

Starkniederschläge: Sachschäden durch Oberflächenabfluss (pluviales Hochwasser)

Technischer Bericht als Ergänzung des Hauptberichts NCCS-Impacts P5 - Die Kosten von ausgewählten Klimarisiken

Juni 2026

Dieser Bericht wurde im Rahmen des Programms «Entscheidungsgrundlagen für den Umgang mit dem Klimawandel in der Schweiz: Informationen zu sektorenübergreifenden Themen (NCCS-Impacts)» als Teil des Projektes «Kosten der Auswirkungen des Klimawandels in der Schweiz mit und ohne globale Klimaschutzmassnahmen» erstellt. Die Leitung für dieses Projekt seitens NCCS liegt beim Bundesamt für Umwelt (BAFU).

Projektnummer: 223004.00

Weitere Informationen: www.nccs.admin.ch/impacts

Kontakt

Sustainaccount AG

www.sustainaccount.com

info@sustainaccount.com

Zusammenfassung

Der Klimawandel erhöht in der Schweiz die Häufigkeit und Intensität kurzzeitiger Starkniederschläge. Besonders relevant für dicht bebaute und stark versiegelte Räume ist der Oberflächenabfluss (pluviales Hochwasser): Niederschlagswasser kann nicht ausreichend versickern oder über Entwässerungssysteme abgeführt werden und fliesst entlang der lokalen Topografie in Senken, an Gebäuden und über Verkehrs- und Infrastrukturanlagen ab. Der vorliegende technische Bericht dokumentiert die im NCCS-Impacts-P5-Ergebnisbericht verwendete Modelllogik für diesen Teil des Klimarisikos Starkniederschläge, präzisiert die mathematische Struktur der Schadensberechnung und ordnet die Anpassungsmassnahmen aus der projektbegleitenden Massnahmentabelle ein.

Die Modellierung kombiniert die Klimaszenarien CH2018 mit der hochaufgelösten Gefährdungskarte Oberflächenabfluss des BAFU, topografischen Informationen, historischen Ereignisdaten und einer probabilistischen Ereignismodellierung in CLIMADA. Die Exposition wird auf Objektebene für Immobilien, Mobilien und Infrastruktur abgebildet. Ereignisintensitäten werden über Vulnerabilitäts- beziehungsweise Depth-Damage-Funktionen in monetäre Schäden übersetzt. Die Schäden einzelner Ereignisse werden anschliessend mit deren Eintrittswahrscheinlichkeiten gewichtet und zu erwarteten jährlichen Schadenskosten aggregiert. Die Berechnung isoliert soweit möglich das Klimasignal: Neue Bauzonen und Bevölkerungswachstum werden nicht als zusätzliche Exposition modelliert.

Für den Referenzzustand weist der Hauptbericht jährliche Sachschäden durch Oberflächenabfluss von rund 264 Mio. CHF aus. Für 2060 steigen die erwarteten jährlichen Schäden auf rund 312 Mio. CHF unter RCP 2.6, 397 Mio. CHF unter RCP 4.5 und 631 Mio. CHF unter RCP 8.5. Gegenüber der Referenz entspricht dies einem Anstieg von rund 18 %, 50 % beziehungsweise 139 %. Für ein Extremjahr mit einer ungefähren Häufigkeit von 1 in 10 Jahren werden Schäden von 452 Mio. CHF, 708 Mio. CHF und 1.104 Mrd. CHF ausgewiesen. Besonders hohe absolute Schäden entfallen auf Immobilien und Infrastruktur.

Die Anpassung wird über einen Massnahmen-Mix abgebildet, der insbesondere permanenten und temporären Objektschutz, Retentions- und Schwammstadtmassnahmen, integrale Regenwasserbewirtschaftung und risikobasierte Raumplanung umfasst. Der Mix wird objektspezifisch nach grob beschriebenen lokalen Merkmalen wie Hangneigung und Versiegelung gewichtet. Gebäude mit erwartbar unwesentlichen Schäden erhalten im Modell keine zusätzlichen Objektschutzmassnahmen. Die Umsetzungswahrscheinlichkeit und der Massnahmenmix sind so kalibriert, dass die erwarteten Schäden auf Portfolioebene um rund 54 % reduziert werden. Die resultierenden Anpassungskosten für Oberflächenabfluss betragen 84 Mio. CHF/Jahr unter RCP 2.6, 92 Mio. CHF/Jahr unter RCP 4.5 und 107 Mio. CHF/Jahr unter RCP 8.5. Die verbleibenden Schadenskosten liegen bei 143, 182 beziehungsweise 290 Mio. CHF/Jahr. Damit sinken die Gesamtkosten aus verbleibendem Schaden und Anpassung gegenüber einer Situation ohne Anpassung um rund 27 %, 31 % und 37 %.

Die Resultate sind als nationale Grössenordnungen und nicht als objektscharfe Prognosen zu interpretieren. Wesentliche Unsicherheiten entstehen aus der Abbildung lokaler Entwässerungs- und Geländebeziehungen, fehlenden Informationen zu

Kanalnetzkapazitäten, Durchlässen und kleinräumigen Barrieren, generalisierten Vulnerabilitätskurven sowie der nicht vollständig dokumentierten Parametrisierung des probabilistischen CLIMADA-Ereignissets. Auch die exakten per-Gebäude-Schwellen und Gewichtungen des Anpassungsmixes sind in den bereitgestellten Projektdokumenten nicht ausgewiesen. Der Bericht erfindet diese Parameter deshalb nicht, sondern kennzeichnet sie als Reproduzierbarkeitslücken und beschreibt, welche Daten für eine vollständige Neuimplementierung erforderlich wären.

Einleitung

Extreme Niederschlagsereignisse haben in der Schweiz in den letzten Jahrzehnten an Bedeutung gewonnen. Starkniederschläge können über verschiedene Prozessketten zu Schäden führen: Flusshochwasser entsteht durch steigende Pegel in Gewässern, Oberflächenabfluss durch lokal nicht versickerndes oder nicht ausreichend abgeführtes Niederschlagswasser und Murgänge durch die Mobilisierung von Wasser und Sediment in steilen Einzugsgebieten. Diese Prozesse werden gemeinsam unter dem Klimarisiko «Sach- und Personenschäden durch Starkniederschläge» analysiert. Der vorliegende technische Bericht grenzt den Betrachtungsgegenstand enger ab und fokussiert auf Oberflächenabfluss beziehungsweise pluviales Hochwasser.

Oberflächenabfluss ist besonders lokal geprägt. Ob und in welchem Ausmass ein Starkregenereignis Schäden verursacht, hängt nicht allein von der Niederschlagsmenge ab. Entscheidend sind unter anderem die Versiegelung, die Infiltrationsfähigkeit des Bodens, Gefälle und Senken, vorhandene Fliesswege, die Lage und Ausbildung von Gebäudeöffnungen sowie die Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen. Die gleiche Niederschlagsintensität kann deshalb an zwei benachbarten Standorten sehr unterschiedliche Überflutungstiefen und Schäden verursachen. Diese räumliche Heterogenität ist ein wesentlicher Grund, weshalb das Modell auf hochaufgelöste Gefährdungs- und Gebäudedaten zurückgreift.

Mit fortschreitendem Klimawandel nehmen kurzzeitige Starkniederschläge in Häufigkeit und Intensität zu. Der Hauptbericht nennt für kurzzeitige Extremniederschläge bis zur Mitte des Jahrhunderts Grössenordnungen von rund 10-20 % Zunahme unter RCP 4.5 und 20-30 % unter RCP 8.5. Für kleine und mittlere Einzugsgebiete werden steigende Spitzenabflüsse von rund 20-40 % beschrieben. In urbanen Räumen können die Effekte durch hohe Versiegelungsgrade verstärkt werden. Gleichzeitig verschiebt sich die Wiederkehr heutiger seltener Ereignisse: Ein Ereignis, das heute ungefähr alle zehn Jahre auftritt, kann künftig deutlich häufiger eintreten. Diese Veränderungen bilden den klimatischen Treiber der vorliegenden Schadensanalyse.

Die Analyse betrachtet direkte Sachschäden an Immobilien, Mobilien und Infrastruktur. Personenschäden werden im quantitativen Modell nicht berücksichtigt, weil sie in der Schweiz im Zusammenhang mit den betrachteten Ereignissen bisher selten sind und keine ausreichend robuste Datengrundlage für eine nationale Monetarisierung vorliegt. Ebenso nicht enthalten sind Betriebsunterbrüche, Lieferketteneffekte, Verkehrsverzögerungen, Notfalleinsätze oder Schäden an Funktionen wie Wasserversorgung und

Abwasserbehandlung. Damit bildet die Monetarisierung nur einen Teil der tatsächlichen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Auswirkungen ab.

Der technische Bericht verfolgt drei Ziele. Erstens wird die Modellierungskette vom Klimasignal über Gefährdung, Exposition und Vulnerabilität bis zu den jährlichen Schadenskosten transparent dargestellt. Zweitens werden Auswahl, Logik und Bewertung der Anpassungsmassnahmen aus der Massnahmentabelle technisch eingeordnet. Drittens werden die Kostenergebnisse für Oberflächenabfluss separat ausgewertet, während gesamtwirtschaftliche Resultate nur dort diskutiert werden, wo eine eindeutige Zuordnung zum pluvialen Teilrisiko möglich ist.

