

*Hunziker  
Gefahrenmanagement*

Tiefbauamt des Kantons Bern

## HOCHWASSERABSCHÄTZUNG IM KANTON BERN – ARBEITSHILFE

Umgang mit HydroMaps-B04 Daten bei der  
Gefahrenbeurteilung

**Bericht**

15.07.2024

## IMPRESSUM

---

---

Projektbearbeitung	Hunziker Gefahrenmanagement Gabi Hunziker Ofenhausgässli 21 CH-1794 Salvenach Tel. +41 (0)31 755 87 58 Mobile +41 (0)79 789 43 87 gefahrenmanagement@bluewin.ch
--------------------	---

---

Auftraggeber	TBA, OIK I – Damian Stoffel, OIK II – Warin Bertschi
--------------	--

---

---

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>IMPRESSUM.....</b>	I
<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	III
<b>1 EINFÜHRUNG .....</b>	4
1.1 Ausgangslage .....	4
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeitshilfe.....	4
1.3 Verwendete Grundlagen .....	5
<b>TEIL I - HOCHWASSERABSCHÄTZUNG .....</b>	6
<b>2 HOCHWASSERENTSTEHUNG UND VERFAHREN ZUR HOCHWASSERABSCHÄTZUNG .....</b>	6
2.1 Historischer Abriss zur Hydrologie .....	6
2.2 Modelle und Realität.....	6
2.3 Generelles zur Hochwasserentstehung.....	7
2.4 Typisierung Fliessgewässer .....	9
2.5 Stufengerechte Bearbeitungstiefe – Prozessgerechte Berücksichtigung .....	10
2.6 Verfahren zur Hochwasserabschätzung .....	11
2.7 Hochwasserabschätzverfahren in der Schweiz .....	12
2.8 Massgebende Eingangsgrössen .....	15
2.9 Besonderheiten der Hochwasserabschätzformeln .....	15
2.10 Fazit zur Anwendung von Hochwasserabschätzverfahren .....	19
<b>3 ABFLUSSSTEUERNDE FAKTOREN BEI REINWASSERABFLÜSSEN.....</b>	20
<b>4 EMPFEHLUNG ZUM VORGEHEN BEI HOCHWASSERABSCHÄTZUNGEN .....</b>	24
<b>5 KLIMAWANDEL – EIN AUSBlick .....</b>	29
<b>TEIL 2 – ARBEITSHILFE KOMPAKT .....</b>	33
<b>TEIL 3 – ANHANG UND BEILAGEN.....</b>	39
Anhang 1 – Modellparameter in Hochwasserabschätzverfahren	
Anhang 2 – Übersicht Hochwasserabschätzformeln	
Anhang 3 – HYDROmaps B04 – Niederschlagsveränderung im Kanton Bern	
Beilage 1 – Übersichtskarten der Veränderungen der Niederschlagsintensitäten im Kanton Bern	

## ZUSAMMENFASSUNG

---

- Hochwasserabschätzungen erfolgen heute, mit Ausnahme bei gemessenen Fließgewässern, anhand von Modellberechnungen. Modelle versuchen die Realität abzubilden, weisen aber **Unschärfe**n auf. Ein Modellresultat sollte daher nie ohne kritische Beleuchtung verwendet werden. Mit der gleichzeitigen Anwendung mehrerer Modelle und dem Vergleich der Resultate können die bestehenden Unschärfe reduziert werden. Dies ist aber nur möglich, wenn die verwendeten Verfahren noch aktuell sind. Viele der heute verwendeten Modelle basieren auf empirischen Ansätzen aus einer klimatisch anderen Periode. Inwiefern diese Modelle respektive deren Resultate unter den heutigen klimatischen Bedingungen noch sinnvoll sind, ist fraglich.
- Bei Gefahrenbeurteilungen werden heute nach wie vor meist nur die Grundszenarien für Wasser (HQx) und Geschiebe (Gx) erhoben. Unabhängig von der Bearbeitungstiefe ist für die Gefahrenbeurteilung immer der **Gesamtabfluss**, als Funktion von Wasser und Geschiebe, massgebend. Bei jeder Gefahrenbeurteilung ist zwingend der Gesamtabfluss anzugeben und dessen Herleitung zu dokumentieren.
- Bei der Gefahrenbeurteilung gibt es verschiedene Bearbeitungstiefen: Hinweisstufe, Gefahrenkarten, Massnahmenplanungen. Auf allen Stufen sind Hochwasserabschätzungen notwendig. Bezüglich Bearbeitungstiefe soll im Kanton Bern künftig eine Differenzierung vorgenommen werden können. Im Rahmen der Gefahrenkartenerarbeitung werden **Referenzbäche** immer mit einer hohen Bearbeitungstiefe bearbeitet. Mittels Flächenansatzfunktionen werden die Resultate auf die der jeweiligen Kategorie zugehörigen Bäche übertragen. Im Rahmen von Massnahmenplanungen ist die Bearbeitungstiefe weiter zu erhöhen.
- Heute werden meist für sämtliche Fließgewässer Hydrologie-Szenarien ausgewiesen. **Reinwasserabflüsse** sind aber **nicht bei allen Gewässertypen relevant**. Bei Fließgewässern mit starkem Geschiebetransport (Wildbäche) sind die Ansätze der Hochwasserabschätzverfahren nicht gültig. Entsprechend stellt sich die Frage, ob für diese die Herleitung von Reinwasserabflüssen in jedem Fall notwendig ist oder ob darauf verzichtet werden kann.
- Die in der Schweiz gebräuchliche **Software HAKESCH und HQx-meso-CH ist in die Jahre gekommen**. Bei HQx-meso-CH besteht das grösste Defizite darin, dass teils auf fix implementierte Datensätze zurückgegriffen wird. Über die Zeit veränderbare Grundlagen können nicht berücksichtigt werden. Eine Auffrischung beider Tools ist dringend notwendig.
- Die Bestimmung der Grundszenarien für Wasser und Geschiebe ist schwierig und wird immer schwierig bleiben. Daher ist es wichtig, **das Vorgehen und die Entscheide**, die zu deren Festlegung geführt haben, zu **dokumentieren**. In dieser Arbeitshilfe wurde dazu ein entsprechendes Faktenblatt entwickelt.
- Die seit 2022 vorliegenden HYDROmaps B04 Daten für extreme Punktniederschläge berücksichtigen die neuesten Niederschlagsdaten. Sie zeigen gegenüber den bisher verwendeten HADES (1992) Daten teilweise starke Veränderungen. Oft sind die Niederschlagsintensitäten bis zu einem Faktor 2 höher. Ihre Anwendung in der Hochwasserabschätzung ergeben entsprechend hohe Abflussspitzen. Im Moment **fehlen Erfahrungen mit der Berücksichtigung der B04-Daten** bei Hochwasserberechnungen. Entsprechend wichtig ist es, die Berechnungsresultate kritisch zu beleuchten.
- Nicht alle Hochwasserabschätzverfahren verwenden den **Niederschlag als Eingangsparameter**. In N-A-Modellen, denen heute eine höhere Zuverlässigkeit zugeschrieben wird, wirken sich die B04-Daten stark aus. Verfahren ohne Niederschlagsdaten reagieren entsprechend nicht auf Niederschlagsveränderungen. Bei Anwendung mehrerer Verfahren gehen die Resultate der Abflussberechnungen heute weit auseinander. Auffallend ist, dass bei der Anwendung der Software HQx-meso-CH, die für Einzugsgebiete  $> 10 \text{ km}^2$  eingesetzt wird, nur geringfügige Veränderungen in den Hochwasserberechnungen resultieren, während die Anwendung HAKESCH (Einzugsgebiet  $< 10 \text{ km}^2$ ) zu sehr starken Veränderungen führt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in HAKESCH 4 von 5 Verfahren den Niederschlag berücksichtigen, während in HQx-meso-CH nur 1 von 7 Verfahren die B04-Daten berücksichtigt. Somit stellt sich die Frage, ob sich die in den B04-Daten festgestellten Veränderungen im Niederschlagsgeschehen mit den aktuell verwendeten Verfahren überhaupt genügend abbilden lassen.
- Die Festlegung des Spitzenabflusses auf Basis der heutigen Hochwasserabschätzverfahren stellt für die Bearbeitenden eine grosse Herausforderung dar. Die vorliegende Arbeitshilfe empfiehlt, immer eine **Plausibilisierung der Berechnungsresultate** vorzunehmen. Diese Plausibilisierung sollte, wenn immer möglich, mit unabhängigen Verfahren erfolgen, bspw. anhand von bereits aufgetretenen Ereignissen (Ereigniskataster, Verzeichnis Hochwasserdaten) oder anhand eines Vergleichs mit der bestehenden Abflusskapazität.
- Im Hinblick auf den Klimawandel dürfte die **Zunahme ungünstiger Konstellationen** (Zunahme Niederschlagsintensitäten, saisonale Veränderungen, persistentere Lagen, usw.) zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die heute bestehenden Hochwasserabschätzverfahren berücksichtigen diese Konstellationen nicht oder nur ungenügend. Neue Beurteilungsansätze werden künftig notwendig sein.

# 1 EINFÜHRUNG

## 1.1 AUSGANGSLAGE

Vor einigen Jahren wurde von MeteoSchweiz das Webportal 'Extremwertanalysen' aufgeschaltet. Darin sind die Daten der in der Schweiz bestehenden Niederschlagsstationen zusammengestellt. Die Plattform bietet die Möglichkeit, Extremwertanalysen von Starkniederschlägen für unterschiedlich lange Messreihen (Standardperiode 1961 – 2020 und längste Periode) durchzuführen. Seit 2022 sind diese Datengrundlagen im Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES) umgesetzt und laufen unter dem Begriff 'HYDROmaps' (B04 – Extreme Punktniederschläge, v2.0).

Die Entwicklung der beiden Analysetools drängte sich aus den folgenden Gründen auf:

- Die bisher verwendeten Starkniederschlagsdaten beziehen sich auf ältere Messreihen. Aktuelle Niederschlagsdaten fehlen darin.
- Mit dem Klimawandel verändert sich das Niederschlagsgeschehen. Aktuellen Messdaten kommt eine immer wichtigere Bedeutung zu.
- Bestehende Analysetools (HADES) bilden die aktuelle Niederschlagssituation zu wenig gut ab, da sie die neuen Niederschlagsdaten nicht berücksichtigen.
- Im Faktenblatt zur neuen HADES-Tafel 'Extreme Punktniederschläge (B04)' wird darauf hingewiesen, dass ab 2024 mit der Neuentwicklung von Werkzeugen für die Hochwasserabschätzung begonnen wird. Wann diese vorliegen werden, ist nicht genannt.

Die Verwendung der neuesten Niederschlagsdaten, wie dies durch das BAFU im Faktenblatt zur neuen HADES-Tafel [6] verlangt wird, macht unter diesen Aspekten Sinn; deren Verwendung führt aber in den Abflussberechnungen zu teils massiv höheren Hochwasserabflüssen. Die höheren Abflussmengen werden sich auf Gefahrenkarten und Hochwasserschutzprojekte auswirken. Noch besteht im Kanton Bern keine Praxis, wie mit dieser veränderten Ausgangslage umgegangen werden soll. Auch liegen neue oder angepasste Berechnungsansätze der KOHS nicht in absehbarer Zeit vor. Das Tiefbauamt des Kantons Bern möchte mit der vorliegenden Arbeitshilfe eine 'Best Practice' im Umgang mit HYDROmaps-Daten zur Verfügung stellen.

## 1.2 ZIELSETZUNG UND AUFBAU DER ARBEITSHILFE

Mit den heute vorliegenden Niederschlagsdaten aus HYDROmaps B04 resultieren bei der Anwendung verschiedener Hochwasserabschätzverfahren deutlich höhere, teils doppelt so hohe, Spitzenabflüsse. Aktuell liegen keine Erfahrungen vor, ob mit den geänderten Grundlagen die Verfahren noch plausible Resultate liefern. Die vorliegende Arbeitshilfe soll die Fachexpertinnen und -experten bei der kritischen Betrachtung der Berechnungsresultate unterstützen. Dazu liefert sie eine Anleitung zur Plausibilisierung der Resultate. Die Festlegung der hydrologischen Grundszenarien (HQx) soll gutachterlich, unter Berücksichtigung aller relevanten Faktoren eines Einzugsgebietes, erfolgen. Dazu kann die beiliegende Dokumentationsvorlage verwendet werden.

Das vorliegende Dokument beschränkt sich weitgehend auf Methodenbetrachtungen in Einzugsgebieten ohne Direktmessung (Abflussmessungen). Bei Gewässern mit Pegelmessungen erfolgt die Festlegung der Hochwasserabflüsse durch statistische Auswertung der Messreihen. Diese widerspiegeln das vergangene, aber auch das aktuelle Abflussgeschehen wesentlich besser als dies empirische Berechnungsansätze vermögen.

Die vorliegende Arbeitshilfe besteht aus drei Teilen:

- **Teil 1** - dem ausführlichen **Erläuterungsbericht**, in dem die wichtigsten Grundlagen zur Bestimmung der Hochwasserabflüsse kritisch beleuchtet werden
- **Teil 2** - einer **Anleitung zum Vorgehen** (Kurzfassung des Erläuterungsberichts) und der dazugehörigen **Dokumentationsvorlage**, mit welcher Vorgehen und Resultate zur Festlegung der Grundszenarien (hydrologische Szenarien) strukturiert dokumentiert werden können.
- **Teil 3** – dem Anhang, in dem nebst einer Zusammenstellung der in der Schweiz gebräuchlichsten Hochwasserabschätzverfahren und deren Formeln die HYDROmaps B04 – Daten erläutert sind. Ein Kernstück stellen die Übersichtskarten dar, in denen die **Veränderungen der extremen Punktniederschläge** für den Kanton Bern zusammengestellt sind.

### 1.3 VERWENDETE GRUNDLAGEN

- [1] HADES (2022): Hydrologischer Atlas der Schweiz, Erläuterungen zu B04 'Extreme Punktniederschläge'.
- [2] HADES (1992): Hydrologischer Atlas der Schweiz. Geographisches Institut GIUB Universität Bern, Bern, 1992.
- [3] BWG (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten, Praxishilfe, Bericht des BWG, Serie Wasser (Bern 2003).
- [4] BWG, Bundesamt für Wasser und Geologie (2002): HQx\_meso\_CH, Software und Handbuch.
- [5] BAFU, WSL (2003): HAKESCH, Software.
- [6] BAFU (2023): Faktenblatt zur neuen HADES-Tafel *Extreme Punktniederschläge (B04)*. 10. Mai 2023
- [7] Rimböck A., Barben M., Gruber H., Hübl, J., Moser M., Rickenmann D., Schober S., Schwaller G. (2013): OptiMeth – Beitrag zur optimalen Anwendung von Methoden zur Beschreibung von Wildbachprozessen. Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT, Schriftenreihe 1, Handbuch 3, Klagenfurt.
- [8] Barben, M. (2003): Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten, Geographica Bernensia G71.
- [9] Dobmann, J. (2009): Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz. Interpretations- und Praxishilfe. Geographisches Institut Universität Bern.
- [10] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2011): Leitfaden – Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten.
- [11] Schaffner M., Pfaundler M., Göggel W. (2013): Fliessgewässertypisierung der Schweiz. Eine Grundlage für die Gewässerbeurteilung und -entwicklung. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1329: 63 S.
- [12] Bergmeister K. et al. (2009): Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele.
- [13] Internationale Kommission für die Hydrologie des Rhein gebietes (2001): Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. Erfahrungen aus den Rheinanliegerstaaten. Bericht Nr. I-19 der HKR.
- [14] Liebscher H.-J., Mendel H.G. (2010): Vom empirischen Modellansatz zum komplexen hydrologischen Flussgebietsmodell – Rückblick und Perspektiven -. bfg, Bundesanstalt für Gewässerkunde.
- [15] Weingartner R. (1999): Regionalhydrologische Analysen, Grundlagen und Anwendungen. In: Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 37, Bern.
- [16] <https://www.zh.ch/de/planen-bauen/wasserbau/grundlagen-naturgefahren.html> (Abfrage 28.12.2023): Faktenblätter heutige Methoden Hochwasserabschätzung. AWEL ZH, geo7 AG.
- [17] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2011): Leitfaden, Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten.
- [18] <https://www.waldwissen.net>, aufgerufen am 09.01.2024.
- [19] [https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/wasser--methoden/grosse\\_hochwasserabflusse-2.html](https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/wasser--methoden/grosse_hochwasserabflusse-2.html), aufgerufen am 09.01.2024.
- [20] Akademien der Wissenschaften Schweiz (2016): Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven. Swiss Academies Reports 11 (5).

---

## TEIL I - HOCHWASSERABSCHÄTZUNG

---

### 2 HOCHWASSERENTSTEHUNG UND VERFAHREN ZUR HOCHWASSERABSCHÄTZUNG

#### 2.1 HISTORISCHER ABRISS ZUR HYDROLOGIE

Liebscher und Mendel [14] setzen den Beginn der Entwicklung erster empirischer Modell um 1810 an, mit dem Aufbau hydrometrischer Dienste in verschiedenen europäischen Ländern. Erstmals lagen Richtlinien für Pegel- und Niederschlagsmessungen vor, die es ermöglichen, Niederschlags- und Abflussdaten in Korrelation zu bringen. Bis Mitte des 19. Jahrhunderts beschränkte sich die Hydrologie auf die Entwicklung von Beziehungen zwischen Niederschlags- und resultierenden Abflusswerten bei grossen Flusseinzugsgebieten. Erst mit der Erfindung der Telegraphie im Jahr 1837 wurde es möglich, diese Technik zu verwenden, um bei Hochwassergefahr Informationen zu Niederschlägen und Wasserständen aus dem Oberlauf eines Flusses an weiter untenliegende gefährdete Städte weiterzugeben.

Eine der ersten empirischen Formeln zur Berechnung des Hochwasserabflusses präsentierte der irische Bauingenieur Thomas James Mulvaney im Jahr 1851. Es handelte sich um eine Formel vom Typ Rational Formula. Mulvaney verwendete darin erstmals das Prinzip der Konzentrationszeit. In den folgenden Jahren wurden verschiedene weitere Ansätze im Bereich der empirischen Modelle entwickelt. Der Übergang zur 'modernen' Hydrologie – Liebscher und Mendel bezeichnen dies als das Zeitalter der Systemhydrologie – fand mit der Entwicklung der Rechentechnik in den 1950er Jahren statt. Mit dieser Technik wurde es möglich, auch komplexe Rechenvorgänge effizient auszuführen.

In der Schweiz wurde ein erster Ansatz zur Berechnung von Hochwasserabflüssen im Jahr 1876 durch Robert Lauterburg entwickelt und 1887 verbessert. Es handelte sich dabei um einen Hüllkurven-Ansatz, der einen Zusammenhang zwischen der Einzugsgebietsfläche und der maximalen Abflussspitze herstellte. Dies war eines der ersten Modelle, mit dem die Hochwasserspitze für Stellen ohne Direktmessung des Abflusses hergeleitet werden konnte. Weiter entwickelte Lauterburg erstmals ein Wasserbilanzmodell, in dem ein Verzögerungsfaktor für Zubringer und der Regentyp (Flutregen, Landregen) berücksichtigt werden konnten. Der Aufbau der Formeln in der Form von  $Q_{max} = a \times F^b$  (mit  $a$  als gebietsabhängiger Faktor,  $F$  = Einzugsgebietsfläche und  $b$  als kontanter Exponent) war in derselben Form wie die heute nach wie vor oft verwendeten Ansätze nach Müller (1943) und Kürsteiner (1917).

Einen nächsten Schritt in der Entwicklung von Hochwasserabschätzverfahren stellten Verfahren dar, die eine umfassende Sicht der Wasserbewegungen beinhalteten. Diese Modelle berücksichtigten die Teilprozesse Gebietsniederschlag, Verdunstung, Schneeschmelze, Oberflächen- und Gewässerabfluss und das Verhalten von ungesättigten und gesättigten Bodenzonen. Sie waren eine Weiterentwicklung der Rational Formula. In der Schweiz gebräuchlich sind die Verfahren Kölla (1986) und das modifizierte Fliesszeitverfahren.

#### 2.2 MODELLE UND REALITÄT

Ein Modell ist eine vereinfachte Abbildung der Wirklichkeit, aber nie die Wirklichkeit selbst. Auch die in der Hochwasserabschätzung eingesetzten Verfahren und Modelle versuchen, die realen, bei einem Hochwasserereignis möglichen Abflüsse so genau als möglich abzubilden. Bergmeister et al. [12] beschreibt dies treffend: «Hydrologische Modelle zur Abflussberechnung vereinfachen die natürlichen Zusammenhänge mehr oder weniger stark. Somit beschreibt ein mathematisches Modell prinzipiell einen Prozess, den es in der Natur nicht gibt. Daher ist es grundsätzlich unmöglich, mithilfe eines Modells gesicherte Aussagen über das Verhalten der Natur zu erlangen.»

Mit der gleichzeitigen Anwendung mehrerer Modelle oder dem Einsatz komplexer Rechenmodelle wird versucht, die bestehenden Unschärpen bei der Hochwasserabschätzung zu minimieren. Heute bietet die computergestützte Datenverarbeitung die Möglichkeit, sehr komplexe Modelle anzuwenden, aber auch in kurzer Zeit mehrere Modellansätze halb- oder ganzautomatisch zu berechnen. Die dazu notwendigen Eingangsgrößen liegen aber oft nicht in genügender Qualität vor, sind teilweise nicht mehr aktuell oder lassen sich in den Softwareanwendungen nicht aktualisieren. Der Vergleich der Modellresultate führt nur dann zu einer 'besseren' Abschätzung, wenn alle Verfahren die lokalen Gegebenheiten genügend berücksichtigen. Drei falsche Berechnungen ergeben nicht automatisch ein gutes Resultat, nur weil die Resultate in der gleichen Größenordnung liegen.

Zudem wird häufig davon ausgegangen, dass komplexe Modelle bessere, sprich genauere Resultate liefern. Dies trifft vielfach nicht zu. Weingartner (1999) [15] stellt den Zusammenhang zwischen Modellkomplexität, Modellierungsaufwand und Unschärfe eines Modells in einer Grafik anschaulich dar.

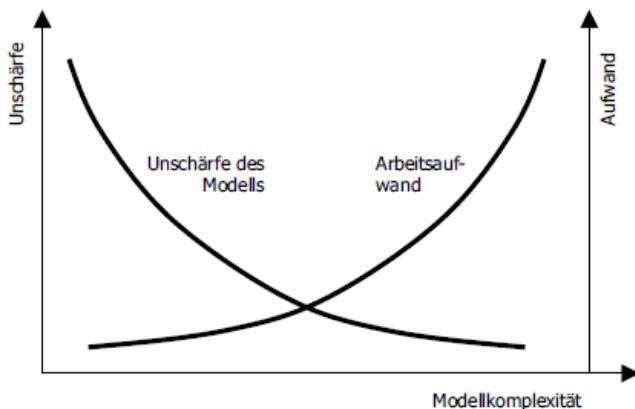


Abbildung 1: Skizze zum Zusammenhang zwischen Modellkomplexität, Modellierungsaufwand und Unschärfe des Modells (aus Weingartner 1999).

## 2.3 GENERELLES ZUR HOCHWASSERENTSTEHUNG

### 2.3.1 ENTSTEHUNG UND TYPEN VON HOCHWASSEREIGNISSEN

Die häufigsten Ursachen für Hochwasser sind:

- Niederschlagsereignisse (Starkregen und Dauerregen), mit folgenden Ausprägungen:
  - Regen (unterschiedlicher Intensität) auf Schnee --> wirksam bei kleinen bis mittleren Einzugsgebieten in den Alpenrandregionen und den Voralpen sowie bei entsprechend langer Dauer des Niederschlagsereignisses bei den grossen Talflüssen und Seen
  - Regen auf gefrorenen Boden --> wirksam bei kleinen und mittleren Einzugsgebieten. Grundsätzlich unabhängig von der Region, tendenziell dort, wo sich warme und kalte Phasen abwechseln können.
  - Regen auf gesättigten Boden --> vergleichbar mit Regen auf gefrorenen Boden, wobei aus dem durch längere Niederschlagsphasen gesättigten Boden zusätzlich Wasser mobilisiert werden kann (der Schwamm läuft aus)
  - Regen auf stark ausgetrockneten Boden --> vermutlich vergleichbar mit Regen auf gefrorenen Boden. Evtl. zeitliche Verzögerung möglich, wenn der Boden verbreitet Trockenrisse aufweist, die Wasser aufnehmen können.
- Schneeschmelze, besonders kritisch in Kombination mit Niederschlagsereignissen (siehe oben)
- Ausbruch von Gletscherseen und Wassertaschen
- Rückstau und anschliessender Bruch von Verklausungen
- Bruch von Schutzdämmen
- Verstärkter Zustrom durch Oberflächenabfluss
- Überlauf aus Nachbargewässern

#### Spezialfälle:

- Starker Grundwasserzustrom als Folge von Grundwasserhochständen (bspw. überlaufende Karstquellen)
- Bruch von Staudämmen oder Staumauern oder Ausbruch natürlich aufgestauter Seen
- Eisstoss/Eisgang (meist in Kombination mit Niederschlag oder Schneeschmelze; vereinzelt in der Schweiz aufgetreten)

Die heute standardmäßig verwendeten Berechnungsansätze berücksichtigen in der Regel nur reine Niederschlagsereignisse. Weitere meteorologische Bedingungen werden oft nicht oder nur ungenügend berücksichtigt. Betrachtet werden fast ausschliesslich Starkregenereignisse, nicht aber Konstellationen, die zu deutlich erhöhten Abflüssen führen können. Auch Bedingungen wie Vorfeuchte sind in vielen Berechnungsansätzen nicht oder nur ungenügend berücksichtigt. Beispielsweise führen Konstellationen mit einer Kombination aus mässig intensiven Niederschlägen und Schneeschmelze zu deutlich erhöhten Abflüssen. Die entsprechenden Niederschlagsintensitäten in der klassischen Abflussberechnung eingesetzt würden deutlich zu tiefe Abflüsse ergeben. Die Festlegung der Abflussmengen sollte, insbesondere im Hinblick auf die erwarteten Klimaänderungen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten, vermehrt auch die Betrachtung solcher Wetterkonstellationen berücksichtigen. Heute fehlen weitgehend Studien dazu, in welchem Ausmass das Abflussgeschehen bei unterschiedlichen Konstellationen zunehmen

kann und wie sich die Auftretenshäufigkeit in den kommenden Jahren unter dem Einfluss des Klimawandels konkret ändern kann.

