmen dort getroffen werden, wo sie effektiv benötigt werden und Fehler infolge veralteter Gefahrengrundlagen vermieden werden. Dieser Effekt wird in den Ergebnissen für das Szenario "OSM-2100-Plus und angepasste Gefahrenkarte" sichtbar, wo sich eindeutig positive Auswirkungen auf das resultierende Schadenausmass zeigen.

7.7 Entwicklung des Schadenausmasses durch den Klimawandel

Nachfolgend werden die möglichen Auswirkungen der Veränderung der Abflüsse durch den Klimawandel für den Zustand 2040 isoliert betrachtet.

Die Auswirkung des Klimawandels auf die Entwicklung des Schadenausmasses kann nicht in einem entweder/oder-Vergleich mit der Siedlungsentwicklung betrachtet werden. Der Klimawandel ist somit als zusätzlicher Faktor zu verstehen, der das Schadenausmass bis ins Jahr 2040 weiter erhöhen kann.

Die Entwicklung des Schadenausmasses wird nachfolgend exemplarisch anhand des Szenarios "Schadenausmass 2040 mit OSM 2040" aufgezeigt, einmal unter der Annahme, dass die EXAR-Hochwasserstatistik von 2020 im Jahr 2040 immer noch gültig ist (kein Einfluss des Klimawandels) und einmal unter der Annahme, dass der Klimawandel zu einer Zunahme der Abflussspitzen um +8 % führt (entspricht dem Median der Klimasensitivität, vgl. grauer Kasten in Kapitel 4.2). Der Vergleich der Entwicklung des Schadenausmasses wurde anhand der Jährlichkeiten HQ100, HQ300 und EHQ durchgeführt (vgl. Tabelle 4). Die Entwicklung pro Jährlichkeit wird in den nachfolgenden Kapiteln 7.7.1 bis 7.7.3 behandelt.

Tabelle 4: Veränderung des Schadenausmasses in den Hotspots bei der Betrachtung des Jahres 2040 mit und ohne Klimawandel für die Jährlichkeiten HQ100, HQ300 und EHQ. Die Klimasensitivität wird mit dem Medianwert und dem 25%-/75%-Quantil angegeben (vgl. grauer Kasten in Kapitel 4.2).

Hotspot	Schadenausmass OSM-2040 [Mio. CHF] HQ100				Relative Zunahme Median (25% - 75%) gerundet [%]	Absolute Zunahme Median (25% - 75%) gerundet [Mio. CHF]
	Ohne Einfluss Klima	Mit Einfluss Klima (25%-Quantil)	Mit Einfluss Klima (Median)	Mit Einfluss Klima (75%-Quantil)		
Wichtrach - Münsingen	2.7	16.6	31.6	45.1	1070 (510 - 1570)	30 (15 - 40)
Bern Marzili - Bremgarten bei Bern	59.9	95.7	113.7	130.1	90 (60 - 120)	55 (35 - 70)
Biel - Nidau - Brugg	163.7	304.0	366.3	391.2	120 (90 - 140)	205 (140 - 230)
Solothurn - Attisholz	3.6	41.4	70.7	75.0	1860 (1050 - 1980)	65 (40 - 70)
Wangen an der Aare	95.2	142.2	161.1	171.3	70 (50 - 80)	65 (45 - 75)
Schönenwerd-Aarau	8.7	18.5	20.6	75.0	140 (110 - 760)	10 (10 - 65)
Wasserschloss	47.0	71.9	86.8	96.8	80 (50 - 110)	40 (25 - 50)
Döttingen - Klingnau	0.7	3.1	4.6	5.5	560 (340 - 690)	5 (0 - 5)
Summe aller Hotspots	381.5	693.4	855.4	990.0	120 (80 - 160)	470 (310 - 610)

Hotspot	Schadenausmass OSM-2040 [Mio. CHF] HQ300				Relative Zunahme Median (25% - 75%) gerundet [%]	Absolute Zunahme Median (25% - 75%) gerundet [Mio. CHF]
	Ohne Einfluss Klima	Mit Einfluss Klima (25%-Quantil)	Mit Einfluss Klima (Median)	Mit Einfluss Klima (75%-Quantil)		
Wichtrach - Münsingen	13.3	41.6	66.6	77.7	400 (210 - 480)	55 (30 - 65)
Bern Marzili - Bremgarten bei Bern	86.7	115.2	137.4	144.3	60 (30 - 70)	50 (30 - 60)
Biel - Nidau - Brugg	291.0	392.3	475.7	552.1	60 (30 - 90)	185 (100 - 260)
Solothurn - Attisholz	80.4	98.5	112.9	122.5	40 (20 - 50)	35 (20 - 40)
Wangen an der Aare	186.2	211.0	233.2	346.6	30 (10 - 90)	45 (25 - 160)
Schönenwerd-Aarau	92.0	115.6	129.5	135.3	40 (30 - 50)	40 (25 - 45)
Wasserschloss	106.6	149.2	174.8	191.8	60 (40 - 80)	70 (45 - 85)
Döttingen - Klingnau	6.5	139.6	189.7	204.6	2820 (2050 - 3050)	185 (135 - 200)
Summe aller Hotspots	862.7	1263.0	1519.8	1774.9	80 (50 - 110)	660 (400 - 910)

Hotspot	Schadenausmass OSM-2040 [Mio. CHF] EHQ				Relative Zunahme Median (25% - 75%) gerundet [%]	Absolute Zunahme Median (25% - 75%) gerundet [Mio. CHF]
	Ohne Einfluss Klima	Mit Einfluss Klima (25%-Quantil)	Mit Einfluss Klima (Median)	Mit Einfluss Klima (75%-Quantil)		
Wichtrach - Münsingen	70.6	95.8	119.4	143.8	70 (40 - 100)	50 (25 - 75)
Bern Marzili - Bremgarten bei Bern	135.1	153.8	165.5	173.9	20 (10 - 30)	30 (20 - 40)
Biel - Nidau - Brugg	390.1	592.1	713.3	794.1	80 (50 - 100)	325 (200 - 405)
Solothurn - Attisholz	130.1	153.5	163.6	170.4	30 (20 - 30)	35 (25 - 40)
Wangen an der Aare	265.5	318.4	346.6	362.6	30 (20 - 40)	80 (55 - 95)
Schönenwerd-Aarau	144.3	173.0	190.1	201.6	30 (20 - 40)	45 (30 - 55)
Wasserschloss	210.9	238.4	254.9	265.8	20 (10 - 30)	45 (30 - 55)
Döttingen - Klingnau	221.3	300.2	347.5	378.7	60 (40 - 70)	125 (80 - 155)
Summe aller Hotspots	1567.9	2025.2	2300.9	2490.9	50 (30 - 60)	730 (460 - 920)

7.7.1 Entwicklung des Schadenausmass bei einem HQ100

Bei einem HQ100 ist in den Hotspots eine starke Zunahme des relativen Schadenausmasses festzustellen. Der prozentual angegebene Anstieg muss dabei immer mit dem effektiv ausgewiesenen Schadenausmass ins Verhältnis gesetzt werden. Das effektive, heutige Schadenausmass ist in den meisten Hotspots sehr klein, mit Ausnahme der Hotspots Bern Marzili-Bremgarten bei Bern, Biel-Nidau-Brügg, Wangen an der Aare und dem Wasserschloss.