Methodik

Ausgangslage und Systemgrenze

Die im NCCS-Impacts-P5-Projekt verwendete Risikologik folgt der für Klimarisiken üblichen Struktur aus Klimasignal beziehungsweise Gefährdung, Exposition und Vulnerabilität. Für Oberflächenabfluss wird diese Struktur auf einzelne Objekte angewandt und anschliessend auf die gesamte Schweiz aggregiert. Der Betrachtungszeitraum umfasst die Referenzperiode 1981-2010 und die Zukunftsperiode 2060, die im Projekt als Zeitraum 2045-2074 repräsentiert wird. Verwendet werden die Emissionsszenarien RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 gemäss CH2018.

Die Modellierung ist bewusst auf die Veränderung durch den Klimawandel ausgerichtet. Neue Bauzonen werden nicht hinzugefügt und Bevölkerungswachstum wird nicht als zusätzlicher Expositionstreiber berücksichtigt. Damit sollen die Effekte einer stärkeren Gefährdung nicht mit Veränderungen des Gebäude- und Bevölkerungsbestands vermischt werden. Diese Abgrenzung ist für die Interpretation wichtig: Die Ergebnisse sind keine vollständige Prognose der zukünftigen Gesamtschäden unter realer Siedlungsentwicklung, sondern eine klimatisch getriebene Veränderungsrechnung auf Basis der im Modell hinterlegten Exposition.

Modellierungskette: Oberflächenabfluss (pluviales Hochwasser)

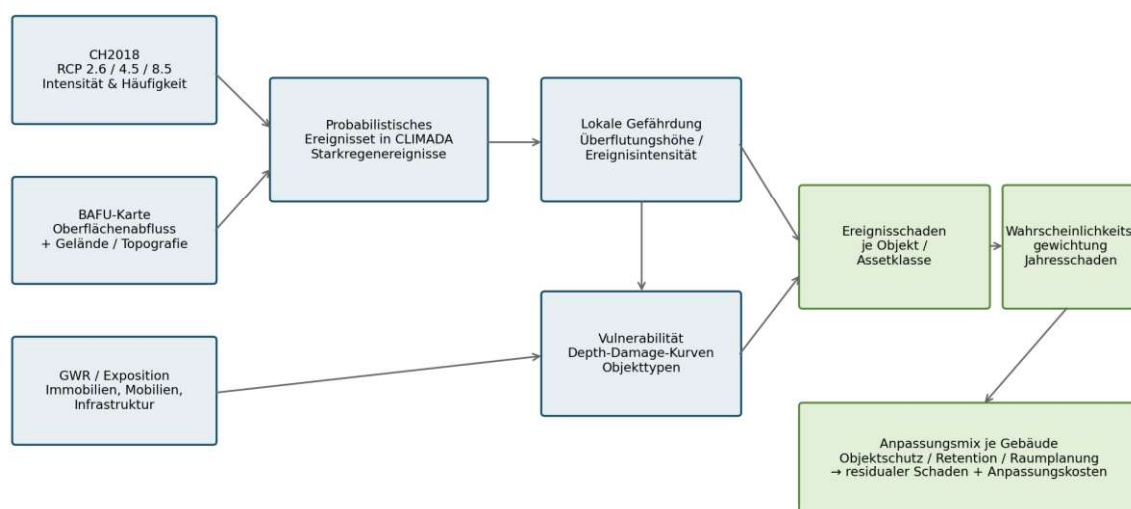


Abbildung 1: Schematische Modellierungskette für Oberflächenabfluss. Quelle: eigene Darstellung auf Basis des NCCS-P5-Ergebnisberichts.

Klimasignal und probabilistisches Ereignisset

Die klimatische Veränderung wird aus CH2018 abgeleitet. Intensitäten und Häufigkeiten von Starkregenereignissen werden für die drei RCP-Szenarien verändert und beispielhafte Starkregenereignisse mit CLIMADA modelliert werden. Die probabilistisch erzeugten Ereignisse werden mit Geländemodellen, Oberflächenabflussinformationen, Hochwasserzonen und historischen Flutereignissen zusammengeführt. Damit entsteht ein Ereignisset, das unterschiedliche Intensitäten und Eintrittswahrscheinlichkeiten abbildet.

Für die technische Interpretation kann der Klimafaktor eines Ereignisses e im Szenario s abstrakt als Veränderung der Niederschlagsintensität und/oder Ereignisfrequenz gegenüber der Referenz verstanden werden.

Klimasignal (konzeptionell)

$$I_{e,s} = f(I_e, \Delta I_s, \Delta F_s)$$

$I_{e,s}$ = Ereignisintensität im Szenario s ; ΔI_s = Intensitätsänderung; ΔF_s = Änderung der Ereignisfrequenz.

Kurzzeitige Extremniederschläge können bis zur Mitte des Jahrhunderts unter RCP 4.5 um etwa 10-20 % und unter RCP 8.5 um etwa 20-30 % zunehmen. Parallel können heutige 10-jährliche Starkregenereignisse künftig bereits etwa alle 3-5 Jahre auftreten. Diese Angaben dienen der Einordnung des Klimasignals, sind aber nicht als vollständige Ereignisparametrisierung des Modells zu verstehen.

Gefährdungsmodell Oberflächenabfluss

Die räumliche Basis der Gefährdung ist die Gefährdungskarte Oberflächenabfluss des BAFU. Diese bildet Fliesswege und potenzielle Überflutungsbereiche ab und wird mit topografischen Informationen verknüpft. Für ein einzelnes Ereignis wird aus der Kombination von Starkregenintensität, Gelände und bestehenden Gefährdungsinformationen die lokale Überflutungsintensität am Standort eines Objekts abgeleitet. Als schadenrelevante Intensitätsgrösse wird die Überflutungshöhe verwendet.

Die Gefährdungskarte bildet bereits einen Teil der heutigen Schutz- und Geländesituation ab. Zusätzliche Schutzmassnahmen werden in der Schadensmodellierung nur berücksichtigt, soweit sie in den vorhandenen Grundlagen enthalten sind. Kleinräumige hydraulische Elemente wie Bordsteine, Durchlässe, Unterführungen oder temporäre Barrieren können lokal entscheidend sein, sind aber aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht systematisch in der nationalen Modellierung enthalten. Gleiches gilt für die Kapazität von Kanalnetzen und deren Verhalten bei Verstopfung oder Überlastung.

Für die Modellierung bedeutet dies, dass die Gefährdung als hochaufgelöste, aber dennoch vereinfachte Repräsentation des tatsächlichen urbanen Abflusssystems zu verstehen ist.

Besonders in dicht bebauten Gebieten können kleine Geländekanten oder Entwässerungselemente den tatsächlichen Fliessweg stark verändern. Diese Effekte gehören deshalb zu den zentralen Unsicherheiten einer schweizweiten Skalierung.

Exposition

Die Exposition beschreibt die räumliche Verteilung der schadenrelevanten Werte. Drei Assetklassen werden unterschieden: Immobilien, Mobilien und Infrastruktur. Für Oberflächenabfluss erfolgt die Modellierung grundsätzlich auf Ebene einzelner Gebäude beziehungsweise Objekte; die Ergebnisse werden für den Ergebnisbericht anschliessend auf die gesamte Schweiz aggregiert. Als zentrale Datengrundlage für Gebäude wird das eidgenössische Gebäude- und Wohnungsregister (GWR) des BFS verwendet.

Komponente	Grundlage	Technische Bedeutung
Immobilien	GWR / räumliche Gebäudeverteilung	Objektscharfe Lage der Gebäude; monetäre Schäden über Vulnerabilitätskurven
Mobilien	Separate Schadenskategorie	Schäden an beweglichen Werten; genaue objektspezifische Wertzuordnung nicht dokumentiert
Infrastruktur	Separate Schadenskategorie	Schäden an Verkehrs- und weiteren Infrastrukturen; Detailinventar im Quellenbestand nicht spezifiziert
Sozio-ökonomische Entwicklung	Keine neuen Bauzonen; Bevölkerungswachstum ausgeschlossen	Isolierung des Klimaeffekts von Expositionswachstum

Tabelle 1: Expositionsponenten und dokumentierter Modellstatus. Quelle: eigene Zusammenstellung.

Vulnerabilität und Schadensfunktionen

Die Vulnerabilität beschreibt, welcher Anteil des exponierten Wertes bei einer bestimmten Überflutungsintensität beschädigt wird.

$$D_{i,e} = V_i \cdot v_k(h_{i,e})$$

$D_{i,e}$ = Schaden am Objekt i im Ereignis e; V_i = exponierter Wert; $h_{i,e}$ = Überflutungshöhe;

$v_k(h_{i,e})$ = Vulnerabilitätsfunktion für Objektklasse k (Anteil des beschädigten Wertes).

Huizinga, de Moel & Szewczyk (2017) stellen für sechs Nutzungsklassen normalisierte Depth-Damage Functions bereit: Residential, Commercial, Industrial, Transport, Infrastructure und Agriculture. Die Kurven geben den relativen Schaden $D(h)$ zwischen 0 und 1 als Funktion der

Überflutungstiefe h an. Die monetäre Schadenshöhe ergibt sich anschließend durch Multiplikation mit dem maximal schädigbaren Wert.