### 2.3.2 ABFLUSSSTEUERNDE FAKTOREN

Nebst der Hochwasserentstehung spielen auch die abflusssteuernden Faktoren in einem Gerinne eine wichtige Rolle:

- hydraulische Eigenschaften des Gerinnes: Querschnitt, Gefälle, Rauigkeit
- Faktoren, welche die Durchflussmenge in einem Gerinneprofil verändern: Hindernisse im Profil, seitliche Einengungen, Sohlenveränderungen durch Geschiebe- oder Schwebstoffablagerungen, Rückstauphänomene
- Geschiebeanteil am Hochwasserabfluss (Gesamtabfluss), welcher den Transportprozess bestimmt

### 2.3.3 ÜBERTRAGUNGSPROBLEME

Bei der Erarbeitung von Gefahrenkarten wird aufgrund der oft hohen Anzahl der zu beurteilenden Gewässer häufig mit der Übertragungsmethode gearbeitet. Die Berechnungen aus Einzugsgebieten mit ähnlicher Charakteristik werden dabei auf benachbarte Bäche übertragen. Dieses Vorgehen ist grundsätzlich zulässig. Es sind aber die folgenden Effekte zu beachten, die in [17] beschrieben sind.

#### Skaleneffekte

Die Grundlagen und Parameter einer Hochwasserabschätzung lassen sich nicht ohne weiteres von grossen auf kleine Einzugsgebiete oder umgekehrt übertragen. Dies gilt sowohl für meteorologische Parameter als auch für hydrologische und morphologischen Faktoren.

Meteorologische Ursachen: Je nach Grösse, Form und Lage eines Einzugsgebietes können unterschiedliche Niederschlagsereignisse massgebend sein:

- In grösseren Einzugsgebieten sind meist langanhaltende, grossräumige Niederschläge mit geringerer Intensität oder auch eine intensive Schneeschmelze für extreme Hochwasser ausschlaggebend.
- In kleineren Einzugsgebieten führen meist kurzzeitige, kleinräumige Niederschläge mit hoher Intensität (Starkregen, Gewitter) zu extremen Hochwassern.

Hydrologische Ursachen: Je kleiner ein Einzugsgebiet, umso grösser ist in der Regel die Abflussmenge im Verhältnis zur Grösse. Dies hängt damit zusammen,

- dass bei kleinen Einzugsgebieten in der Regel das gesamte Einzugsgebiet überregnet wird und somit das gesamte Einzugsgebiet zum Abfluss beiträgt,
- dass der Flächenanteil von Flächen mit hoher Abflussbildung (beitragende Flächen) in kleinen Einzugsgebieten eher hoch ist und
- dass bei kurzen Fließwegen und Fließzeiten kaum eine Dämpfung der Hochwasserwelle möglich ist.

Morphologische Faktoren: In kleinen Einzugsgebieten wirkt sich die kleinräumige Topographie stärker aus als in grossen, in welchen sich die morphologischen Ausprägungen besser ausmitteln.

Im Bewusstsein um die Skaleneffekte erstaunt es, dass die heute verwendeten Abschätzformeln oft einen sehr grossen Anwendungsbereich in Bezug auf die Einzugsgebietsgrösse aufweisen. Es ist nicht unüblich, dass ein Verfahren einen Gültigkeitsbereich von wenigen  $\text{km}^2$  bis einigen  $100 \text{ km}^2$  ausweist.

#### Extrapolationsprobleme

Da die Datenlage zu historischen Ereignissen meist dünn ist, ist die Übertragung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten immer mit grösseren Unsicherheiten verbunden.

#### Ausreisserprobleme

Das Auftreten eines extremen Hochwassers innerhalb einer Messreihe ist oft zufällig. Dadurch kann die Wiederkehrperiode im Beobachtungszeitraum unterschätzt werden. Insbesondere bei sehr kurzen Messreihen besteht die Gefahr der Über- oder Unterschätzung einzelner Beobachtungen.

## Regionalisierungsprobleme

Eine Übertragung von Kennwerten aus einem Gebiet (oder Gewässer) auf ein anderes Gebiet bzw. Gewässer birgt immer die Gefahr, dass einzelne Gebietseigenschaften nicht genügend erkannt und berücksichtigt werden. Dadurch können sich bei der Hochwasserabschätzung entscheidende Fehler ergeben. Entsprechende Vorsicht ist bei regionalen Übertragungen notwendig.

## 2.4 TYPISIERUNG FLEISSGEWÄSSER

Mit den heute gängigen Hochwasserabschätzverfahren werden **Reinwasserabflüsse** berechnet. Der Reinwasserabfluss ist jedoch nicht bei allen Fliessgewässern von gleicher Bedeutung. Insbesondere bei murfähigen Bächen ist der Murgangabfluss die massgebende Grösse. Dieser wird aus der Murgangfracht abgeleitet. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht einer vereinfachten Fliessgewässertypisierung nach verschiedenen Faktoren.

In der Schweiz gibt es keine offizielle Klassifikation der Gewässertypen. Eine Typisierung kann grundsätzlich auf folgenden Eigenschaften basieren:

- Wasserführung: dauernd wasserführend (perennierend), zeitweise wasserführend (intermittierend)
- Gerinneneigung: steil > 5%, mittelsteil 0.5 – 5%, flach < 0.5%; für murfähige Bäche werden oft die Grenzen ≥ 15% - 20% angesetzt
- Transportprozesse: Reinwasserabfluss, fluivialer Feststofftransport (Geschiebetrieb), murgangartiger Feststofftransport, Murgang
- Grösse Einzugsgebiet: sehr klein, klein, mittel, gross, sehr gross

In der Schweiz sind folgende Begriffe gebräuchlich:

- **Fluss:** grosses Fliessgewässer mit ganzjährlicher Wasserführung. Flüsse können weiter unterteilt werden in Talflüsse und Gebirgsflüsse. Gebirgsflüsse weisen im Gegensatz zu Talflüssen ein steileres Gefälle auf. In der Schweiz gelten die folgenden Gewässer als 'grosser Flüsse': Rhein ab Tamins, Aare ab Interlaken, Reuss ab Luzern, Limmat ab Zürich, Linth ab Weesen, Rhone ab Visp, Ticino ab Bellinzona, Inn ab Martina, Arve ab Landesgrenze.
- **Bach:** kleines bis mittelgrosses Fliessgewässer; kann weiter unterteilt werden in flache Bäche, steile Bäche, Wildbäche, Runsen. Allen Bachtypen ist gemeinsam, dass sie über ein definiertes, im Gelände erkennbares Gerinne verfügen. In Geländemulden ohne erkennbares Bachbett findet Oberflächenabfluss statt. Nach einem intensiven Oberflächenabfluss kann es als Folge des Ereignisses zu einer Bettbildung kommen.
  - Flache und steile Bäche: Gewässer mit kleinen bis mittleren Einzugsgebieten, die über die Gerinneneigung definiert sind
  - Wildbäche: Bäche mit starkem Gefälle, starker Geschiebemobilisierung und intensivem Transport von Geschiebe, meist murfähig
  - Runsen: Zeitweise wasserführende Gerinne mit meist steiler Gerinneneigung. Runsen verfügen über ein definiertes, im Gelände erkennbares Bachbett. Bei Hochwasser können starke Erosionen auftreten. Oft kommt es zur Murgangbildung.
- **Kanal:** Künstliches Gewässer mit meist definierter maximaler Abflussmenge.

## Wasserführung

Die Wasserführung (perennierend/intermittierend) eignet sich nur bedingt für die Typisierung eines Gewässers, da sie nichts über mögliche Abflussmengen aussagt.

## Gerinneneigung

Die Gerinneneigung charakterisiert grundsätzlich ein Gewässer, besagt aber ebenfalls nichts über die Abflussmengen. Dieses Kriterium muss in Kombination mit anderen Kriterien für die Typisierung verwendet werden.

## Transportprozesse

Für die Gefahrenbeurteilung von Wasserprozessen ist das Kriterium 'Transportprozess' ein geeignetes Kriterium für die Typisierung von Fliessgewässern. Nachfolgende Typisierung stammt aus Bergmeister et al. (2009) [12]:

- Reinwasser: Abfluss von Wasser und unerheblichen Feststoffmengen. Feststoffe werden überwiegend als Schwebstoffe transportiert. Der Geschiebetransport ist im Verhältnis zum Wasseranteil sehr gering und liegt im Promillebereich.
- Fluvialer Feststofftransport (Geschiebetrieb): Verlagerung von bedeutenden Feststoffmengen (Schwebstoffe und Geschiebe). Der Transport des Geschiebes erfolgt charakteristischerweise sohennah. Volumetrische Feststoffkonzentration 0 – 20 %, Dichte des Wasser-Feststoff-Gemisches < 1300 kg/m<sup>3</sup>.
- Murgangartiger Feststofftransport: Die Feststoffkonzentration ist gegenüber dem fluvialen Feststofftransport deutlich höher und findet über den gesamten Abflussquerschnitt statt. Die Dichte des Wasser-Feststoff-Gemisches liegt im Bereich von 1300 – 1700 kg/m<sup>3</sup>, die Feststoffkonzentration beträgt 20 – 40 %. Starke Erosionskraft, Grösstkorn bis Meterbereich möglich.
- Murgang: Langsam bis schnell abfliessendes Gemisch aus Wasser, Feststoffen und Holz. Der Abfluss findet häufig in mehreren Schüben statt. Feststoffe sind über den gesamten Abflussquerschnitt verteilt, Dichte 1700 – 2400 kg/m<sup>3</sup>, Feststoffkonzentration 40 – 70 %, sehr starke Erosionskraft. Grösstkörner im Meterbereich.

Tabelle 1: Gewässertypisierung

	Talfluss	Gebirgsfluss	Fluvialer Bach	Wildbach	Runse	Kanal
Wasserführung	perennierend	perennierend	meist wasserführend	meist wasserführend	intermittierend	künstlich gesteuert
Gerinneneigung	flach	flach bis mittelsteil	flach bis steil	steil	mittelsteil bis steil	flach
Transportprozess	Reinwasserabfluss bis fluvialer Feststofftransport	starker Geschiebetrieb bis murgangartiger Feststofftransport	fluvialer Feststofftransport bis starker Geschiebetrieb	murgangartiger Feststofftransport bis Murgang	starker Geschiebetrieb bis Murgang	Reinwasserabfluss
Einzugsgebiets- grösse	sehr gross	gross bis sehr gross	mittel	mittel bis gross	klein bis sehr klein	ohne Bezug zu EZG

## 2.5 STUFENGERECHTE BEARBEITUNGSTIEFE – PROZESSGERECHTE BERÜKSICHTIGUNG

Hochwasserabschätzungen erfordern eine stufengerechte Bearbeitungstiefe und eine prozessgerechte Berücksichtigung.

### Stufengerechte Bearbeitungstiefe

In der Gefahrenbeurteilung werden verschiedene Bearbeitungstiefen unterschieden: Gefahrenhinweisstufe, Stufe Gefahrenkarte und Massnahmenplanung. Je nach Bearbeitungsstufe/-tiefe werden in der Regel mehr oder weniger detaillierte Verfahren für die Bestimmung der gefahrenrelevanten Faktoren angewendet.

Sind zahlreiche Prozessquellen zu beurteilen, werden Verfahren bevorzugt, die rasch akzeptable Resultate liefern. Dabei kann der einzelnen Prozessquelle (Gewässer/Einzugsgebiet) oft zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt werden. Dies ist häufig bei Gefahrenkarten oder Gefahrenbeurteilungen auf regionaler Stufe der Fall. Bei der Planung von Schutzmassnahmen steigt der Anspruch an die Genauigkeit der Gefahrenbeurteilung. Da dabei meist nur ein einzelnes Gewässer oder wenige Gewässer betrachtet werden, besteht hier die Möglichkeit, mehr Zeit in die Grundlagenarbeit zu investieren.

Obwohl man sich heute bewusst ist, dass eine Gefahrenbeurteilung auf Stufe Gefahrenkarte – aufgrund der grossen Anzahl der zu beurteilenden Gewässer – nicht den gleichen Detaillierungsgrad wie eine Detailstudie aufweisen kann, werden Hochwasserschutzprojekten oft die Szenarien der Gefahrenkarte zu Grunde gelegt. Dies soll sich künftig ändern, indem für die Hochwasserabschätzung eine Differenzierung nach Bearbeitungstiefe vorgenommen werden kann. Es können folgende Bearbeitungstiefen und die zugehörigen Produkte unterschieden werden:

Gefahrenhinweiskarten: liefern einen groben Überblick und zeigen, wo Gefahren relevant sein können. Lokale Gegebenheiten können aufgrund der verwendeten Eingangsdaten nur ungenügend berücksichtigt werden. Es werden in der Regel keine Geländeaufnahmen durchgeführt. Hochwasserabschätzungen basieren auf einer regionalen Gebietsansprache. Es kommen einfache Hochwasserabschätzverfahren zur Anwendung. Lokale Gegebenheiten fliessen nur so weit ein, wie sie in Geodaten verfügbar sind.

Gefahrenkarten: zeigen einen Überblick über die Gefahrensituation, unter Angabe der Stärke (Intensitäten) und der erwarteten Häufigkeit (Wiederkehrperiode) der Prozesse. Ihr Fokus liegt auf der Erkennung der Gebiete mit Gefährdung. Lokale Gegebenheiten werden im Rahmen von Geländebegehungen und/oder Modellierungen erhoben. Eine detaillierte Ansprache soll in erster Linie für die Referenzbäche (siehe Kapitel 4.1.3) erfolgen. Die Ergebnisse werden mittels Flächenansatzfunktion auf die der jeweiligen Kategorie zugehörigen Bäche übertragen.

Fachgutachten Naturgefahren (Objektschutzgutachten): stellen einen Spezialfall der Gefahrenbeurteilung dar. Sie verwenden in der Regel die bestehende Gefahrenkarte als Beurteilungsgrundlage für die Festlegung der Prozesseinwirkungen. Eine kritische Prüfung der Beurteilungsgrundlage ist aber in jedem Fall notwendig. Liegen begründete Zweifel an der Aktualität der Resultate vor, ist in Absprache mit den zuständigen Fachstellen der Überarbeitungsbedarf zu klären. Dies betrifft insbesondere die höheren Abflussschätzungen unter Verwendung der neuen B04-Niederschlagsdaten.

Massnahmenplanungen (Hochwasserschutzprojekte): setzen dort an, wo Schutzdefizite bzw. erhöhte Risiken vorhanden sind, die mittels Schutzmassnahmen reduziert werden können. Durch gezielte Untersuchungen werden die bestehende Gefahrenbeurteilung im Rahmen einer Detailstudie verfeinert und die Bemessungsgrößen für die Massnahmen bestimmt. Für die Hochwasserabschätzung bedeutet dies in erster Linie eine detailliertere Beurteilung der Bodeneigenschaften. Für Hochwasserschutzprojekte sind diese anhand von Geländeaufnahmen zu ermitteln. Bestehen bereits Hochwasserabschätzungen aus der Gefahrenkarte, ist zu prüfen, mit welcher Bearbeitungstiefe (Stufe Gefahrenkarte: Referenz- oder Übertragungsgewässer) diese beurteilt wurden. Auf Stufe Massnahmenplanung ist die Bearbeitungstiefe weiter zu verfeinern. Dies gilt insbesondere bei Gewässern, deren Hochwasserabschätzung in der Gefahrenkarte mittels Flächenansatzfunktion erfolgte.

### Prozessgerechte Berücksichtigung

Mit den Hochwasserabschätzformeln werden **Reinwasserabflüsse** berechnet. Je nach Gerinne-Typ (vgl. Kapitel 2.4) und Szenario haben Reinwasserabflüsse nur eine untergeordnete Bedeutung. Eine steile Runse im Lockermaterial oder ein Wildbach im alpinen Gelände werden selbst bei einem 30-jährlichen Ereignis kaum Schäden durch Reinwasser verursachen. Für diese Gerinne-Typen sind die Mobilisierung von Geschiebe und die Transportprozesse massgebend. Dies ist bei der Gefahrenbeurteilung entsprechend zu berücksichtigen und zu dokumentieren.

Bei der Beurteilung von Wasserprozessen ist immer der Gesamtabfluss (Abfluss von Wasser und Geschiebe respektive Murgangabfluss) entscheidend. Heute werden in der Regel die Grundszenarien für die Hydrologie (Reinwasser-Spitzenabflüsse in  $\text{m}^3/\text{s}$ ) und die Geschiebe- oder Murgangfrachten [ $\text{m}^3$ ] ausgewiesen. Die Abschätzung des Gesamtabflusses bei starkem Geschiebetrieb, murgangartigem Abfluss bis Murgang fehlen oft, sind aber zwingende Grundlagen für die Schwachstellenanalyse. Künftig sind nebst Reinwasser- und Geschiebeszenarien immer auch der Gesamtabfluss (Ereignisabfluss) auszuweisen.

## 2.6 VERFAHREN ZUR HOCHWASSERABSCHÄTZUNG

Die heute bestehenden Verfahren lassen sich aufgrund ihres Anwendungsbereichs einteilen in:

- A) statistische Ansätze unter Berücksichtigung von Pegelstatistiken (Abflussmessreihen)
- B) Niederschlags-Abflussmodelle (N-A Modelle), Laufzeitverfahren
- C) Modelle mit regionaler Übertragungsfunktion (Hüllkurvenverfahren, i.d.R. ohne Betrachtung der Jährlichkeit und Verfahren des Typs 'Rational Formula')

Während die statistischen Ansätze auf Abflussmessungen basieren, liegen bei den N-A Modellen und bei den Modellen mit regionaler Übertragungsfunktion keine Abflussmessungen vor. Für die Festlegung des Anwendungsbereichs ist bei diesen Modellen meist die Grösse des Einzugsgebiets massgebend. Hier werden in der Regel zwei Kategorien unterschieden:

- Mesoskalige (mittelgrosse) Einzugsgebiete:  $10 - 200 \text{ km}^2$  (teilweise auch  $10 - 500 \text{ km}^2$ ) und
- Kleine Einzugsgebiete:  $< 10 \text{ km}^2$

Es gibt jedoch Verfahren, die sich nicht eindeutig einer der beiden Kategorien zuordnen lassen. In Kölla (1986) werden beispielsweise Einzugsgebiete mit einer Fläche bis zu  $100 \text{ km}^2$  als kleine Einzugsgebiete bezeichnet. Kölla legt in ihrer Dissertation keine Untergrenze für den Gültigkeitsbereich ihres Ansatzes fest.

Skaleneffekte führen dazu, dass kleine und kleinste Einzugsgebiete stärker auf wechselnde Verhältnisse reagieren. Abflussbildung und -konzentration werden in kleinen Einzugsgebieten deutlich weniger ausgemittelt oder gedämpft als bei mittelgrossen und grossen Einzugsgebieten. Entsprechend wichtig wären für Klein- und Kleinsteinzungsgebiete flächendeckende und qualitativ hochwertige Grundlagen zu Bodeneigenschaften (Abflusskoeffizienten). Heute wird für diese Grundlagen oft auf kleinmassstäbliche Datensätze zurückgegriffen, die jedoch nicht über die notwendige Genauigkeit bezüglich der räumlichen oder inhaltlichen Auflösung verfügen. Beispielsweise liefert der swissTLM3D-Datensatz detaillierte Informationen zur

Bodenbedeckung, aus den für die Abflussbildung relevanten Kategorien 'Lockergestein' und 'Lockergestein locker' lassen sich Abflusskoeffizienten oder Wasserspeichervermögen jedoch nur bedingt ableiten.

Aus der Feststellung, dass die Spitzabflüsse in sehr kleinen Einzugsgebieten ( $< \text{ca. } 1 - 2 \text{ km}^2$ ) in der Regel mit den bestehenden Ansätzen nur ungenügende Resultate liefern, sollte eine weitere Kategorie, diejenige der Kleinsteinzeuggebiete, festgelegt werden. Für diese Kategorie bestehen zurzeit keine Verfahren, die sich explizit für diese Größenordnung eignen. Entsprechend vorsichtig sind die Resultate der Hochwasserberechnungen für diese Einzugsgebiete zu verwenden.

### Statistische Ansätze (Extremwertstatistik)

Statistische Ansätze basieren auf Abflussmessreihen. Die Jährlichkeit des Abflusses wird aus der Analyse der Abflussmessreihen abgeleitet. Diese Verfahren werden in der vorliegenden Arbeitshilfe nicht weiter beleuchtet.

### Niederschlag-Abfluss Modelle

Bei komplexeren Fragestellungen kommen meist Niederschlag-Abfluss-Modelle (N-A Modelle) zum Einsatz. Um eine gute Qualität der Resultate zu erhalten, sollten sie nur bei Vorliegen von Abflussmessdaten angewendet werden, da dadurch eine Modellkalibrierung möglich ist. In Gebieten ohne Abflussmessungen werden N-A Modelle nicht empfohlen, da die Qualität der Resultate deutlich geringer ist.

Komplexe N-A Modelle erfordern einen grossen Bearbeitungsaufwand von mehreren Tagen bis mehreren Wochen. Dabei werden lokale Gegebenheiten, insbesondere die Bodeneigenschaften im Einzugsgebiet, detailliert anhand von Geländeuntersuchungen beurteilt. Es bestehen auch einfachere N-A Modelle mit deutlich geringerem Bearbeitungsaufwand. Bei diesen Modellen erfolgt die Festlegung der Bodeneigenschaften meist anhand schweizweit verfügbarer Geodatensätze. Deren Auflösung ist zurzeit noch ungenügend, so dass idealerweise eine Überprüfung, respektive eine Verfeinerung, dieser Datengrundlage vorgenommen werden sollte.

Auch wenn heute den N-A-Modellen oft eine bessere Aussagegenauigkeit zugesprochen wird, muss auch bei diesen Ansätzen berücksichtigt werden, dass es sich um Modelle handelt.

Repräsentanten in HAKESCH/HQx\_meso\_CH: Kölla (1986), Kölla meso (1986), mod. Fliesszeitverfahren (frühes 20. Jh.), Clark-WSL (2001), Taubmann/Thiess/Chow (1962/1975/1986)

### Modelle mit regionaler Übertragungsfunktion

Diese Verfahren basieren auf beobachteten Abflussereignissen, anhand derer ein Zusammenhang zwischen der Einzugsgebietsfläche und der maximalen Hochwasserspitze hergestellt wurde. Die gebietsspezifischen Eigenschaften fliessen über verschiedene Faktoren in die Formel ein. Der Wertebereich der Eingangsgrössen ist vorgegeben und wurde aus den beobachteten Ereignissen abgeleitet. Hüllkurven-Verfahren liefern **keine Jährlichkeiten** und verwenden **keine Niederschlagsdaten**.

Da diese Verfahren auf beobachteten Abflussereignissen basieren, ist ihre Gültigkeit auf die den Referenzereignissen zu Grunde liegende Klimaperiode beschränkt. Viele dieser Verfahren wurden Anfang bis Mitte 20. Jahrhundert entwickelt und repräsentieren entsprechend das Hochwassergeschehen dieser Zeit. **Inwiefern diese Formeln, trotz teilweiser Weiterentwicklungen, heute noch repräsentative Ergebnisse liefern, ist fraglich.**

Repräsentanten in HAKESCH/HQx\_meso\_CH: Kürsteiner (1917/1943), Müller modifiziert (1943/1997), Müller-Zeller (1943/1975), GIUB'96 (1999)

## 2.7 HOCHWASSERABSCHÄTZVERFAHREN IN DER SCHWEIZ

Die Berechnung der Spitzabflüsse erfolgt heute, insbesondere im Rahmen von Gefahrenkartierungen, in der Regel mit den Software Tools HAKESCH (für kleine Einzugsgebiete,  $< 10 \text{ km}^2$ ) und HQx\_meso\_CH (für mittelgrosse Einzugsgebiete,  $> 10 \text{ km}^2$ ).

Die nachfolgenden Ausführungen stützen sich auf die Praxishilfe 'Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten' [3] ab. Beide Softwarepakete bieten den Vorteil einer Palette von mehreren Verfahren, die gleichzeitig berechnet werden können. Die Resultate werden nebeneinander aufgeführt und daraus der weiter zu verwendete Wert bestimmt, gutachterlich oder durch Übernahme der Empfehlung. Durch die Verwendung mehrerer Modellresultate sind die Ergebnisse zwar breiter abgestützt, jedoch besteht dadurch noch keine Garantie, dass die Resultate korrekt sind.

Sowohl für die Anwendung von HAKESCH, als auch für HQx\_meso\_CH ist das Vorgehen bei der Bestimmung von Spitzabflüssen mittels Ablaufschema und Erläuterungen in [3] beschrieben. Dies beinhaltet auch die definitive Festlegung der

Abflüsse. Bei beiden Anwendungen wird die Wichtigkeit der Analyse der Eingangsgrößen und der Interpretation der Ergebnisse hervorgehoben.

Abbildung 2 zeigt das in [3] empfohlene Vorgehen.