Das relativ hohe Schadenausmass bei diesen Hotspots entsteht ohne Berücksichtigung eines Freibords bei den Hochwasserschutzmassnahmen. Die Ursache für das hohe Schadenausmass liegt bei folgenden Annahmen und Vereinfachungen:

- Die zugrundeliegenden Abflüsse aus EXAR sind in diesen Abschnitten für den Ist-Zustand (2020) teilweise deutlich höher als die Abflüsse aus der Gefahrenkarte (vgl. Kapitel 4.3). Teilweise werden für die Dimensionierung des übergeordneten Hochwasserschutzes auch von der Gefahrenkarte abweichende Abflüsse definiert, welche tiefer liegen und beispielsweise von einer Einhaltung der Murgenthaler Bedingung² ausgehen.
- Es werden keine mobilen Massnahmen berücksichtigt (z.B. keine Beaver-Schläuche in Bern beim Matte-Quartier).

Für alle Hotspots zusammengefasst könnte der Klimawandel (im Sinne der angewendeten Bandbreite zur Sensitivität der Parameter) zu einem Anstieg des Schadenausmasses von rund 120 % bzw. 470 Mio. CHF führen.

Der höchste prozentuale Anstieg entsteht in den Hotspots Wichtrach-Münsingen (ca. 11-fache Zunahme), Solothurn - Attisholz (ca. 19-fache Zunahme) und Döttingen-Klingnau (ca. 6-fache Zunahme). In diesen Hotspots ist das Schadenausmass ohne Einfluss des Klimas jedoch sehr gering (jeweils < 5 Mio. CHF). Die absolute Zunahme des Schadens ist in diesen Gebieten im Vergleich zu den anderen Hotspots hingegen nicht auffallend hoch.

Für den Hotspot Schönenwerd-Aarau führen die hohen Quantilwerte (75%-Quantil und höher) zu einer starken Zunahme des Schadenausmasses (75%-Quantil:

² Die Murgenthaler Bedingung ist eine überkantonale Vereinbarung, die den Abfluss an der Aare bis Murgenthal auf 850 m³/s begrenzt. Dieser Abfluss soll durch die Regulierung der Jura-Randseen sichergestellt werden.

+760 % / +65 Mio. CHF). Die Überflutungsflächen nehmen somit zwischen dem Medianwert (+140 % / +10 Mio. CHF) und dem 75%-Quantilwert stark zu.

In den Hotspots Bern-Marzili-Bremgarten bei Bern, Wangen an der Aare und Wasserschloss ist jeweils eine Zunahme im hohen zweistelligen Bereich (ca. +70 % bis +90 %) festzustellen. In absoluten Zahlen entspricht dies einer Zunahme pro Hotspot um rund 40 bis 65 Mio. CHF.

Bei einem Vergleich der absoluten Zunahme des Schadenausmasses fällt der Hotspot Biel-Nidau-Brügg mit einer hohen absoluten Zunahme auf (Median: +205 Mio. CHF). Dies entspricht einer Zunahme von rund 120 % gegenüber dem Schadenausmass, welches ohne Einfluss des Klimawandels bei einem hundertjährigen Ereignis auftreten würde.

7.7.2 Entwicklung des Schadenausmasses bei einem HQ300

Bei einem HQ300 ist die mögliche, relative Zunahme des Schadenausmasses durch den Klimawandel weiterhin gross. In der Summe aller Hotspots ist bezüglich der untersuchten Klimasensitivität eine Zunahme von rund 80 % oder 660 Mio. CHF möglich.

Auffallend hoch ist die relative Zunahme im Hotspot Döttingen-Klingnau (ca. eine 28-fache Zunahme) und im Hotspot Wichtrach-Münsingen (4-fache Zunahme). In den übrigen Hotspots liegt die Zunahme zwischen +30 % und +60 %.

Die absolute Zunahme des Schadenausmasses ist in den beiden Hotspots Biel-Nidau-Brügg und Döttingen-Klingnau auffallend gross (je +185 Mio. CHF). Bei den übrigen Hotspots liegen die mit dem Median berechneten Zunahmen bei +35 bis +70 Mio. CHF.

7.7.3 Entwicklung des Schadenausmasses bei einem EHQ

Auch bei einem EHQ ist bezüglich der untersuchten Klimasensitivität ein starker Anstieg des Schadenausmasses sichtbar. Für sämtliche Hotspots zusammengefasst ist eine Erhöhung des Schadenausmasses von rund 50 % oder 730 Mio. CHF zu erwarten.

In den meisten Hotspots wird in Bezug auf die betrachtete Klimasensitivität bei einem EHQ zu einer relativen Erhöhung des Schadenausmasses von +30 bis +60 %, ausser in den Hotspots Wichtrach-Münsingen (+70 %) und Biel-Nidau-Brügg (+80 %).

Die absolute Zunahme des Schadenausmasses ist wiederum im Hotspot Biel-Nidau-Brügg (+325 Mio. CHF) am höchsten, gefolgt vom Hotspot Döttingen-Klingnau (+125 Mio. CHF).

7.7.4 Fazit Entwicklung des Schadenausmasses durch den Klimawandel

Bei einer Betrachtung über sämtliche Hotspots ist die Erhöhung des Schadenausmasses durch den Einfluss des angenommenen Klimawandels (Sensitivität) bei einem HQ100 bei rund 120 %, bei einem HQ300 bei rund 80 % und bei einem EHQ bei rund 50 %. Die relative Zunahme des Schadenausmasses nimmt mit höheren und damit selteneren Abflüssen somit deutlich ab. Es gibt jedoch starke regionale Unterschiede. Einzelne Hotspots reagieren sehr sensitiv auf eine Zunahme des Abflusses:

- In **Wichtrach-Münsingen** springt das Schadenausmass mit Einfluss des angenommenen Klimawandels (Sensitivität) bereits bei einem HQ100 stark an, nimmt aber auch bei den höheren Wiederkehrperioden weiter stark zu. Insgesamt steigt in diesem Hotspot das Schadenausmass ab einem hundertjährigen Abfluss (ohne Klimawandel) progressiv an, d.h. die Steigung des Schadenausmasses nimmt bei zunehmendem Abfluss zu.
- Der Hotspot **Biel-Nidau-Brügg** weist ebenfalls einen progressiven Anstieg des Schadenausmasses auf. Im Vergleich zum Hotspot Wichtrach-Münsingen ist jedoch die Schadenssumme rund 5-mal so gross, wodurch bei allen Szenarien grosse absolute Zunahmen des Schadenausmasses ausgewiesen wurden.
- Die Hotspots **Solothurn-Attisholz** und **Döttingen-Klingnau** weisen in der Zunahme des Schadenausmasses eine Unstetigkeit auf, bei der eine sprunghafte Erhöhung des Schadenausmasses bei einer kleinen Erhöhung des Abflusses auftritt:
 - **Solothurn-Attisholz:** Ein HQ100 mit Einfluss des angenommenen Klimawandels führt zu einer knapp 19-fachen Zunahme des Schadenausmasses
 - **Döttingen-Klingnau:** Der sprunghafte Anstieg ist bei einem HQ300 zu beobachten (28-fache Zunahme).