Für Europa lauten die Kurven:

Überflutungstiefe h	Wohnen	Gewerbe / Dienstleistung	Industrie	Transport	Infrastruktur
0.0 m	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
0.5 m	0.25	0.15	0.15	0.317	0.25
1.0 m	0.40	0.30	0.27	0.542	0.42
1.5 m	0.50	0.45	0.40	0.702	0.55
2.0 m	0.60	0.55	0.52	0.832	0.65
3.0 m	0.75	0.75	0.70	1.000	0.80
4.0 m	0.85	0.90	0.85	1.000	0.90
5.0 m	0.95	1.00	1.00	1.000	1.00
6.0 m	1.00	1.00	1.00	1.000	1.00

Für Immobilien erfolgte weiterhin eine Zuordnung zu Schweizer Objektklassen:

Schweizer Exposition	JRC-/CLIMADA-Funktion
Ein-/Mehrfamilienhäuser, Wohngebäude	Residential Europe (Wohnen)
Büro, Handel, Hotel, Schule, Spital, Verwaltung etc.	Commercial Europe (Gewerbe / Dienstleistung)
Fabrik, Produktionsgebäude, Lager, Logistik	Industrial Europe (Industrie)
Strassen-/Verkehrsanlagen	Transport Europe (Transport)
allgemeine Strassen-/Bahninfrastruktur	Infrastructure Europe (Infrastruktur)

Probabilistische Aggregation

Da einzelne Starkregenereignisse unterschiedliche Eintrittswahrscheinlichkeiten besitzen, werden die daraus resultierenden Schäden nicht einfach addiert, sondern nach deren Wahrscheinlichkeiten der Ereignisschäden gewichtet. Mathematisch entspricht dies einer Erwartungswertbildung über das modellierte Ereignisset. Der so erhaltene Wert ist als mittlerer jährlicher Schaden beziehungsweise erwartete jährliche Schadenskosten zu interpretieren.

$$E[D] = \sum_E \lambda_e \cdot D_e$$

$$D_e = \sum_i D_{i,e}$$

λ_e = Ereignisgewicht beziehungsweise jährliche Eintrittsrate des Ereignisses e.

Die genaue Konstruktion der Ereignisraten λ_e ist im Quellenbestand nicht dokumentiert. Deshalb wird der resultierende jährliche Schaden hier als projektspezifischer probabilistischer Erwartungswert bezeichnet und nicht mit einem externen Versicherungsmodell gleichgesetzt. Neben dem mittleren Jahr weist der Hauptbericht Extremjahre aus, die einer ungefähren Wiederkehrperiode von 1 in 10 Jahren entsprechen.

Datengrundlagen

Datengrundlage	Verwendung im Modell
CH2018 Klimaszenarien (2018)	Veränderung der Intensität und Häufigkeit von Starkniederschlägen; Szenarien RCP 2.6, 4.5, 8.5
Gefährdungskarte Oberflächenabfluss (BAFU, 2025b)	Räumliche Fliesswege, Senken und potenzielle Überflutungsbereiche
Gebäude- und Wohnungsregister (BFS, 2025b)	Räumliche Verteilung der Gebäude / Exposition
Unwetterschadens-Datenbank der Schweiz (WSL, 2025)	Historische Ereignisse und Plausibilisierung
Universität Bern / Mobiliarlab (2025; 2025a)	Grundlagen zu Hochwasserrisiken und Schadenpotenzial; im Gesamtrisiko insbesondere für Flusshochwasser
Huizinga et al. (2017)	Vulnerabilitäts- bzw. Depth-Damage-Funktionen für Überflutung
CLIMADA	Probabilistische Ereignismodellierung und Verknüpfung von Hazard, Exposure und Vulnerability

Tabelle 2: Zentrale Datengrundlagen der Modellierung. Quelle: NCCS-P5-Ergebnisbericht.

Sozioökonomische Annahmen

Die Modellierung hält die räumliche Exposition im Wesentlichen konstant, um das Klimasignal sichtbar zu machen. Neue Bauzonen werden nicht angenommen. Dies ist auch mit der Schweizer Planungsausrichtung «Innenentwicklung vor Aussenentwicklung» begründbar. Bevölkerungswachstum wird explizit ausgeschlossen. Eine reale Entwicklung mit Nachverdichtung, Wertsteigerungen, zusätzlicher Infrastruktur oder veränderten Nutzungen kann deshalb zu höheren zukünftigen absoluten Schäden führen, als die rein klimatische Veränderungsrechnung ausweist.

Gemäss Programmrahmen des NCCS-Impacts werden keine generellen Kostensteigerungen oder Baupreissteigerungen bis 2060 modelliert. Die Kosten sind damit in realen Preisen zu interpretieren. Der im Projekt allgemein verwendete Diskontfaktor für zukünftige Kosten beträgt 0 %.

Dokumentierte und nicht dokumentierte Implementierungsparameter

Element	Status in den Quellen	Konsequenz für Reproduzierbarkeit
RCP-Szenarien und Zeithorizont	voll dokumentiert	direkt reproduzierbar
BAFU-Gefährdungskarte als Basis	dokumentiert	Grunddatensatz identifizierbar
Verwendung von CLIMADA	dokumentiert	Modellrahmen identifizierbar
Anzahl / Dauer / räumliche Struktur der synthetischen Starkregenereignisse	nicht dokumentiert	Ereignisset nicht identisch rekonstruierbar
Transformation CH2018 → Ereignisintensität und Frequenz	nur konzeptionell beschrieben	Klimaskalierung nicht exakt rekonstruierbar
Geländemodell-Version und hydraulische Detailparameter	nicht vollständig dokumentiert	lokale Wasserstände nicht exakt rekonstruierbar
Zuordnung der Huizinga-Kurven zu Schweizer Objekttypen	nicht vollständig dokumentiert	Schadensfunktion nur konzeptionell reproduzierbar
Objektwerte für Mobilien / Infrastruktur	nicht vollständig dokumentiert	aggregierte Ergebnisse nutzbar, Objektmodell nicht vollständig reproduzierbar

Schwellen und Gewichte des Anpassungsmixes je Gebäude	nicht dokumentiert	Anpassungsmodell nur auf Aggregatniveau reproduzierbar
--	--------------------	--

Tabelle 3: Reproduzierbarkeitsstatus zentraler Modellparameter.

Limitationen der Gefährdungs- und Schadensmodellierung

- Die heutige Versiegelung, Hanglage und vorhandene Schutzsituation werden als Ausgangspunkt verwendet. Unsicherheiten in diesen Grössen wirken direkt auf die lokalen Fliesswege und Überflutungstiefen.
- Kanalnetzkapazitäten, Trenn-/Mischsysteme, Verstopfungen unter Extremregen und lokale Entwässerungsbauwerke werden mangels flächendeckender Daten nicht systematisch berücksichtigt.
- Die Qualität der Oberflächenabfluss-Hinweiskarten hängt von Auflösung und Qualität des digitalen Geländemodells ab. Kleine Barrieren, Bordsteine, Durchlässe und Unterführungen können lokal falsch oder unvollständig repräsentiert sein.
- Kombinationsereignisse wie Starkregen bei gleichzeitig hohem Vorfluter, Schneeschmelze oder erhöhtem Seepegel werden nicht explizit modelliert.
- Depth-Damage-Kurven sind generalisiert. Kontamination, lange Trocknungszeiten, Gebäudenutzung und Betriebsunterbrüche können zu zusätzlichen, im Modell nicht enthaltenen Schäden führen.
- Externe Kosten wie Verkehrsverzögerungen, Notfalleinsätze, Entsorgung und Lieferkettenunterbrüche sind nicht Teil der direkten Sachschäden.

Klimaanpassung

Selektion von Anpassungsmassnahmen

Die projektbegleitende Massnahmentabelle ordnet das Klimarisiko «Sach- und Personenschäden durch Starkniederschläge» dem Risiko-Code HW-Schäd zu und enthält 47 Einträge. Für die nationale Modellierung werden diese Einzelmassnahmen zu drei zentralen Massnahmenpaketen zusammengefasst: Objektschutz, Prävention Naturgefahren und risikobasierte Raumplanung. Zusätzlich enthält die Massnahmentabelle einen separaten Reiter mit 28 detaillierten Vorschlägen für klimaangepasste Gebäude, die für Oberflächenabfluss relevant sind.

Analog zur Struktur des technischen Wasserkraftberichts erfolgt die Auswahl der Massnahmen nicht allein anhand ihrer theoretischen Wirksamkeit. Die Massnahmentabelle bewertet unter anderem Wirkungsart und Effektivität, Investitions- und Betriebskosten, Robustheit, Nachhaltigkeit, finanzielle Tragbarkeit, positive Nebeneffekte, Flexibilität, Zielkonflikte sowie Verteilungsgerechtigkeit. Diese Kriterien sind für pluviale Risiken besonders relevant, weil ein Massnahmenpaket häufig mehrere Ebenen kombinieren muss: Ein einzelnes Gebäude kann zwar geschützt werden, gleichzeitig muss aber vermieden

werden, dass Wasser lediglich auf Nachbargrundstücke oder in nachgelagerte Siedlungsbereiche verlagert wird.

Selektionskriterien

Lokale hydraulische Relevanz. Massnahmen werden danach beurteilt, ob sie am konkreten Schadensmechanismus ansetzen. In einem steilen Gelände mit ausgeprägtem Fliessweg kann eine gezielte Ableitung oder Barriere wirksamer sein als reine Versickerung. In flachen, stark versiegelten Gebieten kann zusätzliche Retention beziehungsweise Entsiegelung wirksamer sein. Die Quelle dokumentiert, dass die Modellgewichtung je Gebäude grob auf Merkmalen wie Hangneigung und Versiegelung basiert; konkrete Schwellenwerte sind nicht ausgewiesen.

Robustheit. Starkregen ist mit erheblichen Unsicherheiten in Intensität, Dauer und räumlicher Verteilung verbunden. Massnahmen sind deshalb besonders geeignet, wenn ihre Wirkung nicht nur für ein einzelnes Bemessungsereignis besteht. Die Massnahmentabelle bewertet zahlreiche Retentions- und Objektschutzmassnahmen als robust und flexibel.