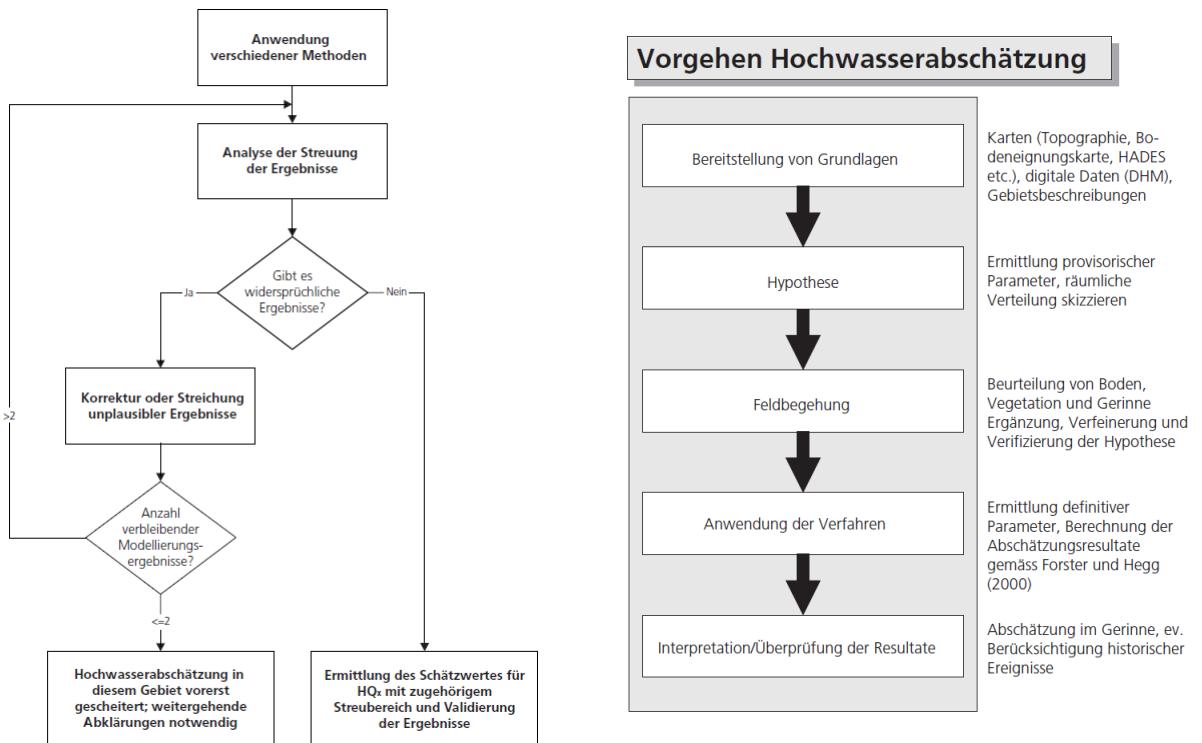


Abbildung 2: Vorgehen bei der Hochwasserabschätzung in mittelgrossen (links) und in kleinen Einzugsgebieten (rechts).

### 2.7.1 ÜBERSICHT HOCHWASSERABSCHÄTZVERFAHREN IN HAKESCH UND HQX\_MESO\_CH

Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf die in HAKESCH und HQx\_meso\_CH implementierten Hochwasserabschätzverfahren. Alle Verfahren können auch manuell, also ohne Einsatz der Software, angewendet werden. Detailliertere Angaben zu den Verfahren können der Praxishilfe 'Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten' [3] oder in kompakter Form den Steckbriefen in [16] entnommen werden.

Nebst den in der Schweiz gebräuchlichsten Berechnungsansätzen gibt es im europäischen Raum weitere Hochwasserabschätzverfahren. Eine Zusammenstellung dazu findet sich in [7]. Da diese Verfahren in der Schweiz selten angewendet werden, fehlen Erfahrungen dazu.

Tabelle 2: Übersicht über die in HAKESCH und HQx\_meso\_CH berücksichtigten Berechnungsansätze. WKP = Wiederkehrperiode, N-A = Niederschlag-Abfluss Modelle

Methode	Typ	Gültigkeitsbereich	Abschätzbare WKP	Sensitivste Faktoren	Aufwand
<b>HAKESCH:</b>					
Müller modifizier nach Rickli & Forster 1943/1997	Hüllkurve	$\geq 1 \text{ km}^2$	HQmax	Abflusskoeffizient $\psi$	Minuten bis Stunden
Taubmann/Thiess/ Chow 1962/1975/1986	N-A	urspr. $< 30 \text{ km}^2$ $1 - 300 \text{ km}^2$	HQ5, HQ10, HQ25, HQ50, HQ100, Ganglinie für HQx	Konzentrationszeit komplexer Abflussbeiwert $\alpha$	Stunden bis Tage
Modifiziertes Fließzeitverfahren frühes 20. Jh.	N-A	bisher nur in EZG $< 5 \text{ km}^2$ getestet	HQx, x beliebig in 5er-Schritten bis max. x=100	Abflusskoeffizient $\psi$ Konzentrationszeit max. Fließlänge	Stunden bis Tage
Kölla 1986	N-A	1 - 100	HQ20 und HQ100	Niederschlag (insbes. 100-j. 1-Std.) kumulative Gerinnelänge / Benetzungs volumen	Stunden bis Tage
Clark-WSL	N-A	$< 5 \text{ km}^2$	HQx, x beliebig in 5er-	Konzentrationszeit	Stunden bis Tage

Methode	Typ	Gültigkeitsbereich	Abschätzbare WKP	Sensitivste Faktoren	Aufwand
2001			Schritten bis max. $x=100$ , Ganglinie für HQx	Wasserspeichervermögen	
<b>HQx_meso_CH:</b>					
Kürsteiner / Heusser 1917/1943	Hüllkurve	5 – 500 km <sup>2</sup>	ca. HQ100	c-Wert	Minuten bis Stunden
Müller-Zeller 1943/1975	Hüllkurve	2 – 100 km <sup>2</sup>	HQmax	Abflusskoeffizient $\psi$ Zonenkoeffizient $\alpha$	Minuten bis Stunden
Kölla meso 1986	N-A	1 – 100 km <sup>2</sup> (Original) 1 – 500 km <sup>2</sup> (HQx-meso_CH)	HQ20 und HQ100	Niederschlag (insbes. 100-j. 1-Std.) kumulative Gerinnelänge --> Benetzungsvolumen	Stunden bis Tage
GIUB'96 (FN) u. (MQ) 1999	Hüllkurve	10 – 500 km <sup>2</sup>	HQ100	empirische Parameter a und b	Minuten
Momente 1994		10 – 500 km <sup>2</sup>	HQx, x beliebig bis max. $x=100$	mittleres Wasserspeichervermögen	Stunden bis Tage
BaD7 2001		10 – 500 km <sup>2</sup>	HQx, x beliebig bis max. $x=100$	---	Stunden bis Tage

### Bemerkungen zur Tabelle:

**Typ:** Bei den mit N-A bezeichneten Verfahren handelt es sich um Niederschlag-Abfluss Ansätze. Niederschlagsdaten kommen einzig in diesen Berechnungsansätzen zur Anwendung. Dies bedeutet, dass in HQx\_meso\_CH, das für mittelgrosse Einzugsgebiete eingesetzt wird, einzig im Verfahren Kölla meso der Niederschlag berücksichtigt wird. Bei den kleinen Einzugsgebieten (Berechnung mit HAKESCH) wird dagegen in 4 von 5 Verfahren der Niederschlag berücksichtigt. Entsprechend ergeben sich, unter Verwendung der aktuellen HYDROmaps-B04 Daten, in erster Linie für Einzugsgebiete < 10 km<sup>2</sup> grössere Spitzenabflüsse. Die Spitzenabflüsse bei Einzugsgebiete > 10 km<sup>2</sup> bleiben weitgehend unverändert.

**Aufwand:** Die Angaben zum Aufwand bezeichnen eine Bandbreite. Der obere Wert wird erreicht, wenn die Festlegung der lokalspezifischen Eingangsgrössen mit Untersuchungen im Gelände erfolgt. Eine solche ist gemäss den Autorinnen und Autoren der Abschätzverfahren Bedingung, wird aber oft nicht gemacht. In HQx\_meso\_CH sind Datensätze hinterlegt, die eine effiziente Bearbeitung ermöglichen. Da die meisten der Datensätze statisch sind, werden Veränderungen in den Eingangsgrössen meist nicht berücksichtigt (Ausnahme: kumulative Gerinnelänge und Niederschlag beim Verfahren Kölla).

**Sensitivität:** Angaben zur Sensitivität der verschiedenen Parameter sind in [3] nur ansatzweise beschrieben. Eine gute Zusammenstellung liefert dagegen Dobmann [9] für die in HAKESCH enthaltenen Berechnungsansätze. Analysiert wurden die Parameter Niederschlag (alle N-A Modelle), Benetzungsvolumen (Kölla und Fliesszeitverfahren), Abflussbeiwert  $\alpha$  (Taubmann) und Abflusskoeffizienten Rickli/Forster.

Als sensitivster Faktor stellte sich in den Untersuchungen der Niederschlag heraus. Eine Niederschlagserhöhung um 5 % Prozent führte zu 6 – 12 % höheren Abflusswerten. Bei 10 % Erhöhung des Niederschlaginputs resultierte eine Zunahme um 10 – 26 %. Von den Verfahren, bei denen der Niederschlag als Eingangsgröße eingeht, ist die Zunahme beim Verfahren Kölla am grössten, gefolgt durch das mod. Fliesszeitverfahren. Die Verfahren Clark-WSL und Taubmann reagieren deutlich schwächer.

Der Vergleich der Niederschlagsdaten aus HADES (1992) mit HYDROmaps (2022) zeigt, dass nicht alle Wiederkehrperioden die gleiche Zunahme zeigen. In der Regel nahmen die 100-jährlichen Niederschlagsintensitäten (1 und 24 Std.) am stärksten zu.

Dies zeigt auch das Beispiel eines Testbaches mit einer Einzugsgebietsgrösse von 16 km<sup>2</sup>, bei dem das Verfahren Kölla (1986) angewendet wurde. Der berechnete Spitzenabfluss reagiert sehr stark auf 100-jährliche 1-Stunden Niederschläge reagiert. Die Berechnungen wurden mit der Software HQx\_meso\_CH durchgeführt. Das Verfahren Kölla ist im Methodenset das einzige Verfahren, bei dem die Niederschlagswerte manuell verändert werden können. Die Berechnungen erfolgten mit den Vorgabewerten des Programms. Es wurde ohne Niederschlagsabminderung und mit maximaler Intensität im Einzugsgebiet gerechnet.

### Beispiel Testbach (EZG 16 km<sup>2</sup>)

Tabelle 3: Vergleich Niederschlagsdaten HADES (1991) und HYDROmaps (2022) am Beispiel eines Testbaches mit 16 km<sup>2</sup> Einzugsgebietsgrösse.

Dauerstufe/Wiederkehrperiode	Niederschlagssumme	HADES 1991	HYDROmaps 2022 (Median)	Zu-/Abnahme
1h / 2.33 Jahre (C)	23 mm	24 mm	+5 %	
1h / 100 Jahre (A)	57 mm	68 mm	+20 %	
24h / 2.33 Jahre (D')	65 mm	70 mm	+8 %	
24h / 100 Jahre (B')	128 mm	150 mm	+18 %	

Tabelle 4: Verfahren Kölla: Veränderung des HQ100 bei Erhöhung der Niederschlagswerte um jeweils 25 %. Es wurde für die Abflussberechnung jeweils nur einer der vier Niederschlagswerte (1h/100 J., 24h/100 J., 1h/2.33 J., 24h/2.33 J.) um 25 % erhöht.

Niederschlagdauer / Wiederkehrperiode	HQ100 für Testbach mit EZG = 16 km <sup>2</sup>	
	ohne Erhöhung	+ 25% Niederschlag
Erhöhung N-Wert für 1h / 100 Jahre	21 m <sup>3</sup> /s	27 m <sup>3</sup> /s
Erhöhung N-Wert für 24h / 100 Jahre		22 m <sup>3</sup> /s
Erhöhung N-Wert für 1h / 2.33 Jahre		21 m <sup>3</sup> /s
Erhöhung N-Wert für 24h / 2.33 Jahre		21 m <sup>3</sup> /s

Die Berechnungen zeigen, dass im Testbach einzig bei der Erhöhung des 100-jährlichen 1-Std. Niederschlags auch eine relevante Erhöhung des Spitzenabflusses [m<sup>3</sup>/s] resultiert. Dieser liegt beim Testbach im Bereich eines rund 28 % höheren Abflusses.

## 2.8 MASSGEBENDE EINGANGSGRÖSSEN

In die Abflussformeln fliessen eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren ein. Diese betreffen Informationen zu:

- Meteo
- Morphometrie
- Gerinne
- Landnutzung
- Gebietscharakterisierung bezüglich Wasserspeichervermögen und Abflusskonzentration

Eine Zusammenstellung, welche Faktoren (Modellparameter) in welchen Hochwasserabschätzverfahren enthalten sind, befindet sich in Anhang 1.

Die am häufigsten verwendeten Parameter sind Einzugsgebietsgrösse und Niederschlagsintensität. Einzig die Verfahren Kölla, Momente und BaD7 verwenden keine Angaben zur Einzugsgebietsgrösse. Bei Kölla wird anstatt der Einzugsgebietsgrösse die beitragende Fläche verwendet. Diese leitet sich aus der Gerinnelänge ab.

## 2.9 BESONDERHEITEN DER HOCHWASSERABSCHÄTZFORMELN

Die in der Schweiz gebräuchlichsten Hochwasserabschätzformeln sind in Barben [8], Dobmann [9] und [16] umfassend beschrieben und hinsichtlich der Sensitivität einzelner Eingangsgrössen beleuchtet worden. Für weitere Informationen wird auf diese Dokumente verwiesen. Nachfolgend sind die wichtigsten Besonderheiten dieser Berechnungsansätze in kompakter Form zusammengestellt.

### Müller (1943/1975) und Müller modifiziert (1943/1997)

**Formel:**  $HQ_{max} = 43 * \psi * E^{2/3}$  (für EZG < 10 km<sup>2</sup>) und  $Q_{max} = \alpha * \psi * F^{2/3}$  (für EZG > 10 km<sup>2</sup>)

**Charakterisierung:** In BWG 2003 [3] werden zwei Ansätze für Müller aufgeführt, die jedoch sehr ähnlich sind. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Zonenkoeffizienten  $\alpha$ , der für Einzugsgebiete < 10 km<sup>2</sup> (HAKESCH) den fixen Wert von 43 aufweist, bei grösseren Einzugsgebieten dagegen aus der Zonenkarte, bestehend aus 3 unterschiedlichen Zonen, bestimmt werden muss.

Der Abflusskoeffizient  $\psi$  wird in beiden Formeln verwendet. In HQx\_meso\_CH (grosse Einzugsgebiete) wird er anhand der Abflusskoeffizienten-Tabelle nach Müller, resp. Zeller, festgelegt. Angaben zur Landnutzung werden aus der Arealstatistik (1985) erhoben. In HAKESCH (kleine Einzugsgebiete) wird der Abflusskoeffizient  $\psi$  anhand des Entscheidungsschema nach Rickli & Forster (1997) ermittelt. In beiden Fällen wird  $\psi$  in Abhängigkeit der Vegetationsbedeckung gewählt.

**Einschränkungen:** Sowohl für den Zonenkoeffizienten als auch für den Abflusskoeffizienten bestehen keine kleinräumig aufgelösten Grundlagen. So verfügt die Zonenkarte nach Zeller nur über 3 unterschiedliche Zonenkoeffizienten  $\alpha$ . Der räumliche Gültigkeitsbereich der beiden Verfahren ist mit  $\geq 1$  bis  $200 \text{ km}^2$  sehr gross.

**Fazit:** Mit beiden Ansätzen können die lokalen Eigenheiten eines Einzugsgebietes nur ungenügend abgebildet werden. Die Resultate sind entsprechend vorsichtig zu verwenden.

### Taubmann

**Formel:**  $HQ(t,T) = A * X(t,T,\alpha) * Y(t,T) * Z(t)$

**Charakterisierung:** Beim Verfahren Taubmann handelt es sich um ein Fliesszeitverfahren. Darin sind sowohl Gebietsniederschläge als auch Gebietskennwerte implementiert. Mit dem Verfahren können sowohl Hochwasserspitzen als auch Hochwasservolumina berechnet werden. Ursprünglich wurde das Verfahren für Einzugsgebiete bis  $30 \text{ km}^2$  entwickelt. In der Publikation von Taubmann (1986) wurde der Anwendungsbereich auf  $1 - 300 \text{ km}^2$  erhöht.

**Einschränkungen:** Untersuchungen im Rahmen der Entwicklung der Praxishilfe 'Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten' [3] haben ergeben, dass von den Eingabegrössen der Abflussbeiwert  $\alpha$  der mit Abstand sensitivste Parameter ist. Fehlerbetrachtungen zeigen, dass Abweichungen von 5 % beim  $\alpha$ -Wert bei den resultierenden Hochwasserabflüssen bis zu 30 %ige Differenzen ergeben können. Die Tabelle, welche die Zuordnung der Abflussbeiwerte ermöglicht, ist v.a. auf mittelländische, landwirtschaftlich genutzte Flächen ausgerichtet. Für voralpine und alpine Gebiete hingegen, wo landwirtschaftlich nicht genutzte Flächen (hydrologisch unterschiedlich reagierende Waldfächen, Nassflächen, Schutthalde etc.) grössere Gebietsanteile ausmachen können, ist sie zu wenig ausführlich und entsprechend nicht geeignet.

**Fazit:** Die bestehenden Unsicherheiten beim sehr sensiblen Abflussbeiwert und die grosse Bandbreite des Gültigkeitsbereichs der Einzugsgebietsgrösse deuten darauf hin, dass die Resultate der Berechnungen vorsichtig zu interpretieren sind. Insbesondere die grosse Bandbreite der Einzugsgebietsgrösse lässt vermuten, dass die lokalen Eigenheiten kleiner Einzugsgebiet nicht genügend berücksichtigt werden können. Das Verfahren eignet sich nicht für die Anwendung in alpinen Gebieten.

### Modifiziertes Fliesszeitverfahren

**Formel:**  $HQ(x) = 0.278 * i(T_c, x) * \psi_s * E$

**Charakterisierung:** Das modifizierte Fliesszeitverfahren entspricht im Wesentlichen dem klassischen Fliesszeitverfahren, bei dem davon ausgegangen wird, dass die höchsten Spitzenabflüsse nach derjenigen Zeit auftreten, die ein Wassertropfen benötigt, um vom entferntesten Punkt im Einzugsgebiet bis zum Gebietsauslass zu gelangen. Weiter wird vorausgesetzt, dass die Intensität eines Niederschlags über die gesamte Dauer konstant ist. Für die Berechnung werden Angaben zur Einzugsgebietsgrösse, zum Abflusskoeffizienten und zur Konzentrationszeit benötigt. Beim modifizierten Fliesszeitverfahren wird der Abflusskoeffizient als Produkt aus den Infiltrationsbedingungen und der Wasser-Aufnahmefähigkeit eines Bodens bestimmt. Dazu wird die Tabelle nach Rickli & Forster (1997) verwendet. Die Konzentrationszeit wird aus der Summe der Fliesszeit (nach Ansatz Kirpich) und der Benutzungsdauer berechnet.

**Einschränkungen:** Sowohl der Abflusskoeffizient als auch die Konzentrationszeit sind Faktoren, die schwierig abzuschätzen sind. Dies zeigt sich darin, dass bei beiden Faktoren zahlreiche Ansätze zu deren Bestimmung bestehen. Die bestehenden Unschärfen bei der Festlegung dieser Parameter führen dazu, dass auch das Resultat entsprechende Unschärfe aufweist. Zudem werden die Parameter einheitlich für die gesamte Einzugsgebietsfläche festgelegt und können die lokalen Eigenheiten eines Einzugsgebietes (Teilflächen mit unterschiedlichem Verhalten) nur bedingt berücksichtigen. Das Verfahren wurde bisher einzlig in Einzugsgebieten  $< 5 \text{ km}^2$  getestet.

In [3] wird darauf hingewiesen, dass die Form eines Einzugsgebietes einen massgebenden Einfluss auf die Hochwasserabschätzung haben kann. Beispielsweise kann durch Abtrennen eines Teilgebietes (z.B. flaches Hochplateau) ein höherer Spitzenabfluss resultieren.

**Fazit:** Das modifizierte Fliesszeitverfahren ist ein häufig verwendetes Verfahren, das vergleichbar mit dem Verfahren Kölla (1986) ist. In HQx\_meso\_CH wird denn auch für das Benutzungsvolumen der Ansatz nach Kölla verwendet. Entsprechend liegen die Resultate der beiden Verfahren häufig nahe beieinander. Die fehlende Differenzierung des Abflusskoeffizienten innerhalb des Einzugsgebietes kann zu grösseren Fehlern führen.

### **Kölla (1986) und Kölla mod. (1996), Kölla meso (2003)**

**Formel:** Kölla (1986):  $HQ(x) = (r_x(T1_x+T2_x)) + r_s - f_{(x)} * (FL_{eff(x)} + FL_b) * k_{Gang} + Q_{GL(x)}$

Kölla\_meso:  $HQx = (r_x(t_{c(x)}) + r_s - f_x) * (FL_{eff(x)} + FL_b) * 0.278 + Q_{vgl(x)}$

**Charakterisierung:** Es bestehen drei sich leicht voneinander unterscheidende Verfahren, die alle vom ursprünglichen Ansatz Kölla (1986) ausgehen. Kölla (1986) ist die ursprüngliche Formel. Sie geht von einem räumlichen Gültigkeitsbereich von 1 – 100 km<sup>2</sup> Einzugsgebietsgrösse aus. Kölla mod. (1996) ist eine Weiterentwicklung der Formel durch Manser (1996). In Abweichung zu Kölla (1986) wird das erforderliche Benetzungsvolumen nicht über die Landschaftscharakteristik, sondern über die Bodentiefe und die Bodeneignungskarte bestimmt. Dieser Ansatz ist in HAKESCH und HQx\_meso\_CH nicht implementiert. Kölla meso (2003) ist eine Variante, die für HQx\_meso\_CH so abgeändert wurde, dass das Verfahren für Einzugsgebietsgrössen bis 500 km<sup>2</sup> gültig ist. Die Anpassungen betreffen im Wesentlichen den Gebietsniederschlag, der wahlweise abgemindert werden kann. Die Möglichkeit der Niederschlagsabminderung soll es erlauben, den Ansatz auch für EZG > 100 km<sup>2</sup> einzusetzen. In diesem Fall ist immer die Niederschlagsabminderung im Programm zu wählen.

In HQx\_meso\_CH wird der Faktor  $kG$  (abflusserhöhender Effekt einer Regenganglinie) mit einem fixen Wert von 0.278 ersetzt. Kölla weist in ihrer Dissertation darauf hin, dass dieser Faktor nur für Einzugsgebiete von weniger als 10 km<sup>2</sup> und Regendauern von weniger als 3 Stunden einen Einfluss hat.

Das Verfahren Kölla ist in der Schweiz sehr verbreitet und wird oft für die Erarbeitung der Hydrologie-Szenarien in Gefahrenkarten verwendet.

**Einschränkungen:** Alle Varianten des Verfahrens Kölla reagieren sehr sensiv auf die Eingangsgrössen Niederschlag und kumulative Gerinnellänge.

**Kumulative Gerinnellänge:** In Kölla entspricht die kumulative Gerinnellänge der Länge der ständig wasserführenden Gerinne und der ephemeren Gerinneabschnitte, die nur während Hochwasser wasserführend sind. Im Gegensatz dazu verwendet HQx\_meso\_CH das Gewässernetz der Landeskarte 1:25'000 (ständig wasserführende Gerinne). Die kumulative Gerinnellänge wird daher im Programm unterschätzt und kann manuell korrigiert werden. Heute werden für die Berechnungen oft auch die im Datensatz swissTLM3D erfassten Trockenrunsen berücksichtigt. Auch hier ist Vorsicht geboten, da es dadurch zu einer Überschätzung der kumulativen Gerinnellänge kommen kann.

**Niederschlag:** Die Abflussberechnung nach Kölla reagiert sehr stark auf die Niederschlagswerte. Als sehr sensiv haben sich die 100-jährlichen 1-Std. Niederschläge herausgestellt. Im Beispiel in Tabelle 5 erhöhen sich die berechneten Spitzenabflüsse eines HQ100 in der gleichen Grössenordnung wie die Zunahme der Niederschlagsintensitäten (25 % Zunahme in den Niederschlagsintensitäten führt zu 25 % grösseren Abflüssen). Kölla beschreibt dies in ihrer Dissertation wie folgt: "Eine falsche Einschätzung der Gebietscharakteristik und die Wahl eines in dem Sinne unzutreffenden Regenvolumens wirkt sich umso schwerwiegender auf das Resultat der Abschätzung aus, je tiefer die Regenintensitätswerte im Bereich der kurzen Regendauern (1 bis 6 Std.) des betreffenden Gebietes sind."

**Erforderliches Benetzungsvolumen:** In diesem Faktor ist die Information enthalten, dass Abflussvorgänge in und auf dem Boden erst dann einsetzen, wenn eine gewisse Benetzung des Bodens besteht. Dazu ist ein bestimmtes Regenvolumen notwendig. Die Grösse des Regenvolumens hängt unter anderem von den Bodeneigenschaften ab, die über den Parameter  $v_0$  einfließen. Die Wahl dieser Eingangsgröße ist abhängig von der Landschaftscharakteristik und von den Bodeneigenschaften (Bodenkarte). Gerade die Bodenkarte weist für kleine Einzugsgebiete oft eine ungenügende Datenqualität auf.

**Fazit:** Das Verfahren Kölla ist in der Schweiz weit verbreitet und lässt in der Regel eine gute räumliche Ansprache zu. Das Verfahren reagiert sehr sensiv auf gewisse Eingangsgrössen (Niederschlag, kumulative Gerinnellänge, Benetzungsvolumen). Entsprechend vorsichtig sind diese zu wählen. Bei unsachgemäßem Anwendung können auch bei diesem Verfahren rasch grössere Fehler resultieren.