Die Zunahme des Schadenausmasses, ausgelöst durch die Bandbreite des hier angenommenen Klimawandels, ist insgesamt deutlich höher als die Zunahme des erwarteten Abflusswerts.

7.8 Vergleich der Entwicklung des Schadenausmasses aus der Siedlungsentwicklung und dem Klimawandel

Unter den gegebenen Modellannahmen wird bis ins Jahr 2040 eine Zunahme des Schadenpotenzials von rund 14 % erwartet, wie Tabelle 1 zeigt. Dies führt – ohne Einfluss des Klimawandels – für das Jahr 2040 zu einer ähnlichen Zunahme des Schadenausmasses: Bei einem HQ100 beträgt die Erhöhung +8 %, bei einem HQ300 ca. +10 % und bei einem EHQ rund +12 % (vgl. Tabelle 2).

Falls infolge des Klimawandels eine Zunahme der Spitzenabflüsse erfolgt, muss mit einer Überlastung der flächenhaft wirkenden Hochwasserschutzmassnahmen gerechnet werden, da die auf Projektierungsebene gewählten Dimensionierungsgrössen überschritten werden. Gebiete, die bisher als hochwassersicher galten (und demnach keiner Gefahrenvorsorge unterliegen) werden plötzlich gefährdet, was zu einem starken Anstieg des Schadenausmasses führen kann. Über alle Hotspots betrachtet liegt diese Zunahme bei einem Vergleich des Szenarios 2040 mit OSM 2040 bei einem HQ100 bei 120 %, bei einem HQ300 80 % und nimmt bis zu einem EHQ auf 50 % ab.

Die gesamthafte Erhöhung, das heisst die Siedlungsentwicklung zuzüglich einem Einfluss des Klimawandels (Medianwert der angenommenen Gesamtsensitivität) zeigt, dass für die betrachteten 8 Hotspots mit einer Erhöhung des Schadenausmasses bei einem HQ100 von 150 % (oder rund 510 Mio. CHF), bei einem HQ300 von 100 % (ca. 750 Mio. CHF) und bei einem EHQ von 70 (ca. 935 Mio. CHF) gerechnet werden muss (vgl. Tabelle 5). Dies bedeutet, dass je nach Ausmass des Klimawandels und einer damit verbundenen Zunahme der Spitzenabflüsse das Schadenausmass kaum bis wesentlich mehr gegenüber der Siedlungsentwicklung zunehmen kann.

Tabelle 5: Veränderung des Schadenausmasses bei kombinierter Betrachtung aus Siedlungsentwicklung 2020 – 2040 und Einfluss des Klimawandels (Medianwert der angenommenen Gesamtsensitivität) für die Jährlichkeiten HQ100, HQ300 und EHQ.

Schadenausmass HQ100					
Hotspot	Szenario 2020, OSM 2020 [Mio. CHF]	Szenario 2040, OSM-2040 [Mio. CHF]		Relative Zunahme 2020 - 2040 (mit Median Klimasensitivität) gerundet [%]	Absolute Zunahme 2020 - 2040 (mit Median Klimasensitivität) gerundet [Mio. CHF]
		Ohne Einfluss Klima	Mit Einfluss Klima (Median)		
Wichtrach - Münsingen	2.8	2.7	31.6	1030	30
Bern Marzili - Bremgarten bei Bern	58.8	59.9	113.7	90	55
Biel - Nidau - Brugg	157.7	163.7	366.3	130	210
Solothurn - Attisholz	2.8	3.6	70.7	2430	70
Wangen an der Aare	90	95.2	161.1	80	70
Schönenwerd-Aarau	5.5	8.7	20.6	270	15
Wasserschloss	28.9	47.0	86.8	200	60
Döttingen - Klingnau	0.5	0.7	4.6	820	5
Summe aller Hotspots	347.0	381.5	855.4	150	510

Schadenausmass HQ300					
Hotspot	Szenario 2020, OSM 2020 [Mio. CHF]	Szenario 2040, OSM-2040 [Mio. CHF]		Relative Zunahme 2020 - 2040 mit Median Klimasensitivität gerundet [%]	Absolute Zunahme mit Median Klimasensitivität gerundet [Mio. CHF]
		Ohne Einfluss Klima	Mit Einfluss Klima (Median)		
Wichtrach - Münsingen	11.4	13.3	66.6	480	55
Bern Marzili - Bremgarten bei Bern	86.2	86.7	137.4	60	50
Biel - Nidau - Brugg	277	291.0	475.7	70	200
Solothurn - Attisholz	70.2	80.4	112.9	60	45
Wangen an der Aare	174.6	186.2	233.2	30	60
Schönenwerd-Aarau	68.6	92.0	129.5	90	60
Wasserschloss	77.4	106.6	174.8	130	95
Döttingen - Klingnau	5.2	6.5	189.7	3550	185
Summe aller Hotspots	770.6	862.7	1519.8	100	750

Schadenausmass EHQ					
Hotspot	Szenario 2020, OSM 2020 [Mio. CHF]	Szenario 2040, OSM-2040 [Mio. CHF]		Relative Zunahme 2020 - 2040 mit Median Klimasensitivität gerundet [%]	Absolute Zunahme mit Median Klimasensitivität gerundet [Mio. CHF]
		Ohne Einfluss Klima	Mit Einfluss Klima (Median)		
Wichtrach - Münsingen	59.1	70.6	119.4	100	60
Bern Marzili - Bremgarten bei Bern	126.8	135.1	165.5	30	40
Biel - Nidau - Brugg	367.3	390.1	713.3	90	345
Solothurn - Attisholz	104.2	130.1	163.6	60	60
Wangen an der Aare	248.4	265.5	346.6	40	100
Schönenwerd-Aarau	106.8	144.3	190.1	80	85
Wasserschloss	168	210.9	254.9	50	85
Döttingen - Klingnau	187	221.3	347.5	90	160
Summe aller Hotspots	1367.6	1567.9	2300.9	70	935

8. Handlungsempfehlungen

Unter der Annahme einer wahrscheinlichen Zunahme der Abflussspitzen sowie einer wahrscheinlichen Zunahme des Schadenpotenzials bis ins Jahr 2040 und 2100 zeigt die vorliegende Studie, dass die Schadenausmasse teils massiv zunehmen könnten.

Raumplanerische und organisatorische Veränderungen brauchen Zeit, um geplant und umgesetzt werden zu können. Je rascher eine veränderte Ausgangssituation deshalb Eingang in die Gefahrengrundlagen findet, desto besser kann eine zukunftsorientierte und auf aktuellen Grundlagen basierende risikobasierte Planung stattfinden.