Technische und institutionelle Umsetzbarkeit. Die Umsetzung erfolgt durch unterschiedliche Akteure: Bund, Kantone, Gemeinden, Privatwirtschaft und Private. Raumplanerische und wasserwirtschaftliche Massnahmen benötigen andere Entscheidungs- und Investitionsprozesse als Objektschutz am Einzelgebäude. Die technische Modellierung fasst diese Unterschiede in einer Umsetzungswahrscheinlichkeit beziehungsweise in einem Massnahmenmix zusammen.

Kosten und Effizienz. Für die meisten HW-Schäd-Massnahmen enthält die Massnahmentabelle qualitative Kosteneinschätzungen, häufig «tief», aber keine belastbaren schweizweiten Einheitspreise. Der Ergebnisbericht weist dennoch aggregierte jährliche Anpassungskosten aus. Die zugrunde liegende vollständige Einheitspreis- und Skalierungsbibliothek ist in den bereitgestellten Dokumenten nicht enthalten. Für eine spätere Neuimplementierung sollten diese Kostenparameter separat dokumentiert werden.

Synergien und Zielkonflikte. Retentions- und Schwammstadtmassnahmen können gleichzeitig Hitzebelastung reduzieren, Biodiversität fördern und Wasser in Trockenperioden verfügbar machen. Umgekehrt können harte Schutzbauten, Pumpwerke oder unkoordinierter Objektschutz negative ökologische oder räumliche Nebenwirkungen verursachen. Diese Wechselwirkungen werden in der Massnahmentabelle qualitativ erfasst und sind Bestandteil der Auswahlentscheidung.

Massnahmenpakete

Nr.	Massnahmenpa ket	Wesentliche Massnahmen
-----	---------------------	------------------------

A1	Objektschutz	Temporäre mobile oder stationäre Barrieren; permanente Objektschutzmassnahmen an Gebäuden; Schutz kritischer Öffnungen und technischer Einrichtungen.
A2	Prävention Naturgefahren	Monitoring und Gefährdungsanalysen; robuste Schutzbauten; Wasserretention / Schwammstadt;

		Entsiegelung, Retentionsflächen, Revitalisierung, Zwischenspeicher und Dachbegrünung; Integration in SIA-Normen; Notfallplanung und Sensibilisierung.
A3	Risikobasierte Raumplanung	Integration des Klimawandels in Gefahrenkarten und Richt-/Nutzungsplanung; Wasserrückhalt innerhalb und ausserhalb des Siedlungsgebiets; integrale Regenwasserbewirtschaftung; Trenn-/Mischsysteme der Kanalisation.

Tabelle 4: Zentrale Anpassungsmassnahmen für Starkniederschläge. Quelle: Massnahmentabelle und NCCS-P5-Ergebnisbericht.

Ausgewählte Massnahmen aus der Massnahmentabelle

Massnahme	Akteur	Wirkung / Beschreibung	Qualitative Bewertung
Temporäre Objektschutzmassnahmen	Gemeinden	Mobile oder stationäre Barrieren zum gezielten Schutz kritischer Infrastrukturen; abhängig von Warnung und Einsatzplanung.	CAPEX tief; OPEX tief; Robustheit, Tragbarkeit und Flexibilität hoch.
Permanente Objektschutzmassnahmen	Private / Privatwirtschaft	Dauerhafte konzeptionelle oder technische Sicherung gefährdeter Bauten und Infrastrukturen.	CAPEX tief bis mittel; OPEX tief; Robustheit und Flexibilität hoch.
Wasserrückhalt im Siedlungsgebiet	Gemeinden	Topografische Analyse von Flliesswegen und Senken; Nutzung flutbarer Flächen und lokaler Rückhalteräume.	Direkte, hohe Wirkung; qualitative Kosten tief; hohe Robustheit.
Wasserrückhalt ausserhalb des Siedlungsgebiets	Kantone	Retentionsräume, Dämme, Grabensysteme, angepasste Land-/Forstnutzung und weitere Rückhalteelemente im Einzugsgebiet.	Direkte, hohe Wirkung; qualitative Kosten tief; hohe Robustheit.
Integrale Regenwasserbewirtschaftung	Kantone	Schwammstadtansatz mit präventiven, topografischen, oberirdischen, unterirdischen und gebäudebezogenen Bausteinen.	Direkte, hohe Wirkung; qualitative Kosten tief; hohe Nachhaltigkeit und Flexibilität.
Entsiegelung von Oberflächen	Gemeinden	Grünflächen und teil-/durchlässige Beläge zur Reduktion des Oberflächenabflusses.	Indirekte Wirkung; qualitative Kosten tief; positive

			Nebeneffekte hoch.
Retentions- flächen im Siedlungsraum	Gemeinden	Teiche, Gräben, flutbare Grün- und Freiflächen, Mulden, Baumrigolen und temporär flutbare Infrastrukturen.	Indirekte Wirkung; qualitative Kosten tief; hohe Robustheit und positive Nebeneffekte.
Dach- begrünungen / Einstaudächer	Gemeinden / Private / Unternehmen	Verdunstung und temporärer Wasserrückhalt auf Dachflächen.	Qualitative Kosten tief; hohe Robustheit, Nachhaltigkeit und Flexibilität.
Unterirdische Zwischenspeicher	Gemeinden	Rigolen, Rückhaltebecken, Entlastungskanäle und Zisternen zur Dämpfung von Abflussspitzen.	Qualitative Kosten tief; hohe Robustheit und Flexibilität.

Tabelle 5: Beispiele und qualitative Bewertungen aus der Massnahmentabelle. Quelle: NCCS-Impacts P5 Massnahmentabelle.

Gebäudebezogene Detailmassnahmen

Der separate Reiter «Massnahmen_KlimaangepasstGebäud» ergänzt die übergeordneten Pakete durch konkrete Massnahmen am Gebäude und Grundstück. Für das Risiko HW-Schäd sind 28 Einträge ausgewiesen. Die Liste enthält keine quantitativen CAPEX/OPEX-Werte für diese pluvialen Massnahmen, erlaubt aber eine systematische Strukturierung nach Hülle, Entwässerung, Retention, Gebäudetechnik und Betriebsorganisation.

Bereich	Beispiele aus der Massnahmentabelle
Gebäudehülle	Wasserabweisende Materialien; wirksame Abdichtung; wasserresistente Beschichtungen und Mörtel; Sicherung loser Fugen und Bauteile.
Dach und Regenwasser	Inspektion und Reinigung von Dachabläufen; Fallrohre umlenken; blaues Dach; blau-grünes Dach; Gründach; Regenwassertanks.
Grundstück / Retention	Versickerungsgräben und Mulde-Rigole; durchlässige Oberflächen; Bodenaufbereitung; Regenbeete und Mulden; Pufferzonen; Dränagesysteme.
Abwasser / Rückstau	Rückstauklappen; Abwasserpumpen; Niederschlagswasser vom Abwasser trennen; nachhaltige urbane Entwässerung.
Gebäudekonzept	Hochgesetzte Konstruktion; Technik und Elektrik oberhalb der Flutlinie; «nasses» Floodproofing; kompakte Gebäudekubatur.
Barrieren	Permanente Hochwasserschutzbarrieren; temporäre Schutzbarrieren.

Planung / Betrieb	Voruntersuchung des Baugrunds; regelmässige Wartung und Reinigung.
--------------------------	--

Tabelle 6: Gebäudebezogene Detailmassnahmen für Oberflächenabfluss. Quelle: Massnahmentabelle.

Modellierung der Wirksamkeit des Anpassungsmixes

Für die quantitative Kostenrechnung wird kein einzelnes Schutzbauwerk als universelle Lösung angenommen. Stattdessen wird ein Massnahmen-Mix vorgeschlagen. Die einzelnen Massnahmen können sich gegenseitig verstärken oder abschwächen; deshalb sollen möglichst wenige gegenseitige Abhängigkeiten kombiniert werden. Der Mix wird für jedes Gebäude grob nach lokalen Merkmalen wie der Neigung des umgebenden Geländes und der Versiegelung gewichtet. Für Gebäude mit erwartbar unwesentlichem Schaden wird keine zusätzliche Objektschutzmassnahme angenommen.

Die genaue Zuordnungslogik ist im Quellenbestand nicht als vollständiger Algorithmus dokumentiert. Auf Aggregatniveau ist jedoch die Kalibrierung nachvollziehbar: Der Massnahmen-Mix und die Umsetzungswahrscheinlichkeit werden so gewählt, dass etwa die Hälfte der Schadenskosten vermieden wird. Die Ergebniswerte entsprechen einer Reduktion von rund 54 % in allen drei RCP-Szenarien. Für die technische Darstellung kann dies als aggregierter Reduktionsfaktor formuliert werden:

$$D_{s,adapt} = (1 - r) \cdot D_{s,ohne} \quad \text{mit } r \approx 0.54 \text{ auf aggregierter Portfolioebene}$$

$D_{s,ohne}$ = erwartete Schadenskosten ohne zusätzliche Anpassung;

$D_{s,adapt}$ = verbleibende Schadenskosten nach Umsetzung des modellierten Massnahmenmixes.

Der Faktor r ist keine universelle Wirksamkeit einzelner Massnahmen. Er entsteht aus dem gewählten Portfolio aus Massnahmen, deren Umsetzungswahrscheinlichkeiten und der objektspezifischen Gewichtung. Eine streng objektscharfe Anwendung erfordert separate Wirkungsfunktionen für jede Massnahme, die in den bereitgestellten Dokumenten nicht enthalten sind.

Zielkonflikte und Maladaptation

Es werden mehrere Formen möglicher Maladaptation ausgewiesen. Sie sind für pluviale Risiken besonders relevant, weil lokale Schutzmassnahmen die Wasserwege und damit die Gefährdung benachbarter oder nachgelagerter Bereiche verändern können.