### **Clark-WSL**

**Formel:** ohne Formelangabe

**Charakterisierung:** Das Verfahren Clark-WSL entstand im Rahmen einer Praktikums- und einer Diplomarbeit. Es basiert auf dem Niederschlag-Abflussmodell von Clark, bei dem davon ausgegangen wird, dass nur der nicht-infiltrierende Teil eines Niederschlags zum Abfluss kommt. Die Gebietsparameter müssen durch Felderhebungen festgelegt werden. Der Aufwand für die Bestimmung ist entsprechend hoch und wird mit 'wenigen Tagen' (inkl. Feldarbeit) angegeben. Als Eingangsgrössen verwendet das Modell die Faktoren Konzentrationszeit, Wasserspeichervermögen (nach Rickli & Forster 1997), Abflusskoeffizient und Speicherkonstante K. Diese wird über das Wasserspeichervermögen (nach Rickli & Forster 1997) festgelegt. Das Verfahren arbeitet mit einer Isozonierung und benötigt dafür ein Zeit-Flächendiagramm.

**Einschränkungen:** Das Verfahren wurde einzig in 10 kleinen Einzugsgebieten getestet, wovon 2 grösser als 2 km<sup>2</sup> waren. Die Gültigkeit dieses Ansatzes beschränkt sich entsprechend auf Einzugsgebiet < 5 km<sup>2</sup>. Bei der Konzentrationszeit und beim Wasserspeichervermögen handelt es sich um sensitive Faktoren, die schwierig zu bestimmen sind.

**Fazit:** Das Verfahren liefert in der Regel plausible Resultate. Mit der Forderung, dass die gebietsspezifischen Eigenschaften im Gelände zu erheben sind, wird den lokalen Eigenheiten eines Gebietes Rechnung getragen. Der geringe Stichprobenumfang von nur 10 Testgebieten ist für die Einschätzung der Güte des Verfahrens deutlich zu klein.

### Kürsteiner

**Formel:**  $Q_{\max} = c * F^{2/3}$

**Charakterisierung:** Kürsteiner verwendet einen generellen Ansatz für die ganze Schweiz. Die Differenzierung erfolgt über den c-Wert. Dieser charakterisiert das Einzugsgebiet (flach, hügelig, gebirgig, vergletschert). Kürsteiner postulierte einen q-Wert im Bereich von 9 – 12, äusserte sich aber nicht dazu, wie der Wert zu bestimmen ist. Die Festlegung des c-Wertes (entspricht dem q-Wert von Kürsteiner) erfolgte durch Heusser (1947).

**Einschränkungen:** Die Bewertung des c-Wertes erfolgt sehr pauschal über das gesamte Einzugsgebiet. In HQx\_meso\_CH erfolgt die Zuordnung des c-Wertes aufgrund des mittleren Gebietsgefälles. Dies führt dazu, dass sich bei unterschiedlichen Hangneigungen im Einzugsgebiet (bspw. oberes EZG steil, unteres EZG flach) massive Fehleinschätzungen der Abflussspitze ergeben können.

**Fazit:** Die lokalen Eigenheiten eines Einzugsgebietes werden nur ungenügend abgebildet. Die Resultate sind entsprechend vorsichtig zu verwenden.

### GIUB '96

**Formel:**  $Q_{\max} = a * F_n^b$  (für Spitzenabfluss als Funktion der EZG-Grösse) und  $Q_{\max} = a * M_Q^b$  (für Spitzenabfluss als Funktion des mittleren Jahresabflusses)

**Charakterisierung:** Der Ansatz GIUB '96 basiert auf der Auswertung von 700 Hochwasserereignissen zwischen 1896 und 1991. Aus den Daten wurden Regionen mit vergleichbarem Hochwasserverhalten abgeleitet und für diese Regionen Kennwerte für die Abschätzung von 100-jährlichen Hochwasserspitzen hergeleitet. Der Aufbau der Funktion ist vergleichbar mit derjenigen von Kürsteiner und beinhaltet die regionenspezifischen Faktoren a und b, deren Werte in einer Tabelle pro Typregion festgehalten sind. Es stehen zwei Ansätze zur Verfügung. GIUB '96 (FN) betrachtet den Spitzenabfluss als Funktion der Einzugsgebietsgrösse, GIUB '96 (MQ) benutzt dazu den mittleren Jahresabfluss.

**Einschränkungen:** Die beiden Ansätze des Verfahrens sind auf die Schweiz und auf die Bestimmungen eines HQ100 beschränkt. Im Bereich der Regionengrenzen ergeben sich teils abrupte Übergänge, je nach Regionenwahl. Zudem liegen den Regionen teils sehr kleine Stichprobenumfänge der Hochwasserereignisse zu Grunde. In diesen Fällen empfiehlt sich eine zusätzliche Berechnung mit den Nachbarregionen.

**Fazit:** Das Verfahren ist sehr einfach in der Anwendung und liefert sämtliche Grundlagen der Parameterwahl mit. Die Gebietseigenschaften sind in nur 2 Parametern abgebildet, was dazu führen kann, dass die lokalen Eigenheiten, insbesondere von kleineren Einzugsgebieten, nur ungenügend abgebildet sind. Der Ansatz basiert auf der Auswertung von Ereignissen zwischen 1896 und 1991 und kann dadurch sich verändernde Niederschlagsverhältnisse nicht abbilden.

### Momente

**Formel:**  $HQx = mHQ + Kx * s(HQ)$ , mit  $mHQ = f(F_n, Vgl, N, Im, Oed, WSV)$  und  $s(HQ) = f(F_n, N, WSV)$

**Charakterisierung:** Die Methode Momente (Düster 1994) bestimmt den Hochwasserabfluss anhand der mittleren Jahreshochwasserspitze mHQ und der Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen s(HQ). Hochwasserspitze und Standardabweichung werden anhand der Einzugsgebietsfläche, des Umfangs, des Schwerpunktstandorts, der Tallänge und der Flussdichte bestimmt. Bei der Gewichtung der Faktoren wird davon ausgegangen, dass in einem EZG unterschiedliche Bereiche bestehen und diese unterschiedlich stark zum Hochwasserabfluss beitragen. Je grösser die Hangneigung und je kleiner die Entfernung vom Gewässernetz ist, desto grösser wird der relative Beitrag zum Hochwasserabfluss. Das Modell wurde anhand von 95 schweizerischen Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 10 und 500 km<sup>2</sup> geeicht.

**Einschränkungen:** Die Grundlage für die Eichung des Modells ist mit einem Stichprobenumfang eher gering. Insbesondere da damit der ganze Bereich von Einzugsgebietsgrössen zwischen 10 – 500 km<sup>2</sup> abgedeckt werden soll. Gemäss [3] eignet sich das Verfahren nicht für Gebiete mit extremen Parameterkombinationen (z.B. städtische oder stark vergletscherte Einzugsgebiete). In HQx\_meso\_CH werden die Parameter direkt aus den im Programm implementierten Datensätzen berechnet. Eine Aktualisierung der Datensätze ist zurzeit nicht möglich.

**Fazit:** Das Verfahren lässt sich in HQx\_meso\_CH mit geringem Aufwand anwenden. Datensätze wie beispielsweise die beitragende Fläche (abhängig vom Gewässernetz), der Vergletscherungsgrad und der Jahresniederschlag, lassen sich im Programm nicht manuell übersteuern. Gerade diese Datensätze können aber mit der Zeit Veränderungen unterliegen.

### BaD7

**Formel:** ohne Formelangabe

**Charakterisierung:** Das Verfahren von Barben (2001) stellt eine Weiterentwicklung des Ansatzes nach Düster (1994) dar. Der Unterschied besteht darin, dass die beiden Momente durch Mittelung der Momente der sechs ähnlichsten Referenzgebiete erfolgt. Zudem verwendet Barben zusätzlich Daten zum Versiegelungsgrad und zum Weideanteil. Das Verfahren nach Barben beruht auf der Auswertung derselben 95 schweizerischen Einzugsgebieten wie in Düster (1994).

**Einschränkungen:** Es gelten dieselben Einschränkungen wie bei der Methode Momente (Düster, 1994).

**Fazit:** Es gilt dasselbe Fazit wie bei der Methode Momente (Düster, 1994).

## 2.10 FAZIT ZUR ANWENDUNG VON HOCHWASSERABSCHÄTZVERFAHREN

- Es gibt nicht **das** Modell oder **die** Vorgehensweise, welche die Realität am besten abbilden. Alle Modellansätze weisen Stärken und Schwächen auf. Eine fundierte Hochwasserabschätzung sollte daher immer mehrere Ansätze und Kombinationen von Ansätzen enthalten. Dabei sind die enthaltenen Parameter immer kritisch zu prüfen und nach Möglichkeit im Gelände zu erheben. Die Anzahl der Parameter gibt noch keine Auskunft über die Genauigkeit eines Modells.
- Die Anwendung von Modellen erfordert Erfahrung. Die Anwendenden müssen sich der Genauigkeit des Modells und der Sensitivität der darin verwendeten Parameter bewusst sein. Software-Anwendungen verleiten oft dazu, die Resultate der Berechnungen zu wenig kritisch zu hinterfragen. Gleichermaßen gilt für die Anwendung GIS-basierter Ansätze. Sie verleiten dazu, Datensätze zu verwenden, die flächendeckend verfügbar sind, deren Güte aber für eine Hochwasserabschätzung ungenügend sein kann.
- Die bestehenden Hochwasserabschätzverfahren berücksichtigen mit wenigen Ausnahmen nur reine Niederschlagsereignisse. Konstellationen mit Vorfeuchte oder sehr trockenen Verhältnissen oder der Kombination aus Schneeschmelze und Niederschlag wird heute oft zu wenig Bedeutung beigemessen.
- Hochwasserabschätzverfahren berechnen den Reinwasserabfluss. Bei Ereignissen ist jedoch immer der Gesamtabfluss, bestehend aus dem Wasser- und dem Geschiebeanteil, massgebend. Dieser setzt Kenntnisse zum Transportprozess voraus. Der Transportprozess wiederum gibt vor, welche Ansätze zur Berechnung des Spitzenabflusses zu wählen sind. Die Festlegung der Hydrologie- und der Geschiebeszenarien reichen nicht als Grundlage für die Schwachstellen- und die Wirkungsanalyse. In jedem Fall ist der Gesamtabfluss auszuweisen.
- Ergebnisse von Modellrechnungen sind immer kritisch zu hinterfragen und mit unabhängigen Gegenprüfungen abzugleichen. Die Plausibilität kann bspw. über dokumentierte Ereignisse oder im Vergleich mit den tatsächlich bestehenden Abflusskapazitäten an einem aussagekräftigen Fließquerschnitt geprüft werden.
- Veränderungen in den Niederschlagsintensitäten wirken sich nur auf Berechnungsansätze aus, die Niederschlagsintensitäten unterschiedlicher Jährlichkeiten berücksichtigen. In sämtlichen Hüllkurvenverfahren findet der Niederschlag keinen Eingang. Ein Vergleich der Berechnungsresultate unterschiedlicher Berechnungsansätze (Hüllkurven, N-A-Modelle, Extremwertstatistik) kann grosse Unterschiede ergeben.
- Die Software HQx\_meso\_CH ist zu wenig dynamisch und greift auf im Programm fix installierte Datensätze zurück. Dies betrifft auch die Niederschlagsdaten. Veränderte Grundlagen fliessen dadurch nicht in die Berechnung ein. Einzig beim Verfahren Kölla lassen sich Niederschlagsintensitäten durch manuell angepasste Werte übersteuern.
- In HAKESCH werden die Niederschläge in der Parameterwahl eingesetzt. HAKESCH ist jedoch nur für Einzugsgebiete bis 10 km<sup>2</sup> zulässig.
- Die heute gebräuchlichsten Hochwasserformeln müssen bezüglich ihrer Aktualität geprüft werden. Die Hochwasserabschätzverfahren basieren auf dem damaligen Hochwassergeschehen. Bei den N-A – Modellen betrifft dies stark die Niederschlagsintensitäten. Diese haben sich seither teils markant verändert. Entsprechend vorsichtig sind die Resultate dieser Berechnungen zu verwenden, insbesondere wenn der Niederschlag der sensitivste Faktor ist. Es stellt sich die Frage, ob ihre Anwendung heute noch zulässig ist.

- Viele Faktoren sind schwierig abzuschätzen, weil verschiedene Datengrundlagen heute immer noch ungenügend sind. Dies betrifft in erster Linie Eigenschaften des Bodens wie das Wasseraufnahmevermögen und den Abflusskoeffizienten. Nur wenige Verfahren lassen detaillierte Betrachtungen über verschiedene Teillächen zu. Die Anwendung dieser Verfahren erfordert einen deutlich erhöhten Bearbeitungsaufwand, wie er im Rahmen von Gefahrenkarten in der Regel nicht geleistet werden kann.

### 3 ABFLUSSSTEUERnde FAKTOREN BEI REINWASSERABFLÜSSEN

Es bestehen verschiedene Faktoren, die das Abflussverhalten eines Baches steuern. Einige dieser Faktoren sind bereits in den bestehenden Hochwasserabschätzformeln berücksichtigt, andere dagegen nicht. Bei der Festlegung der Spitzenabflüsse sollten möglichst alle im jeweiligen Einzugsgebiet relevanten Faktoren bewertet werden, sei dies durch die Verwendung einer geeigneten Hochwasserformel oder durch nachgelagerte Bewertung und Gewichtung der aus den Berechnungen erhaltenen Resultate. Das in Abbildung 4 dargestellte Bewertungsschema soll eine Hilfestellung für die Festlegung von Reinwasserabflüssen geben. Das Bewertungsschema ist so anzuwenden, dass für jeden Faktor geprüft wird, ob er im untersuchten Einzugsgebiet abflussverstärkend oder abflussreduzierend wirkt. Die Bestimmung der Lage im Diagramm erfolgt gutachtlisch.

Aus der Gesamtschau der bewerteten Faktoren lässt sich die Gewichtung der berechneten Abflusswerte vornehmen. Liegt der Hauptteil der Einstufungen in der unteren Hälfte, spricht dies tendenziell für eine Überschätzung der berechneten Abflusswerte. Einstufungen in der oberen Hälfte sprechen für eine Übernahme der Berechnungswerte, allenfalls sogar eine Erhöhung derselben. Es ist zu beachten, dass Faktoren, welche bereits in den Formeln berücksichtigt wurden, nicht ein weiteres Mal berücksichtigt werden dürfen.

In Tabelle 5 sind die abflusssteuernden Faktoren zusammengestellt. Die Tabelle gibt eine Übersicht, ist aber, je nach lokalen Gegebenheiten, nicht abschliessend. In diesem Fall können weitere Faktoren berücksichtigt werden. Sind Faktoren bereits in einzelnen Hochwasserformeln enthalten, sind diese Faktoren nicht erneut für die Gewichtung zu verwenden.

Bei den Einflussfaktoren kann in einem ersten Schritt unterschieden werden zwischen ereignisabhängigen Faktoren und ereignisunabhängigen Faktoren. Die nachfolgenden Angaben wurden aus [10] übernommen.

#### Ereignisabhängige Faktoren:

- Intensität, Dauer und Menge des Niederschlages
- räumliche Verteilung des Niederschlages, inklusive Zugrichtung der Niederschlagsfront in Bezug zum Einzugsgebiet
- Höhe der Schneefallgrenze
- Schnee- und Gletscherschmelzrate
- aktuelle Infiltrationseigenschaften der Böden im Einzugsgebiet (abhängig von Bodenfeuchte, Verdichtungsgrad, Bodenfrost, Bodenbedeckung, Austrocknung des Bodens)
- Eisbildung in Flüssen (während eines Eisstosses)
- Bewirtschaftung von Rückhalteraumen (z.B. Rückhaltebecken, Stauteiche) oder plötzliche Veränderung des vorgegebenen Rückhalteraumes, z.B. durch Dammbrüche, Verklausungen oberhalb des betrachteten Profils
- beim Bruch von Dämmen und Staumauern: Größe der Bresche, zeitliche Entwicklung, Füllungsgrad vor dem Bruch
- usw.

#### Ereignisunabhängige Faktoren:

- Größe und Form des Einzugsgebietes
- Höhenlage
- Steilheit des Geländes, vorhandene Terrassierungen
- Dichte des Gewässernetzes
- Wellenablaufgeschwindigkeit im Fluss und in den Zubringern (abhängig von Gefälle, Rauigkeitseigenschaften)
- Verteilung der geologischen Randbedingungen und der Bodeneigenschaften im Einzugsgebiet
- Verteilung der Landnutzung (z.B. Wald, versiegelte Flächen)
- Regulierungsgrad von Flüssen und damit zusammenhängend Hochwasserrückhalt in den Vorländern (Überschwemmungsgebiete)
- usw.

Tabelle 5: Abflusssteuernde Faktoren und deren Auswirkung auf die Abflussberechnung. Hinweis: Sind Faktoren bereits in einzelnen Hochwasserformeln enthalten, sind die Faktoren nicht erneut für die Gewichtung zu berücksichtigen.

= abflussverstärkende Effekte = abflussreduzierend Effekte, = Auswirkung auf Abfluss gering

Faktoren	Subfaktoren	Bewertung
Wald	Waldanteil (absolut)	<p>Wald kann eine dämpfende Wirkung auf die Abflussspitze ausüben. Während in einer Studie von ENGLER (1919) ein hohe Wirkung des Waldes auf die Abflussspitze postuliert wird, konnten mit Studien aus dem Alptal (SZ) kein Zusammenhang belegt werden (aus [18]).</p> <p>Heute wird dennoch davon ausgegangen, dass hohe Waldanteile im Einzugsgebiet die Abflussbeiwerte reduzieren können und dass der Niederschlag dadurch langsamer zum Abfluss kommt.</p> <p>Verbreitet Wald vorhanden: </p> <p>Kaum Wald vorhanden:  oder </p>
	Waldfäche (Veränderung)	<p>Da Wald eine dämpfende Wirkung auf die Abflussspitze haben kann, werden auch Veränderungen der Waldfächen entsprechende Auswirkungen auf das Abflussgeschehen zeigen. Eine Zunahme der Waldfäche erfolgt immer langsam und ist entsprechend wenig relevant. Eine Abnahme der Waldfäche, bspw. durch Windwurf oder Waldbrand, tritt als abruptes Ereignis auf. Im Vergleich zu vorangehenden Abflussberechnungen kann der Spitzenabfluss nach einem solchen Ereignis höher sein.</p> <p>Abnahme Waldfäche: </p>
Boden	Boden-verdichtung	<p>Je grösser die Flächen mit Bodenverdichtung in einem Einzugsgebiet (z.B. bei intensiver landwirtschaftlicher Nutzung), desto weniger Niederschlag kann im Boden versickern. Mehr Wasser gelangt in kürzerer Zeit in den Vorfluter.</p> <p>Verbreitet Flächen mit Bodenverdichtung: </p> <p>Verbreitet Flächen mit durchlässigen Böden:  oder </p>
	Felsflächen	<p>Auf Felsflächen ist die Versickerung von Niederschlag sehr gering (Ausnahme Karst oder stark zerklüftete Felsflächen). Je grösser der Anteil an Felsflächen in einem Einzugsgebiet, umso mehr Wasser und umso rascher gelangt Wasser in den Vorfluter.</p> <p>Verbreitet Felsflächen: </p>
Sümpfe und Seen	Sümpfe und Seen	<p>Sümpfe und Seen können, wenn sie nicht direkt ans Gewässernetz angeschlossen sind, als Retentionsflächen wirken. Grosse, nicht an ein Fließgewässer angeschlossene Sümpfe oder Seen beeinflussen die Abflussbildung entsprechend positiv.</p> <p><i>Hinweis: Bei entsprechender Vorfeuchte kann der Effekt von Sumpfflächen wegfallen oder sich sogar negativ auswirken, indem es zu einem sprunghaften Anstieg des Abflusses kommen kann, wenn Sümpfe oder Seen überlaufen. Der Faktor ist entsprechend vorsichtig in der Gewichtung zu verwenden.</i></p> <p>Grosse Sumpf- oder Seeflächen (ohne Anschluss): </p> <p>Kleine Sumpf- oder Seeflächen (ohne Anschluss):  oder </p>
	Versiegelung (Veränderung)	<p>Auf versiegelten Flächen findet keine Infiltration von Niederschlag statt. Der gesamte Niederschlag fliesst oberflächlich ab. Mehr Wasser erreicht in kürzerer Zeit den Vorfluter.</p> <p><i>Hinweis: Versiegelte Flächen befinden sich meist im Wirkungsgebiet und nicht im Einzugsgebiet und haben dann keinen oder einen untergeordneten Einfluss auf die Abflussberechnung, wirken sich hingegen auf die Gefahrenflächen aus.</i></p> <p>Deutliche Zunahme der versiegelten Flächen: </p>
Gerinnedichte im EZG	Gerinnelänge pro km <sup>2</sup> EZG	<p>Einzugsgebiete mit einem dichten Gerinnenetz sprechen stärker und rascher auf Starkniederschläge an, da der Anteil der abflussbeitragenden Fläche entlang der zahlreichen Wasserläufe hoch ist. Im Vergleich dazu ist in Einzugsgebieten mit geringer Gerinnedichte der Anteil nicht oder spät beitragender Fläche gross. Entsprechend geringer fallen bei Starkniederschlägen die Spitzenabflüsse aus.</p> <p>Geringe Gerinnedichte im Einzugsgebiet: </p> <p>Hohe Gerinnedichte im Einzugsgebiet: </p>

Faktoren	Subfaktoren	Bewertung
Abfluss-beitragende Flächen	Anteil beitragender Flächen	<p>Einzugsgebiete mit einem hohen Flächenanteil an abflussbeitragenden Flächen (rasche Zuströmbereiche im Bereich der Gerinne) reagieren stärker auf Starkniederschläge als Gebiete mit kleinen abflussbeitragenden Flächen. Generell reagieren Gebiete mit kleinen abflussbeitragenden Flächen stärker auf Landregen/Dauerregen, während grosse abflussbeitragende Flächen stärker auf Gewitterniederschläge ansprechen.</p> <p><i>Hinweis: Faktor teilweise in bestehenden Abflussformeln enthalten über Versiegelung, Verdichtung oder Gerinnendicthe.</i></p> <p>Hoher Anteil abflussbeitragender Flächen:</p>
Gerinneverbau	Grundsätzlich	<p>Stark verbaute Bäche sind meist stärker kanalisiert, wodurch es zu einem raschen Abfluss kommt. Ein stark verbauter Bach reagiert somit stärker auf Niederschläge als ein natürlicher Gerinnelauf.</p> <p>Natürliche Gerinne:</p> <p>Stark verbaute Gerinne:</p>
	Veränderung	<p>Neben dem grundsätzlichen Verhalten bei Verbauungen ist auch die Veränderung gegenüber einem früheren unverbauten oder weniger verbauten Zustand massgebend.</p> <p>Starke Veränderung:</p>
Zu- und Wegströmbereiche	Wegströmbereiche (Ausuferungen)	<p>Entlang eines Baches können Schwachstellen bestehen, an denen es zu Wasserverlusten durch Ausuferungen kommen kann. Dabei kann das ausufernde Wasser das Einzugsgebiet gänzlich verlassen, z.B. über Strassen oder Geländemulden. Befinden sich diese Stellen oberhalb des Bemessungspunktes für die Abflussberechnung, werden die Verluste nicht berücksichtigt. In diesen Fällen ist der Bemessungspunkt neu festzulegen oder die berechneten Abflüsse sind um die Wasserverluste zu korrigieren. Bei Ausuferungen mit Rückfluss zurück ins Gerinne kann es zu einer Dämpfung der Abflussspitze kommen.</p> <p>Relevante Verluste durch Ausuferungen:</p> <p>Ohne oder geringe Verluste durch Ausuferungen:</p>
	Zuströmbereiche (Zufluss Oberflächenwasser über Hangmulden)	<p>Einzugsgebiete mit verbreitet Mulden mit Wasserkonzentration, die dem Gerinne Wasser zuleiten, reagieren stärker auf Niederschläge, insbesondere auf Niederschläge hoher Intensität.</p> <p>Zahlreiche Zuströmbereiche:</p>
Räumliche Niederschlagsverteilung	Blockierungslagen	<p>Bei Einzugsgebieten in Kessellagen kommt es häufiger zu Blockierung von Gewitterzellen. In Kessellagen ist daher häufiger mit länger andauernden Niederschlägen mit hoher Intensität zu rechnen.</p> <p>Einzugsgebiete in Kessellagen:</p>
	Staulagen	<p>Bei Einzugsgebieten in bekannten Staulagen kann es wie bei den Blockierungslagen häufiger zu Niederschlagssituationen mit länger andauernden Niederschlägen hoher Intensität kommen.</p> <p>Einzugsgebiet mit Staulagen:</p>
Höhenverteilung		<p>Die Höhenlage eines Einzugsgebietes (EZG) ist relevant für die Abflussbildung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Niederschlag in tiefliegenden EZG fällt meist in flüssiger Form (direkter Abfluss)</li> <li>- Niederschlag in hochalpinen EZG in Form von Schnee (kein oder verzögter Abfluss)</li> <li>- Niederschlag in mittleren Lagen sowohl in flüssiger als auch in fester Form möglich, besonders gefährlich sind Ereignisse des Typs 'Regen auf Schnee' oder 'Regen auf gefrorenen Boden'</li> </ul> <p>Einzugsgebieten in mittleren Lagen:</p>
Gletscheranteil		<p>Bei Einzugsgebieten mit Gletscheranteil kann bei höheren Temperaturen zusätzlich zum Niederschlag ein erhöhter Schmelzwasseranteil auftreten.</p> <p>Gletscherflächen vorhanden:</p>

Faktoren	Subfaktoren	Bewertung
Morphologische Faktoren	Form EZG	Die Form eines Einzugsgebietes kann die Abflussbildung beeinflussen. Schmale Einzugsgebiete reagieren in der Regel rascher und stärker als breite. <i>Hinweis: Der Effekt kann bereits im Faktor Gerinnendichte enthalten sein. In diesem Fall ist eine zusätzliche Gewichtung zu prüfen.</i> Breite Einzugsgebiete:   Schmale Einzugsgebiete:  oder 
	Mikro-topographie (Terrassierung/strukturierte Oberfläche)	In stark terrassierten oder stark mit Senken und Hügeln strukturierten Oberflächen kann es zu relevantem Wasserrückhalt kommen. Dies dürfte vor allem bei Gewitterniederschlägen der Fall sein. <i>Hinweis: Kommt es aber im Laufe eines Niederschlagsereignisses zu einem Überlaufen der Senken, kann dies zu einem sprunghaften Anstieg des Abflusses führen. Dieser Faktor ist entsprechend vorsichtig zu berücksichtigen.</i> Viele Negativformen:  !
	Steilheit Einzugsgebiet	Je steiler ein Einzugsgebiet, desto rascher fliesst der Niederschlag dem Gerinne zu und im Gerinne ab. Bei steilen Gerinnen ist gegenüber flachen Gerinnen ein eher erhöhter Abfluss zu erwarten. Mehrheitlich steile Einzugsgebiete: 
Geologische Randbedingungen	Wasserstauer	Wasserstauende Gesteinseinheiten im bodennahen Untergrund erhöhen den Abflusskoeffizienten eines Gebietes/einer Fläche. Niederschlag kommt rascher zum Abfluss. Verbreitet wasserstauende Gesteinsschichten:  Wenige oder keine wasserstauenden Schichten: 
	Karst	Verkarstungsfähige Gesteine (Kalk, Gips) nehmen aufgrund der vielen Hohlräume viel Wasser auf. Bei Gewitterereignissen wirken diese Gesteinseinheiten abflussreduzierend. Bei langandauernden Niederschlägen über mehrere Tage füllen sich die Karstspeicher mit Wasser und können überlaufen. Dadurch kann es zu unerwartet hohen Abflüssen kommen. Karst im Einzugsgebiet vorhanden:  !
Meteorologische Konstellationen		Fällt Niederschlag zu einem Zeitpunkt, bei dem im Einzugsgebiet spezielle Konditionen wie Schnee, gefrorener, gesättigter oder ausgetrockneter Boden herrschen, kann dies zu einem deutlich erhöhten Abfluss führen. Bei der Festlegung der Bemessungsabflüsse sind diese für jedes Szenario zu prüfen und die Eintretenswahrscheinlichkeiten solcher Konstellationen zu bewerten. Ungünstige Konstellationen: 

Verschiedene dieser Faktoren sind bereits in einzelnen Formeln enthalten. Wird für die Festlegung des massgebenden Hochwasserabflusses ein Berechnungsansatz verwendet, der bereits einzelne Faktoren berücksichtigt, sind diese nicht mehr zusätzlich zu bewerten. Diejenigen Faktoren, die nicht in den verwendeten Hochwasserabschätzformeln abgebildet sind, sollten im Rahmen der Prüfung der abflussteuernden Faktoren zusätzlich bewertet werden.