Aus den Resultaten der vorliegenden Untersuchung lassen sich deshalb folgende Handlungsempfehlungen ableiten (die Liste ist nicht abschliessend):

- **Gefahrengrundlagen aktuell halten:** Gefahrenkarten stellen eine wichtige raumplanerische Grundlage dar und sind somit ein zentrales Werkzeug der risikobasierten Raumplanung. Aktuelle Gefahrengrundlagen ermöglichen das Ergreifen von wirksamen und standortgerechten Schutzmassnahmen. Die periodische Aktualisierung der Gefahrenkarten ist von zentraler Bedeutung und hat massgebende Auswirkungen auf das zukünftige Schadenausmass.
- **Objektspezifische risikobasierte Gefahrenbeurteilung:** Gebiete, Quartiere oder Gebäude, die ein besonders hohes Schadenpotenzial oder eine besonders hohe Verletzlichkeit aufweisen, können einen grossen Einfluss auf das resultierende Schadenausmass einer Region haben. Solche Sonderobjekte sollten in allen Gefährdungsbereichen (dort, wo eine geringe oder eine Restgefährdung vorliegt) frühzeitig identifiziert werden und einer objektspezifischen risikobasierten Gefahrenbeurteilung unterzogen werden.
- **Objekt- / Flächenschutz zeitnah umsetzen, gegebenenfalls höhere Schutzziele anstreben:** Objekt- und Flächenschutzmassnahmen sollten in Sinne des Vorsorgeprinzips zeitnah und mit möglichst strengen Schutzzielen umgesetzt werden, vor allem in gelben Gefahrengebieten.
- **Anpassung der Dimensionierungsgrundlagen, Erweiterung des Freibords um einen Faktor «Klimasensitivität»:** Ein Anstieg der Hochwasserabflüsse durch den Klimawandel ist zwar unsicher, aber möglich. Wegen der grossen Sensitivität des Schadensausmasses gegenüber vergleichsweise geringen Abflusserhöhungen könnten z. B. die Freibordberechnungen mit einem Faktor «Klimasensitivität» ergänzt werden.

9. Schlussfolgerungen und Ausblick

9.1 Generelles

Die gemäss Kapitel 3.2 formulierten Leitfragen konnten dank des angewendeten Forschungsdesigns und der Verknüpfung verschiedener Modelle (Hydrologie, Hydraulik, Siedlungsentwicklung, Schadenausmass) beantwortet werden. Das resultierende Schadenausmass konnte szenarienbasiert ermittelt und kartographisch dargestellt werden. In diesem Zusammenhang wurden neue, erstmals zur Anwendung kommende methodische Ansätze im Bereich des integralen Risikomanagements getestet und bewertet. Die Angaben zu den Spitzenabflüssen, zur Entwicklung des Schadenpotenzials und zu den Schadenausmassen sind unter diesem Gesichtspunkt explizit nicht als Prognose, sondern als **mögliche Szenarien unter Modellannahmen** zu betrachten.

9.2 Hydrologie

Die hier durchgeführten Betrachtungen zu den Hochwasserspitzen für die Jahre 2040 und 2100 zeigen, dass die wissenschaftlichen Grundlagen für einzugsgebiets-spezifische Betrachtungen nach wie vor nicht genügen, um belastbare und präzise Aussagen liefern zu können, wie sich der Klimawandel im Einzugsgebiet der Aare effektiv auswirken wird. Die Unsicherheiten sind insgesamt noch gross und teils methodischer Natur, andererseits aber auch der grossen Variabilität des Hochwassergeschehens und den im Vergleich dazu kurzen Beobachtungszeitreihen geschuldet. Nicht zuletzt sind die Unsicherheiten aber auch von politischen Entscheiden der Weltgemeinschaft abhängig, die nicht vorhergesagt werden können. Infolge dieser Unsicherheiten bei der Festlegung der Spitzenabflüsse in der Zukunft haben sich die hier angewendeten «was-wäre-wenn»-Szenarien bewährt. Wichtiger als die absoluten Werte war im vorliegenden Projekt somit die vergleichende, relative Entwicklung von Hochwassern und des Schadenpotenzials, um eine Aussage zur Entwicklung der Schadenausmasse herleiten zu können. Es ist daher auch nicht von grosser Bedeutung, ob die verwendeten Hochwasserspitzen aus EXAR etwas höher liegen als jene, die in den heute gültigen Gefahrenkarten verwendet werden.

9.3 Hydraulik

Generell zeigt sich, dass eine detaillierte Modellierung der Hydraulik eine wichtige Rolle für die Beurteilung der Entwicklung der Schadenausmasse bis Ende des 21.

Jahrhunderts darstellt. Dank der homogenen Grundlagen aus EXAR und einem kalibrierten und validierten hydrodynamischen Modell über den gesamten Perimeter war es überhaupt möglich, die Gefahrengrundlagen in einem so grossen Perimeter einheitlich zu eruieren und für die Betrachtung der Schadenausmasse zu verwenden. Dies ermöglichte auch die Ausscheidung von «Hotspots», die untereinander vergleichbar sind.

9.4 Siedlungsmodell

Wie bei den Grundlagen bezüglich Hydrologie und Hydraulik wurden auch für das Siedlungsmodell homogene Grundlagen verwendet, um die Vergleichbarkeit der betrachteten Gebiete und «Hotspots» zu ermöglichen. Grundsätzlich zeigte sich, dass eine modellbasierte Betrachtung der Siedlungsentwicklung eine unverzichtbare Grundlage für eine Berechnung von zukünftigen Schadenausmassen darstellt. Die Modellgüte entscheidet dabei über die Genauigkeit der Prognosen in Bezug auf die räumliche und zeitliche Entwicklung des Schadenpotenzials und damit auch der zukünftigen Schadenausmasse. Modellunschärfen, ob beim Siedlungsmodell oder beim Überflutungsmodell, können sich überlagern und dazu führen, dass einzelne Bereiche im Modell sehr stark zur Entwicklung der Schadenausmasse beitragen (wenn z. B. eine Fabrik mit sehr hohem Schadenpotenzial plötzlich von Überflutungen betroffen ist).

9.5 Gefahrengrundlagen und Objektschutz

Grundsätzlich wurde im Modellansatz davon ausgegangen, dass Objektschutz nur dort umgesetzt wird bzw. werden muss, wo sich heute Gefahrenbereiche befinden. Die heutigen (quasi statischen) Gefahrengrundlagen steuern die Entwicklung des Objektschutzanteils in der Zukunft deshalb in relevanter Weise. Die vorliegende Studie, zeigt damit, mit welchem Schadenausmass in Zukunft zu rechnen ist, falls die Massnahmen nicht auf die zukünftige Gefährdung angepasst werden. Damit kann der Handlungsbedarf für Flächen- oder weitergehende Objektschutzmassnahmen aufgezeigt werden.