Zielkonflikt / Fehlanpassung	Mechanismus	Mögliche Folge	Konsequenz für Planung
Unterdimensionierter Schutz	Bemessung auf zu schwaches Starkregenereignis	Versagen bei extremeren Ereignissen; hohe Restschäden und Fehlinvestitionen	Szenario- und Extremereignisse in Bemessung berücksichtigen; Restrisiko transparent ausweisen.
Harte Schutzbauten vs. Ökologie	Gewässerverbauung und veränderte Strömung	Biodiversitätsverlust, Erosion, Verlagerung von Flutwellen	Naturbasierte und räumlich integrierte Lösungen mitprüfen.
Schneller Wasserabtransport vs. Unterlieger	Ableitung verkürzt Retentionszeit	Höhere Abflussspitzen und Schäden fluss-/geländeabwärts	Rückhalt und Drosselung gegenüber reiner Ableitung priorisieren.
Pumpwerke als alleinige Strategie	Hoher Strom- und Betriebsbedarf; Abhängigkeit von Funktion im Ereignis	Zielkonflikt Klimaschutz; Ausfall- und Überlastungsrisiko	Pumpen nur als Teil redundanter Systeme einsetzen.
Objektschutz vs. Nachbarschaft	Barrieren verändern lokale Fliesswege	Mehr Oberflächenabfluss auf Nachbargrundstücken	Quartiers- und Einzugsgebietsbetrachtung statt isolierter Objektoptimierung.
Versickerung vs. Grundwasserqualität	Infiltration potenziell belasteten Wassers	Eintrag von Schadstoffen in Boden und Grundwasser	Vorbehandlung und Standortprüfung einplanen.
Schein-Sicherheit (Levee-Effekt)	Schutzbauwerk erhöht subjektive Sicherheit	Mehr Bebauung im Gefährdungsraum; höheres Restrisiko	Raumplanung und Risikokommunikation mit Schutzbau kombinieren.
Versicherung / Subvention vs. Lock-in	Wiederaufbau am gleichen riskanten Standort	Fortschreibung hoher Exposition	Finanzielle Anreize an integriertes Risikomanagement koppeln.

Tabelle 7: Zielkonflikte und Maladaptationsrisiken. Quelle: NCCS-P5-Ergebnisbericht; Konsequenzen für Planung als technische Einordnung der dort genannten Risiken.

Limitationen des Anpassungsmodells

- Die tatsächliche Hochwassergefährdung ist unsicher. Eine auf ein einzelnes Bemessungsereignis dimensionierte Massnahme kann bei einem stärkeren Ereignis versagen.
- Der nationale Modellansatz bildet die Eignung einzelner Massnahmen nur grob über lokale Merkmale ab. Detaillierte Gebäudeöffnungen, Kellerzugänge, Haustechnik, lokale Entwässerung und bauliche Zustände sind nicht objektscharf hinterlegt.
- Die Massnahmentabelle enthält für viele pluviale Massnahmen qualitative, aber keine numerischen CAPEX/OPEX. Die Quelle der aggregierten nationalen Kosten lässt sich deshalb aus den bereitgestellten Dateien nicht vollständig auf Einzelmassnahmen zurückrechnen.
- Die Wirksamkeiten der Einzelmassnahmen und ihre Abhängigkeiten sind nicht als explizite Funktionen dokumentiert. Der 54-%-Reduktionswert ist eine Portfolio-Kalibrierung, keine universelle technische Schutzwirkung.

Potential zur Erweiterung des Anpassungsmodells

Eine Weiterentwicklung sollte die Massnahmen nicht nur als aggregierten Portfoliosfaktor, sondern als explizite Eingriffe in Gefährdung und Vulnerabilität modellieren. Retentionsmassnahmen könnten beispielsweise die lokale Abflussspitze beziehungsweise Überflutungstiefe reduzieren, während Objektschutz die Vulnerabilitätsfunktion eines Gebäudes verändert. Dadurch würde sichtbar, ob eine Massnahme am Hazard, an der Exposure oder an der Vulnerability ansetzt und wie mehrere Massnahmen technisch zusammenwirken.

- Aufbau objektspezifischer Wirkungsfunktionen für Rückstauklappen, Barrieren, erhöhte Technik, Abdichtung und Retentionsmassnahmen.
- Kopplung von Oberflächenabfluss und Kanalnetz, um Kapazitäten, Rückstau und Überlastung unter Starkregen abzubilden.
- Integration kleinräumiger Geländeelemente und 3D-Gebäudegeometrien zur besseren Erfassung von Eintrittspunkten und Fliesswegen.
- Kalibrierung von Schutzwirkungen und Schadensfunktionen mit Schweizer Claims- und Ereignisdaten.
- Szenariobasierte Bemessung von Massnahmen inklusive 1-in-10-, 1-in-30- oder seltenen Stressereignissen, statt nur eines einzelnen Designereignisses.
- Explizite Abbildung von Umsetzungspfaden: Zeitpunkt der Investition, Lebensdauer, Erneuerungszyklen und Nachrüstung.

Modellierung der Klimakosten

Schadenskosten

Die Schadenskosten ergeben sich direkt aus der probabilistischen Sachschadensmodellierung. Für jedes Ereignis werden die Schäden an Immobilien, Mobilien und Infrastruktur bestimmt und anschliessend über die Ereigniswahrscheinlichkeiten zu jährlichen Erwartungswerten aggregiert. Die Kosten werden in realen Schweizer Franken ausgewiesen; allgemeine Kostensteigerungen bis 2060 sind gemäss Programmrahmen nicht enthalten.

$$C_{s, \text{Schaden}} = E[D_s] = C_{s, \text{Immobilien}} + C_{s, \text{Mobilien}} + C_{s, \text{Infrastruktur}}$$

Die drei Teilkomponenten werden für Referenz und RCP-Szenarien separat ausgewiesen.

Die Schadenskosten sind direkte physische Sachschäden. Nicht enthalten sind Produktionsausfälle, Lieferkettenunterbrechungen, Verkehrsverzögerungen, gesundheitliche Auswirkungen, Notfallkosten oder langfristige Wachstumsverluste. Dadurch ist die monetäre Risikogrösse tendenziell enger als der gesellschaftliche Gesamtschaden.

Anpassungskosten

Die Anpassungskosten werden für den modellierten Massnahmen-Mix nach Assetklassen ausgewiesen. Der Hauptbericht enthält jährliche Kosten für Immobilien, Mobilien und Infrastruktur. Für Oberflächenabfluss steigen die Gesamtkosten des Massnahmenmixes von 84 Mio. CHF/Jahr unter RCP 2.6 auf 107 Mio. CHF/Jahr unter RCP 8.5. Die bereitgestellte Massnahmentabelle enthält zu vielen relevanten Einzelmassnahmen lediglich qualitative Kostenklassen.

Szenario	Immobilien	Mobilien	Infrastruktur	Total
RCP 2.6	46	8	29	84
RCP 4.5	50	9	32	92
RCP 8.5	59	10	37	107

Tabelle 8: Jährliche Anpassungskosten des Massnahmen-Mixes für Oberflächenabfluss 2060 (Mio. CHF/Jahr). Quelle: NCCS-P5-Ergebnisbericht. Rundungsdifferenzen zwischen Komponenten und Total sind im Quellbericht vorhanden.

Verteilung der Kosten auf Beteiligte

Für Flusshochwasser, Oberflächenabfluss und Murgänge wird ein gemeinsames Verteilungsschema verwendet. Bei Immobilienschäden tragen in 19 Kantonen die kantonalen Gebäudeversicherungen einen grossen Anteil. In den GUSTAVO-Kantonen (GE, UR, SZ, TI, AI, VS, OW) ohne entsprechendes KGV-Monopol ist die Verteilung deutlich privatlastiger. Mobilien werden überwiegend privat versichert, während Infrastrukturschäden vor allem von der öffentlichen Hand getragen werden.

Schadens-kategorie	Bund	Kantone	Städte / Gemeinden	Privat-wirtschaft	Haushalte
Immobilien	2 %	80 % (5 %)	3 %	10 % (75 %)	5 % (15 %)
Mobilien	5 %	5 %	10 %	30 %	50 %
Infrastruktur	45 %	35 %	15 %	5 %	0 %

Tabelle 9: Verteilung der Schadenskosten. Werte in Klammern für GUSTAVO-Kantone. Quelle: Experteneinschätzung im NCCS-P5-Ergebnisbericht.

Anpassungs-kategorie	Bund	Kantone	Städte / Gemeinden	Privat-wirtschaft	Haushalte
Immobilien	0 %	25 % (10 %)	10 %	30 % (45 %)	35 % (40 %)
Mobilien	0 %	10 %	10 %	25 %	55 %
Infrastruktur	40 %	35 %	15 %	10 %	0 %

Tabelle 10: Verteilung der Anpassungskosten. Werte in Klammern für GUSTAVO-Kantone. Quelle: Experteneinschätzung im NCCS-P5-Ergebnisbericht.

Für die Anpassung an Immobilien wird der Objektschutz primär von Eigentümerinnen und Eigentümern getragen, teilweise unterstützt durch kantonale Gebäudeversicherungen und punktuell Gemeinden. Bei Infrastruktur sind Hochwasser- und Wasserbauprojekte Verbundaufgaben zwischen Bund, Kantonen und Gemeinden. Die Kostenverteilung ist deshalb nicht nur eine technische, sondern auch eine institutionelle Annahme der Modellierung.