## 4 EMPFEHLUNG ZUM VORGEHEN BEI HOCHWASSERABSCHÄTZUNGEN

Im Gegensatz zur Hochwasserabschätzung werden bei der Geschiebeabschätzung Feldaufnahmen reinen Berechnungen klar vorgezogen. Auch für die Bestimmung des Geschiebeaufkommens bestehen verschiedene Formeln, teils auch solche, die eine differenzierte Ansprache eines Baches zulassen. Es wurde jedoch schon früh festgestellt, dass kaum ein Berechnungsansatz in der Lage ist, den Anforderungen einer Gefahrenbeurteilung im Rahmen der Erstellung einer Gefahrenkarte oder eines Detailgutachtens zu genügen. Auch die heute bestehenden Verfahren für Hochwasserabschätzungen vermögen im konkreten Fall die lokalen Eigenheiten eines Einzugsgebietes mit Vorfeuchte, Bodenbeschaffenheit oder Topographie oft nicht adäquat zu berücksichtigen. Trotzdem werden sie häufig als einzige Grundlage bei der Bestimmung der Abflussszenarien verwendet. Mit der Kenntnis, dass Hochwasserabschätzverfahren methodenbedingt grosse Unschärfen aufweisen, ist es umso wichtiger, eine fundierte und gut strukturierte Nachbearbeitung der berechneten Resultate vorzunehmen.

Zu Beginn jeder Hochwasserabschätzung, sei es bei der Erstellung einer Gefahrenkarte, einer Massnahmenplanung oder eines Detailgutachtens, sollte man sich daher über die folgenden Fragen Rechenschaft ablegen:

- Sind die gewählten Berechnungsansätze (Verfahren, Formeln) unter Berücksichtigung der aktuellen klimatischen Verhältnisse noch gültig und können sie auf veränderte Klimabedingungen genügend eingehen?
- Lässt sich die gesuchte Fragestellung mit dem gewählten Berechnungsansatz beantworten?
- Eignet sich der Ansatz für die vorliegende Einzugsgebietsgrösse? Einzugsgebietsgrößen im Randbereich der ausgewiesenen Bandbreite sind fraglich.
- Liegen die Eingangsgrößen für alle verwendeten Verfahren in genügender Qualität, räumlicher Auflösung und Aktualität vor?

Wenn nur einer der obigen Fragen mit 'Nein' beantwortet werden muss, eignet sich das jeweilige Verfahren nicht oder nur bedingt. Wird es trotzdem angewendet, sind die Resultate entsprechend kritisch zu prüfen und allenfalls gutachterlich anzupassen.

Dies gilt auch, wenn softwarebedingte Einschränkungen bestehen, die eine Berechnung erschweren oder unmöglich machen (Beispiel: Zugriff auf veraltete Niederschlagsdaten in HQx\_meso\_CH). In diesem Fall sind manuelle Berechnungen durchzuführen.

### 4.1.1 EINSCHRÄNKUNGEN BEI DEN HEUTE VERFÜGBAREN HOCHWASSERABSCHÄTZVERFAHREN

**Gültigkeit aufgrund klimatischer Veränderungen:** Bei den meisten der heute angewendeten Verfahren handelt es sich um empirische Ansätze, die auf der Auswertung ehemaliger Hochwassereignisse beruhen. Diese Berechnungsansätze widerspiegeln das Hochwassergeschehen unter den damaligen klimatischen Bedingungen. Unter heute teilweise deutlich veränderten Bedingungen stellt sich die Frage, inwiefern diese Berechnungsansätze heute noch gültig sind.

**Gültigkeit aufgrund des Anwendungsbereiches:** Verschiedene Verfahren sind auf eine grosse Bandbreite der Einzugsgebietsgrösse ausgerichtet. Kölla (1986) beispielsweise wird für Einzugsgebietsgrößen von < 100 km<sup>2</sup> angegeben, Kölla meso für 10 – 500 km<sup>2</sup>. Skaleneffekte wirken sich bei dieser Bandbreite sehr stark aus. Berechnungen in den Randbereichen der Bandbreite sind daher besonders kritisch zu prüfen.

**Gültigkeit aufgrund Auflösung der Eingangsparameter:** Verschiedene Ansätze verwenden Parameter, die in einer sehr geringen räumlichen Auflösung vorliegen oder wenig differenziert sind. Der Ansatz nach Müller verwendet beispielsweise als Regionalfaktoren eine Zonen- und einen Abflusskoeffizienten. Die gesamte Schweiz ist dabei in 3 Zonen mit unterschiedlichen Zonenkoeffizienten unterteilt. Daraus lässt sich ableiten, dass die Resultate der Berechnungen mit dem Verfahren Müller lokalspezifische Eigenschaften kleiner und kleinster Einzugsgebiet nicht adäquat wiedergeben können. Gleicher gilt generell für Hüllkurvenverfahren, die meist auf wenigen, oft überregional festgelegten, Faktoren beruhen.

**Gültigkeit aufgrund fehlender Daten oder ungenügender Datenqualität:** In verschiedenen Berechnungsansätzen finden Parameter Eingang, für die in der Schweiz keine entsprechenden Grundlagen oder nur Grundlagen mit ungenügender Genauigkeit vorliegen. Dies betrifft insbesondere Parameter, welche die Abflussbildung steuern, wie bspw. Bodeneigenschaften und die damit verbundenen Abflusskoeffizienten und das Wasserspeichervermögen. Hier werden oft Angaben aus Tabellen mit meist sehr grober Einteilung verwendet, welche die effektiven Gegebenheiten in einem Einzugsgebiet nur ungenügend repräsentieren.

**Gültigkeit aufgrund der Nicht-Verwendung relevanter Parameter:** Zahlreiche Berechnungsansätze (siehe Anhang 1) verwenden im Gegensatz zu den Niederschlags-Abflussmodellen keine Niederschlagsdaten. Veränderungen im Niederschlag fliessen somit in diesen Formeln nicht ein. Es stellt sich die Frage, inwiefern diese Ansätze unter den heutigen klimatischen Bedingungen noch verlässliche Resultate liefern. Für eine grobe Einordnung dürften sie nach wie vor genügen, für eine detaillierte Analyse nicht.

All diese Gründe führen dazu, dass **berechnete Hochwasserabflüsse immer kritisch zu hinterfragen sind** und die letztendliche Festlegung der Werte gutachtlich erfolgen muss, unter Berücksichtigung der Berechnungsresultate, einer Gewichtung mit weiteren Einflussfaktoren und einer unabhängigen Plausibilisierung.

#### 4.1.2 MÖGLICHKEITEN ZUR PLAUSIBILISIERUNG DER BERECHNETEN HOCHWASSERABFLÜSSE

Nachfolgend werden zwei Möglichkeiten aufgezeigt, mit denen berechnete Hochwasserabflüsse plausibilisiert werden können. Der erste basiert auf der Auswertung vergangener Hochwasserabflüsse, der zweite auf einer Gegenüberstellung der Abflusskapazität in einem bestimmten Abflussquerschnitt mit dem berechneten Hochwasserabfluss für diese Stelle.

**Plausibilisierung anhand vergangener Hochwasserabflüsse:** Bei entsprechender Datenlage ist eine Plausibilisierung anhand von vergangenen Hochwasserereignissen (Ereigniskataster) möglich. Bei kleinen und kleinsten Einzugsgebieten liefern die bestehenden Ereigniskataster kaum je Angaben.

**Plausibilisierung anhand der Abflusskapazität eines Gerinnes:** Eine weitere Möglichkeit besteht im Vergleich der tatsächlichen Abflusskapazität eines Gerinnes (bordvoller Abfluss) mit dem für diese Stelle berechneten Hochwasserabfluss. Dabei wird bei einem charakteristischen Gerinnequerschnitt (offener Bachlauf, Brücke, Eindolung) die Abflusskapazität bei einem bordvollen Abfluss berechnet. Durch Befragung von Personen, die den Bach gut kennen, wird bestimmt, wie häufig es an dieser Stelle zu Ausuferungen kommt. Daraus lässt sich die Jährlichkeit eines bordvollen Abflusses näherungsweise festlegen. Dieser Wert lässt sich anschliessend mit den Hochwasserberechnungen vergleichen. Bei grösseren Abweichungen sind die Abschätzungen kritisch zu hinterfragen.

**Beispiel:** Im zu beurteilenden Gerinne(abschnitt) tritt gemäss Anwohnern der Bach etwa alle 10 Jahre über die Ufer. Die Abflusskapazität (bordvoll) an dieser Stelle beträgt rund  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Daraus lässt sich ableiten, dass etwa alle 10 Jahre ein grösserer Abfluss als  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  auftritt.  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  entsprechen somit etwa einem HQ10. Die Hochwasserabflussberechnung mittels Formeln ergibt für diesen Bemessungspunkt ein HQ30 von  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ . Unter Anwendung eines Faktors von bspw. 0.75 für die Umrechnung eines HQ30 auf ein HQ10, ergibt sich ein Spitzenabfluss HQ10 von  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ . Der berechnete Abfluss von  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  ist somit rund 3x höher als die Abflusskapazität des Gerinnes ( $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Es liegt die Vermutung nahe, dass einer der beiden Werte zu hoch oder zu tief liegt. Da die Abflusskapazität des Gerinnes die effektiven Gegebenheiten vermutlich besser abbildet, kann davon ausgegangen werden, dass die Hochwasserberechnung zu hoch ist.

#### 4.1.3 VORGEHEN SCHRITT FÜR SCHRITT

Eine Hochwasserabschätzung sollte idealerweise in den nachfolgend aufgeführten Schritten ablaufen. Sind Hochwasserabschätzungen für eine Vielzahl von Gewässern vorzunehmen (z.B. im Rahmen einer Gefahrenkartenerarbeitung), kann in Schritt 1 eine Typisierung gleichartiger Bäche vorgenommen werden. Dabei werden **Referenzbäche** als Stellvertreter für einen spezifischen Einzugsgebietstyp bestimmt. Die Hochwasserabschätzung erfolgt für diese Referenzbäche gemäss den 5 Schritten in Abbildung 3. Die Resultate der Beurteilungen können anschliessend mittels Flächenansatzfunktionen<sup>1</sup> auf die der jeweiligen Kategorie zugehörigen Bäche übertragen werden. Die Festlegung der Referenzbäche und der vergleichbaren Bäche muss sorgfältig erfolgen. Dabei sind alle wichtigen Aspekte der Hochwasserbildung zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 3). Alle Einzugsgebiete mit vergleichbaren abflusssteuernden Faktoren können in einer Typ-Kategorie zusammengefasst werden.

<sup>1</sup> Eine mögliche Flächenansatzfunktion stellt folgender Ansatz dar:  $\text{HQ}_{x, \text{Pkt.1}} = \text{HQ}_{x, \text{Pkt.2}} * (\text{EZG}_{\text{Pkt.1}}/\text{EZG}_{\text{Pkt.2}})^{2/3}$

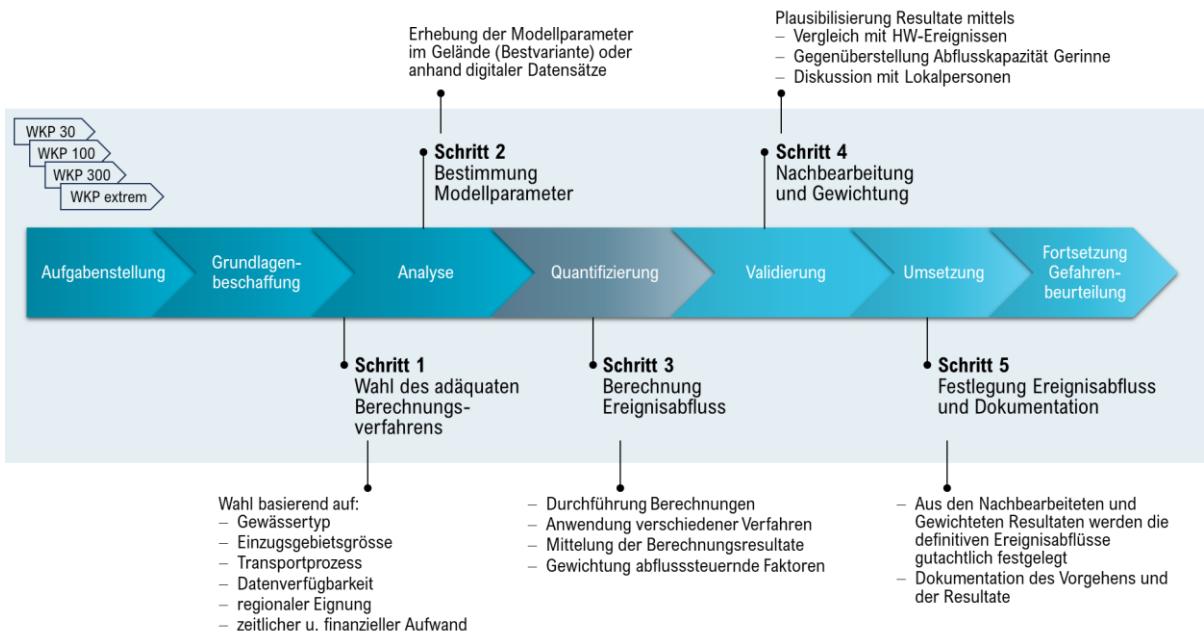


Abbildung 3: Ablauf einer Hochwasserabflussbestimmung für Referenzbäche

Ein ähnlicher Ablauf wird auch im Kanton Zürich [16] vorgeschlagen. Im Vergleich dazu setzt die Methodik im Kanton Bern noch stärker auf die kritische Plausibilisierung der Resultate und liefert dazu ein konkretes Vorgehen.

#### 4.1.4 SCHRITT 1 - WAHL DES ADÄQUATEN BERECHNUNGSVERFAHRENS

Die Wahl des geeigneten Berechnungsmodells sollte sich generell auf die folgenden Kriterien abstützen:

- Fragestellung
- Datenverfügbarkeit
- Regionale Eignung
- Zeitlicher und finanzieller Aufwand

Bei Hochwasserabschätzungen in der Schweiz, insbesondere im Rahmen der Erstellung von Gefahrenkarten, sind die Berechnungen oft für eine Vielzahl an Gewässern durchzuführen. Die grosse Anzahl an Gewässern, die dabei innerhalb eines relativ kurzen Zeitraumes bearbeitet werden müssen, führt dazu, dass dem zeitlichen und finanziellen Aufwand oft ein höheres Gewicht eingeräumt wird als den Kriterien der regionalen Eignung oder der Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Daten. Dadurch werden diejenigen Hochwasserabschätzformeln attraktiv, bei denen mit wenig Aufwand ein vernünftiges Resultat erzielt werden kann. Oft werden Geländeaufnahmen zur Bestimmung der Eingangsgrössen gänzlich weggelassen respektive anhand von meist räumlich ungenügend aufgelöster Geodatensätze vorgenommen.

Mit den Tools HAKESCH und HQx\_meso\_CH steht zudem eine Software zur Verfügung, die mit verhältnismässig geringem Aufwand angewendet werden kann. Das standardisierte Vorgehen hilft, schweizweit vergleichbare Abflussberechnungen durchzuführen, birgt aber die Gefahr, dass bei nicht fachgerechter Anwendung entscheidende Fehler entstehen können. Die Anwendung der Software allein garantiert noch nicht die Güte der Resultate. Hier ist es wichtig, bei jeder Berechnung die Wahl der Eingangsgrössen fundiert zu prüfen wie auch im Anschluss der Berechnung die Resultate kritisch zu hinterfragen und zu gewichten.

#### 4.1.5 SCHRITT 2 - BESTIMMUNG DER MODELLPARAMETER

Der Bestimmung der Eingangsgrössen kommt eine zentrale Bedeutung zu. Insbesondere bei Parametern, welche die lokalen Eigenschaften eines Einzugsgebietes charakterisieren und kleinflächigen Variationen unterliegen, sollte die Bestimmung im Gelände erfolgen. Aus Zeit- und Kostengründen wird hier oft auf Geodaten zurückgegriffen, die zwar schweizweit vorliegen, häufig jedoch nicht in adäquater Auflösung. Resultate aus Abflussberechnungen, die mehrheitlich oder ausschliesslich auf Geodaten beruhen, müssen besonders kritisch geprüft werden.

Die in der Schweiz häufig verwendete Software HQx\_meso\_CH verwendet für die Berechnung fix implementierte Datensätze zu verschiedenen räumlichen Geodaten (bspw. Niederschlag, Abflusskoeffizienten, Zonenzuteilung, usw.). Diese liegen einheitlich in einem Hektarraster vor und sind seit 2003 unverändert. Neue Datengrundlagen können zurzeit in dieser Software nicht berücksichtigt werden. Dies betrifft ebenfalls die Niederschlagdaten, die - mit Ausnahme des Verfahrens Kölla - noch auf den HADES-Daten 1992 beruhen. Beim Verfahren Kölla können die Niederschlagsdaten manuell angepasst werden. Für die Software ist dringend ein Update notwendig. **Wo eine Anpassung der Modellparameter in der Software nicht möglich ist, sind die Berechnungen manuell durchzuführen.**

#### **4.1.6 SCHRITT 3 - BERECHNUNG DES EREIGNISABFLUSSES**

Die Berechnung der Spitzenabflüsse erfolgt mit den in Schritt 1 ausgewählten Hochwasserabschätzverfahren und den in Schritt 2 festgelegten Eingangsgrößen. Durch die Anwendung möglichst vieler geeigneter Verfahren soll ein möglichst grosses Spektrum an Hochwasserabschätzungen dargestellt werden. Anhand der Gegenüberstellung der Resultate kann die Streuung analysiert und interpretiert werden.

Liegen die Berechnungen nahe beieinander, wird in der Regel davon ausgegangen, dass die Berechnungsresultate zuverlässig sind. Dies kann insbesondere dann ein Trugschluss sein, wenn die Eingangsdaten qualitativ ungenügend sind. Provokativ formuliert ergeben drei falsche Resultate in derselben Grössenordnung nicht automatisch ein korrektes Resultat.

#### **4.1.7 SCHRITT 4 – NACHBEARBEITUNG UND GEWICHTUNG DER RESULTATE**

Die mittels Hochwasserabschätzverfahren berechneten Abflussszenarien sind in Schritt 4 zu plausibilisieren.

##### **Plausibilisierung der Resultate**

Alle heute zur Verfügung stehenden Hochwasserabschätzmethoden haben ihre Stärken und Schwächen. Die Schwächen gilt es auszuloten und die Resultate entsprechend kritisch zu prüfen. Der entscheidende Schritt bei der Festlegung der Hochwasserabflüsse muss daher in der Nachbearbeitung und Gewichtung der berechneten Resultate liegen. Die Nachbearbeitung sollte immer auch eine Strategie zur Reduktion von Unsicherheiten enthalten. Sei dies bei der kritischen Überprüfung der für die Berechnung verwendeten Eingangsgrößen oder durch eine unabhängige Gegenprüfung mittels eines Vergleichs der Berechnungsresultate mit den bestehenden Abflusskapazitäten eines Gewässers. Auch der Vergleich mit Angaben aus dem Ereigniskataster oder dem Verzeichnis grosser Hochwasser des BAFU [19] kann bei der Plausibilisierung helfen.

Die in 'Teil 3 – Arbeitshilfe kompakt' beigefügte Dokumentationsvorlage soll sicherstellen, dass alle wichtigen Überlegungen gemacht und dokumentiert wurden. Sie bildet die Grundlage für eine nachvollziehbare Dokumentation der Grundszenarien Hydrologie.

Zu Beginn der Nachbearbeitung sollten folgende Fragen beantwortet werden:

- A) Widerspiegeln die Berechnungen die erwarteten Transportprozesse?
  - Kann der Reinwasserabfluss dem Ereignisabfluss gleichgesetzt werden oder sind andere Transportprozesse massgebend? Bei einem murfähigen Wildbach, der bspw. ab einem 100-jährlichen Ereignis murfähig ist, sind Angaben zum Reinwasserabfluss nur bedingt aussagekräftig oder können gar ganz weggelassen werden. Hier ist der Ereignisabfluss gemäss Kapitel 2.4 und 2.5 massgebend. Diese Frage muss für jedes einzelne der betrachteten Szenarien gestellt werden.
- B) Gibt es Gründe, die für eine Erhöhung oder eine Reduktion der Abflussmengen sprechen?
  - Mittels Bewertung der abflusssteuernden Faktoren können die Resultate der Abflussberechnungen zusätzlich gewichtet werden. Die Bewertung kann anhand der in Tabelle 5 aufgeführten Faktoren erfolgen. Mittels Dokumentationsvorlage werden die Ergebnisse dokumentiert.
  - Die Bewertung der abflusssteuernden Faktoren kann anhand des nachfolgenden Bewertungsschemas vorgenommen werden.

Förderfaktoren (+) / Reduktionsfaktoren (-)	Wald – absoluter Flächenanteil Wald – Flächenveränderung Bodenverdichtung Bodenversiegelung Festflächenanteil Gerinnelänge pro km <sup>2</sup> EZG Anteil abflussbeitragender Flächen Zuströmbereiche Oberflächenabfluss Wegstörmbereiche Gerinneverbau – grundsätzlich Gerinnelängen – Veränderung Blockierungslagen Höhenverteilung im EZG Gletscheranteil Form Einzugsgebiet Mikroltopographie im EZG Steilheit des EZG Wasserstauende Geologie Karst Abflusfördernde Meteorologie Abflussmindernde Meteorologie Weitere
+++	
++	
+ +	
0	
-	
--	
---	

Abflusserhöhende Faktoren (Förderfaktoren) werden im + Bereich eingestuft, abflussvermindernde Faktoren (Reduktionsfaktoren) im – Bereich.

Abbildung 4: Bewertungsschema für die Gewichtung der Ergebnisse der Hochwasserabflussberechnungen.

C) Liegen die Resultate in einem plausiblen Bereich?

Das BAFU stellt mit dem 'Verzeichnis grosser Hochwasserdaten' ([www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch) > Themen > Thema Wasser > Daten, Indikatoren und Karten > Methoden > Verzeichnis grosser Hochwasserabflüsse ) ein aktualisiertes Verzeichnis beobachteter grosser Abflüsse zur Verfügung. Die Daten sind in einer interaktiven graphischen Oberfläche dargestellt und können räumlich nach Niederschlagsregionen, Flussgebieten und Kantonen dargestellt werden. Zudem können die Daten als Exceldatei bezogen und ausgewertet werden (<https://opendata.swiss/de/dataset/grosse-hochwasserabfluesse-in-der-schweiz>). Der Vergleich der berechneten Abflusswerte mit den dokumentierten Ereignisabflüssen kann bei der Einordnung der Berechnungen helfen.

**Kantone**

- AG  AI  AR  Ausland  BE  BL  BS  FR  GE  GL  GR  JU  LU  NE  NW  
 OW  SG  SH  SO  SZ  TG  TI  UR  VD  VS  ZG  ZH

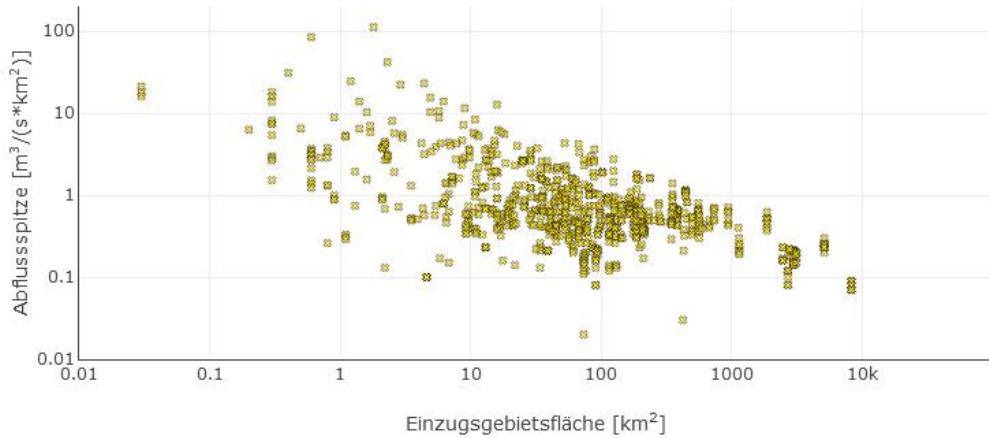


Abbildung 5: Dokumentierte spezifische Hochwasserabflüsse in Einzugsgebieten des Kantons Bern.