Je älter die Gefahrengrundlagen sind, desto eher ergibt sich ein Unterschied einerseits zwischen der effektiven, sich raumzeitlich dynamisch entwickelnden Gefährdung, die je nach Szenario durch den Klimawandel verschärft wird und andererseits der Planungsgrundlage der Behörden, die zunehmend veraltet ist. Die vorliegende Untersuchung unterstreicht deshalb die Wichtigkeit der regelmässigen Überprüfung der Aktualität der Gefahrengrundlagen und deren bedarfsgerechter

Nachführung im Sinne eines griffigen und der Aktualität der Gefahrenprozesse folgenden integralen Risikomanagements.

9.6 Schadenausmass

Das Schadenausmass nimmt grundsätzlich in Zukunft zu. Erst gegen Ende des 21. Jahrhunderts ist eine Abnahme denkbar, sofern die tiefen Szenarien bezüglich der Bevölkerungsentwicklung Realität werden. Dennoch ist mit einer absoluten Abnahme der Bevölkerung nicht a priori eine Abnahme des Schadenausmasses verbunden. Dies wäre nur dann der Fall, wenn Gebäude in Gefahrenbereichen rückgebaut und nicht wieder neu (oder nur mit komplett wirksamem Objektschutz) errichtet würden, was aber als nicht realistisch eingestuft wird.

Die Siedlungsentwicklung wird generell eher graduell stattfinden. Die Baulandreserven sind beschränkt, ebenso das Potenzial zur Verdichtung innerhalb der bereits bestehenden Bauzonen. Anders verhält es sich mit den zukünftigen Überflutungsflächen für die Jahre 2040 oder 2100. Bereits eine geringe Zunahme des Abflusses in der Aare kann zu erheblichen zusätzlich betroffenen Überflutungsflächen führen, die bisher nicht tangiert waren. Da die Abflüsse mit der durchgeführten Sensitivitätsanalyse je nach Szenario recht deutlich zunehmen, ist dieser Effekt in Bezug auf die Zunahme des Schadenausmasses sehr dominant. Er hat einen viel grösseren Effekt als die reine Zunahme des Schadenpotenzials. Dies umso mehr, weil davon ausgegangen wurde, dass der Anteil der Objektschutzmassnahmen mit Zunahme der Überflutungsflächen nicht zunimmt, ausser im Szenario OSM 2040 Plus.

9.7 Kritik

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden verschiedene Modelle verwendet und zu einem Gesamtmodell verknüpft. Allen verwendeten Modellen und Inputdaten ist gemeinsam, dass verschiedentlich Vereinfachungen und Annahmen getroffen wurden, um die Komplexität der Fragestellung und der Modellierungsläufe auf ein Optimum zu reduzieren. Dies führt teils zu Effekten, die bei detaillierter Betrachtung der Resultate als nicht realistisch einzustufen sind. Als Beispiel sei die Anwendung eines Objektschutzfaktors genannt. Die verwendeten Objektschutzfaktoren gemäss MobiLab [26] basieren auf Expertenbefragungen, die nicht zwingend korrekt sein müssen. Aus modelltechnischen Gründen wurde der Anteil der Gebäude, die durch Objektschutzmassnahmen geschützt sind, ausserdem pauschal pro Zeitschritt (2020, 2040, 2100) angewendet. Für spätere Modellierungsläufe ist zu prüfen, ob nicht eine objektbasierte Anwendung sinnvoller wäre. Damit könnte im Modell jedes

neu gebaute Gebäude als «geschützt» ausgewiesen werden. Auch die Anwendung des hydraulischen Modells aus EXAR ist prüfenswert. Aus methodischen (und budgettechnischen) Gründen war es nicht möglich, das Modell auf einem Detaillierungsgrad zu betreiben, wie es z. B. auf Stufe Gefahrenkarte üblich ist. Es ist möglich, dass die Vereinfachungen zu Fehlern in den Modellresultaten führen und einem Direktvergleich mit der heute gültigen Gefahrenkarte nicht zwingend standhalten.

9.8 Ausblick

Aus Sicht der Autoren ist der angewendete Ansatz einer sehr grossräumigen hydrodynamischen Modellierung, die mit «was-wäre-wenn»-Szenarien bezüglich der Hydrologie kombiniert werden und gleichzeitig mit einem Siedlungsentwicklungsmodell verknüpft sind, zielführend und aus Sicht der Forschung, aber auch für Entscheidungsträger sehr relevant, um szenarienbasierte Aussagen über die Entwicklung der Schadenausmasse in der Zukunft – mit und ohne Berücksichtigung von Effekten des Klimawandels – treffen zu können.

Nebst der Weiterentwicklung der hier präsentierten Modellansätze wird empfohlen, die Methodik auch in anderen Einzugsgebieten mit relevantem Schadenpotenzial und einer voraussichtlich relevanten Zukunftsentwicklung in Bezug auf die Siedlungsstruktur anzuwenden. Den verantwortlichen Behörden steht damit ein Planungsinstrument zur Verfügung, das in dieser Form neu ist und sehr wertvolle Erkenntnisse in Bezug auf eine risikobasierte Siedlungsentwicklung unter der Prämisse des Klimawandels gibt.

Eine noch kritischere Auswahl in Bezug auf die Eignungskriterien für die Entwicklung der Siedlungsflächen ist möglich und könnte mit verhältnismässigem Aufwand zu einer deutlichen Verbesserung der Ergebnisse führen. Die Vorhersagen könnten anschliessend als Grundlage für ein zukunftsorientiertes integrales Risikomanagement genutzt werden. Zwecks Kommunikation der erstellten Grundlagen wird ausserdem eine Verbesserung der Visualisierung und der kartographischen Aufbereitung der Daten empfohlen. In diesem Rahmen ist eine webbasierte dynamische Kartenanwendung voraussichtlich die optimale Lösung, um ein möglichst breites Publikum zu erreichen.

10. Verwendete Grundlagen

- [1] IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- [2] CH2018, 2018. CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. National Centre for Climate Services, Zurich, ISBN 978-3-9525031-4-0.
- [3] CH2011, 2011. Swiss Climate Change Scenarios CH2011. C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, ISBN 978-3-033-03065-7.
- [4] Sharma A, Wasko C, Lettenmaier DP, 2018. If Precipitation Extremes Are Increasing, Why Aren't Floods? *Water Resources Research*, 54, 8545–8551. doi:10.1029/2018WR023749.
- [5] Brunner MI, Swain DL, Wood RR, Willkofer F, Done JM, Gilleland E, Ludwig R, 2021. An extremeness threshold determines the regional response of floods to changes in rainfall extremes. *Communications Earth & Environment*, 2(1). doi:10.1038/s43247-021-00248-x.
- [6] BAFU 2021. Hochwasserstatistik. Stationsbericht Aare – Brügg, Aegerten. https://www.hydrodaten.admin.ch/lhg/sdi/hq_studien/hq_statistics/2029_hq_Bericht.pdf, aufgerufen am 05.11.2021.
- [7] Zappa M, Brunner M, 2019. Simulated future discharge and climatological variables for medium-sized catchments in Switzerland. doi:10.16904/ENVIDAT.57.
- [8] Hochwasserschutz und Revitalisierung Emme, Wehr Biberist bis Aare, Raumplanungsbericht & Technischer Bericht. Auflageprojekt, ARGE Emme Auen 15. Mai 2015
- [9] Kissling + Zbinden, Hochwasserschutz Emme, Los 6, 3D-Modell der Dämme, entspricht grösstenteils den ausgeführten Arbeiten, März 2019
- [10] AWA Kt. BE, Der neue Hagneckkanal, Besserer Hochwasserschutz, natürlichere Landschaft, 2015
- [11] BAFU [Bundesamt für Umwelt], 2021a. Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Umwelt-Wissen 2101, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.

- [12] Molnar P, Chang YY, Peleg N, Moraga S, Zappa M, Brunner MI, Seibert J, Freudiger D, Martius O, Mülchi R, 2020. Future changes in floods. In: Ruiz-Villanueva V, Molnar P, eds. Past, current, and future changes in floods in Switzerland. ETH Zurich, doi:10.3929/ETHZ-B-000462778, pp. 51–58.
- [13] Mülchi R, Rössler O, Schwanbeck J, Weingartner R, Martius O, 2020. Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz. Bericht CH2018 im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Geographisches Institut der Universität Bern.
- [14] Madsen H, Lawrence D, Lang M, Martinkova M, Kjeldsen TR, 2014. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, 519, 3634–3650. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.11.003.
- [15] Kauzlaric M, Nicolet G, Viviroli D, 2021. Entwicklung hydrometeorologischer Grundlagen. In: Andres N, Steeb N, Badoux A, Hegg C. Extremhochwasser an der Aare. Hauptbericht Projekt EXAR, Methodik und Resultate. WSL Berichte, 104. WSL, Birmensdorf, pp. 29–37.
- [16] Andres N, Badoux A, Dang V, Hingray B, Müller M, Pfäffli M, Schwab S, Sutter A, Viviroli D, Hegg C, 2021b. Diskussion der Unsicherheiten und Limitationen. Andres N, Steeb N, Badoux A, Hegg C, eds. Grundlagen Extremhochwasser Aare. Hauptbericht Projekt EXAR. Methodik und Resultate, Birmensdorf, pp. 222–226.
- [17] BAFU [Bundesamt für Umwelt], 2021b. Hochwasserstatistiken. <https://www.hydrodaten.admin.ch/de/stationen-und-daten.html>, aufgerufen am 01.10.2021.
- [18] Baumgartner E, Boldi M-O, Kan C, Schick S, 2013. Hochwasserstatistik am BAFU – Diskussion eines neuen Methodensets. *wasser, energie, luft*, 105(2), 103–110.
- [19] Breinlinger R, Gamma P, Weingartner R, 1992. Kenngrößen kleiner Einzugsgebiete. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 1.2. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [20] Viviroli D, Zappa M, Gurtz J, Weingartner R, 2009. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software*, 24(10), 1209–1222. doi: 10.1016/j.envsoft.2009.04.001.
- [21] Brunner MI, Hingray B, Zappa M, Favre AC, 2019. Future trends in the interdependence between flood peaks and volumes: hydro-climatological drivers and uncertainty. *Water Resources Research*, 55, 4745-4759. doi:10.1029/2019WR024701.

- [22] Bundesamt für Statistik (BfS) (2020): Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz und der Kantone 2020–2050.
- [23] ARE (2017), Bauzonenstatistik Schweiz 2017 – Statistik und Analysen Bundesamt für Raumentwicklung, Bern
- [24] Schwaab, J., Lautenbach, S., Braun-Dubler, N., Gmünder, M., Grêt-Regamey, A., & Van Strien, M. J. (2020). The difficulty of steering settlement development to reduce the loss of ecosystem services: an exploration of different development scenarios in Switzerland using spatially explicit land-use models. *Journal of Environmental Planning and Management*, 63(6), 1037-1055.
- [25] Bundesamt für Statistik BfS (2018): Merkmalskatalog Eidgenössisches Gebäude- und Wohnungsregister. Version 4.1.
- [26] Röthlisberger, V., Zischg, A. P., & Keiler, M. (2018): A comparison of building value models for flood risk analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(9), 2431-2453.
- [27] Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2008): Nutzungsreserven im Bestand. Konzeptstudie.
- [28] Nebel R., Hollenstein K., Di Carlo G., Niedermaier M., Scholl B. (2017): Schweizweite Abschätzung der Nutzungsreserven 2017.
- [29] Forschungsinitiative Hochwasserrisiken – vom Verstehen zum Handeln (2020). Schadensimulator: Konzept Überbauung der Bauzonenreserven
- [30] Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2020): Modelletablierung Nationales Personenverkehrsmodell (NPVM).
- [31] Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2017): Zonenstruktur und Verkehrsnetze.
- [32] Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2016): Tool Bevölkerung Beschäftigte (TBB).
- [33] Fehlmann A. (2019): Abschätzung Anteil baulicher Objektschutzmassnahmen an Gebäuden gegen Überschwemmung in den Hochwassergefahrenzonen.
- [34] Bundesamt für Umwelt BAFU (2020): Minimale Standards Kantonale Risikoübersichten für gravitative Naturgefahren.
- [35] Aller D. & Egli T. (2009): PLANAT Glossar. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 19 S.
- [36] Andres, N. et al. (2021): Extremhochwasser an der Aare. Hauptbericht EXAR. Methodik und Resultate. WSL Berichte, 104. 226 p.
- [37] Pfäffli, M., Baer, P., Sutter, A., Irniger, A., Hunziker, R. 2021: Extremhochwasser an der Aare. Detailbericht E Projekt EXAR.

- Hydraulische Modellierungen. ARGE GEOTEST-HZP-IUB. Zollikofen, Aarau, Bern: 106 S.
- [38] Irniger, A., Hunziker, R., Pfäffli, M. 2020: Extremhochwasser an der Aare. Detailbericht F Projekt EXAR. Morphologische Untersuchungen. ARGE GEOTEST-HZP-IUB. Zollikofen, Aarau, Bern: 122 S.
- [39] Müller M., Karrer T., Hemund. R., Billeter, P. 2021: Extremhochwasser an der Aare. Detailbericht D Projekt EXAR. Versagen wasserbaulicher Einrichtungen. ARGE GEOTEST-HZP-IUB. Bern: 127 S.
- [40] Jaberg S., Pfäffli M. 2019: Extremhochwasser an der Aare. Resultatmappe 1 Projekt EXAR. Kalibrierung und Validierung des hydraulischen Modells. ARGE GEOTEST-HZP-IUB. Zollikofen, Aarau, Bern: 59 S.
- [41] CH2018 (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp.
- [42] Zhang S, Zhou L, Zhang L, Yang Y, Wei Z, Zhou S, Yang D, Yang X, Wu X, Zhang Y, Li X, Dai Y, 2022. Reconciling disagreement on global river flood changes in a warming climate. Nature Climate Change. doi:10.1038/s41558-022-01539-7.

Anhang 1 Glossar und Abkürzungen

Grundsätzlich wurden die von der "Nationalen Plattform Naturgefahren PLANAT" eingeführten Begriffe verwendet. Sie und die wichtigsten verwendeten Abkürzungen werden im nachfolgenden Glossar zusammengefasst. Für spezifische Literaturverweise wird auf die PLANAT-Dokumentation [35] verwiesen.

Eintretenswahrscheinlichkeit

Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis bestimmter Grösse innerhalb einer definierten Zeitspanne stattfindet [35].

Gefahr

Zustand, Umstand oder Vorgang, aus dem ein Schaden für Mensch, Umwelt und/oder Sachgüter entstehen kann [35].

Gefährdung

Mögliches Ereignis (oder mögliche Entwicklung) – mit einer natürlichen, technischen oder machtpolitischen Ursache (Gefahr) – welches die Bevölkerung und ihre Lebensgrundlagen beeinträchtigt. Vorhandensein einer Gefahr für ein bestimmtes Objekt, etwa Person, Natur, Sachgut oder Funktion [35].

Hundertjährliches Ereignis

Ereignis, das statistisch im Durchschnitt einmal in hundert Jahren auftritt [35].

Objektschutz

Bauliche Objektschutzmassnahmen sind Massnahmen am oder direkt beim Objekt (Gebäude oder Anlage) mit dem Ziel, Schäden an Personen und Sachwerten zu vermeiden oder gering zu halten [33]. Raumplanerische, biologische oder organisatorische Massnahmen sowie Mobile Hochwasserschutzdämme, Sandsacksperrungen usw. werden nicht als Objektschutzmassnahmen berücksichtigt.

Relatives Schadenausmass

Das relative Schadenausmass quantifiziert die relative Zu- oder Abnahme des modellierten Schadenausmasses gegenüber einem heutigen Szenario «EHQ + 20 %» unter Berücksichtigung des Objektschutzszenarios OSM-2020.

Risiko

Ausmass und Wahrscheinlichkeit eines möglichen Schadens. Das individuelle Risiko beschreibt das Risiko für ein einzelnes Individuum. Es gibt die Wahrscheinlichkeit (z. B. pro Jahr) an, dass diesem Individuum ein bestimmter

Schaden zustösst (z. B. Tod). Das kollektive Risiko gibt den Erwartungswert der Gesamtheit aller Schäden (z. B. Personenschäden, Sachschäden etc.) einer Bezugseinheit wieder. Qualitative und/oder quantitative Charakterisierung eines Schadens hinsichtlich der Möglichkeit des Eintreffens und der Tragweite der Schadenswirkungen [35].

Risikokommunikation

Interaktiver Prozess des Austausches von Informationen und Meinungen zu Risiken zwischen wissenschaftlichen Expertinnen und Experten, Risikomanagerinnen und -managern (Behörden, Versicherungen), Vertretenden von Interessengruppen, Verbraucherinnen und Verbrauchern (Betroffenen) und interessierter Öffentlichkeit als Querschnittsfunktion der Risikoregulierung [35].

Schadenpotenzial

Grösse des möglichen Schadens im betrachteten Gefahrengebiet, der mit Schadensgrössen bzw. Schadenindikatoren quantifiziert wird. Summe der möglichen Schäden, die durch eine Handlung oder ein Ereignis ausgelöst werden können [35].

Schadenausmass

Das Schadenausmass wird bestimmt durch die Anzahl Personen, die Sachwerte und die Lebensgrundlagen, die einem gefährlichen Ereignis zum Zeitpunkt seines tatsächlichen Eintrittes ausgesetzt sind und durch die Verletzlichkeit der betroffenen Personen und Werte [35].

Transferpunkt

Ein Transferpunkt ist eine Stelle entlang des Gerinnes, an welchem keine grossflächigen Umströmungen auftreten können. Sämtliches Wasser – auch bei einem extremen Hochwasserereignis – muss die Stelle passieren. An einem Transferpunkt wurde im Projekt EXAR eine Auswertung der berechneten Abflüsse durchgeführt und eine Hochwasserstatistik erstellt.

Wiederkehrperiode

Zeitspanne, in der ein Ereignis einen Wert statistisch im Durchschnitt einmal erreicht oder überschreitet [35].

BfS: Bundesamt für Statistik.

GIS: Geographische Information System.

GWR: Gebäude und Wohnungsregister (BfS) [25].

HQ100, HQ300, EHQ, EHQ-Plus: Hochwasserszenarien mit bestimmte Widerkehrperiode (vgl. auch Glossar «*Hundertjährliches Ereignis*»).

MAF: Modell für die Ausweisung der Flächenreserve

MBS: Modell zur Berechnung der Siedlungsentwicklung

NPVM: Nationale Personenverkehrsmodell der Schweiz [30].

OSM: Objektschutzmassnahme

OSM-heute: Szenario der der heutige Zustand der Installierte Objektschutzmassnahmen berücksichtigt.

OSM-2040: Szenario der der Zustand der Installierte Objektschutzmassnahmen für den Jahr 2040 berücksichtigt (vgl. Kapitel 6.3.2).

OSM-2040-Plus: Szenario der eine erhöhte Zustand der Installierte Objektschutzmassnahmen für den Jahr 2040 berücksichtigt (vgl. Kapitel 6.3.2).

OSM-2100: Szenario der der Zustand der Installierte Objektschutzmassnahmen für den Jahr 2100 berücksichtigt (vgl. Kapitel 06.3.2).

OSM-2100-Plus: Szenario der eine erhöhte Zustand der Installierte Objektschutzmassnahmen für den Jahr 2100 berücksichtigt (vgl. Kapitel 06.3.2).

TBB: Tool Bevölkerung-Beschäftigte [32].

Anhang 2 Vergleich der Hochwasserstatistiken

Tabelle 6: Charakteristische Hochwasserabflüsse entlang der Aare aus der BAFU-Statistik, der Gefahrenkarte und der Studie Extremhochwasser an der Aare (EXAR).

Abschnitt	Station	HW-Abflüsse BAFU Statistik			HW-Abflüsse Gefahrenkarte**				HW-Abflüsse EXAR*					
		HQ30 BAFU	HQ100 BAFU	HQ300 BAFU	Quelle	HQ30 GK	HQ100 GK	HQ300 GK	EHQ GK	HQ30 EXAR	HQ100 EXAR	HQ300 EXAR	HQ1000/EH Q EXAR	EFHQ+ (EHQ + 20%)
Aare ab Thun	Thun	431	481	526	1	500	550	600	780	545	580	615	675	810
Aare ab Gürbe	Bern, Schönbühl	497	551	598	2	490	600	660	700/780					
Aare ab Worble					3	505	615	675	780	640	660	680	730	880
Aare vor Saane					4	460	595	660	725					
Aare nach Saane	Hegneck	1183	1456	1744	5	1170	1385	1580	1845	1440	1685	1915	2220	2660
Aare ab Bielersee	Brügg, Aegerlen	743	777	799	6	660	730	770	920	815	915	965	1010	1210
Aare ab Solothurn										795	865	920	985	1180
Aare ab Emme					6	1060	1200	1340	1490					
Aare ab Russbach/Ösch					6	1070	1220	1360	1510	1080	1235	1395	1560	1870
Aare ab Önz					6	1080	1220	1370	1520					
Aare ab Langete-Stollen					6	1100	1250	1400	1540					
Aare ab Murg	Murgenthal	1098	1176	1232	6	1100	1250	1400	1550					
Aare ab Pfaffnern					6	1120	1270	1430	1580					
Aare ab Wigger					6	1170	1330	1490	1650	1130	1295	1470	1650	1980
Aare ab Dünern					6	1190	1370	1530	1690					
Aare Aarau bis Subremündung					7	1208	1385	1551	1712	1175	1350	1515	1715	2060
Aare mit Sühre					7	1254	1443	1616	1781					
Aare mit Bünz					7	1298	1497	1677	1847					
Aare Brugg					7	1300	1500	1680	1850	1385	1605	1815	2075	2490
Aare vor Reuss	Brugg	1256	1340	1400	8	1308	1510	1691	1862					
Aare mit Reuss					8	1881	2140	2390	2636					
Aare mit Limmat					8	2285	2585	2883	3182					
Aare Unterggental/Silli	Unterggental	2383	2618	2804	8	2300	2600	2900	3200	2530	2920	3270	3670	4400

* Alle hier ausgewiesenen Simulationsergebnisse beziehen sich auf die Modellversion 2018. Während der Erarbeitung des vorliegenden Projekts wurden neue Simulationsergebnisse (Modellversion 2019) veröffentlicht, wodurch in anderen Studien, die sich auf die EXAR-Hydrologie beziehen, abweichende Werte angegeben sein können.
Quellen Gefahrenkarte:

- 1 Prozessbeurteilung Wasser, Tallüsse (ARGE GEOTEST/HZP)
- 2 Gefahrenkarte Wasser Aare Bern (780 m3/s); Generalplanerteam HW S Aarebogen, Hochwasserschutz Aare Bern - Gebietsschutz Quartiere an der Aare, Hydraulik und Geschiebe, 2017
- 3 Gefahrenkarte Itigen 2008, rev. 2018
- 4 BKW, Hochwasser an der Aare und Saane bei der Saanemündung, Flussbau AG, 2006
- 5 Gefahrenkarte Aarberg, Niederried, Radelfingen, 2010
- 6 Flussbau AG, Gefahrenkarte Aare, Grenchen - Olten, Gefahrenkarte Winznau, 2015
- 7 Gefahrenkarte Aare Aarau - Brugg, 2011
- 8 Gefahrenkarte Aare Villigen - Klingnau, 2010

Anhang 3 Berechnungen Schadenausmass

Berechnung des Schadenausmasses

Einleitende Bemerkungen

Gemäss den Anforderungen des Bundesamtes für Umwelt [34] erfolgte die Ermittlung der Schadenausmasse durch die Überlagerung der Gefahrengrundlagen (Intensitätskarten) mit dem Schadenpotenzial. Für weiterführende methodische Informationen sei auf [34] verwiesen.

Wahrscheinliches monetarisierte Schadenausmass

Das **wahrscheinliche monetarisierte Schadenausmass** wird in diesem Bericht als die **individuelle Todesfallwahrscheinlichkeit** einer Person im fixen Objekt (Gebäude) verstanden und anhand folgender Formel berechnet:

$$p_{PG,j} = p_{rA,j} \cdot \lambda_{G,j} \cdot p_{pr}$$

$p_{rA,j}$	räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Szenario j	[-]
$\lambda_{G,j}$	Letalität Personen im fixen Objekt (Gebäude)	[-]
p_{pr}	Präsenzwahrscheinlichkeit einer Person im fixen Objekt (Gebäude)	[-]

Die räumlichen Eintretenswahrscheinlichkeiten sowie die Letalität für alle Grund-szenarien wurden gemäss [34] gesetzt. Die Präsenzwahrscheinlichkeit einer Person im Objekt basiert auf der Anzahl Personen im Gebäude, die gemäss Kapitel 6.3.1 berechnet wurde.

Die Monetarisierung erfolgte anhand des *Value of Statistical live (VOSL)* und drückt die Zahlungsbereitschaft der Gesellschaft für die Verhinderung von Todesopfern (Grenzkosten) aus. Dieser Wert beträgt in der Schweiz 6.6 Millionen CHF. Unter Vernachlässigung von allfälligen Objektschutzmassnahmen liegt die **wahrscheinliche Anzahl Todesopfer** bei folgendem Wert:

$$AW_{PG,j} = p_{rA,j} \cdot \lambda_{G,j} \cdot n_G \cdot p_{pr}$$

$p_{rA,j}$	räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Szenario j	[-]
$\lambda_{G,j}$	Letalität Personen im fixen Objekt (Gebäude)	[-]
n_G	Anzahl durchschnittlich anwesender Personen im fixen Objekt (Gebäude)	[Personen]
p_{pr}	Präsenzwahrscheinlichkeit der Personen im fixen Objekt (Gebäude)	[-]

Die gesamte **wahrscheinliche Anzahl Todesopfer** berechnet sich wie folgt:

$$AW_{PG,tot,j} = \sum_{\text{Gebäude}} AW_{PG,j}$$

Das **wahrscheinliche monetarisierte Schadenausmass** (mit GK als Grenzkosten zu verstehen) wurde wie folgt berechnet:

$$AW_{P,j} = GK \cdot AW_{PG,tot,j}$$

Gesamter wahrscheinlicher Gebäudeschaden

Als gesamter wahrscheinlicher Gebäudeschaden werden Schäden, die Wohn- und Gewerbegebäude betreffen, verstanden. Der **wahrscheinliche Sachschaden** an einem Gebäude wird gemäss [34] folgendermassen berechnet:

$$AW_{G,j} = p_{rA,j} \cdot SE_{G,j} \cdot W_G$$

$p_{rA,j}$	räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Szenario j	[-]
$SE_{G,j}$	Schadenempfindlichkeit des Gebäudes	[-]
W_G	Sachwert des Gebäudes	[CHF]

Die räumliche Eintretenswahrscheinlichkeit und die Schadensempfindlichkeit wurden gemäss [34] gesetzt. Die Ermittlung der Sachwerte der Gebäude wird in Kapitel 6.3.1 genauer beschreiben.

Somit wird der **gesamte wahrscheinliche Gebäudeschaden** für das gewählte Grundscenario j als Summe der einzelnen Sachschäden berechnet:

$$AW_{G,tot,j} = \sum_{\text{Gebäude}} AW_{G,j}$$

Gesamtes Schadenausmasses

Das gesamte Schadenausmass ergibt sich als Summe des wahrscheinlichen monetarisierten Schadenausmasses und des gesamten wahrscheinlichen Gebäudeschadens innerhalb des gewählten Perimeters.

Anhang 4 Hotspotanalyse

Anhang 5 Kartenanhänge