Verbleibende Schadenskosten und Gesamtkosten

Die verbleibenden Schadenskosten werden aus dem modellierten Schaden ohne Anpassung und der aggregierten Wirksamkeit des Massnahmen-Mixes bestimmt. Die Gesamtkosten sind

die Summe aus verbleibendem Schaden und Anpassungskosten. Für die mittleren Jahreswerte sind diese Grössen in den Quelltabellen konsistent und bilden die zentrale Grundlage der Kosten-Nutzen-Einordnung.

$$C_{s, \text{gesamt}} = C_{s, \text{Schaden, adapt}} + C_{s, \text{Anpassung}}$$

$$\text{Netto-Kostenreduktion} = C_{s, \text{Schaden, ohne}} + C_{s, \text{gesamt}}$$

Szenario	Schaden ohne Anpassung	Verbleibender Schaden	Anpassungskosten	Gesamtkosten mit Anpassung	Reduktion Gesamtkosten
RCP 2.6	312	143	84	227	27 %
RCP 4.5	397	182	92	274	31 %
RCP 8.5	631	290	107	397	37 %

Tabelle 11: Kostenvergleich Oberflächenabfluss 2060, mittleres Jahr (Mio. CHF/Jahr). Quelle: NCCS-P5-Ergebnisbericht; Prozentwerte aus den ausgewiesenen Totalkosten.

Plausibilitätskennzahl vermiedener Schaden pro Anpassungsfranken

Aus den im Hauptbericht ausgewiesenen jährlichen Kosten lässt sich als ergänzende, rein statische Plausibilitätskennzahl das Verhältnis aus vermiedenen Schadenskosten zu Anpassungskosten bestimmen. Diese Kennzahl ist keine vollständige Kosten-Nutzen-Analyse: Sie berücksichtigt weder Lebensdauern noch zeitliche Investitionspfade, Diskontierung, Nebennutzen oder Verteilungswirkungen. Sie zeigt jedoch, wie stark die jährliche direkte Schadensreduktion im Verhältnis zu den ausgewiesenen jährlichen Anpassungskosten ist.

Szenario	Vermiedener Schaden (Mio. CHF/Jahr)	Anpassungskosten (Mio. CHF/Jahr)	Verhältnis vermiedener Schaden / Anpassung
RCP 2.6	169	84	ca. 2.0
RCP 4.5	215	92	ca. 2.3
RCP 8.5	341	107	ca. 3.2

Tabelle 12: Abgeleitete Plausibilitätskennzahl aus den Quellwerten. Eigene Berechnung auf Basis des NCCS-P5-Ergebnisberichts.

Die Kennzahl steigt mit dem Emissionsszenario. Der Grund ist, dass die Schäden ohne Anpassung stärker zunehmen als die ausgewiesenen jährlichen Kosten des Massnahmenmixes. Innerhalb der Modellannahmen gewinnt Anpassung damit bei stärkerem Klimawandel an relativer ökonomischer Bedeutung.

Ergebnisse

Schadenskosten ohne zusätzliche Anpassung

Szenario	Immobilien	Mobilien	Infrastruktur	Total	Veränderung ggü. Referenz
Referenz	145	27	93	264	-
RCP 2.6	172	31	109	312	+18 %
RCP 4.5	218	39	139	397	+50 %
RCP 8.5	347	63	221	631	+139 %

Tabelle 13: Jährliche Schadenskosten durch Oberflächenabfluss im mittleren Jahr (Mio. CHF/Jahr). Quelle: NCCS-P5-Ergebnisbericht; Veränderung ggü. Referenz eigene Berechnung.

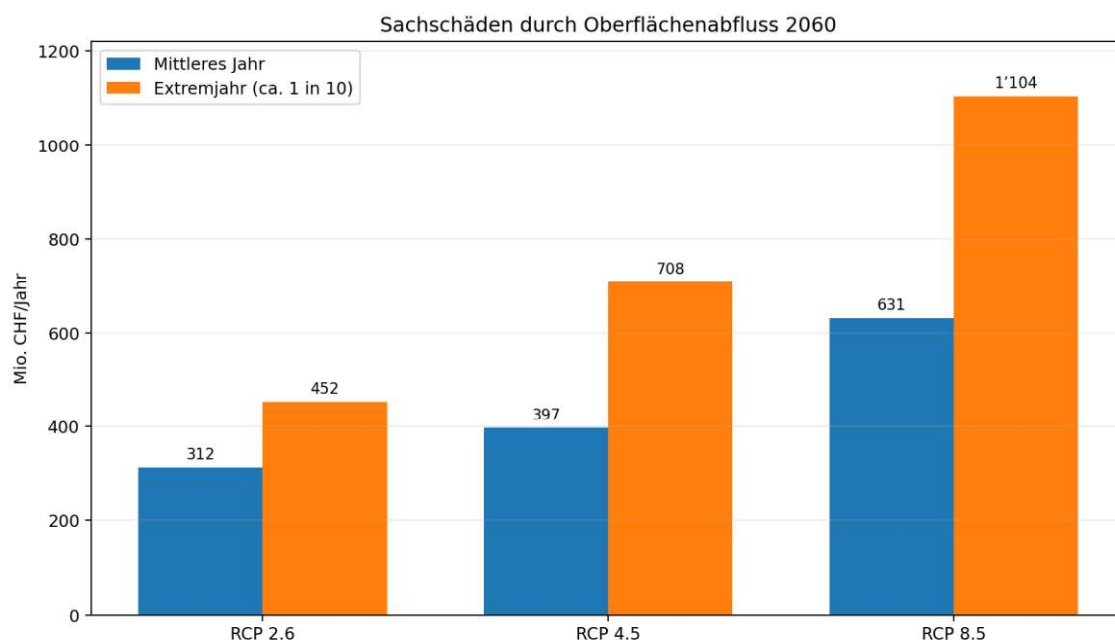


Abbildung 2: Jährliche Schadenskosten durch Oberflächenabfluss 2060 im mittleren Jahr und Extremjahr. Quelle: eigene Darstellung auf Basis des NCCS-P5-Ergebnisberichts.

Die Szenarien divergieren deutlich. Unter RCP 2.6 liegt der erwartete jährliche Schaden nur moderat über der Referenz. Unter RCP 4.5 beträgt der Anstieg bereits rund die Hälfte des heutigen Referenzwerts. Unter RCP 8.5 steigt der mittlere jährliche Schaden auf mehr als das Doppelte der Referenz. Die Ergebnisse verdeutlichen damit, dass nicht nur die Intensität einzelner Ereignisse, sondern insbesondere die höhere Häufigkeit schadenrelevanter Starkregenereignisse die jährliche Risikogrösse erhöht.

Extremjahre

Für Extremjahre mit einer ungefähren Häufigkeit von 1 in 10 Jahren steigen die Schäden wesentlich stärker. Der Hauptbericht weist 452 Mio. CHF unter RCP 2.6, 708 Mio. CHF unter RCP 4.5 und 1.104 Mrd. CHF unter RCP 8.5 aus. Das Verhältnis von Extremjahr zu mittlerem Jahr liegt damit bei etwa 1.45, 1.78 und 1.75. Die Streuung verdeutlicht, dass die reine

Betrachtung erwarteter jährlicher Schäden die finanzielle Belastung einzelner Ereignisjahre nicht vollständig beschreibt.

Für Planung und Dimensionierung von Schutzmassnahmen ist diese Unterscheidung entscheidend. Ein Massnahmenportfolio, das im Mittel wirtschaftlich erscheint, kann in einem Extremjahr dennoch erhebliche Restschäden aufweisen. Der Hauptbericht betont entsprechend die Gefahr der Underdimensionierung und einer daraus entstehenden Maladaptation.

Verteilung auf Assetklassen

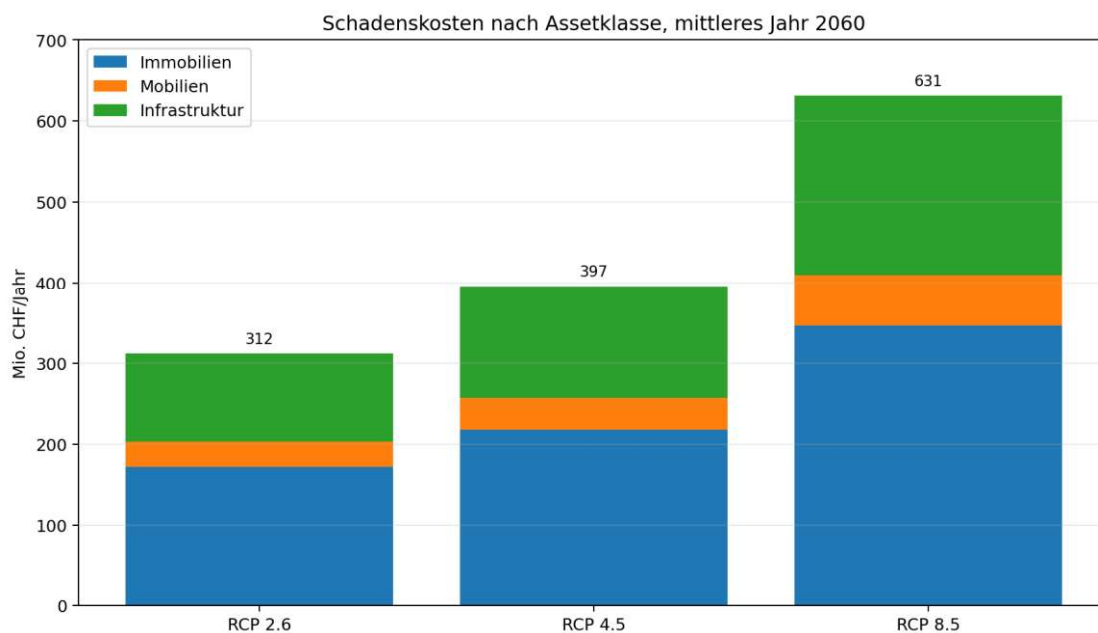


Abbildung 3: Schadenskosten durch Oberflächenabfluss nach Assetklasse, mittleres Jahr 2060. Quelle: eigene Darstellung auf Basis des NCCS-P5-Ergebnisberichts.

Immobilien stellen in allen Szenarien die grösste einzelne Schadenskategorie dar. Unter RCP 8.5 entfallen 347 Mio. CHF/Jahr auf Immobilien. Gleichzeitig ist der Anteil der Infrastruktur mit 221 Mio. CHF/Jahr substantiell. Mobilien tragen mit 63 Mio. CHF/Jahr einen kleineren, aber weiterhin relevanten Anteil. Die Ergebnisse zeigen, dass eine ausschliesslich gebäudebezogene Anpassungsstrategie das Gesamtrisiko nicht ausreichend adressiert: Retention, Entwässerung und Schutz kritischer Infrastrukturen sind komplementär erforderlich.

Ergebnisse der Klimaanpassung

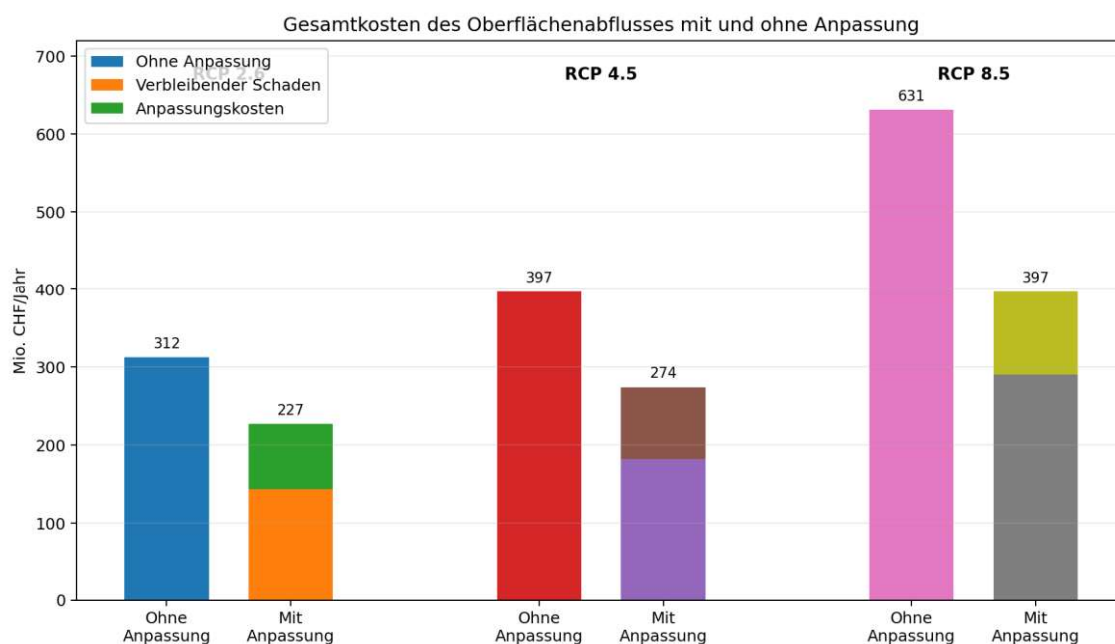


Abbildung 4: Gesamtkosten aus verbleibendem Schaden und Anpassung im Vergleich zur Situation ohne Anpassung. Quelle: eigene Darstellung auf Basis des NCCS-P5-Ergebnisberichts.

Der modellierte Massnahmen-Mix reduziert die direkten Schäden in allen drei Szenarien um rund 54 %. Da die Anpassung selbst Kosten verursacht, fällt die Reduktion der Gesamtkosten geringer aus. Unter RCP 2.6 sinken die Gesamtkosten von 312 auf 227 Mio. CHF/Jahr, unter RCP 4.5 von 397 auf 274 Mio. CHF/Jahr und unter RCP 8.5 von 631 auf 397 Mio. CHF/Jahr. Die absolute Einsparung steigt somit von 85 auf 234 Mio. CHF/Jahr.

Die Anpassungskosten steigen über die Szenarien relativ moderat, während die vermiedenen Schäden stark zunehmen. Innerhalb des gewählten Modells führt dies dazu, dass die relative Reduktion der Gesamtkosten mit stärkerem Klimawandel zunimmt. Dies darf nicht als Aussage verstanden werden, dass stärkere Erwärmung ökonomisch vorteilhaft wäre. Vielmehr zeigt es, dass der Nutzen bereits verfügbarer Schutz- und Retentionsmassnahmen bei höherem Ausgangsrisiko zunimmt.

Bedeutung der Ausgangslücke

Der Hauptbericht weist darauf hin, dass Gesamtkosten mit Anpassung teilweise sogar unter heutigen Referenzschäden liegen können. Dies ist kein Hinweis auf sinkende Hochwasserrisiken durch den Klimawandel. Es reflektiert eine bestehende Anpassungslücke: Das Modell erlaubt die Umsetzung kosteneffizienter Massnahmen, die nicht nur den zusätzlichen Klimaschaden, sondern auch einen Teil des bereits heute vorhandenen Risikos reduzieren. Die Referenzsituation ist damit nicht als technisch optimal angepasster Zustand zu interpretieren.

Vulnerable Gruppen und Verteilung

Obwohl Personenschäden nicht quantitativ modelliert werden, identifiziert der Hauptbericht Gruppen mit besonderer Vulnerabilität. Dazu gehören Personen mit tiefem

sozioökonomischem Status, Kinder, Schwangere, Personen mit eingeschränkter Mobilität oder Behinderungen, ältere Menschen, Pflegebedürftige und chronisch Kranke, Menschen mit geringer Wohndauer in einer Region sowie Personen mit eingeschränkten Sprach- und Lesekenntnissen. Ihre höhere Vulnerabilität entsteht unter anderem durch geringere finanzielle Reserven, eingeschränkte Evakuierungsfähigkeit oder geringere Vertrautheit mit lokalen Risiken und Warnsystemen.

Auch die Verteilung der Anpassungskosten kann soziale Unterschiede verstärken. Privater Objektschutz erfordert Eigeninvestitionen, die einkommensstarke Haushalte leichter tragen können. Öffentliche Förderungen und Gebäudeversicherungen können diesen Effekt reduzieren, gleichzeitig sollten Fehlanreize vermieden werden, die einen Wiederaufbau an hochriskanten Standorten begünstigen. Für die technische Planung bedeutet dies, dass Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit nicht allein aus nationalen Schadenssummen beurteilt werden sollten, sondern auch Zugang, Finanzierbarkeit und räumliche Verteilung der Schutzwirkung relevant sind.

Schlussfolgerungen

Die Modellierung zeigt ein deutlich steigendes finanzielles Risiko durch pluviale Hochwasser in der Schweiz. Die erwarteten jährlichen Sachschäden nehmen von 264 Mio. CHF in der Referenz auf 312 bis 631 Mio. CHF im Jahr 2060 zu, abhängig vom Emissionsszenario. Extremjahre können unter RCP 8.5 Schäden von mehr als 1 Mrd. CHF verursachen. Der starke Szenarioeffekt entsteht aus der Kombination höherer Starkregenintensitäten und steigender Ereignishäufigkeiten mit einer heute bereits hohen Exposition in bebauten und versiegelten Räumen.

Die verwendete Modellarchitektur ist für eine nationale Klimakostenanalyse grundsätzlich geeignet: Klimasignal, räumliche Gefährdung, objektspezifische Exposition und Vulnerabilität werden in einem probabilistischen Rahmen verknüpft. Gleichzeitig zeigt die Dokumentation, dass die Aussagekraft stark von lokalen Daten abhängt. Kanalnetze, kleine topografische Barrieren, Gebäudeeintrittspunkte und detaillierte Schadensfunktionen sind gerade bei Oberflächenabfluss wesentliche Einflussfaktoren und können auf nationaler Ebene nur vereinfacht berücksichtigt werden.

Die Anpassungsergebnisse sprechen für einen kombinierten Ansatz. Objektschutz reduziert die Vulnerabilität einzelner Gebäude, während Retentions- und Schwammstadtmassnahmen die Gefährdung auf Quartiers- und Einzugsgebietsebene reduzieren. Risikobasierte Raumplanung verhindert schliesslich, dass neue Werte in problematischen Fließwegen oder Senken entstehen. Innerhalb der Modellannahmen kann ein solcher Mix die direkten Schadenskosten um rund 54 % reduzieren und die Gesamtkosten trotz Anpassungsaufwendungen um 27-37 % senken.

Für die praktische Umsetzung ist die Modellierung jedoch nicht als Bau- oder Investitionsplanung für ein einzelnes Objekt zu verwenden. Die bereitgestellten Dokumente enthalten keine vollständigen Schwellenwerte für die objektspezifische Auswahl des Massnahmenmixes und keine umfassende Einheitspreisbibliothek. Vor lokalen Investitionsentscheidungen sind deshalb standortspezifische Gefährdungsanalysen, hydraulische Detailmodelle und konkrete Kostenangebote erforderlich. Besonders relevant

ist eine Dimensionierung, die nicht nur ein mittleres Klimaereignis, sondern auch seltene und kombinierte Stressereignisse berücksichtigt.

Eine wesentliche Weiterentwicklung des Modells besteht darin, Anpassungsmassnahmen explizit in die Gefährdungs- und Vulnerabilitätsfunktionen zu integrieren. Dadurch könnten Massnahmen technisch nachvollziehbar auf konkrete Wasserstände, Fliesswege und Schadensgrade wirken, anstatt primär über einen aggregierten Reduktionsfaktor abgebildet zu werden. In Kombination mit lokalen Kanalnetzdaten und detaillierten 3D-Gebäudeinformationen wäre damit eine deutlich präzisere kommunale und objektspezifische Entscheidungsunterstützung möglich.

Weiterführende Analysen

Aus den im Hauptbericht genannten Limitationen und Empfehlungen ergeben sich folgende prioritäre Weiterentwicklungen:

- Analyse weiterer Funktionen und Ökosystemleistungen: Auswirkungen auf Abwasser, Wasserversorgung, Gewässerqualität und weitere kritische Dienste sollten zusätzlich zu direkten Sachschäden quantifiziert werden.
- Detaillierte Analysen für besonders betroffene Regionen: Pluviale Schäden sind stark lokal geprägt. Hotspot-Analysen für Agglomerationen, Talböden und Alpentäler können konkrete Massnahmen priorisieren.
- Kommunale Kostenanalysen: Lokale Mengengerüste und Einheitspreise für Retention, Entsiegelung, Kanalnetz, Objektschutz und Betrieb ermöglichen eine belastbare Investitionsplanung.
- Lokale Kalibrierung von Vulnerabilitätsfunktionen: Schweizer Claims-Daten und Expertengutachten können die Übertragbarkeit globaler Depth-Damage-Kurven verbessern.
- Kopplung von Oberflächen- und Kanalnetzmodellen: Damit lassen sich Rückstau, Überlastung, Trenn-/Mischsysteme und lokale Entwässerung technisch abbilden.
- Analyse kombinierter Ereignisse: Starkregen sollte mit hohem Vorfluter, Schneeschmelze, gesättigten oder ausgetrockneten Böden und weiteren gleichzeitigen Stressoren kombiniert werden.
- Indirekte Schäden: Betriebsunterbruch, Lieferketten, Verkehr, Notfalleinsätze und langfristige Wachstumsverluste sollten über zusätzliche Wirkungsmodelle berücksichtigt werden.
- Separate gesamtwirtschaftliche Modellierung des pluvialen Teilrisikos: Die vorhandene IO-Methodik kann mit pluvialen Schadens- und Anpassungsimpulsen separat gerechnet werden, um eine eindeutige Zuordnung zu ermöglichen.

Anhang A: Gebäudebezogene Massnahmenliste

Die folgende Liste entspricht den für HW-Schäd ausgewiesenen gebäudebezogenen Massnahmen im Reiter «Massnahmen_KlimaangepasstGebäud». Für diese Einträge sind in

der bereitgestellten Massnahmenabelle keine quantitativen CAPEX/OPEX hinterlegt; die Liste dient daher der technischen Strukturierung und nicht einer Einzelkostenrechnung.

Massnahme	Beschreibung
Begrünte Fassaden	Vertikale Bepflanzung reduziert Niederschlagsabfluss, kühlt und verbessert die Rückhaltung an der Gebäudehülle.
Wasserabweisende Materialien	Hydrophob behandelte Baustoffe vermindern das Eindringen von Wasser in Bauteile.
Wirksame Abdichtung	Fugen, Durchdringungen und Anschlüsse werden dauerhaft abgedichtet, um Leckagen zu verhindern.
Lose Fugen / Bauteile sichern	Mechanische oder adhäsive Sicherung verhindert Öffnungen, durch die Wasser eindringen kann.
Versickerungsgräben / Mulde-Rigole	Unterirdische Rigolen oder Gräben nehmen Regen auf und lassen ihn zeitverzögert versickern.
Inspektion und Reinigung von Dachabläufen, Rinnen, Fallrohren	Regelmässige Wartung verhindert Verstopfungen und Überläufe bei Starkregen.
Fallrohre umlenken / kürzen	Niederschlagswasser oberirdisch in Mulden oder Beete leiten statt in kellernahe oder überlastete Kanäle.
Blaues Dach	Dachflächen speichern Regen temporär und geben ihn gedrosselt ab.
Blau-grünes Dach	Kombination aus Wasserspeicherung und Vegetation zur Retention, Verdunstung und Kühlung.
Gründach (extensiv oder intensiv)	Vegetationsschichten halten Wasser zurück, verringern Abflusspeaks und verbessern das Mikroklima.
Durchlässige / versickerungsfähige Oberflächen	Beläge oder Schichten lassen Wasser in den Boden einsickern statt oberflächlich abzufließen.
Bodenaufbereitung	Verbesserung von Gefälle, Bodenstruktur und Tragfähigkeit zur gezielten Ableitung oder Versickerung von Regenwasser.
Regenbeete und Mulden	Vegetationsmulden nehmen Oberflächenabfluss auf, reinigen ihn und versickern das Wasser lokal.
Rückstauklappen / Abwasserpumpen	Verhindern Rückfluss aus der Kanalisation beziehungsweise heben Abwasser über Rückstauhöhe.
Niederschlagswasser vom Abwasser trennen	Trennsysteme entlasten die Kanalisation und reduzieren Übertritte bei Starkregen.
Regenwassertanks	Speicherung von Dachabfluss zur Nutzung oder gedrosselten Abgabe reduziert Spitzenabflüsse.
Nachhaltige urbane Entwässerung	Dezentrales System aus Retentions-, Versickerungs- und Reinigungsbausteinen nach Schwammstadtprinzip.

Kompakte Gebäudekubatur	Kompakte Grundrisse minimieren Angriffsflächen und Eintrittsstellen für Wasser.
Hochgesetzte Konstruktion	Nutzungsebenen oder Fundamente liegen oberhalb erwarteter Wasserstände.
Voruntersuchung des Baugrunds	Geotechnische Untersuchung von Tragfähigkeit, Versickerung und Grundwasserständen für sichere Planung.
Nasses Floodproofing	Kontrolliertes Ein- oder Durchströmen mit Flutöffnungen und interner Entwässerung zur Reduktion von Druckschäden.
Wasserresistente Beschichtungen / Mörtel	Oberflächenfinish reduziert Wasseraufnahme und erleichtert Trocknung.
Permanente Hochwasserschutzbarriere	Feste Mauern oder automatische beziehungsweise versenkbare Systeme halten Wasser zurück.
Temporäre Hochwasserschutzbarrieren	Mobile Schilde, Sandsäcke oder aufblasbare Systeme werden bei Ereignis aufgebaut.
Wasserabweisende Oberflächenbeschichtungen	Imprägnierungen und Anstriche verringern Benetzung und Eindringtiefe.
Technik / Elektrik oberhalb der Flutlinie	Anlagen werden hochgesetzt, um Ausfälle und Kurzschlüsse zu vermeiden.
Pufferzonen ums Gebäude	Abstands-, Grün- und Retentionsbereiche halten Wasser von Fassaden fern.
Dränagesystem ums Gebäude	Ringdränagen und Kontrollschächte führen Sickerwasser sicher ab.

Tabelle A1: Gebäudebezogene Massnahmen für HW-Schäd. Quelle: NCCS-Impacts P5 Massnahmentabelle.

Referenzen

- BAFU/ARE (2022): Bundesamt für Umwelt und Bundesamt für Raumentwicklung. Regenwasser im Siedlungsraum. Starkniederschlag und Regenwasserbewirtschaftung in der klimaangepassten Siedlungsentwicklung.
- Bundesamt für Statistik BFS (2025b): Eidgenössisches Gebäude- und Wohnungsregister (GWR). <https://www.housing-stat.ch/de/index.html>
- Bundesamt für Umwelt BAFU (2025a): Klima-Risikoanalyse für die Schweiz. UW-2502-D. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Bundesamt für Umwelt BAFU (2025b): Gefährdungskarte Oberflächenabfluss. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- CH2018 (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland: Technical Report. National Centre for Climate Services. <https://doi.org/10.18751/Climate/Scenarios/CH2018/1.0>
- Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL (2025): Unwetterschadens-Datenbank der Schweiz.
- Huizinga, J.; De Moel, H.; Szewczyk, W. (2017): Global flood depth-damage functions: Methodology and the database with guidelines. JRC105688. <https://doi.org/10.2760/16510>
- Kanton Basel-Stadt (2021): Anpassung an den Klimawandel im Kanton Basel-Stadt – Handlungsfelder und Massnahmenplanung.
- Reckien, D.; Magnan, A.K.; Singh, C.; Lukas-Sithole, M.; Orlove, B.; Schipper, E.L.F.; Coughlan de Perez, E. (2023): Navigating the continuum between adaptation and maladaptation. Nature Climate Change. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01774-6>
- Seebauer, S.; Babicky, P.; Rogger, M.; Dworak, T.; Thaler, T. et al. (2021): Erweiterung des Hochwasserrisikomanagements durch soziale und psychologische Vulnerabilitätsindikatoren.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2020): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2020-2025.
- Tiefbauamt Basel-Landschaft (2021): Wasserbaukonzept Kanton Basel-Landschaft. Erläuterungsbericht.
- Universität Bern / Mobiliarlab (2025): Risikosensitivität Hochwasser. <https://www.risikosensitivitaet.ch/>
- Universität Bern / Mobiliarlab (2025a): Schadenpotenzial Hochwasserrisiko. <https://schadenpotenzial.hochwasserrisiko.ch/de/map>
- NCCS-Impacts P5 (2025): Die Kosten von ausgewählten Klimarisiken. Ergebnisbericht (Modellierungen und Ergebnisse), Dezember 2025.
- NCCS-Impacts P5 (2025): Massnahmentabelle zu Klimakosten und Anpassungsmassnahmen, separate Excel-Datei.