D) Reflektieren die Resultate das tatsächliche Hochwassergeschehen im Untersuchungsgebiet?

- Wenn Rückmeldungen von Lokalkennern bestehen, welche die Resultate der Berechnung begründet anzweifeln, ist in jedem Fall eine Überprüfung der Resultate notwendig.
- Möglichkeiten zur Überprüfung der Berechnungsresultate sind in Kapitel 4.1.2 beschrieben. Mit den beiden Verfahren (Ereigniskataster, Vergleich mit Abflusskapazität) ist eine unabhängige Prüfung möglich.

#### 4.1.8 SCHRITT 5 - FESTLEGUNG DER WEITER ZU VERWENDENDEN ABFLUSSWERTE UND DOKUMENTATION DES VORGEHENS

Der Weg zur Festlegung der weiter zu verwendenden Ereignisabflüsse muss nachvollziehbar dargelegt werden. Dies betrifft zum einen die Beschreibung des Vorgehens, zum anderen sollen Abweichungen, Anpassungen, Annahmen usw. festgehalten werden.

Die Dokumentation sollte dabei die folgenden Elemente beinhalten:

- Angaben zu den verwendeten Datengrundlagen
  - o Welche Niederschlagsdaten liegen den Berechnungen zu Grunde?
- Angaben zum Gewässer
  - o Berechnungspunkt: Für welchen Punkt im Gewässer gelten die Angaben?
  - o Transportprozess pro Szenario
- Angaben zum Vorgehen
  - o Welche Verfahren wurden für die Berechnung der Spitzenabflüsse (Reinwasser, fluvial, Murgang) angewendet?
  - o Welche abflusssteuernden Faktoren wurden für die definitive Festlegung der Abflussspitzen berücksichtigt und wie wurden diese gewichtet? Dazu kann das Bewertungsschema der Förderfaktoren (Abbildung 4) verwendet werden.
  - o Ausgehend von den berechneten Werten muss dargelegt werden, aufgrund welcher Gründe vom berechneten Wert abgewichen wurde.
- Ergebnisse der Hochwasserabschätzung
  - o definitive Resultate der Hochwasserabschätzung (pro Szenario)
  - o Begründung der Wahl

Für die Dokumentation steht die Vorlage Hochwasserabschätzung (Teil 3) zur Verfügung.

## 5 KLIMAWANDEL – EIN AUSBLICK

Der Klimawandel wird häufig als ein Phänomen verstanden, das sich in den nächsten Jahren und Jahrzehnten manifestieren wird. Der Klimawandel stellt aber eine bereits immer schon dagewesene Veränderung in unterschiedlicher Ausprägung dar. Das Wetter, wie es heute auftritt, ist Teil des aktuellen Klimawandels. Dies betrifft insbesondere das Niederschlagsgeschehen.

Mit der Feststellung, dass heute intensivere Niederschläge auftreten als noch vor 50 oder 100 Jahren, ist in den neuen Niederschlagsdaten von HYDROmaps (2022) bereits ein Teil des aktuellen Klimawandels berücksichtigt. Der Klimawandel wird sich jedoch weiter fortsetzen. Entsprechend sind auch künftige Klimaauswirkungen bei der Szenarienbildung von Hochwassergefahren zu beleuchten.

Nachfolgende Aussagen sind aus dem Bericht 'Brennpunkt Klima Schweiz (2016)' [20] zitiert. Sie sollen einige Schlaglichter auf den aktuellen Stand der Forschung zum Klimawandel in Bezug auf dessen Wirkung auf Naturgefahren im Allgemeinen und die Hochwasserbildung im Speziellen werfen. Die wichtigsten Erkenntnisse sind in der Zusammenfassung am Ende des Kapitels zusammengestellt.

**Einfluss des Klimawandels** (S. 24 ff): *Die meteorologischen Bedingungen, die zu Starkniederschlägen und Hochwassereignissen führen, werden letztendlich durch das globale Klimasystem bestimmt. Im Alpenraum sind die grossräumige Verteilung von Temperatur und Luftfeuchte, die Position und Intensität von Tiefdruckgebieten und ihre Zugbahnen sowie temperaturbedingte Veränderungen in der Schneehydrologie entscheidend. Deren Auswirkungen auf das Sommerklima sind dabei besonders wichtig, denn viele Schweizer Gewässer haben die Hochwasserspitzen in der warmen Jahreszeit. Es sind jedoch auch Veränderungen im Winterhalbjahr zu berücksichtigen, da infolge der Erwärmung im Winter der Niederschlag vermehrt in Form von Regen statt Schnee fallen wird.*

*Hinweise auf die Entwicklung des Hochwassergeschehens im Zuge des Klimawandels lassen sich auch aus der Vergangenheit gewinnen, sofern es gelingt, entsprechende Indizes über lange Zeiträume aus natürlichen Klimaarchiven abzuleiten. Kürzlich wurde die Häufigkeit grossräumiger sommerlicher Überschwemmungen für die letzten 2500 Jahre rekonstruiert, basierend auf Sedimenten von 10 Seen im Alpenraum (Abb. 1.3) (Glur et al. 2013). Die Resultate zeigen, dass grossräumige Hochwasser in vergleichsweise kühlen Sommern häufiger auftauchen. Dies stimmt mit früheren Studien überein, die eine erhöhte Häufigkeit von schweren Überschwemmungen in der kleinen Eiszeit und eine reduzierte Häufigkeit in der mittelalterlichen Warmzeit gefunden hatten (Schmocke-Fackel et al. 2010). Dieses Resultat ist qualitativ auch mit der von den Klimamodellen projizierten Abnahme der sommerlichen Niederschläge konsistent, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass es sich bei der projizierten Zunahme von Starkniederschlägen um kurzzeitige und meist kleinräumige Ereignisse handelt, und nicht um grossräumige Ereignisse wie etwa die sommerlichen Überschwemmungen vom August 2005. Das würde also bedeuten, kurzzeitige, kleinräumige Ereignisse werden häufiger, während stärkere, grossräumige abnehmen könnten.*

**Zukünftige Herausforderungen** (S. 25 ff): Obwohl sich ein qualitatives Verständnis der Sensitivität des Sommerklimas und seiner Starkniederschläge (grossräumige Niederschlagsabnahme gekoppelt mit Intensitätszunahme) abzuzeichnen beginnt, bestehen noch grosse Unsicherheiten. Insbesondere ist hervorzuheben, dass vertrauenswürdige quantitative Aussagen erst für relativ häufige Ereignisse mit Rückkehrperioden von weniger als 100 Jahren möglich sind, selbst wenn der Klimawandel vernachlässigt wird.

**Schneehydrologie** (S. 26): Die Zunahme von Regen auf Kosten von Schneefall ist primär temperaturgetrieben und kann einen grossen Einfluss auf die Abflussbildung haben (BAFU 2012). Schnee hat aufgrund seiner Wasserspeicherkapazität oft einen dämpfenden Effekt auf die Abflussbildung. Mit dem Anstieg der Schneefallgrenze werden gewisse Hochwasserszenarien wahrscheinlicher werden.

**Interne Variabilität im Klimasystem** (S. 26): Änderungen von natürlichen Schwankungen wie der Häufigkeit bestimmter Wetterlagen (auf einer Zeitskala von Tagen bis zu Jahren) könnte die Häufigkeit von extrem seltenen Ereignissen entscheidend beeinflussen. Nebst der interannuellen (Jahr-zu-Jahr) Variabilität sind auch kurze Zeitskalen wichtig. Ändert sich beispielsweise die Persistenz von Wetterlagen, kann dies zu langanhaltenden Niederschlägen oder Trockenperioden führen. Bei all dem darf jedoch nicht vergessen werden, dass es keine absolute Sicherheit gibt und es immer auch «unknown unknowns» geben wird, das heisst unbekannte Faktoren oder Entwicklungen, derer man sich nicht einmal bewusst ist. Dies entbindet jedoch niemanden davon, die bestehenden Abschätzungen als Orientierungshilfe zu nutzen.

**Temperatur und Niederschlag in der Schweiz** (S. 32): Für die Schweiz und den Alpenraum liegen mehrere jährlich aufgelöste Temperatur- und Niederschlagsrekonstruktionen vor (Abb. 1.6). Sie basieren auf fruhinstrumentellen Messungen, historischen Dokumenten, Baumringen, Seesedimenten und anderen Quellen (Pfister 1999; Casty et al. 2005; Büntgen et al. 2006; Trachsel et al. 2012). Demnach sind die Sommertemperaturen seit dem Höhepunkt der «Kleinen Eiszeit» im ausgehenden 17. Jahrhundert um mehr als zwei Grad Celsius angestiegen, wobei der grösste Teil des Anstiegs nach 1975 erfolgte. Im frühen 19. Jahrhundert – unter anderem als Folge zweier Vulkanausbrüche – lag die Temperatur deutlich unterhalb des Schwankungsbereichs der letzten 330 Jahre. In den letzten 25 Jahren, insbesondere in den Sommern 2003 und 2015, lag die Temperatur hingegen deutlich oberhalb der früheren Bandbreite. Auffallend im Vergleich der letzten Jahrhunderte ist auch das gänzliche Fehlen kalter Sommer seit 1980.

Die Sommerniederschläge weisen beträchtliche Schwankungen von Jahr zu Jahr auf, teils auch Schwankungen über mehrere Jahre. Sie zeigen aber keine längerfristigen Veränderungen.

**Extremereignisse in der Schweiz** (S.32 ff): Wetterextreme wie Hitzetage haben in der Schweiz seit Messbeginn zugenommen (...). Die Häufigkeit von Ereignissen wie Überschwemmungen und Stürmen, die sich anhand von historischen Dokumenten und frühen Messungen noch weiter zurück rekonstruieren lässt (...), zeigt aber auch starke Schwankungen über mehrere Jahrzehnte. In der Vergangenheit lassen sich immer wieder Phasen mit selteneren und solche mit häufigeren Überschwemmungen und Stürmen nachweisen, so im späten 19. Jahrhundert und wiederum seit den 1980er-Jahren. Zwischen ungefähr 1935 und 1985 kamen dagegen nur wenige Überschwemmungen und Stürme vor. Dieses Phänomen wird als «Katastrophenlücke» bezeichnet (Pfister 2009) und beeinflusst den Umgang mit Naturkatastrophen in der Schweiz.

**Steigende Temperaturen** (S. 44): Anzahl Sommertage steigt, Anzahl Frosttage sinkt

**Beobachtungen zur Schweiz** (S. 48): Über einem vergleichsweise kleinen Gebiet wie der Schweiz sind aufgrund grosser natürlicher Schwankungen langfristige Niederschlagstendenzen schwierig zu erkennen. Gesamtschweizerisch betrachtet zeigen sich zum heutigen Zeitpunkt keine eindeutigen Trends im mittleren Jahresniederschlag. Die Variationen des Niederschlags sind aber stark von regionalen Einflüssen und vom Jahresgang geprägt. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass sich in der Schweiz ein nordalpines und ein südalpines Niederschlagsregime gegenüberstehen, beide mit ihren spezifischen Eigenheiten. Dies zeigt sich in der langfristigen Entwicklung des Jahresniederschlags seit Messbeginn 1864, bei der für das Schweizer Mittelland eine Niederschlagszunahme von 7,8 Prozent pro 100 Jahre beobachtet wird (MeteoSchweiz 2015). Für die Südschweiz ist keine solche Tendenz vorhanden. Im Gegensatz dazu ist an vielen Stationen eine Zunahme von Starkniederschlägen schon heute messbar (s. a. Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52).

**Schweizer Mittelland: Zunahme des Niederschlags im Winter** (S.48): Jahreszeitlich aufgeschlüsselt zeigt sich, dass die Zunahme des Niederschlags im Schweizer Mittelland nur im Winter eindeutig ist. Seit 1864 beträgt der durchschnittliche Trend plus 22 Prozent Niederschlag pro 100 Jahre (vgl. Abb. 1.14, Nordostschweiz). Im Frühling, Sommer und Herbst sind keine eindeutigen langfristigen Trends (1864 – 2014) nachweisbar. Die Südschweiz zeigt weder jährlich noch saisonal statistisch signifikante Niederschlags-Trends. Wie Abbildung 1.14 verdeutlicht, werden die langfristigen Niederschlagsverläufe aber von dekadischen Schwankungen (schwankender Verlauf der dicken schwarzen Linie) sowie beträchtlichen Jahr-zu-Jahr-Schwankungen überlagert (dünnne schwarze Linie).

**Abflüsse und Verdunstung haben sich verändert** (S. 48): Beobachtungen des Abflusses in natürlichen Einzugsgebieten der Schweiz zeigen eine Zunahme in den kälteren Jahreszeiten (Birsan 2006). Diese Veränderungen sind stark von der mittleren Höhe und den physiogeographischen Charakteristiken der betrachteten Einzugsgebiete abhängig. Eine wichtige Rolle spielt

dabei nicht nur die Zunahme der winterlichen Niederschläge, sondern auch der Anstieg der mittleren Schneefallgrenze um zirka 300 Meter in den letzten Jahrzehnten. Dadurch fällt ein immer grösserer Anteil des Niederschlags in Form von Regen und fliesst schneller ab. Die Erwärmung führt im Frühling zu einer früheren Schneeschmelze in den Voralpen/Alpen (Scherrer et al. 2013). Im Hochgebirge ist im Sommer eine verstärkte Gletscherschmelze zu beobachten, die zu einer Zunahme der Abflüsse in stärker vergletscherten Einzugsgebieten führt (s. a. Kap. 2.4 Wasser, S. 84); (s. a. Kap. 2.3 Schnee, Gletscher und Permafrost, S. 80).

**Die Sommer werden trockener** (S. 48 ff): Saisonal betrachtet sind hingegen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts im Wesentlichen zwei Niederschlagstendenzen ersichtlich (Abb. 1.14): Erstens projizieren die Modelle in Teilen der Schweiz eine Zunahme des zukünftigen mittleren Winterniederschlags gegenüber heute; zweitens ist zu erwarten, dass der Sommerniederschlag der Schweiz im Verlauf des 21. Jahrhunderts den Bereich der heutigen dekadischen Schwankungen verlässt und die mittleren Niederschlagsmengen wahrscheinlich überall in der Schweiz abnehmen (CH2011 2011). Grossräumig betrachtet hängt diese Tendenz mit der erwarteten mediterranen Trockenheit zusammen, die im Sommer Zentraleuropa und den gesamten Alpenraum einschliessen wird. Aufgrund der grossen Jahr-zu-Jahr-Variabilität des Niederschlags sind aber auch am Ende des Jahrhunderts noch vereinzelt Sommer mit nassen Bedingungen zu erwarten (siehe grau hinterlegter Bereich in Abb. 1.14).

Erweiterte Modellauswertungen zeigen, dass die erwartete Abnahme beim mittleren Sommerniederschlag über der Schweiz im Wesentlichen durch einen Rückgang der Anzahl Regentage bestimmt ist. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit von mehrtagigen Trockenphasen, während die durchschnittliche Niederschlagsmenge an Regentagen auf ähnlichem Niveau wie im heutigen Klima verbleibt (Fischer et al. 2015; Rajczak et al. 2013; Ban et al. 2015). Im Herbst und Frühling sind die erwarteten Änderungen kleiner und grösstenteils in der Bandbreite der natürlichen Variabilität.

Als Folge der Erwärmung nehmen die in den Alpen gespeicherten Schnee- und Eismassen stark ab (Steger et al. 2013). Zusammen mit einer saisonalen Umverteilung des Niederschlags und einer Verschiebung von festem zu flüssigem Niederschlag wird dies eine jahreszeitliche Umverteilung der Abflüsse hervorrufen. Die Abflüsse im Winter werden in den meisten Einzugsgebieten der Schweiz zunehmen. Im Sommer führen die abnehmenden Niederschläge, die grössere Verdunstung und die früher zur Neige gehende Schneeschmelze zu sinkenden Pegelständen. In den Gebieten des Mittellandes werden die Pegel bei Niedrigwasser abnehmen und die Niedrigwasserperioden länger werden. In den Alpen werden die Abflüsse in stark vergletscherten Einzugsgebieten mittelfristig noch zunehmen. Bis Ende Jahrhundert ist aber auch in diesen Gebieten mit deutlichen Abflussabnahmen im Sommer zu rechnen (BAFU 2012).

**Natürliche Schwankungen vorhersagen** (S. 50): Eine weitere Herausforderung in der Detektion systematischer Niederschlagstrends stellen natürliche Schwankungen dar. Gerade für ein kleines Gebiet wie die Schweiz spielen jährliche oder dekadische Schwankungen – ausgelöst zum Beispiel durch Änderungen im atmosphärischen Strömungsmuster über Zentraleuropa (z. B. Nordatlantische Oszillation) – eine wichtige Rolle. Diese natürlichen Schwankungen können über mehrere Dekaden langfristige Tendenzen überlagern und deren Detektion erschweren (s. a. Kap. 1.3 Klimavariabilität: Kurzfristige Schwankungen im Klima, S. 34).

**Beobachtungen zur Schweiz** (S. 55 ff): Auf der Skala der Schweiz sind Änderungssignale in Klima- und Wetterextremen von starker natürlicher Variabilität überlagert (s. a. Kap. 1.3 Klimavariabilität: Kurzfristige Schwankungen im Klima, S. 34). Deshalb ist der Nachweis einer Veränderung von Klima- und Wetterextremen insbesondere über vergleichsweise kleinen Flächen wie der Schweiz besonders schwierig.

**Mehr und heißere Hitze- und weniger Kältetage** (S. 56): Nichtsdestotrotz ist auch in der Schweiz an den meisten Stationen ein Trend zu mehr und intensiveren Hitzetagen (Scherrer et al. 2016) und weniger Kältetagen feststellbar (Abb. 1.18) (s. a. Kap. 1.6 Temperatur, S. 40). Ein räumlicher Vergleich zeigt, dass der Trend zu intensiveren Hitzetagen über Mitteleuropa in einem globalen Kontext sogar besonders ausgeprägt ist und weltweit nahezu einmalig für dicht besiedelte Gebiete (Donat et al. 2013). Weiter hat konsistent mit der globalen Veränderung auch in der Schweiz die Häufigkeit und Intensität der Starkniederschläge an der Mehrheit der Stationen zugenommen (Scherrer et al. 2016) (s. a. Kap. 1.7 Wasserkreislauf, S. 46).

**Trend zu häufigeren und intensiveren Starkniederschlägen** (S. 56): Konsistent mit den globalen Vorhersagen werden auch für die Schweiz häufigere und intensivere Starkniederschläge erwartet (Abb. 1.19). Im Winter nehmen die Starkniederschläge prozentual ähnlich zu wie die mittleren Niederschlagsmengen (vergleiche obere und untere Panels in Abb. 1.19). Im Sommer hingegen muss mit abnehmenden Niederschlagsmengen gerechnet werden, während sommerliche Starkniederschläge eher zunehmen. Die entsprechenden Signale dürften sich im Laufe des Jahrhunderts akzentuieren und können in mittleren Szenarien relative Veränderungen von bis zu 30 Prozent erreichen. Wie im Abschnitt zu den globalen Projektionen und in Kap. 1.3 Klimavariabilität: Kurzfristige Schwankungen im Klima, S. 34 erklärt, sind dem projizierten Klimatrend natürliche Schwankungen überlagert. Deshalb ist der signifikante Nachweis der Zunahme der Starkniederschläge in der Schweiz schwierig, scheint aber bereits heute möglich zu sein; gemäss Modellen wahrscheinlich zuerst in den kälteren Jahreszeiten (vergleiche die zwei Zeitperioden in Abb. 1.19).

**Hochwasserrisiko nimmt zu** (S. 57): Da bei steigenden Temperaturen in Abhängigkeit von Jahreszeit und Höhenlage mehr Niederschlag in Form von Regen statt Schnee fällt, nimmt ohne entsprechende Anpassungsmassnahmen das Hochwasserrisiko auch ohne steigende Starkniederschläge zu. Für gewisse Einzugsgebiete wie den Rhein bei Basel äussert sich dieser Effekt besonders ausgeprägt im Winter, während für die Einzugsgebiete der Alpensüdseite wahrscheinlich herbstliche Wetterlagen betroffen sind.

### Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserabflüsse

- Natürliche Schwankungen können den allgemeinen Klimatrend überlagern. Dies macht konkrete Aussagen zu veränderten Niederschlägen und Temperaturen schwierig.
- Es bestehen nach wie vor noch grosse Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Wirkung des Klimawandels.
- Voraussagen zu Klimaänderungen sind für die kleinräumige Schweiz schwierig.
- In der Vergangenheit gab es immer wieder Phasen mit weniger, aber auch mit häufigeren Überschwemmungen. Im späten 19. Jahrhundert und seit den 1980er Jahren treten Überschwemmungen eher häufiger auf; die Jahre 1935 bis 1985 gelten eher als Zeit der Katastrophenlücke.
- Die Entwicklung des Hochwassergeschehens über lange Zeiträume lässt sich aus natürlichen Klimaarchiven ableiten. So konnte anhand von Seesedimenten belegt werden, dass grossräumige Hochwasser (vergleichbar mit dem Hochwasser 2005) in vergleichsweise kühlen Sommern häufiger auftreten.
- Änderungen in der Häufigkeit bestimmter Wetterlagen können die Häufigkeit von extrem seltenen Ereignissen entscheidend verändern.
- Es wurde ein genereller Trend zu steigenden Temperaturen und zu sinkenden Frosttagen festgestellt. Dadurch dürfte sich die Wahrscheinlichkeit von Ereignissen mit Niederschlag auf gefrorenen Boden reduzieren.
- Die Zunahme der winterlichen Niederschläge wird zusammen mit dem Anstieg der mittleren Schneefallgrenze dazu führen, dass immer grössere Anteile des Niederschlags in Form von Regen fällt. Zudem führt die Erwärmung dazu, dass im Frühling in den Voralpen und Alpen die Schneeschmelze früher einsetzt. Im Hochgebirge ist (noch) mit einer verstärkten Gletscherschmelze aufgrund der höheren Temperaturen zu rechnen. Beide Trends können sich verstärkend auf das Abflussgeschehen auswirken.
- Die saisonale Umverteilung des Niederschlags und die Verschiebung von festem zu flüssigem Niederschlag führen zu einer jahreszeitlichen Umverteilung der Abflüsse. Abflüsse im Winter werden tendenziell zunehmen.
- Sommerliche Starkniederschläge nehmen aufgrund der Temperaturzunahme zu. Dieser Trend wird sich im Laufe des Jahrhunderts noch akzentuieren.
- Alle Forschungsergebnisse sind sich einig, dass das Hochwasserrisiko zunehmen wird.

### Konkrete Auswirkungen des Klimawandels auf das Hochwassergeschehen:

- Durch den Rückgang des Gletschereises aufgrund der zunehmenden Temperaturen wird nebst dem Rückgang der schmelzwasserdominierten Abflüsse mittel- bis angfristig auch die Wahrscheinlichkeit von Gletschersee- oder Wassertaschenausbrüchen abnehmen.
- Die veränderte Saisonalität von Niederschlägen zusammen mit der veränderten Schneefallgrenze erhöht die Wahrscheinlichkeit von Ereignissen mit Niederschlag auf Schnee. Zudem ist vermehrt mit Hochwassern im Spätherbst und Spätfrühling zu rechnen.
- Hohe Temperaturen und persistentere Schönwetterlagen werden zu trockenen (hydrophoben) Böden führen, die bei einem Starkniederschlag die in kurzer Zeit anfallenden Niederschlagsmengen nicht aufzunehmen vermögen. Daraus können deutlich erhöhte Abflüsse aufgrund des intensiveren Oberflächenabflusses resultieren.
- Der Klimawandel wirkt sich nicht nur auf die Abflussbildung aus. Durch abschmelzenden Permafrost können grosse Geschiebedepots bereitgestellt werden, aus denen Murgänge entstehen können.

Im Hinblick auf den Klimawandel dürfte die Zunahme ungünstiger Konstellationen (Zunahme Niederschlagsintensitäten, saisonale Veränderungen, persistentere Lagen, usw.) zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die heute bestehenden Hochwasserschätzverfahren berücksichtigen diese Konstellationen nicht oder nur ungenügend. Neue Beurteilungsansätze werden künftig notwendig sein.

## TEIL 2 – ARBEITSHILFE KOMPAKT

Die Arbeitshilfe zeigt in kompakter Form das Vorgehen einer Hochwasserabschätzung auf. Weiterführende Erläuterungen befinden sich in den Teilen 1 und 2 der Arbeitshilfe "Hochwasserabschätzung im Kanton Bern". In der "Arbeitshilfe kompakt" sind die wichtigsten Elemente enthalten, die es bei einer Hochwasserabschätzung zu berücksichtigen gilt. Die nachfolgende Anleitung führt schrittweise durch das Verfahren.

Das empfohlene Vorgehen ist in erster Linie auf die Stufe Gefahrenkarte ausgerichtet. Es lässt sich aber auch auf Stufe Detailbeurteilung, respektive Hochwasserschutzprojekt, anwenden. Auf der detaillierteren Stufe sollten in der Dokumentationsvorlage zusätzlich die Annahmen der Eingangsgrössen der Hochwasserberechnungen der Gefahrenkarte aufgeführt werden, wenn diese die Grundlage für die Detailbeurteilung bildet.

Die Arbeitshilfe beschränkt sich auf die **Herleitung von Reinwasserabflüssen**. Diese sind in erster Linie für Ereignisse mit geringem Feststofftransport massgebend. Bei starkem Feststofftransport, murgangartigen Abflüssen oder Murgängen ist immer der **Gesamtabfluss** entscheidend. Dessen Herleitung ist ebenfalls zwingend im Technischen Bericht zu dokumentieren.

Sind Hochwasserabschätzungen für eine Vielzahl von Gewässern vorzunehmen, kann in Schritt 1 eine Typisierung gleichartiger Bäche vorgenommen werden. Als gleichartig gelten Bäche, deren Charakteristik bezüglich Einzugsgebietsgrösse, Gerinnendichte, Hangneigung, Geologie, Untergrund, Bodeneigenschaften und Vegetation, aber auch bezüglich der Niederschlagsintensitäten vergleichbar sind. Alle Einzugsgebiete mit vergleichbaren abflussteuernden Faktoren können in derselben Typ-Kategorie zusammengefasst werden. Für einen Stellvertreter jeder Typ-Kategorie ist eine detaillierte Hochwasserabschätzung vorzunehmen. Diese Bäche werden im Folgenden als **Referenzbäche** bezeichnet und stellen Stellvertreter für einen spezifischen Einzugsgebietsstyp dar.

Die Hochwasserabschätzung erfolgt für Referenzbäche gemäss den 5 Schritten in Abbildung 6. Die Resultate der Beurteilungen können anschliessend mittels **Flächenansatzfunktionen**<sup>2</sup> auf die der jeweiligen Kategorie zugehörigen Bäche übertragen werden. Die Zuordnung der Bäche zu einer Typ-Kategorie muss sorgfältig erfolgen. Dabei sind alle wichtigen Aspekte der Hochwasserbildung zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 3, Teil I).

### Ablaufschema einer Hochwasserabflussbestimmung:

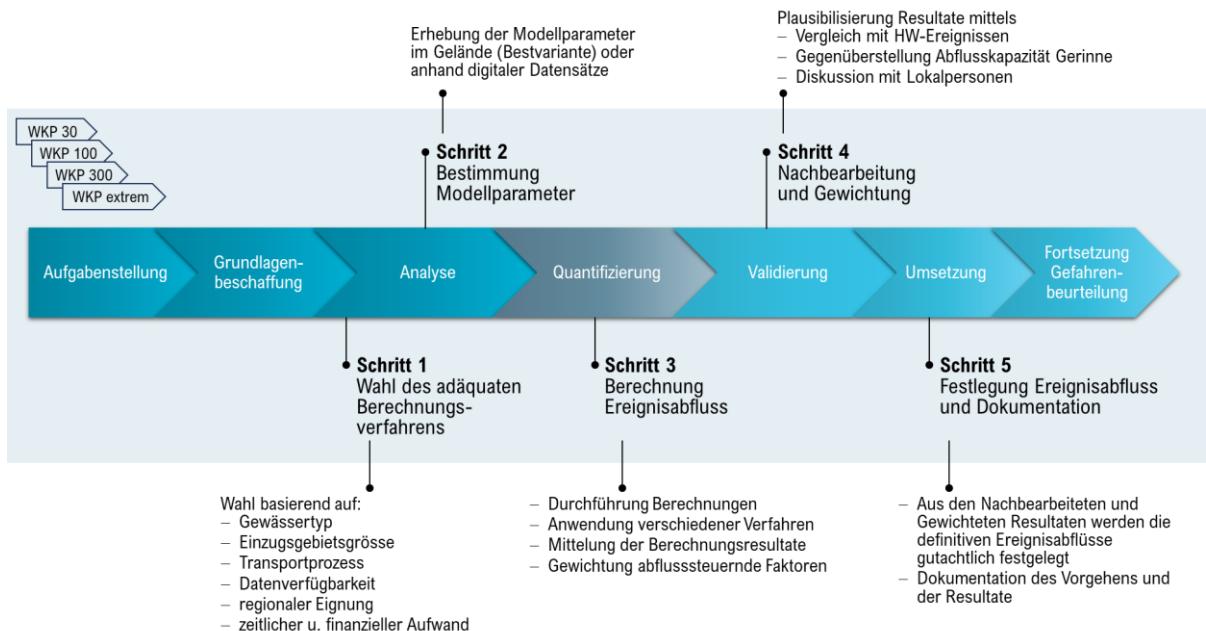


Abbildung 6: Ablauf einer Hochwasserabflussbestimmung

<sup>2</sup> Eine mögliche Flächenansatzfunktion stellt folgender Ansatz dar:  $HQ_{x, Pkt.1} = HQ_{x, Pkt.2} * (EZG_{Pkt.1}/EZG_{Pkt.2})^{2/3}$

### Erläuterung der Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte sind in Teil 1, Kapitel 4 detailliert beschrieben. Sie sind für die vorgängig festgelegten Referenzbäche auszuführen.

Nachfolgend das Wichtigste in Kürze:

<b>Schritt 1</b> Wahl des adäquaten Berechnungsverfahrens	Die Wahl des geeigneten Berechnungsverfahrens basiert auf der Fragestellung, der Datenverfügbarkeit, der regionalen Eignung und untergeordnet der zeitlichen und finanziellen Mittel.
<b>Schritt 2</b> Bestimmung der Modellparameter	Der Bestimmung der Eingangsgrössen kommt eine zentrale Bedeutung zu. Insbesondere bei Parametern, welche die lokalen Eigenschaften eines Einzugsgebietes charakterisieren und kleinflächigen Variationen unterliegen, sollte die Bestimmung im Gelände erfolgen. Besondere Vorsicht ist geboten, wenn die Bestimmung von Modellparametern ausschliesslich anhand von Geodaten erfolgt. Geodaten verfügen häufig nicht über den notwendigen Detaillierungsgrad.
<b>Schritt 3</b> Berechnung des Ereignisabflusses	Die Berechnung der Spitzenabflüsse erfolgt mit den in Schritt 1 ausgewählten Hochwasserabschätzverfahren und den in Schritt 2 festgelegten Eingangsgrössen. Durch die Anwendung möglichst vieler geeigneter Verfahren soll ein möglichst grosses Spektrum an Hochwasserabschätzungen dargestellt werden. Aus der Gegenüberstellung der Resultate kann die Streuung analysiert und interpretiert werden.  Liegen die Berechnungen nahe beieinander, wird in der Regel davon ausgegangen, dass die Berechnungsresultate zuverlässig sind. Dies kann insbesondere dann ein Trugschluss sein, wenn die Eingangsdaten qualitativ ungenügend sind. Provokativ formuliert ergeben drei falsche Resultate in derselben Grössenordnung nicht automatisch ein korrektes Resultat.
<b>Schritt 4</b> Nachbearbeitung und Gewichtung der Resultate	Der entscheidende Schritt bei der Festlegung der Hochwasserabflüsse muss daher in der Nachbearbeitung und Gewichtung der berechneten Resultate liegen. Die Nachbearbeitung sollte immer auch eine Strategie zur Reduktion von Unsicherheiten enthalten. Hilfestellung für die Beurteilung liefert das Bewertungsschema der Förder- und Reduktionsfaktoren (Abbildung 4).  In jedem Fall ist eine unabhängige Gegenprüfung mittels eines Vergleichs der Berechnungsresultate mit den bestehenden Abflusskapazitäten eines Gewässers, dem Vergleich mit Angaben aus dem Ereigniskataster und der Einordnung im Verzeichnis grosser Hochwasser des BAU [19] vorzunehmen.
<b>Schritt 5</b> Festlegung der weiter zu verwendenden Abflusswerte und Dokumentation des Vorgehens	Aus den vorangehenden Berechnungen, der Gewichtung der abflusssteuernden Faktoren und der Plausibilisierung der Resultate werden die weiter zu verwendenden Abflusswerte (Reinwasser) gutachtlich bestimmt.  Das Vorgehen zur Bestimmung der Abflusswerte ist mittels der Dokumentationsvorlage zu dokumentieren.

## DOKUMENTATIONSVORLAGE HOCHWASSERABSCHÄTZUNG

Die nachfolgende Dokumentationsvorlage dient der Dokumentation des Vorgehens zur Festlegung der Reinwasserabflüsse und der dazu getroffenen Annahmen. Die Beurteilung erfolgt auf Stufe Prozessquelle. In der Dokumentationsvorlage werden die Resultate der Festlegung der Reinwasserabflüsse festgehalten. Das allgemeine Vorgehen ist im Technischen Bericht zu beschreiben.

Die Dokumentationsvorlage besteht aus den folgenden Abschnitten:

- Abschnitt 1 – Allgemeine Angaben
- Abschnitt 2 – Grundlagen
- Abschnitt 3 – Eckdaten Einzugsgebiet und Gewässer
- Abschnitt 4 – Hochwasserberechnungen
- Abschnitt 5 – Bewertung abflusssteuernde Faktoren
- Abschnitt 6 – Plausibilisierung der Resultate
- Abschnitt 7 – Definitive Wahl der Ereignisabflüsse
- Abschnitt 8 – Bäche mit Gebietsübertragungsmöglichkeit

**1 - Allgemeine Angaben:** In den allgemeinen Angaben werden die administrativen Angaben zum Projekt und zur zu beurteilenden Prozessquelle aufgeführt.

**2 - Grundlagen:** Im Teil 'Grundlagen' werden sämtliche verwendeten Datengrundlagen und der Stand der Daten aufgeführt, die für die Berechnungen verwendet wurden. Wurden Grundlagen anhand von Feldaufnahmen erhoben, sind die Ergebnisse der Aufnahmen und das Aufnahmedatum anzugeben.

**3 - Eckdaten Einzugsgebiet und Gewässer:** Die 'Eckdaten' befassen sich mit den charakteristischen Eigenschaften des Einzugsgebietes. Verschiedene Kenngrößen wie bspw. die Einzugsgebietsgröße sind abhängig vom Bemessungspunkt. Entsprechende Angaben zu dessen Lokalisierung sind hier aufzuführen. Erfolgen die Berechnungen für mehrere Bemessungspunkte, sind die Angaben für alle Bemessungspunkte anzugeben. Die entsprechenden Zeilen sind zu kopieren. Die Bemessungspunkte sind mit einer eindeutigen ID zu kennzeichnen.

**4 - Hochwasserberechnung:** Im Teil 'Hochwasserberechnung' werden die Ergebnisse der rechnerisch hergeleiteten Hochwasserabflüsse eingetragen. Verfahren, die nicht angewendet wurden, können aus der Tabelle gelöscht werden. In der Zeile 'Eingangsgrößen' sind die Eingangsparameter wie bspw. Abflusskoeffizienten, c-Wert, kumulative Gerinnelänge, usw. für die jeweilige Verfahren aufzuführen. Am Schluss des Abschnitts ist die Wahl der Abflüsse aus den Hochwasserberechnungen aufzuführen.

**5 – Bewertung abflusssteuernde Faktoren:** Mit der Bewertung der abflusssteuernden Faktoren wird nochmals ein kritischer Blick auf die Resultate der Berechnungen geworfen. Die Gewichtung kann dazu führen, dass die Berechnungsresultate gutachtlich, jedoch begründet und mittels Diagramm dargestellt, erhöht oder reduziert werden können. Am Schluss dieses Blockes werden die aus den Berechnungen und der Gewichtung der abflusssteuernden Faktoren resultierenden Reinwasserabflüsse ausgewiesen.

**6 - Plausibilisierung der Resultate:** In diesem Teil erfolgt eine kritische Prüfung der Berechnungsresultate. Die Plausibilisierung erfolgt anhand von drei Prüfungen: a) der Plausibilisierung anhand des Ereigniskatasters (gleiches Fließgewässer), b) anhand der Einordnung im Verzeichnis grosser Hochwasserdaten (vergleichbare Gewässer) und c) anhand von Kapazitätsbetrachtungen am Fließgewässer.

**7 - Definitive Wahl Reinwasserabfluss:** Basierend auf den berechneten und durch die unabhängige Plausibilisierung geprüften Resultaten werden die definitiven Reinwasserabflüsse festgelegt.

**8 - Bäche mit Gebietsübertragungsmöglichkeit:** In diesem Teil können diejenigen Bäche aufgeführt werden, bei denen aufgrund ihrer Vergleichbarkeit mit dem Referenz-Gewässer die Hochwasserabschätzung mit Hilfe der Übertragungsmethode vorgenommen werden kann.

Die Dokumentationsvorlage wird pro Prozessquelle ausgefüllt. Werden pro Prozessquelle mehrere Bemessungspunkte bestimmt, sind die entsprechenden Zeilen zu kopieren.

Die Dokumentationsvorlage beschränkt sich auf die Herleitung der Reinwasserabflüsse. Die Beschreibung der Prozessquelle und deren Wirkungsbeurteilung erfolgt bei Gefahrenkartenprojekten im vorgegebenen Faktenblatt 'Prozessquellen'. In allen anderen Projekten ist die Prozessquelle im Technischen Bericht zu beschreiben. Das Datenblatt 'Hochwasserabschätzung' ist dem Projektdossier beizulegen.

<b>Dokumentationsvorlage Hochwasserabschätzung Reinwasserabflüsse</b>				
<i>Die Beurteilung erfolgt auf der Betrachtungseinheit einer Prozessquelle.</i>				
<b>Allgemeines</b>				
Projektname		Bearbeitung	Name/Vorname bearbeitende Person, Firma	
Prozessquelle	Name und/oder Koordinaten des Referenzbaches)	Datum		
Projektziel	<input type="checkbox"/> Gefahrenkarte <input type="checkbox"/> Hochwasserschutzprojekt <input type="checkbox"/> andere: .....			
[bei Bedarf weitere Zeilen einfügen]				
<b>Grundlagen</b>				
Feldaufnahmen	Datum der Aufnahmen, was wurde erhoben			
Geodaten	verwendete Geodatensätze, Datenstand			
Niederschlag [mm]	1h / 100 Jahre	24h / 100 Jahre	1h / 2.33 Jahre	24h / 2.33 Jahre
Datenquelle	<input type="checkbox"/> HYDROmaps B04    Weitere: .....			
Weitere Grundlagen [bei Bedarf weitere Zeilen einfügen]				
<b>Eckdaten Einzugsgebiet und Gewässer</b>				
Einzugsgebietsgrösse	km <sup>2</sup>	Gerinnelänge [km]:	km Gesamtlänge Hauptgerinne u. Seitenbäche	
Waldflächen	km <sup>2</sup>	Vergletscherung [%]:	% Anteil an EZG	
Höhendifferenz	m	Versiegelte Flächen [%]:	% Anteil an EZG, inkl. Felsflächen	
Bemessungspunkt	m ü. M.	Koordinaten:	Lokalisierung mittels Koordinaten	
Gewässertyp	<input type="checkbox"/> Talfuss <input type="checkbox"/> Gebirgsfluss <input type="checkbox"/> fluvialer Bach <input type="checkbox"/> Wildbach  <input type="checkbox"/> Runse <input type="checkbox"/> Kanal			
Transportprozess bei entsprechender Wiederkehrperiode (WKP)	WKP 30	WKP 100	WKP 300	WKP extrem
<i>Reinwasserabfluss, fluvialer Feststofftransport, starker Geschiebebetrieb, murgangartiger Feststofftransport, Murgang</i>				
<b>Hochwasserberechnung (Reinwasserabflüsse)</b>				
<b>Kleine EZG (&lt; 10 km<sup>2</sup>) – Ergebnisse der Berechnungen</b>	WKP 30	WKP 100	WKP 300	WKP extrem
Müller modifiziert				
Taubmann/Thiess/Chow				
Mod. Fliesszeit				
Kölla (1986)				
Clark-WSL				
Eingangsgrößen	<i>Hier sind für die berechneten Verfahren die massgebenden Eingangsgrößen aufzuführen</i>			
Angewendete Mittelung der Resultate	<i>Beschreibung, wie die Resultate der angewendeten Verfahren gemittelt wurden</i>			

Mittelgrosse EZG (10 - 500 km <sup>2</sup> ) - Ergebnisse der Berechnung	WKP 30	WKP 100	WKP 300	WKP extrem																																																																																																																																																																																	
Kürsteiner/Heusser																																																																																																																																																																																					
Müller-Zeller																																																																																																																																																																																					
Kölla (1986)																																																																																																																																																																																					
GIUB '96																																																																																																																																																																																					
Momente																																																																																																																																																																																					
BaD7																																																																																																																																																																																					
Eingangsgrößen	Hier sind für die berechneten Verfahren die massgebenden Eingangsgrößen aufzuführen																																																																																																																																																																																				
Angewendete Mittelung der Resultate																																																																																																																																																																																					
Reinwasserabflüsse aus Berechnung	WKP 30 m <sup>3</sup> /s	WKP 100 m <sup>3</sup> /s	WKP 300 m <sup>3</sup> /s	WKP extrem m <sup>3</sup> /s																																																																																																																																																																																	
Bemerkung	xxx																																																																																																																																																																																				
<b>Bewertung abflusssteuernde Faktoren</b>																																																																																																																																																																																					
Für jeden Faktor wird die Abweichung zum Ausgangswert festgelegt und aus der Gesamtschau die Bewertung der Faktoren abgeleitet. Liegt der Hauptteil der Einstufungen in der unteren Hälfte, spricht dies tendenziell für eine Überschätzung der berechneten Abflusswerte.  Achtung: Faktoren, welche bereits in den Formeln berücksichtigt sind, dürfen nicht ein weiteres Mal berücksichtigt werden.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Förderfaktoren (+) / Reduktionsfaktoren (-)</th> <th>Wald – absoluter Flächenanteil</th> <th>Wald – Flächenveränderung</th> <th>Bodenverdichtung</th> <th>Bodenversiegelung</th> <th>Felsflächenanteil</th> <th>Geinnelänge pro km<sup>2</sup> EZG</th> <th>Anteil abflussbeitragender Flächen</th> <th>Zustrombereiche Oberflächenabfluss</th> <th>Wegströmberiche</th> <th>Geinneverbau – grundsätzlich</th> <th>Geinneverbau – Veränderung</th> <th>Blockierungslagen</th> <th>Höhenverteilung im EZG</th> <th>Gletscheranteil</th> <th>Form Einzugsgebiet</th> <th>Mikrotopographie im EZG</th> <th>Steilheit des EZG</th> <th>Wasserstauende Geologie</th> <th>Karst</th> <th>Abflussfördernde Meteorologie</th> <th>Weitere</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>+++</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>++</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>+</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>-</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>--</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>---</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				Förderfaktoren (+) / Reduktionsfaktoren (-)	Wald – absoluter Flächenanteil	Wald – Flächenveränderung	Bodenverdichtung	Bodenversiegelung	Felsflächenanteil	Geinnelänge pro km <sup>2</sup> EZG	Anteil abflussbeitragender Flächen	Zustrombereiche Oberflächenabfluss	Wegströmberiche	Geinneverbau – grundsätzlich	Geinneverbau – Veränderung	Blockierungslagen	Höhenverteilung im EZG	Gletscheranteil	Form Einzugsgebiet	Mikrotopographie im EZG	Steilheit des EZG	Wasserstauende Geologie	Karst	Abflussfördernde Meteorologie	Weitere	+++																						++																						+																						0																						-																						--																						---																						
Förderfaktoren (+) / Reduktionsfaktoren (-)	Wald – absoluter Flächenanteil	Wald – Flächenveränderung	Bodenverdichtung	Bodenversiegelung	Felsflächenanteil	Geinnelänge pro km <sup>2</sup> EZG	Anteil abflussbeitragender Flächen	Zustrombereiche Oberflächenabfluss	Wegströmberiche	Geinneverbau – grundsätzlich	Geinneverbau – Veränderung	Blockierungslagen	Höhenverteilung im EZG	Gletscheranteil	Form Einzugsgebiet	Mikrotopographie im EZG	Steilheit des EZG	Wasserstauende Geologie	Karst	Abflussfördernde Meteorologie	Weitere																																																																																																																																																																
+++																																																																																																																																																																																					
++																																																																																																																																																																																					
+																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																					
-																																																																																																																																																																																					
--																																																																																																																																																																																					
---																																																																																																																																																																																					
Bewertung siehe Teil 1	Abflusserhöhende Faktoren (Förderfaktoren) werden im + Bereich eingestuft, abflussvermindernde Faktoren (Reduktionsfaktoren) im – Bereich.																																																																																																																																																																																				
Beschreibung Ergebnisse	Beschreibung des Ergebnisses der Faktorenbewertung																																																																																																																																																																																				
Qualitatives Ergebnis der Plausibilisierung	<input type="checkbox"/> die berechneten Abflüsse werden übernommen, es besteht kein Grund zur Anpassung <input type="checkbox"/> die berechneten Abflüsse sind zu erhöhen <input type="checkbox"/> die berechneten Abflüsse sind zu senken																																																																																																																																																																																				
Ergebnis Gewichtung	In beschreibender Form das Ergebnis der Gewichtung, respektive der Wahl des definitiven Ereignisabflusses beschreiben																																																																																																																																																																																				
Wahl berechnete Reinwasserabflüsse	WKP 30 m <sup>3</sup> /s	WKP 100 m <sup>3</sup> /s	WKP 300 m <sup>3</sup> /s	WKP extrem m <sup>3</sup> /s																																																																																																																																																																																	
Bemerkung																																																																																																																																																																																					

Plausibilisierung der Hochwasserberechnungen							
<b>Plausibilisierung anhand Ereigniskataster:</b>							
Abflussmengen bekannter Ereignisse u. mutmassliche WKP							
<b>Plausibilisierung anhand Verzeichnis grosser Hochwasserdaten (BAFU):</b>							
Beschreibende Einordnung							
<b>Plausibilisierung anhand Kapazitätsbetrachtung:</b>							
Standort Bemessungspunkt							
Abflusskapazität am Bemessungspunkt	m <sup>3</sup> /s	geschätzte WKP:					
Umrechnungsfaktoren							
Abflussmengen aus Hochwasserberechnung	m <sup>3</sup> /s	WKP:					
Fazit aus Plausibilisierung							
<b>Definitive Wahl Reinwasserabfluss</b>							
Gewählter Ereignisabfluss	WKP 30	WKP 100	WKP 300	WKP extrem			
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s			
Bemerkungen							
<b>Bäche mit Gebietsübertragungsmöglichkeit</b>							
Gewässerbezeichnung	WKP 30	WKP 100	WKP 300	WKP extrem			
Name, ID, EZG [km <sup>2</sup> ], Bemessungspunkt	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s			
Name, ID, EZG [km <sup>2</sup> ], Bemessungspunkt	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s			

## TEIL 3 – ANHANG UND BEILAGEN

### Anhang 1 – Modellparameter in Hochwasserabschätzverfahren

Zusammenstellung der Modellparameter in den in HAKESCH und HQx\_meso\_CH implementierten Berechnungsverfahren.  
H = Hüllkurven-Verfahren, N-A = Niederschlag-Abfluss Modelle, S = Statistische Ansätze (basierend auf Pegelstatistik)

		HAKESCH						HQx_meso_CH					
		Müller modifiziert	Taubmann/ Thiess/ Chow	Mod. Fließ- zeiterfahren	Kölla (1986)	Clark-WSL	Kürlsteiner (1917)	Müller-Zeller	Kölla meso	GIUB' 96 (FN)	GIUB' 96(MQ)	Momente	BaD7
		H	N-A	N-A	N-A	N-A	H	H	N-A	H	H	S	S
Meteo	Niederschlagintensität		x	x	x	(x)			x			x	x
	Jahresniederschlag												
	Schneeschmelze/Schmelzwasseräquivalent				x				x				
	Vorfeuchte				x				x				
	Einzugsgebietsgrösse	x	x	x		x	x	x		x	x	(x)	(x)
	Quelle bis Wasserscheide			x									
	Höhendifferenz, Höhe entlang Hauptgerinne			x									
	Hangneigung							x					x
	c-Wert												
	kumulative Gerinnelänge				x				x				
Morphometrie	Länge Hauptgerinne			x	x				x				
	geschätzter Fließquerschnitt		x										
	Fließtiefe		x										
	Rauhigkeitselement	x											
	benetzter Umfang	x											
	Gefälle	x											
	Anteil vergletscherte Fläche				x				x			x	x
	Anteil versiegelte Fläche			x					x				x
	Anteil Oedland											x	x
	Anteil Weideland												x
Gebietsbeurteilung	Spitzenabflusskoeffizient $\psi$	(x)		x			(x)						
	Wasserspeichervermögen WSV				x							x	
	mittlerer Abflusskoeffizient/-beiwert	x	x				x						
	Volumenabflusskoeffizient				x								
	Speicherkonstante				x								
	Verluste an Untergrund			x					x				
	Benetzungsvolumen		x	x					x				
	Zonenkoeffizient						x						
	Beiwert Charakterisierung EZG					x							
	Region vergleichbaren Hochwasserverhaltens									x	x		
Abluss	Elongationsfaktor												x
	mittlerer Jahresabfluss									x			
	mittlere Jahres-HW-Spitze										x		
	Ablussfaktor		x										
	Gletscherabfluss			x				x					
	Klimafaktor	x											
	Scheitelreduktionsfaktor	x											
	Jährlichkeit/Wiederkehrsdauer	x	x	x	x								
	Benetzungszzeit		x	x					x				
	Konzentrationszeit		x	x	x	x			x				
weitere Faktoren	Fliesszeit/Laufzeit im Gerinne			x	x				x				
Abflusskonzentration													

## Anhang 2 – Übersicht Hochwasserabschätzformeln

Verfahren	Formel	Eingangsgrößen
Müller modifiziert (1943/1997)	$HQ_{max} = 43 * \psi * E^{2/3}$	$HQ_{max}$ höchstes mögliches HW im EZG [ $m^3/s$ ] $\psi$ Abflusskoeffizient [-] $E$ Einzugsgebietsfläche [ $km^2$ ]
Taubmann/Thiess/Chow (1962/1975/1986)	$HQ(t,T) = A * X(t,T,\alpha) * Y(t,T) * Z(t)$	$HQ(T)$ Hochwasser mit Jährlichkeit T $A$ Einzugsgebietsfläche [ $km^2$ ] $X$ Abflussfaktor [ $cm/h$ ] $Y$ Klimafaktor [-] $Z$ Scheitelreduktionsfaktor [-] $t$ massgebende Niederschlagsdauer (Konzentrationszeit) [h] $T$ Jährlichkeit [Jahre] $\alpha$ gemittelter komplexer Abflussbeiwert [-]
Modifiziertes Fließzeitverfahren (frühes 20. Jh.)	$HQ(x) = 0.278 * i(T_c,x) * \psi_s * E$	$HQ(x)$ Hochwasserabfluss mit Wiederkehrperiode x [ $m^3/s$ ] $i$ massgebende Niederschlagsintensität [ $mm/h$ ] $\psi_s$ Spitzenabflusskoeffizient [-] $E$ Einzugsgebietsfläche [ $km^2$ ] $T_c$ Konzentrationszeit [min] $x$ Wiederkehrsdauer [Jahre]
Kölla (1986)	$HQ(x) = [i(T_c,x) - f(T_c, x)] * FL_{eff} * k_G + Q_{GL}$ mit $T_c = T_B + T_{FL}$	$HQ(x)$ Hochwasserabfluss der Jährlichkeit x [ $m^3/s$ ] $i(T_c,x)$ Niederschlagsintensität der Jährlichkeit x und der Dauer $T_c$ , [ $mm/h$ ] $f(T_c,x)$ Verluste an den Untergrund [ $mm/h$ ] $FL_{eff}$ effektiv zum Hochwasserabfluss beitragende Fläche [ $km^2$ ]; als Funktion der kumulativen Gerinnellänge $k_G$ Faktor, der den abflusserhöhenden Effekt von feuchten Vorbedingungen berücksichtigt [-] $Q_{GL}$ Gletscherabfluss [ $m^3/s$ ] $T_c$ Konzentrationszeit [h] $T_B$ Benetzungszeit [h] $T_{FL}$ totale Fließzeit [h]
Clark-WSL (2001)	ohne Formelangabe	
Kürsteiner/Heusser (1917/1943)	$Q_{max} = c * F^{2/3}$	$Q_{max}$ Abflussspitze [ $m^3/s$ ] $c$ Beiwert zur Charakterisierung des Einzugsgebietes [-] $F$ Einzugsgebietsfläche [ $km^2$ ]
Müller-Zeller (1943/1975)	$Q_{max} = \alpha * \psi * F^{2/3}$	$Q_{max}$ Abflussspitze [ $m^3/s$ ] $\alpha$ Zonenkoeffizient [-] $\psi$ Abflusskoeffizient [-] $F$ Einzugsgebietsfläche [ $km^2$ ]
Kölla-meso (1986) <i>Umsetzung in HQx_meso_CH</i>	$HQx = (r_x(t_c(x)) + r_s - f_x) * (FL_{eff(x)} + FL_b) * 0.278 + Q_{vgl(x)}$	$HQx$ x-jährliche Abflussspitze [ $m^3/s$ ] $r_x$ Niederschlagsintensität [ $mm/h$ ] eines Blockregens der Dauer $t_c$ $t_c$ Konzentrationszeit [h] mit $t_c = t_1 + t_2$ $t_1$ Benetzungszeit [h] $t_2$ Laufzeit im Gerinne [h] $r_s$ Schmelzwasseräquivalent Schneedecke [ $mm/h$ ] $f_x$ Verluste [ $mm/h$ ] $FL_{eff}$ beitragende Fläche [ $km^2$ ] $FL_b$ befestigte Fläche [ $km^2$ ] $Q_{vgl}$ Abfluss aus den vergletscherten Teilen des EZG $0.278$ Umrechnungsfaktor [ $mm/h$ ] >> [ $m^3/s$ ]
GIUB'96 (FN) (1999)	$Q_{max} = a * Fn^b$	$Q_{max}$ maximale Abflussspitze [ $m^3/s$ ] $a, b$ regionenspezifische Parameter [-] $Fn$ Einzugsgebietsfläche [ $km^2$ ]
GIUB'96 (MQ) (199)	$Q_{max} = a * MQ^b$	$Q_{max}$ maximale Abflussspitze [ $m^3/s$ ] $a, b$ regionenspezifische Parameter [-] $MQ$ mittlerer Jahresabfluss [ $m^3/s$ ]
Momente (1994)	$HQ_x = mHQ + K_x * s(HQ)$ $mHQ = f(Fn, Vgl, N, Im, Oed, WSV)$	$mHQ$ mittlere Jahreshochwasserspitze [ $m^3/s$ ] $s(HQ)$ Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen [ $m^3/s$ ]

Verfahren	Formel	Eingangsgrößen
	$s(HQ) = f(Fn, N, WSV)$	<p>Kx      f (Jährlichkeit, Verteilungsfunktion) [-]  Fn      beitragende Fläche [km<sup>2</sup>]  Vgl     Vergletscherungsgrad [%]  N      Jahresniederschlag [mm]  Im      mittlere Hangneigung [°]  Oed     Oedlandanteil [%]  WSV    mittleres Wasserspeichervermögen [mm]</p>
BaD7 (2001)	ohne Formelangabe	

## Anhang 3: HYDROmaps B04 – Niederschlagsveränderung im Kanton Bern

### Übersicht Niederschlagsveränderungen im Kanton Bern

#### Datengrundlage (Messstationen und Datenreihen)

Mit HYDROmaps (2022), B04 liegen schweizweit neue Niederschlagsdaten vor, die gegenüber den HADES-Werten von 1992 aktuellere Messreihen berücksichtigen.

Während sich der HADES (1992) [2] auf die Wiederkehrperioden (Jährlichkeit) 2.33 und 100 Jahre beschränkt, sind in HYDROmaps B04 [1] Wiederkehrperioden zwischen 2 und 300 Jahren verfügbar. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass in den HADES (1992) Daten nur der flüssige Niederschlag berücksichtigt ist, in HYDROmaps B04 dagegen der gesamte Niederschlag (flüssig + fest).

Tabelle 6: Berücksichtigte Messstationen und Datenreihen in HADES (1992) und HYDROmaps B04 (2022).

Grundlage	HADES (1992)		HYDROmaps (2022)	
	Stationen	Messreihe	Stationen	Zeitraum
1-Stunden Niederschläge	63	1901 – 1970	69 MeteoSchweiz 100 Ausland	1981 – 2020
24-Stunden Niederschläge	200 303	1901 – 1970	418 MeteoSchweiz 78 Ausland	1961 - 2020

In HYDROmaps wurde bewusst auf längere Datenreihen verzichtet, um den Einfluss langzeitlicher Veränderungen gering zu halten.

#### Punktniederschlag - Gebietsniederschlag

Die Niederschlagsdaten in HYDROmaps B04 können im HADES punktgenau abgegriffen werden. Die Werte beschreiben die Verhältnisse in derjenigen Rasterzelle, die ausgewählt wurde. Für ein Einzugsgebiet ist hingegen der Gebietsniederschlag massgebend. Im Erläuterungstext in [1] wird empfohlen, für extreme Gebietsniederschläge eine Umrechnung mit Hilfe der im analogen Hydrologischen Atlas publizierten Abminderungskurven (Tafel 2.5) vorzunehmen.

Die Abminderungskurven beschränken sich auf Niederschlagsdauern von 3, 12, 24 und 48 Stunden. Die Betrachtungseinheiten (Einzugsgebietsflächen) sind in 100 km<sup>2</sup> Schritten angegeben. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Berücksichtigung von Abminderungskurven in erster Linie für grössere Einzugsgebiete sinnvoll ist und der Gebietsniederschlag von kleineren Einzugsgebieten gutachterlich abgeleitet werden kann.

#### Vertrauensintervall

In den HYDROmaps B04-Daten werden pro Rasterzelle und gewählter Wiederkehrdauer 3 Werte ausgewiesen: das 2.5 %- und das 97.5 % Vertrauensintervall und der Median. Mit den beiden Vertrauensintervallen wird der Unsicherheitsbereich ausgedrückt. In [1] werden die Vertrauensintervalle wie folgt beschrieben: „Das 95 %-Vertrauensintervall kann so interpretiert werden, dass der wahre Wiederkehrwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % innerhalb der beiden Grenzen und mit je 2.5 % unterhalb der unteren oder oberhalb der oberen Grenze liegt. Der Median teilt die Schätzverteilung in zwei Teile mit je 50 % Wahrscheinlichkeit.“

In der Regel wird im Rahmen von Abflussberechnungen der Medianwert verwendet. HYDROmaps B04 gibt nicht explizit vor, welcher Wert bei welcher Anwendung zu verwenden ist. Grundsätzlich kann vom Medianwert abgewichen werden. Abweichungen sollten aber entsprechend begründet sein und sind zwingend zu dokumentieren.

#### Beispiel eines 100-jährlichen 1-Stunden-Niederschlags aus HYDROmaps B04:

Wert beim 2.5 %- Vertrauensintervall	40 mm/h
Medianwert (50 %)	59 mm/h
Wert beim 2.5 %- Vertrauensintervall	84 mm/h
Verhältnis (Ratio) Median zu den Vertrauensintervallen 2.5 % resp. 97.5 %	1.475
Verhältnis (Ratio) B04 zu HADES (1992, Tafel 2.4.2, Wert 37.5 mm/h)	1.57

Die Abweichungen innerhalb der in B04 ausgewiesenen Werte (1.475) sind in der gleichen Größenordnung wie diejenigen zu den HADES Werten des Blattes 2.4.2 (1.57)

## Aktualität der Niederschlagsdaten

Während die Daten des HADES (1992) über lange Zeit statisch blieben und dadurch Veränderungen im Niederschlagsgeschehen nicht abbilden konnten, ist vorgesehen, die HYDROmaps B04 – Daten im Laufe der Zeit aufzudatieren. Für künftige Anwendungen kann oder muss davon ausgegangen werden, dass diese Daten Änderungen unterliegen.

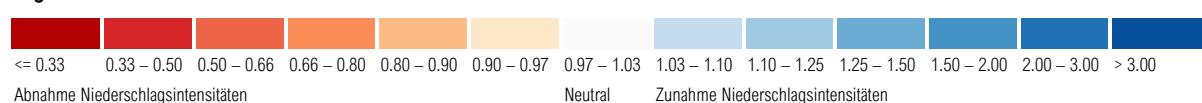
Die erwarteten Veränderungen werden in [1] wie folgt beschrieben: „*Die in der Daten- und Analyseplattform dargestellten Wiederkehrwerte beschreiben die Verhältnisse im heutigen Klima (1961–2020 resp. 1981–2020). Es muss aber davon ausgegangen werden, dass sich als Folge der anthropogenen Klimaänderung die Häufigkeitsverteilung von Starkniederschlägen ändern wird. Analysen von aktuellen Klimasimulationen für die Schweiz zeigen eine Zunahme der saisonalen Wiederkehrwerte des täglichen Niederschlags für T = 10 Jahre und T = 100 Jahre (...). Für ein Szenario mit unverminderten Emissionen (RCP8.5) wird mit einer Zunahme von 10–25 % bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gerechnet. Die Unsicherheiten sind allerdings erheblich, besonders bezüglich der Änderungen im Sommer. Für subtägliche Dauerstufen kann der Einfluss des Klimawandels derzeit noch nicht robust abgeschätzt werden; es bestehen sowohl seitens der Beobachtungsdaten als auch seitens der Modelle noch sehr grosse Unsicherheiten.*“

## Veränderungen der extremen Punktniederschläge im Kanton Bern

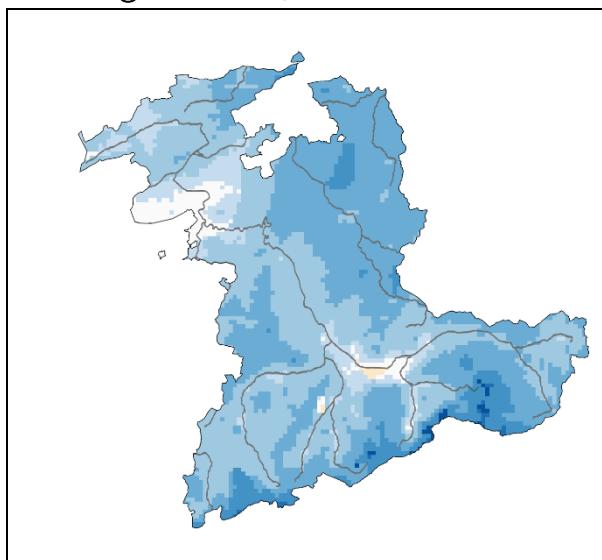
Die graphischen Vergleiche der HYDROmaps (2022) B04-Daten mit den Daten des HADES (1992) zeigen für den Kanton Bern regionale Unterschiede in der Zu- respektive Abnahme der Niederschlagsintensitäten.

Für den grafischen Vergleich wurden die absoluten Differenzen und das Verhältnis zwischen den HYDROmaps B04- und den HADES (1992) 2.4/2.4<sup>2</sup> Daten berechnet. Die ausführliche Darstellung der Resultate befindet sich in Anhang 3. Die nachfolgenden Grafiken beschränken sich auf die aussagekräftigeren Vergleiche der Differenzen zwischen B04 und Tafel 2.4<sup>2</sup>. Dabei werden jeweils die neuen Niederschlagsdaten aus HYDROmaps B04 mit den HADES (1992)-Daten verglichen. Das Verhältnis (Ratio) zeigt dabei die relative Zu- oder Abnahme der Niederschlagsintensitäten in Prozent. Werte kleiner 1 bedeuten eine Abnahme der Niederschlagsintensitäten gegenüber früher, Werte grösser 1 eine Zunahme.

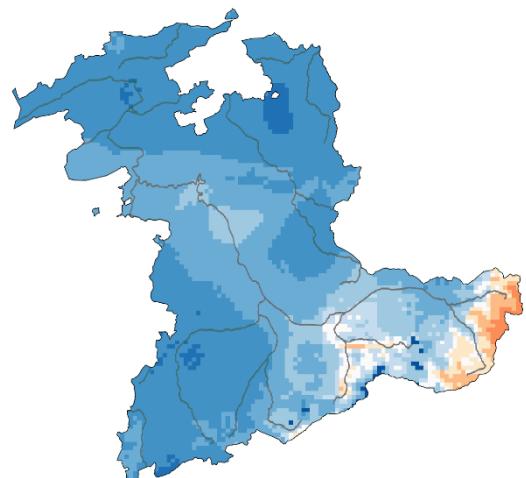
### Legende für Ratio:



X100@24h: Ratio B04 / Tafel 2.4<sup>2</sup>



X100@1h: Ratio B04 / Tafel 2.4<sup>2</sup>



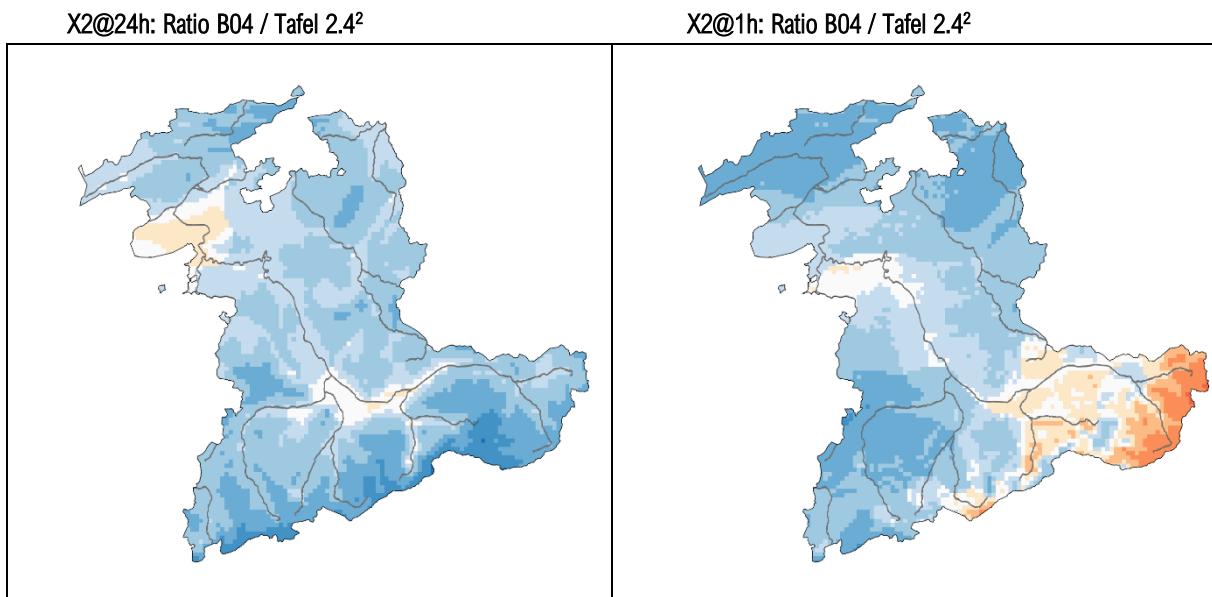


Abbildung 7: Vergleich der **100- und 2-jährlichen Wiederkehrwerte für den 24- und den 1-Stunden-Niederschlag** von B04 mit den HADES-Tafeln 2.4<sup>2</sup>. Die Grafiken zeigen das Verhältnis neu/alt [-]. Die blauen Farbtöne zeigen eine Zunahme der Niederschlagsintensitäten (blau = nass), die roten Farbtöne eine Abnahme an (rot = trocken).

## Ergebnisse

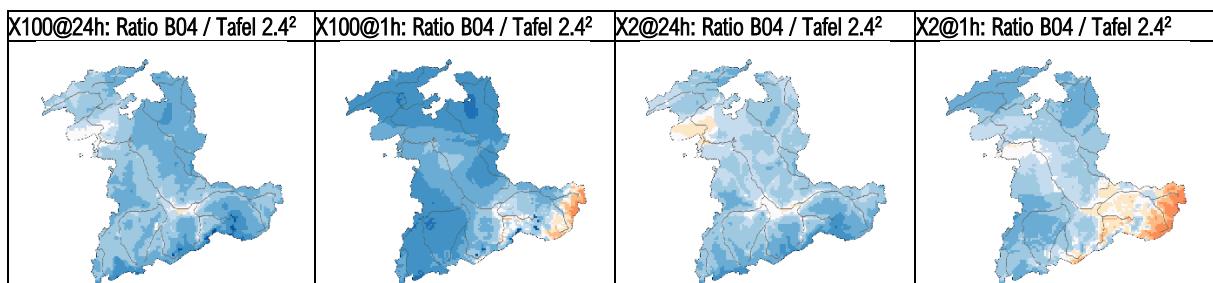
- Die Veränderungen sind über alle betrachteten Niederschlagsklassen sehr unterschiedlich. Es zeigt sich kein einheitlicher Trend.
- Generell sind die Zunahmen bei den 100-jährlichen 1-Stunden-Niederschlagsintensitäten am grössten.
- Niederschlagszunahmen um mehr als einen Faktor 3 (dunkelblau) sind sehr selten und beschränken sich auf sehr kleine Gebiete.
- Niederschlagsabnahmen um einen Faktor kleiner als 0.7 (rote Gebiete) beschränken sich fast ausschliesslich auf die Gipfelregionen im östlichen Berner Oberland.
- Regionale Betrachtung:
  - o Im Jura ist generell eine Zunahme bei allen Niederschlagssituationen zu verzeichnen. Stärkste Zunahmen treten bei den 1-Stunden-Niederschlägen, sowohl bei 100-jährlichen als auch bei den 2-jährlichen Starkniederschlägen auf.
  - o Das Mittelland weist lokal starke Zunahmen (Verhältnis 2.3) bei den 100-jährlichen 1-Stundenniederschlägen im Gebiet Wynigen-Herzogenbuchsee auf. Einzig im Seeland scheinen künftig eher weniger intensive Niederschläge aufzutreten. Ausnahme bilden auch hier die 100-jährlichen 1-Stundenniederschläge.
  - o Voralpine Gebiete zeigen mittlere bis starke Zunahmen bei den 100-jährlichen Niederschlägen, leichte Zunahme bis teilweise Abnahme bei den 2-jährlichen Niederschlägen.
  - o In den alpinen Gebieten muss zwischen Ost und West unterschieden werden. Im östlichen Berner Oberland ist bei den 2-jährlichen 1-Stundenniederschlägen und tendenziell auch bei den 100-jährlichen 1-Stundenniederschlägen eine deutliche Abnahme erkennbar, bei den 24- Stundenniederschlägen ist dagegen eine leichte bis mittlere Zunahme feststellbar. Im westlichen Berner Oberland ist dagegen eine Zunahme der Niederschlagsintensitäten zu verzeichnen. Auch hier treten die stärksten Zunahmen bei den 100-jährlichen 1- Stundenniederschlägen auf.

Unter der Berücksichtigung, dass die heute am häufigsten verwendeten N-A-Modelle Kölla und Fließzeitverfahren am sensitivsten auf die 100-jährlichen 1- Stundenniederschläge reagieren, werden künftige Abflussberechnungen deutlich höher ausfallen, da genau diese Kategorie die stärksten Zunahmen verzeichnet. Aktuell fehlen jedoch Erfahrungen, wie sich die in den B04-Daten ausgewiesenen Niederschlagsintensitäten tatsächlich auf das Hochwasserverhalten der Fließgewässer auswirkt. Zudem fehlen Studien, die zeigen, ob es zulässig ist, die heute aktuellen Niederschlagsdaten in den teils doch älteren Hochwasserabschätzverfahren zu verwenden.

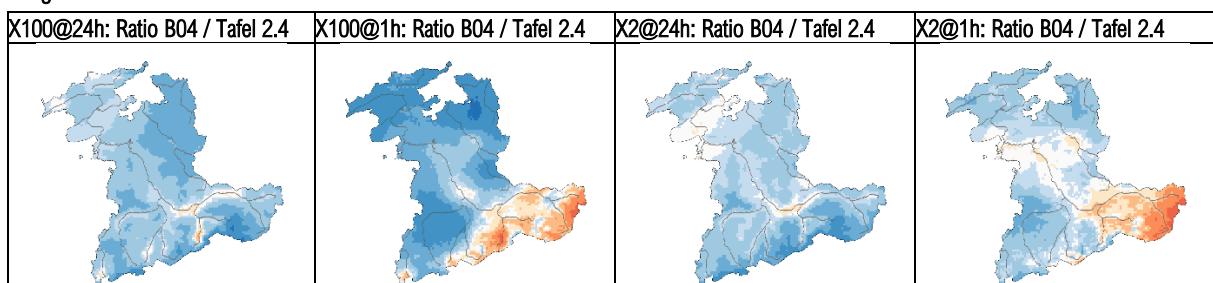
## Beilage 1 – Übersicht über die Veränderung der Niederschlagsintensitäten

Die nachfolgenden Karten zeigen den Vergleich zwischen HYDROmaps B04 (2022) und HADES (1992) Tafel 2.4<sup>2</sup> und 2.4. Dargestellt sind das Verhältnis (Ratio) und die Differenzen zwischen den beiden Datensätzen, jeweils für die Kategorien: 100-jährliche 24-Stundenniederschläge, 100-jährliche 1-Stundenniederschläge, 2-jährliche 24-Stundenniederschläge und 2-jährliche 1-Stundenniederschläge.

### Vergleich mit Tafel 2.4<sup>2</sup> – Ratio



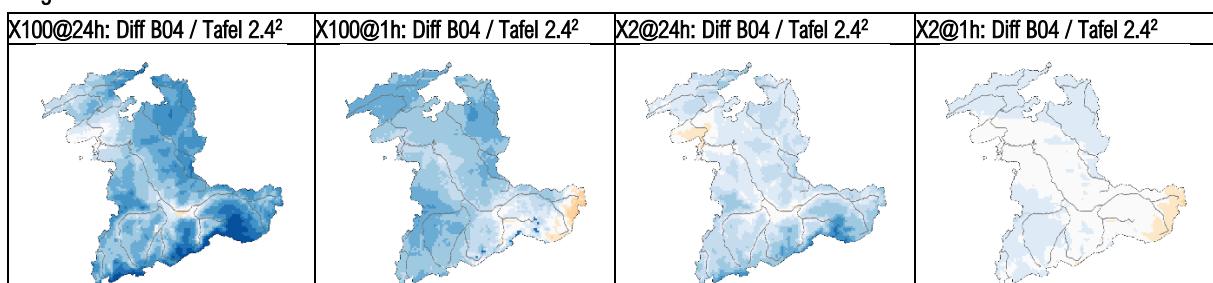
### Vergleich mit Tafel 2.4 – Ratio



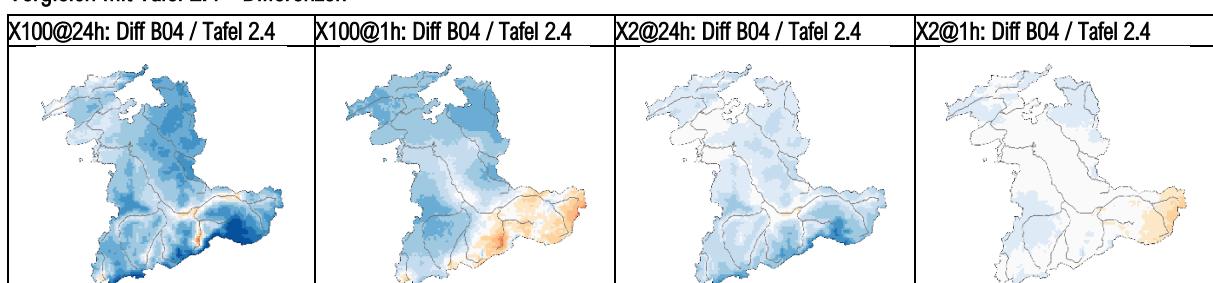
Legende zu den Ratio-Karten:



### Vergleich mit Tafel 2.4<sup>2</sup> – Differenzen



### Vergleich mit Tafel 2.4 – Differenzen



Legende zu den Differenzen-Karten:

