

# Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport

J. SPEERLI, A. BACHMANN, S. BIELER, A. SCHUMACHER UND S. GYSIN



IM AUFTRAG DES BUNDESAMTES FÜR UMWELT BAFU – AUGUST 2020

EINE STUDIE IM RAHMEN DES NCCS THEMENSCHWERPUNKTES “HYDROLOGISCHE  
GRUNDLAGEN ZUM KLIMAWANDEL” DES NATIONAL CENTRE FOR CLIMATE SERVICES

## Impressum

**Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Hydrologie, CH-3003 Bern  
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)

**Auftragnehmer:** HSR Hochschule für Technik Rapperswil, Institut für Bau und Umwelt (IBU), CH-8640 Rapperswil

**Autor/Autorin:** J. Speerli, A.-K. Bachmann, S. Bieler, A. Schumacher, S. Gysin

**Begleitung BAFU:** P. Schmocker-Fackel, F. Hüsler

**Hinweis:** Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) im Rahmen des Themenschwerpunkts Hydro-CH2018 verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

**Zitiervorschlag:** Speerli J., Bachmann A.-K., Bieler S., Schumacher A., Gysin S. 2020. Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern, Schweiz, 48 S.

## Autoren

Jürg Speerli

Prof. Dr. sc. techn. / dipl. Bauing. ETH / SIA

HSR Hochschule für Technik Rapperswil

IBU Institut für Bau und Umwelt

Oberseestrasse 10

8640 Rapperswil

Andrea-Kristin Bachmann, BSc FHO in Bauingenieurwesen

Sara Bieler, MSc FHO Engineering

Aurelian Schumacher, BSc FHO/STV in Bauingenieurwesen

Sami Gysin, BSc FHO in Bauingenieurwesen

HSR Hochschule für Technik Rapperswil

IBU Institut für Bau und Umwelt

Oberseestrasse 10

8640 Rapperswil



Jürg Speerli

Projektleiter



Andrea-Kristin Bachmann

Projektingenieurin

Rapperswil, den 31. August 2020

# INHALT

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>RESUMÉ.....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>AUFTRAG UND EINLEITUNG .....</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>DEFINITIONEN.....</b>	<b>12</b>
<b>4.1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>12</b>
<b>4.2</b>	<b>GEWÄSSERSYSTEM .....</b>	<b>12</b>
<b>4.3</b>	<b>SEDIMENTE .....</b>	<b>13</b>
4.3.1	Einteilung.....	13
4.3.2	Sedimenttransport.....	14
<b>4.4</b>	<b>SEDIMENTTRANSPORT IN FLIESSGEWÄSSERN .....</b>	<b>15</b>
4.4.1	Wildbäche.....	17
4.4.2	Bäche .....	17
4.4.3	Flüsse .....	18
<b>4.5</b>	<b>SEDIMENTTRANSPORT IN SEEN .....</b>	<b>18</b>
4.5.1	Künstliche Seen .....	19
4.5.2	Natürliche Seen.....	19
<b>4.6</b>	<b>SEDIMENTTRANSPORT IM GRUNDWASSER .....</b>	<b>20</b>
<b>4.7</b>	<b>DAS WICHTIGSTE IN KÜRZE .....</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>PROBLEME UND GEFAHREN DURCH SEDIMENTE .....</b>	<b>22</b>
<b>5.1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>22</b>
<b>5.2</b>	<b>FLIESSGEWÄSSER .....</b>	<b>22</b>
5.2.1	Wildbäche.....	22
5.2.2	Bäche und Flüsse oberstrom von Seen.....	23
5.2.3	Flüsse unterstrom von Seen .....	23
5.2.4	Flussstauhaltungen .....	24
<b>5.3</b>	<b>SEEN .....</b>	<b>24</b>
5.3.1	Künstliche Seen .....	24
5.3.2	Natürliche Seen.....	24
<b>5.4</b>	<b>GRUNDWASSER.....</b>	<b>24</b>
<b>5.5</b>	<b>FLORA UND FAUNA.....</b>	<b>25</b>
<b>5.6</b>	<b>DAS WICHTIGSTE IN KÜRZE .....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS .....</b>	<b>26</b>
<b>6.1</b>	<b>AUSWIRKUNGEN AUF DIE EINFLUSSFAKTOREN DES SEDIMENTTRANSPORTES.....</b>	<b>26</b>

6.1.1	Einleitung.....	26
6.1.2	Klimawandel.....	26
6.1.3	Niederschläge.....	26
6.1.4	Abflussregime.....	26
6.1.5	Permafrost.....	29
6.1.6	Wasserqualität.....	29
<b>6.2</b>	<b>AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DEN SEDIMENTTRANSPORT.....</b>	<b>30</b>
6.2.1	Einleitung.....	30
6.2.2	Fliessgewässer.....	30
6.2.3	Seen.....	32
6.2.4	Grundwasser.....	33
6.2.5	Abfluss- und Sedimenttransportregime.....	33
6.2.6	Flora und Fauna.....	35
<b>6.3</b>	<b>DAS WICHTIGSTE IN KÜRZE.....</b>	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>VERFAHREN ZUM MONITORING VON SEDIMENTEN.....</b>	<b>38</b>
<b>7.1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>38</b>
<b>7.2</b>	<b>SCHWEBSTOFFE.....</b>	<b>38</b>
7.2.1	Direkte Probenahme.....	38
7.2.2	Indirekte Erfassung.....	38
<b>7.3</b>	<b>GESCHIEBE.....</b>	<b>38</b>
7.3.1	Direkte Messmethode.....	39
7.3.2	Indirekte Messmethode.....	39
<b>7.4</b>	<b>MURGANG.....</b>	<b>39</b>
7.4.1	Murgangerfassung mit Kontakt.....	39
7.4.2	Kontaktlose Murgangerfassung.....	39
<b>7.5</b>	<b>DAS WICHTIGSTE IN KÜRZE.....</b>	<b>39</b>
<b>8</b>	<b>WERKZEUGE ZUR MODELLIERUNG DES SEDIMENTTRANSPORTES.....</b>	<b>40</b>
<b>8.1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>40</b>
<b>8.2</b>	<b>NUMERISCHE MODELLIERUNG.....</b>	<b>40</b>
8.2.1	Numerische 1D-Modelle.....	40
8.2.2	Numerische 2D-Modelle.....	40
8.2.3	Numerische 3D-Modelle.....	41
<b>8.3</b>	<b>HYDRAULISCHE MODELLIERUNG.....</b>	<b>41</b>
<b>8.4</b>	<b>HYBRIDE MODELLIERUNG.....</b>	<b>41</b>
<b>8.5</b>	<b>DAS WICHTIGSTE IN KÜRZE.....</b>	<b>42</b>
<b>9</b>	<b>OFFENE FRAGEN UND FORSCHUNGSLÜCKEN.....</b>	<b>43</b>
<b>9.1</b>	<b>FORSCHUNG.....</b>	<b>43</b>
<b>9.2</b>	<b>ENTWICKLUNG VON NEUEN SYSTEMEN/KONZEPTEN.....</b>	<b>44</b>
<b>10</b>	<b>QUELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>45</b>

---

<b>10.1</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>45</b>
<b>10.2</b>	<b>ONLINE .....</b>	<b>48</b>

## 1 ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Bericht werden die Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport in Schweizer Gewässern beschrieben. Bei den Sedimenten wird zwischen Geschiebe und Schwebstoffen unterschieden. Schwebstoffe sind die feinsten Sedimente und werden in Schwebelagung im Wasser verfrachtet. Geschiebe ist gröber und wird an der Sohle von Fliessgewässern transportiert oder am Grund von Seen und Fliessgewässern abgelagert.

Fliessgewässer sind steile Wildbäche oder eher flachere Bäche und Flüsse, sowie Seen, welche natürlich oder künstlich sein können. Im Grundwasser werden höchstens Schwebstoffe transportiert und es ist somit für das Thema Sedimenttransport nicht sehr bedeutend. Der Wasseraustausch Fliessgewässer-Grundwasser kann aber stark vom Sedimenttransport im Fliessgewässer beeinflusst sein.

Wildbäche können aufgrund ihrer Steilheit und hangnaher Lage v.a. bei Hochwassern relativ zu ihrer Grösse viele Sedimente (auch sehr grobe Komponenten) transportieren, die sie meist zerkleinert in Bäche, Flüsse und Seen einleiten. Im Gefällsknick von steil zu flach nimmt die Transportkapazität der Gerinne ab und die eingebrachten Sedimente können meistens nicht vollständig weitertransportiert werden. Bei Fliessgewässern und Seemündungen kann dies die Eintretenswahrscheinlichkeit von Überschwemmungen bei Hochwassern erhöhen, in künstlichen Speicherseen sinkt das nutzbare Volumen. Seen können im Gegensatz zu Fliessgewässern aufgrund der geringen Fliessgeschwindigkeiten kein Geschiebe sondern höchstens Schwebstoffe transportieren.

Der Klimawandel hat auf die sehr unterschiedlichen Gewässereinzugsgebiete der Schweiz verschiedene Auswirkungen. Generell wird von intensiveren Gewitterereignissen und aufgrund höherer Temperaturen mehr Regen anstatt Schnee im Winter ausgegangen, zudem werden in diesem Jahrhundert fast alle Gletscher verschwinden und so zwischenzeitlich zusätzliches Schmelzwasser liefern. So sind Hochwasser in Zukunft über längere Perioden im Jahr möglich und werden in der Tendenz höhere Spitzen erreichen. Gleichzeitig wird sich aber auch die Zeit der Niedrigwasserperioden ausdehnen und die niedrigen Abflüsse werden noch tiefer ausfallen.

Infolge von Gletscherrückgang und ansteigender Permafrostgrenze wird in hohen Lagen vermehrt Material freigelegt und die Stabilität der Hänge reduziert. Dies führt zu vermehrtem Auftreten von Hangrutschungen, Erosionen und Murgängen, wodurch mehr Sedimente in die Gewässer eingetragen werden. Durch die zeitweise erhöhten Abflüsse wird zumindest ein Teil dieser zusätzlichen Sedimente in tiefere Lagen weitertransportiert. D.h. dass die Eintretenswahrscheinlichkeit von Überschwemmungen bei Hochwassern in Fliessgewässern mit Auflandungstendenz und bei Seemündungen generalisiert noch zusätzlich zunimmt. Die Weiterleitung von Sedimenten v.a. in künstlichen Seen wird umso wichtiger, um deren Nutzvolumen zu erhalten und den negativen Auswirkungen von Sedimentdefiziten (verschärft durch höhere Abflüsse) im Unterwasser vorzubeugen, namentlich Verschlechterung der ökologischen Rahmenbedingungen sowie Kollaps gewässernaher Infrastrukturen durch Erosion. Auch Flusstauhaltungen werden aufgrund des höheren Sedimenteintrags aufwendiger bewirtschaftet werden müssen. Die Grundwasservorkommen können von vermehrter Geschiebeumlagerung profitieren, da dies die Frischwasserzufuhr aus Fliessgewässern garantiert. Jedoch können durch vermehrten Schwebstofftransport aber auch die Fliessgewässersohlen stärker kolmatieren, wodurch die

Wasserzufuhr ins Grundwasser unterbrochen wird. Flora und Fauna sind etwa gleichermassen von positiven wie negativen Veränderungen betroffen.

Als ergänzende Kapitel sind im vorliegenden Bericht Informationen zum Monitoring von Sedimenten und zu Werkzeugen zur Modellierung des Sedimenttransportes enthalten. Abschliessend werden einzelne Punkte des durchaus noch bedeutenden Forschungsbedarfs beleuchtet.



## 2 RESUMÉ

Ce rapport décrit les effets du changement climatique sur le transport des sédiments dans les eaux suisses. Une distinction est faite entre la charge de fond et les sédiments en suspension. Les sédiments en suspension sont les plus fins et sont transportés en suspension dans l'eau. La charge de lit est plus grossière et est transportée le long du lit des cours d'eau ou déposée au fond des lacs et des cours d'eau.

Les cours d'eau sont des torrents abrupts ou des ruisseaux et rivières moins profonds, ainsi que des lacs, qui peuvent être naturels ou artificiels. Les eaux souterraines transportent principalement des solides en suspension et ne sont donc pas très importantes pour le transport des sédiments. Cependant, l'échange d'eau entre les cours d'eau et les eaux souterraines peut être fortement influencé par le transport de sédiments dans les cours d'eau.

En raison de leur inclinaison et de la proximité des pentes, les torrents peuvent transporter une grande quantité de sédiments (y compris des éléments très grossiers) par rapport à leur taille, en particulier en cas d'inondation, qu'ils déversent généralement sous forme concassée dans les ruisseaux, les rivières et les lacs. Lorsque la pente passe de forte à faible, la capacité de transport des canaux diminue et les sédiments transportés ne peuvent généralement pas être complètement transportés plus loin. Dans les cours d'eau et les estuaires, cela peut augmenter la probabilité d'inondation lors des crues, et dans les réservoirs artificiels, le volume utilisable diminue. Contrairement aux cours d'eau, les lacs ne peuvent pas transporter de charges de fond en raison de leur faible vitesse d'écoulement, mais ne peuvent transporter que des matières en suspension.

Le changement climatique a des effets divers sur les bassins versants très différents de la Suisse. En général, on s'attend à des orages plus intenses et, en raison des températures plus élevées, à plus de pluie au lieu de neige en hiver. En outre, presque tous les glaciers disparaîtront au cours de ce siècle et fourniront donc entre-temps de l'eau de fonte supplémentaire. Cela signifie qu'à l'avenir, les inondations pourront se produire pendant de plus longues périodes de l'année et auront tendance à atteindre des pics plus élevés. Dans le même temps, cependant, la période de basses eaux sera prolongée et les faibles rejets seront encore plus faibles.

En raison du recul des glaciers et de la hausse des limites du permafrost, davantage de matériaux seront exposés à haute altitude et la stabilité des pentes sera réduite. Cela entraînera une augmentation de l'incidence des glissements de terrain, de l'érosion et des coulées de débris, ce qui aura pour effet d'entraîner davantage de sédiments dans les cours d'eau. En raison de l'augmentation temporaire du ruissellement, au moins une partie de ces sédiments supplémentaires est transportée à des altitudes plus basses. Cela signifie que la probabilité que des inondations se produisent lors de crues de cours d'eau ayant tendance à se déverser en amont et à l'embouchure des lacs augmente encore plus en termes généralisés. Le transfert de sédiments, en particulier dans les lacs artificiels, devient d'autant plus important pour maintenir leur volume utilisable et pour prévenir les effets négatifs des déficits sédimentaires (exacerbés par des rejets plus importants) dans les eaux résiduaires, à savoir la détérioration des conditions cadres écologiques et l'effondrement des infrastructures à proximité des masses d'eau en raison de l'érosion. Les bassins fluviaux devront également être gérés à un coût plus élevé en raison de l'apport plus important de sédiments. Les ressources en eaux souterraines peuvent bénéficier

d'une redistribution accrue de la charge de fond, car cela garantit l'approvisionnement en eau douce des cours d'eau. Cependant, le transport accru de sédiments en suspension peut également entraîner un colmatage accru des lits des rivières, ce qui interrompt l'approvisionnement en eau des nappes phréatiques. La flore et la faune sont affectées par des changements positifs et négatifs à peu près dans la même mesure.

En outre, le présent rapport contient des informations sur la surveillance des sédiments et sur les outils de modélisation du transport des sédiments. Enfin, des points particuliers du besoin encore important de recherche sont mis en évidence.

### 3 AUFTRAG UND EINLEITUNG

Das National Centre for Climate Services (NCCS) wurde 2015 gegründet und ist für sogenannte Klimadienstleistungen zuständig. Dies sind wissenschaftlich basierte Informationen und Daten über das vergangene, heutige und zukünftige Klima und seine Folgen. Das NCCS soll eine Plattform bieten, damit die Gesellschaft, die Wirtschaft und die Verwaltung die klimabezogenen Chancen und Risiken erkennen und ihnen mit fundiertem Wissen begegnen können.

Die Abteilung Hydrologie des Bundesamts für Umwelt (BAFU) ist mit dem Themenschwerpunkt „Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Hydrologie – Hydro-CH2018“ des NCCS betraut. Das Ziel von diesem Teilprojekt Hydro-CH2018 ist die Schaffung einer hydrologischen Basis für die Anpassung an den Klimawandel. Die einzelnen Komponenten des hydrologischen Zyklus sollen für Zukunftsszenarien sowohl qualitativ als auch wo sinnvoll quantitativ beschrieben werden, um insbesondere den Entscheidungsträgern als Entscheidungshilfe zu dienen.

Das Endprodukt von Hydro-CH2018 ist ein umfassender Synthesebericht, basierend auf aktuellen Forschungsergebnissen aus verschiedenen Projekten in der Schweiz. Im Rahmen der Projektbearbeitung sollen Wissenslücken aufgezeigt und allenfalls geschlossen werden und ein Wissensaustausch stattfinden.

Dieser Bericht behandelt das Kapitel „Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport“. Der Bericht fasst die heutigen Erkenntnisse von Sedimentherkunft und -mobilisierung mit Blick auf den Klimawandel zusammen. Weiter werden die verschiedenen Einflüsse auf die Gewässersysteme durch den veränderten Sedimenttransport betrachtet.

## 4 DEFINITIONEN

*SCHLÜSSELWÖRTER: Gewässersystem, Fließgewässer, See, Grundwasser, Feststoffe, Sedimente, Schwebstoffe, Erosion, Auflandung, Geschiebe, Geschiebeablagung, Geschiebetransport, Geschiebeverlagerung, Geschiebeeintrag, Schwemmkegel, Delta*

### 4.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden das Gewässersystem und seine Bestandteile erläutert. Anschliessend wird der Begriff Sedimente definiert. Die Unterteilung der Sedimente in seine Bestandteile und die jeweilige Herkunft der Sedimentbestandteile wird aufgezeigt. Anschliessend folgt eine Erläuterung über den Sedimenttransport in den verschiedenen Gewässertypen.

### 4.2 Gewässersystem

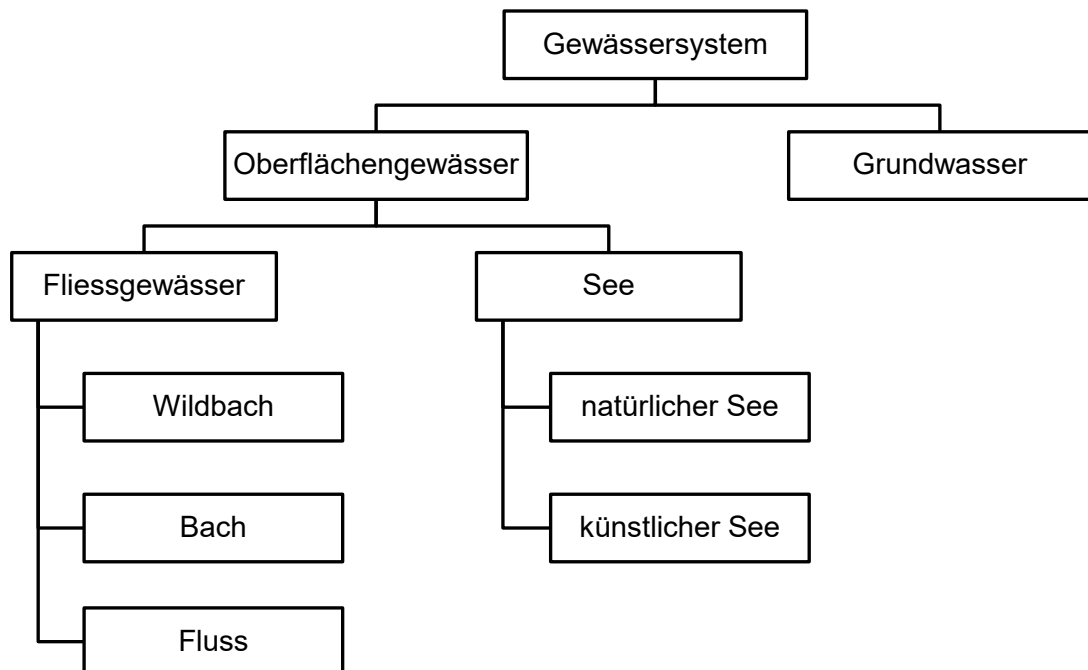


Abb. 1: Definition Gewässersystem mit den Untersystemen Oberflächengewässer und Grundwasser.

Ein Gewässersystem kann grundsätzlich in die Teilsysteme Oberflächengewässer und Grundwasser unterteilt werden (Abb. 1). Bei Oberflächengewässern erfolgt der Abfluss über dem Terrain, bei Grundwasser unter Terrain. Die Fließgewässer sind Oberflächengewässer und unterscheiden sich durch ihre grösseren Fließgeschwindigkeiten von den Seen.

Die Fließgewässer werden aufgrund ihrer Grösse und Lage weiter unterteilt. Die Wildbäche befinden sich typischerweise in alpinen Gebieten und haben ihren Ursprung in einer Quelle. Sie sind oftmals der Start eines Gewässersystems und weisen meist ein hohes Gefälle auf. Dadurch treten in Wildbächen in der Regel auch hohe Fließgeschwindigkeiten und Schleppkräfte auf, was zu hoher Sedimenttransportkapazität führt. Bäche sind eher kleinere Fließgewässer. Ein Bach hat oft eine tiefere Fließgeschwindigkeit als ein Wildbach und zeichnet sich durch kleinere

Längsgefälle aus. Seinen Ursprung kann der Bach ebenfalls im alpinen Gebiet bei einer Quelle haben oder er ist die Weiterführung eines Wildbachs. Die meisten Bäche finden sich aber in voralpinem Gebiet oder im Flachland. In der Schweiz gilt als grösstes Fließgewässer der Fluss. Dieser hat eine deutlich grössere Gerinnebreite als ein Bach oder ein Wildbach. Er wird von Wildbächen und Bächen sowie allenfalls von Seen mit Sedimenten und Wasser versorgt und transportiert beides bis in einen weiteren Teil des Gewässersystems, oft einen See. Ein Fluss kann sowohl oberwasserseitig von einem See liegen und diesen mit Wasser versorgen wie auch unterwasserseitig sein, von wo er das Wasser aus dem See abtransportiert.

Die Seen kennzeichnen sich durch ihre sehr kleinen Fließgeschwindigkeiten aus. Es wird zwischen natürlichen und künstlichen Seen unterschieden. Die natürlichen Seen sind, wie ihr Name es beschreibt, von der Natur geschaffen worden. Es sind typischerweise Seen, welche durch einen Fluss gespiesen werden und als Ausfluss auch wieder einen Fluss haben. Die Seen entstanden durch eine Vertiefung in der Erdoberfläche, oftmals aufgrund des Rückzugs eines Gletschers aus der letzten Eiszeit, welche von Wasser aufgefüllt wurde. Im Gegensatz zu den natürlichen Seen sind die künstlichen Seen von Menschenhand erstellte Wasserspeicher. Ohne ein Bauwerk würde das Wasser an den jeweiligen Seestellen nicht oder nicht in diesem Ausmass zurückgestaut werden. Auch liegt der Ausfluss aus diesen künstlichen Seen oftmals weit unterhalb des Seespiegels.

Letzter Bestandteil des Gewässersystems in dieser Betrachtungsweise ist das Grundwasser. Grundwasser ist jenes Wasser, welches sich mit sehr geringer Fließgeschwindigkeit im Boden fortbewegt. Es wird von der Versickerung von Niederschlag und aus den Oberflächengewässern gespiesen. Je nach Wasserstand in den Gewässern und im Grundwasser wird aber auch Wasser zurück an die Oberflächengewässer gegeben.

## **4.3 Sedimente**

### **4.3.1 Einteilung**

Feststoffe im Wasser können in drei Kategorien unterteilt werden: Sedimente, Schwimmstoffe und gelöste Stoffe (Abb. 2). Hauptunterscheidungsmerkmal ist die Transportart: Sedimente weisen eine höhere Dichte als Wasser auf und sinken ohne Strömung ab, Schwimmstoffe, wie beispielsweise Schwemholz, halten sich aufgrund der im Verhältnis zum Wasser geringeren Dichte an der Oberfläche und gelöste Stoffe sind gleichmässig im Wasser verteilt. Für die nachfolgenden Betrachtungen sind die Sedimente von übergeordneter Wichtigkeit gegenüber den anderen beiden Feststoffarten.

Die Sedimente unterteilen sich in zwei weiterführende Kategorien. Das Geschiebe ist jener Teil der Sedimente, welcher nahe an der Sohle eines Fließgewässers transportiert wird. Das Geschiebe besteht aus verschiedenen grossen Körnern, welche im Wildbachsystem als grosse Blöcke ihren Weg beginnen und im Verlauf des Transportes zerkleinert werden (BEZZOLA 2017). Geschiebe wird durch seitliche Zubringer in ein Gewässer eingetragen oder durch Erosion mobilisiert. Dabei werden die Sohlen- und Seitenerosion unterschieden. Bei den seitlichen Zubringern handelt es sich meist um Wildbäche, Lawinenschutt, Hangrutschungen, Hangmuren oder sonstige Zuflüsse. Gerade erosive Wildbäche mit kleinen Einzugsgebieten sind für einen Grossteil des Geschiebetransportes bzw. -eintrages verantwortlich. Mittellandflüsse

mit grossen Einzugsgebieten hingegen können verhältnismässig wenig Geschiebe transportieren, vor allem wenn ein See oder eine künstliche Stauhaltung oberstrom liegt, in welchem das zugeführte Geschiebe abgelagert wird.

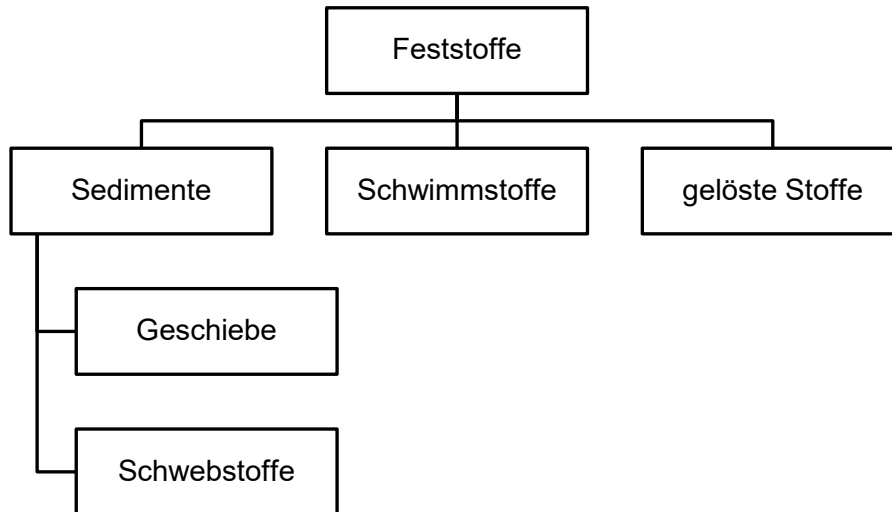


Abb. 2: Einteilung der Feststoffe (BEZZOLA 2017).

Schwebstoffe sind die kleinsten und feinsten Bestandteile der Sedimente. Sie entstehen durch die Zerkleinerung der grösseren Geschiebebestandteile oder werden als Verwitterungsprodukt und durch Erosion aus dem Festgestein gelöst. Durch turbulente Strömungen werden sie aufgrund ihrer kleinen Sinkgeschwindigkeit abgehoben und so über eine grössere Distanz über der Sohle schwebend transportiert (BEZZOLA 2017).

#### 4.3.2 Sedimenttransport

Der Sedimenttransport hängt wesentlich vom Abfluss und dem Gefälle eines Fließgewässers sowie der Verfügbarkeit von Sedimenten ab. Ein erhöhter Abfluss bringt die Sedimente in Bewegung. Durch den erhöhten Abfluss wirken grössere Kräfte auf die Sedimente und sie werden von der Sohle gelöst und abgehoben und so vom Wasser transportiert. Es entsteht eine Erosion an der Sohle. Reduziert sich der Abfluss, werden auch die Kräfte auf die Sedimentbestandteile kleiner und das Geschiebe und die Schwebstoffe sinken zurück auf die Sohle und führen dort zu Auflandungen.

In Abb. 3 sind die wichtigsten Einflussfaktoren für den Sedimenttransport in Form einer Waage dargestellt. Wenn die Waage bzw. das Gerinne im Ausgangszustand im Gleichgewicht ist und man beispielsweise die Korngrösse und/oder die Sedimentführung erhöht, ergibt sich eine Auflandung. Erhöht man hingegen das Gefälle und/oder den Abfluss, tieft sich das Gerinne ein.

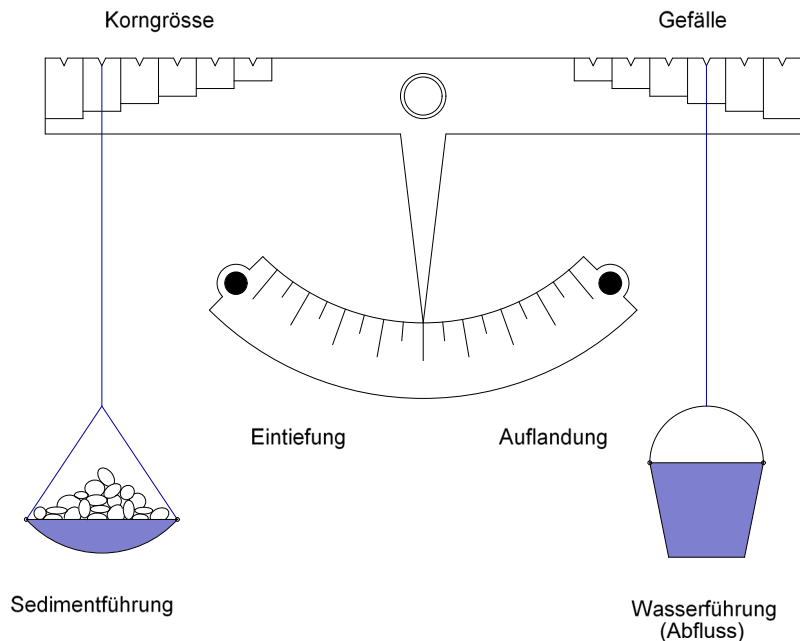


Abb. 3: Sedimentwaage nach LANE (1955).

Der Sedimenttransport ist vor allem für die morphologische Gestalt von Sohle und Ufer verantwortlich. Der Schwebstofftransport beeinflusst massgeblich die Kolmationsprozesse, die Feinmaterialablagerungen auf dem Vorland und die Verlandung von Auengewässern. Unter Kolmation versteht man das Verfüllen des Porenvolumens des Sohlenmaterials durch Feinmaterialien, was zu einer temporären oder dauerhaften Abnahme der Durchlässigkeit der Sohle führt und damit den freien Austausch zwischen Fliessgewässer und Grundwasser behindert oder unterbindet. Kolmation wird auch als Selbstabdichtung der Sohlenoberfläche verstanden. Geschiebe- und Schwebstofftransport werden wesentlich durch den Abfluss und dessen Schwankungen beeinflusst. Der Transport der Schwebstoffe verläuft vergleichsweise kontinuierlich, wogegen der Geschiebetransport intermittierend und nicht gleichmässig über die gesamte Gewässerbreite vor sich geht (PATT 2016 und BAFU 2017).

Bezüglich Sedimenttransport können drei Fälle unterschieden werden: Geschiebedefizit, Geschiebeüberschuss und Geschiebegleichgewicht. Beim Geschiebedefizit wird weniger, beim Geschiebeüberschuss mehr Geschiebe vom Oberwasser in den betreffenden Gewässerabschnitt eingetragen als darin transportiert werden kann und beim Geschiebegleichgewicht wird gleichviel Geschiebe zu- wie abgeführt (SCHÄLCHLI, ABEGG + HUNZINGER 2005).

#### 4.4 Sedimenttransport in Fliessgewässern

Im nachfolgenden Abschnitt wird der Sedimenttransport in Fliessgewässern näher erläutert. Es wird zwischen dem Sedimenttransport in Wildbächen (vorwiegend alpines Gebiet) und in Bächen und Flüssen (vorwiegend voralpines Gebiet und Mittelland) unterschieden.

In Abb. 4 sind die relevanten Grössen und Zusammenhänge übersichtlich dargestellt.

- In den Alpen oder dem Oberlauf bringen meistens viele relativ kleine Zubringer bei hohen Längsgefällen und starker Strömung jedoch verhältnismässig kleinen Abflüssen viel grobe bis sehr grobe Sedimente mit und lagern kaum Material ab. Allfällige Ablagerungen sind in der Regel sehr grob.
- In den Voralpen oder im Mittellauf nehmen die Anzahl der Zuflüsse, das Gefälle und die Strömung ab, der Abfluss hingegen zu. Der Sedimenteintrag nimmt ab und wird feiner, dafür nehmen die Ablagerungen zu und weisen mittlere Korngrößen auf.
- Im Mittelland oder Unterlauf liegen typischerweise flache, oft gestreckte Gerinne mit wenigen oder keinen Zuflüssen, eher schwacher Strömung jedoch mit hohen Abflüssen. Es werden wenige und höchstens noch feine Sedimente eingetragen, dafür wird viel, hauptsächlich feines Material abgelagert.

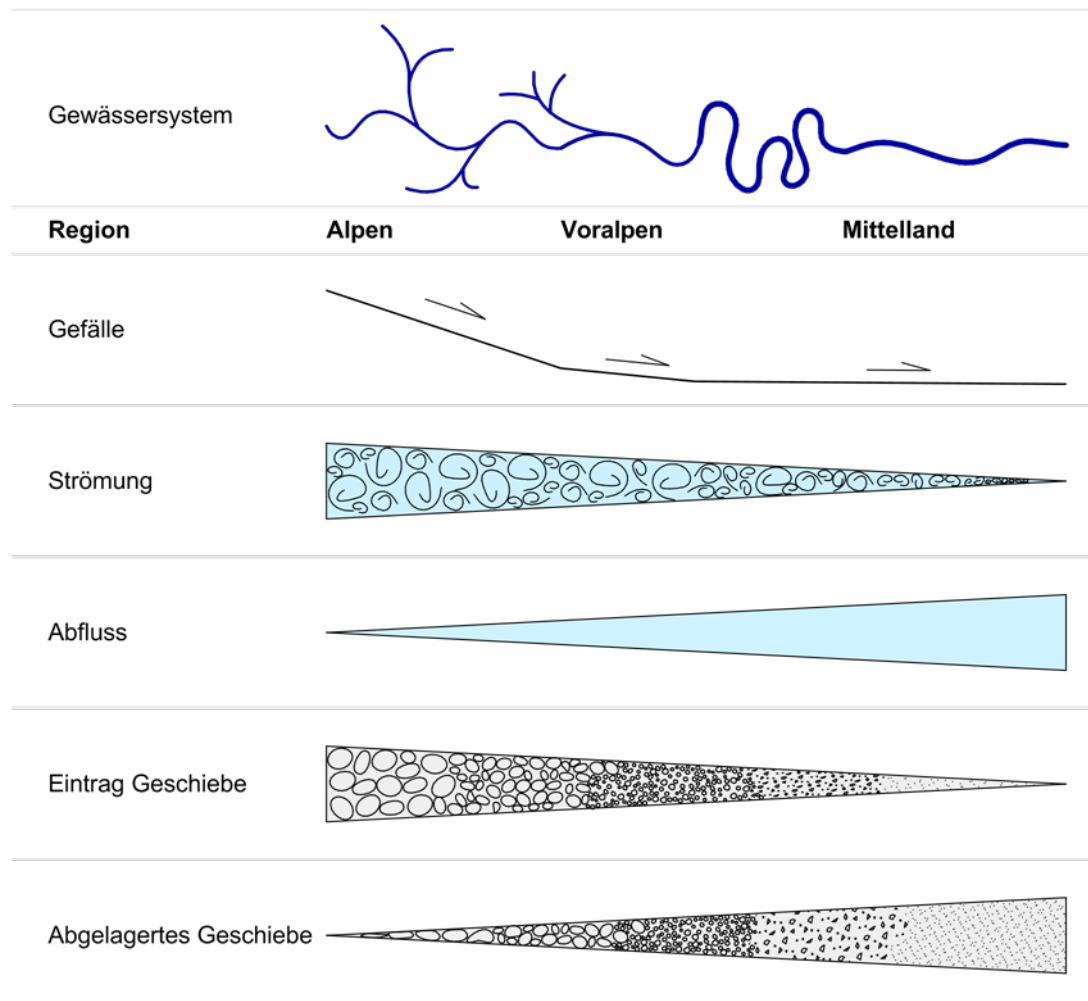


Abb. 4: Transport und Ablagerung von Sedimenten entlang eines Fließgewässers (eigene Darstellung nach BAFU 2017).

Entscheidender als die Gebietsbezeichnungen Alpen, Voralpen und Mittelland ist die Abgrenzung zwischen steilen und flachen Fließgewässern. Erstere sind fast immer Wildbäche und transportieren relativ zum Abfluss viel Sedimente, letztere sind meistens Bäche oder Flüsse. Der kritische Punkt ist der Gefällsknick beim Übergang von steilen zu flachen Strecken. Das von oben eingetragene Material kann nicht vollständig weitertransportiert werden und führt im Gerinne – oder wenn der Gefällsknick bei



einer Mündung liegt im Gerinne des unterstrom liegenden Gewässers – zu Auflandungen.

#### 4.4.1 Wildbäche

Die Sedimente in Wildbächen entstehen an den Hängen der Berge sowie steiler Hügel und werden über ein oder mehrere Gerinne in ein Gewässer transportiert (Abb. 5). In diesem Gewässer (Bach, Fluss, See) endet die Betrachtung des Sedimenttransportes für die Wildbäche.

An den Hängen des Gebirges werden die Sedimente durch Erosion aufbereitet. Das Material gelangt über den Oberflächenabfluss in ein Gerinne und wird dort zerkleinert und weitertransportiert. Aus Hangrutschungen, Murgängen und weiteren Erosionsprozessen kann zusätzliches Material ins Gerinnesystem gelangen. In diesem Gerinnesystem wird das Material verlagert und nach einem Hochwasser im Bereich der abgeflachten Strecken abgelagert. Beim Durchgang eines neuen Hochwassers werden die Sedimente weitertransportiert und auf einem Schwemmkegel oder Delta abgelagert oder direkt bis ins nächste Gewässer transportiert (SPREAFICO ET AL. 2005). Der Geschiebetransport in Wildbächen findet in der Regel nur bei mittleren bis grossen Hochwasserereignissen statt und ist dann sehr gross (SCHÄLCHLI, ABEGG + HUNZINGER 2005).

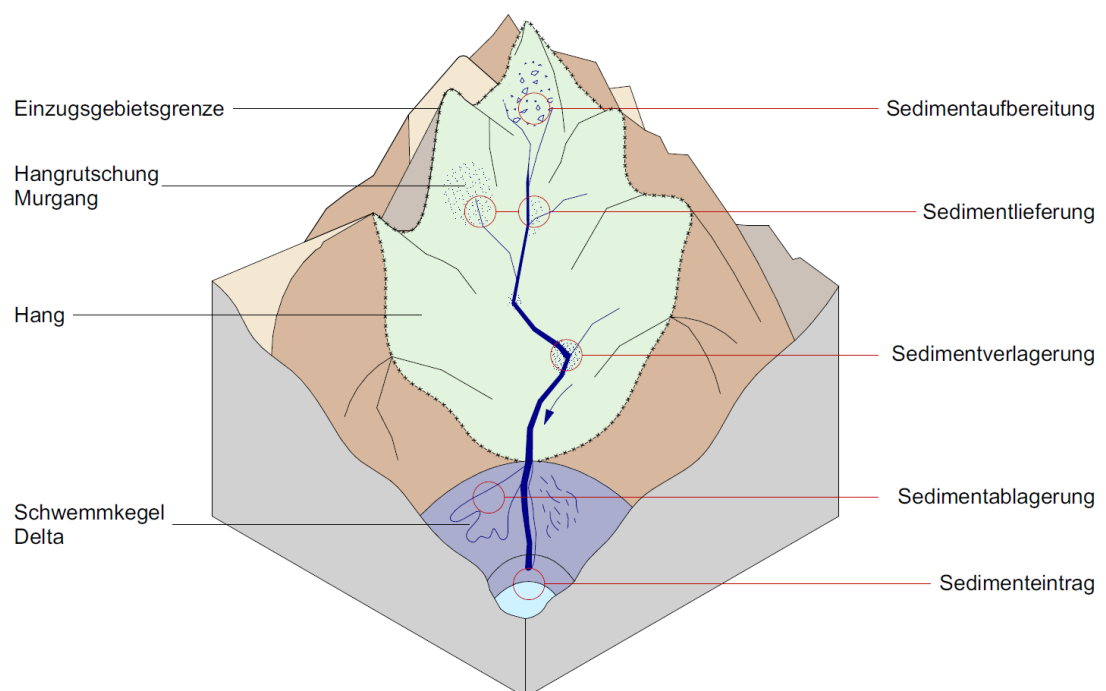


Abb. 5: Sedimentherkunft und -transport im alpinen Gebiet bis in ein Gewässer. Zeichnungsidee: SPREAFICO ET AL. (2005).

#### 4.4.2 Bäche

Die Sedimenttransportprozesse in Bächen sind vergleichbar mit denjenigen in Flüssen, Hauptunterschied ist die Grösse. Im vorliegenden Bericht werden die Prozesse für Bäche und Flüsse oberstrom von Seen gemeinsam beschrieben.

### 4.4.3 Flüsse

Nach dem Sedimenteintrag von (Wild-)Bächen in einen Fluss werden die Sedimente im Flusssystem weitertransportiert (Abb. 6). Weitere Sedimentquellen für das Flusssystem sind Hangrutsche und kleinere Flüsse und Bäche im Einzugsgebiet. Das Geschiebe wird auf der Sohle rollend, gleitend oder springend verlagert. Die Schwebstoffe schweben im Wasser. Der Transport im Flusssystem ist analog zum Wildbachsystem stark vom Abfluss und den Strömungsbedingungen im Gerinne abhängig. Die Geometrie, das Längsgefälle und die Beschaffenheit der Böschungen und der Sohle des Gerinnes beeinflussen bei einem Hochwasser die Fliesstiefe und die Fließgeschwindigkeit. Diese beiden Faktoren ergeben die Kapazität des Gerinnes und somit des Sedimenttransportes. Durch die Gerinnegeometrie und den momentanen Abflusszustand wird das Feststoff-Transportvermögen des Flusses bestimmt. Es kann ein Ablagerungs-, Gleichgewichts- oder Erosionszustand vorliegen. Je nach Zustand wird die Flusssohle beeinflusst und es ändert sich infolge dessen die Gerinnegeometrie. Dies hat einen erneuten Einfluss auf den Zustand des Gerinnes. So entsteht eine komplexe Wechselwirkung zwischen Abfluss, Gerinneform und Sedimenttransport (SPREAFICO ET AL. 2005).

Beim Durchgang eines Hochwassers wird das Material in grösseren Mengen erodiert und transportiert und lagert sich nach dem Durchgang der Hochwasserwelle im Gerinne ab. Durch diese Prozesse werden die Sedimente in den Flusssystemen nach und nach ins nächste Gewässer transportiert und lagern sich dort auf einem Schwemmkegel ab oder werden weiter in dieses Gewässer eingetragen.

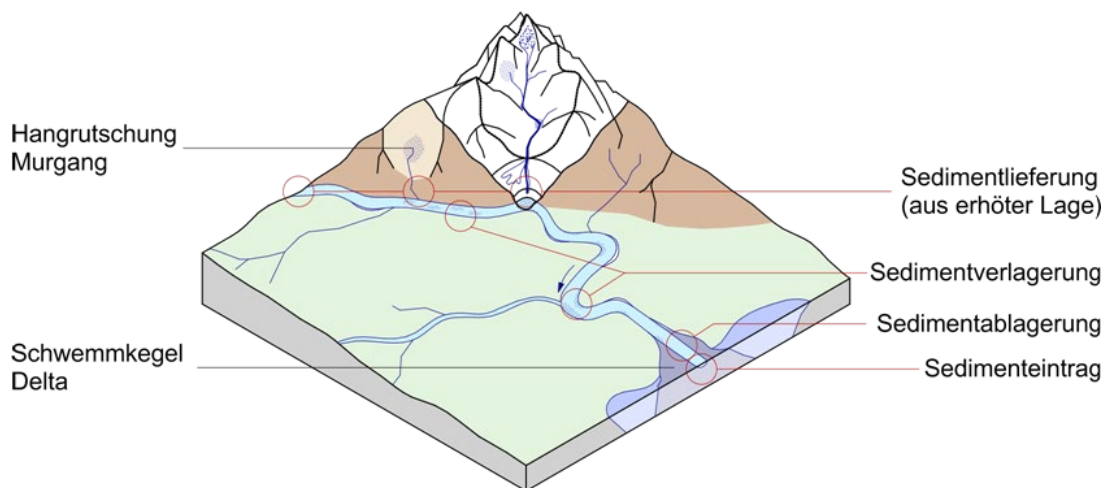


Abb. 6: Sedimentherkunft und -transport in einem Fluss.

### 4.5 Sedimenttransport in Seen

Nachfolgend wird der Transport von Sedimenten in den verschiedenen Seetypen diskutiert. So hat der Sedimenttransport beispielsweise in einem Speichersee eine andere Bedeutung als in einem der grossen Alpenrandseen. In Seen wird ein Grossteil der Sedimente abgelagert. Je nach Art und Grösse des Sees ist die Verlandung ein entscheidender Faktor für dessen Nutzung.

Die in einen See einmündenden Fließgewässer bringen den Grossteil der Sedimente, welche sich in einem See ablagern. Hang- und Uferrutschungen, Lawinen, Murgängen sind weitere Quellen von Sedimenten, welche direkt in einen See gelangen können.

Die Sedimente, welche von einem Fließgewässer transportiert werden, lagern sich in der Regel direkt bei der Einmündung in Form eines Deltas im See ab. Die grossen Sedimentbestandteile sinken direkt beim Seeufer ab und bilden so ein Delta. Die feineren Anteile, die Schwebstoffe, können über grössere Distanzen im See transportiert werden (sogenannte Trübestromung) und lagern sich erst nach einer gewissen Fließstrecke ab oder werden vom Abfluss aus dem See weiter in ein nächstes Gewässer verfrachtet (SPREAFICO ET AL. 2005).

#### 4.5.1 Künstliche Seen

Die eingetragenen und abgelagerten Sedimente aus den Wildbächen oder Flusssystemen führen zu einer Auflandung im künstlichen See und bewirken eine Verminderung des Seevolumens (Abb. 7). Im Falle eines Stausees führt die Reduktion des staubaren Volumens zu einem negativen Effekt auf die wasserwirtschaftliche Nutzung, beispielsweise die Wasserkraft. Weiter können technische Einrichtungen der Stauanlage, namentlich Grundablässe und Wasserfassungen, mit Sedimenten bedeckt werden (SPREAFICO ET AL. 2005).

Die abgelagerten Sedimente können zum Erhalt des Stauvolumens entweder über die Wasserfassung oder den Grundablass ins Unterwasser geleitet werden. So kann zumindest ein Teil der Sedimente, welche sich in einem Stausee ablagern, weitertransportiert werden. Jedoch haben solche Stauraumpülungen einen direkten Einfluss auf die Feinsedimentkonzentration und Geschiebedynamik im Unterwasser (BAFU 2017).

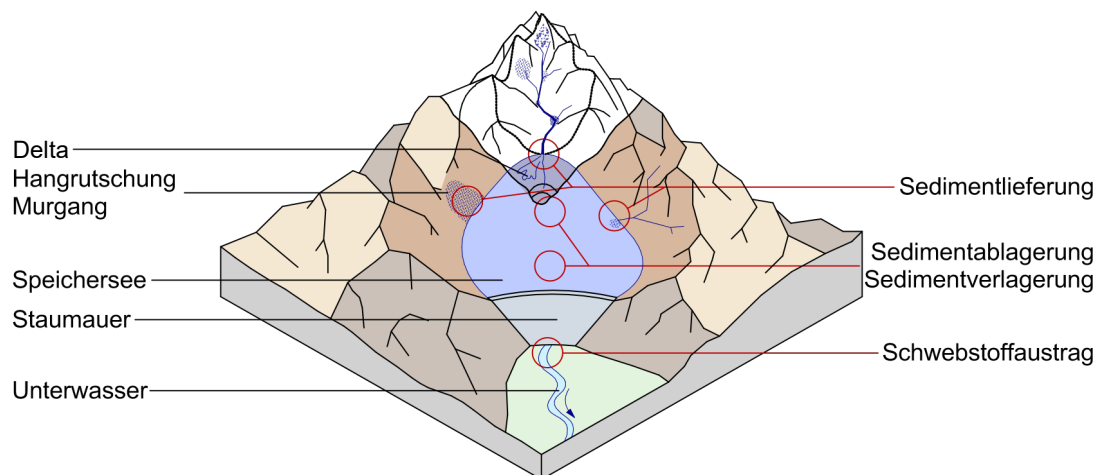


Abb. 7: Sedimentherkunft und -transport in einem künstlichen Speichersee.

#### 4.5.2 Natürliche Seen

Der Ablagerungsprozess von Sedimenten in natürlichen Seen (Abb. 8) beeinflusst hauptsächlich seichte Buchten, Schiffahrtsrinnen und Hafenbecken (SPREAFICO ET AL. 2005). Im Gegensatz zu den Speicherseen können die natürlichen Seen nicht

gespült werden und der Abfluss aus dem See kann höchstens mittels Baggerung und Wiederzugabe durch Sedimente aus den Seeablagerungen angereichert werden. Es findet kein oder nur ein geringer Austrag von Sedimenten ins Unterwasser statt. Dabei handelt es sich ausschliesslich um Schwebstoffe, da Geschiebe aufgrund der kleinen Fließgeschwindigkeit nicht bis zum Ausfluss des Sees gelangen kann.

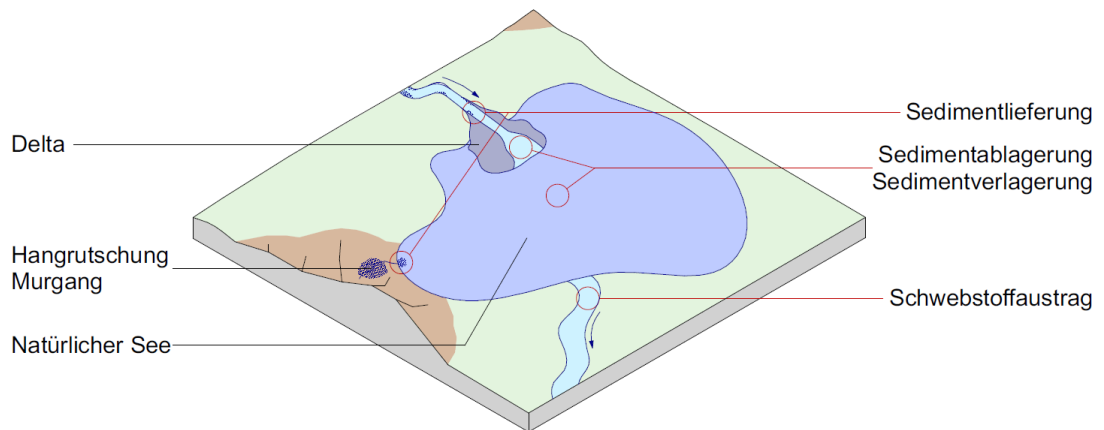


Abb. 8: Sedimentherkunft und -transport in einem natürlichen See.

#### 4.6 Sedimenttransport im Grundwasser

Im Grundwasser selber findet kein Geschiebetransport, sondern allenfalls Schwebstofftransport statt. Das Grundwasser kann jedoch vom Sedimenttransport in den Oberflächengewässern beeinflusst werden. Je nach Grösse, Häufigkeit und Art der Verlagerungen wird die Speisung des Grundwassers mit Fluss- oder Bachwasser beeinflusst. So führt eine Kolmatierung (Selbstabdichtung des Flussbettes) zu einer Abnahme der Grundwasserneubildung durch infiltriertes Flusswasser (SCHÜRCH ET AL. 2012).

#### 4.7 Das Wichtigste in Kürze

- Ein Gewässersystem unterteilt sich in Fließgewässer, Seen und Grundwasser. Die Fließgewässer unterteilen sich weiter in Wildbäche, Bäche und Flüsse. Bei den Seen wird zwischen künstlichen und natürlichen Seen unterschieden.
- Die im Gewässer transportierten Feststoffe bestehen aus Sedimenten, Schwimmstoffen und gelösten Stoffen. Die Sedimente sind weiter unterteilt in Geschiebe, welches durch die Strömung direkt über der Sohle des Gewässers fortbewegt wird und Schwebstoffe, welche sich über die gesamte Wassertiefe verteilen können.
- Sedimenttransport ist ein Prozess in einem Gewässersystem, welcher vom Abfluss, dem Gefälle und der Verfügbarkeit von Sedimenten abhängig ist. Dabei wird das Gesteinsmaterial, welches über verschiedene Prozesse ins Gerinne gelangt, zerkleinert und vom Eintrittsort wegverfrachtet. Jedes Gewässersystem hat einen anderen Einfluss auf den Transport von Sedimenten.

- Der Sedimenttransport beginnt immer in erhöhten Lagen. Dort wird das Gesteinsmaterial abgetragen und bei einem grösseren Abfluss ins Gerinnesystem geleitet. In diesem Gerinnesystem werden vor allem grosse Sedimentbestandteile eingetragen, die durch Hochwasserabflüsse weiter in Richtung Tal verfrachtet und dabei nach und nach verkleinert werden. Die Sedimente werden jeweils ins nächste Gewässer geleitet, welches ein geringeres Gefälle aufweist, wodurch es zu einem Schwemmkegel oder Delta beim Eintritt in dieses Gewässer kommt.
- Die zerkleinerten Geschiebefraktionen gelangen aus dem steilen Wildbachsystem in ein flacheres Gewässer, einen Bach oder Fluss. In diesem Gewässer sind die Wassertiefen höher, das Gefälle kleiner, die Gerinnebreiten grösser, wodurch es zu einem Schwemmkegel oder Auflandungen beim Eintritt in dieses Gewässer kommen kann. Bei einem Hochwasserereignis werden viele Sedimente transportiert und das Material verlagert sich häufig im Gerinne selbst, bis es ins nächste Gewässer gelangt.
- Alternativ zu einem Fluss oder Bach kann sich unterstrom des Wildbachsystems auch ein künstlicher oder natürlicher See befinden, wodurch es zu einem Schwemmkegel oder Delta beim Eintritt in dieses Gewässer kommt. In einem künstlichen See wird das Wasser durch eine Staumauer aufgestaut und temporär gespeichert. Ein solcher See kann in den meisten Fällen entleert werden. Je nach Bauart können die abgelagerten Sedimente in unterschiedlichem Ausmass in ein nachfolgendes Gewässersystem gespült werden.
- In einem natürlichen See können die groben Sedimente höchstens mit Entnahmen und Wiedergabe an ein nachfolgendes Gewässersystem geleitet werden. Natürlicherweise werden, wenn überhaupt, nur die Schwebstoffe ins Unterwasser weitergeleitet.

## 5 PROBLEME UND GEFAHREN DURCH SEDIMENTE

*SCHLÜSSELWÖRTER: Erosion, Auflandung, Eintiefung, Übersarung, Geschiebetrieb, Reaktivierung, Geschiebedynamik, Umleitungsstollen, Kiesschüttung, Revitalisierung*

### 5.1 Einleitung

Durch den Sedimenttransport in den Gerinnen entstehen verschiedene Probleme und Gefahren in den Gewässersystemen, bzw. in erster Linie im Umland der Fließgewässer. Um die negativen Auswirkungen auf die Bevölkerung und die Infrastrukturen zu reduzieren, wurden in der Vergangenheit und werden in der Gegenwart verschiedene Methoden angewendet. Nachfolgend werden die Probleme und Gefahren in den einzelnen Gewässertypen aufgezeigt und die jeweiligen Methoden zum Eindämmen der Auswirkungen beschrieben.

### 5.2 Fließgewässer

#### 5.2.1 Wildbäche

In den Wildbächen besteht hauptsächlich eine Erosionsproblematik. Durch die sehr steilen Gefälle in diesen Gewässern und die daraus folgenden hohen Fließgeschwindigkeiten werden viele Sedimente aktiviert und transportiert. Bei einem Hochwasserereignis wird in kurzer Zeit sehr viel Material verfrachtet und ins nächste Gewässer geleitet. Durch die erhöhte Erosion und die daraus folgende Eintiefung des Gerinnes kann es zu Hangrutschungen und Uferanrissen kommen. Dadurch wird noch mehr Material ins Gerinne geleitet. Das mobilisierte Sedimentmaterial wird anschliessend im flacheren Unterlauf oder im nächsten Gewässer abgelagert. Dies weil dort normalerweise ein geringeres Gefälle und durch die grössere Gewässerbreite eine tiefere Fließgeschwindigkeit herrscht. Weiter kann es zu einer Übersarung kommen. Wird sehr viel Geschiebe mobilisiert, können auch Murgänge entstehen. Deren Transportkapazität ist noch höher als bei fluvialem Geschiebetransport, da aufgrund der höheren Dichte des Transportmediums auch die Schleppkräfte grösser sind, was beim Ausbrechen aus dem Gerinne zu einer Übermuring führen kann, bei welcher sich sehr viel Material ausserhalb des Gerinnes abgelagert. Murgänge fliessen in einzelnen Schüben ab und nicht kontinuierlich wie ein Wasserabfluss (SPREAFICO ET AL. 1996).

Um eine Eintiefung der Sohle und damit eine grosse Mobilisierung von Geschiebe zu verhindern, wurden in der Vergangenheit Wildbachsperrern erstellt. Diese sollen sowohl die Sohle wie auch die Ufer, bzw. die Hangböschungen stabilisieren. Durch diese Sperren, welche das Geschiebe zurückhalten, kann jedoch im Unterwasser und in den unterstrom liegenden Gewässern ein Geschiebedefizit entstehen, welches die Lebensraumvielfalt im Gewässer verringert und auch gerinnenahe Infrastrukturen durch Erosionen gefährden kann. Um eine Übersarung und Übermuring zu verhindern, wurden die Gerinne auf den Wildbachkegeln kanalisiert und begradigt (BAFU 2017).

In neuerer Zeit wurde der Geschiebetrieb auch in den Wildbächen vermehrt reaktiviert. Dies um im Unterlauf die Geschiebedynamik und damit die Habitatsdynamik zu fördern. Hierzu wurden unter anderem durchgängige Geschiebesammler entwickelt und realisiert. Diese lassen bei kleinen und mittleren Ereignisse Geschiebe passieren

und halten es bei grossen Ereignissen, mit einem grossen Gefahrenpotential für die Siedlungen und Infrastrukturen, zurück (BAFU 2017).

Eine weitere Möglichkeit, um den Geschiebetrieb wieder natürlicher zu gestalten, ist die Gerinneverbreiterung. Dadurch nimmt die morphologische Vielfalt zu. Der Bachlauf wird naturnaher und die Vernetzung der Lebensräume und die Biodiversität wird gefördert (BAFU 2017).

### **5.2.2 Bäche und Flüsse oberstrom von Seen**

In Bächen und Flüssen oberstrom von Seen ist das Gefälle geringer als in den Wildbächen. Das geringere Gefälle und der grosse Eintrag von Geschiebe aus den zubringenden Gewässern führen zu einer Auflandung in den Gerinnen. Dies kann die Eintretenswahrscheinlichkeit von Überschwemmungen im Falle eines Hochwassers erhöhen. Um dieser Auflandungsproblematik und den daraus resultierenden Hochwassergefahren entgegenzuwirken, wurden früher grosse Korrekturen an den Fliessgewässern vorgenommen, z.B. Kanderdurchstich oder Linthkorrektion (VISCHER 2003). Weiter wurden die Gerinne kanalisiert und verschmälert, es wurden Mäanderdurchstiche und Begradigungen vorgenommen. Dadurch wurde die Transportkapazität der Gerinne erhöht. Mit festen Uferverbauungen wurde der seitliche Eintrag von Sedimenten durch Ufererosionen unterbunden (BAFU 2017 und SCHÄLCHLI, ABEGG + HUNZINGER 2005).

Um die Auflandungen zu verkleinern, wurden vereinzelt Kiesentnahmen angeordnet. Diese können jedoch zu einem Sedimentdefizit im nachfolgenden Gewässer führen (BAFU 2017 und SCHÄLCHLI, ABEGG + HUNZINGER 2005).

Um den natürlichen Geschiebetrieb zu reaktivieren, werden heute wo möglich Uferverbauungen wieder entfernt und die Ufererosion mit Kiesschüttungen und Bühnen gefördert. Auch werden die Gerinne naturnaher gestaltet und revitalisiert, um die Sedimentdynamik zu verstärken und so natürlichere Lebensräume zu schaffen (BAFU 2017).

### **5.2.3 Flüsse unterstrom von Seen**

Für Flüsse unterstrom der Seen ist ein geringer Sedimenttransport typisch. Dies vor allem direkt nach den Seen, weil in diesen die Sedimente nicht weitergeleitet werden. Im weiteren Verlauf des Flusses werden neue Geschiebequellen durch Erosion der Ufer und Sohle sowie Zuflüsse aktiviert. Jedoch ist der Sedimenttransport deutlich kleiner als in den Flüssen oberstrom der natürlichen Seen (SCHÄLCHLI, ABEGG + HUNZINGER 2005).

Um die Erosion der Ufer zu verhindern, wurden auch die Flüsse unterstrom der Seen begradigt, teilweise kanalisiert und mit festen Uferverbauungen versehen (VISCHER 2003). Im Zuge der Aktivierung des Geschiebetriebs werden auch diese Verbauungen wo möglich entfernt und mit Kiesschüttungen der Eintrag von Sedimenten erhöht (BAFU 2017).

#### **5.2.4 Flusstauhaltungen**

Flusstauhaltungen wurden für die Wasserkraftnutzung erstellt und sind analog zu den künstlichen Seen eine Blockade für den Sedimenttransport. Je nach Betriebsweise des Kraftwerks sind die Auswirkungen auf den Sedimenttransport grösser oder kleiner. Die Sedimente werden durch die geringere Fließgeschwindigkeit direkt an der Stauwurzel abgelagert und nur bedingt weitertransportiert. Wie bei den künstlichen Seen kann auch bei einer Flusstauhaltung durch einen Sedimentumleitungsstollen oder ein Durchleiten der Sedimente mit einer Stauraumpülung der Geschiebetrieb reaktiviert werden (BAFU 2017 und SCHÄLCHLI, ABEGG + HUNZINGER 2005).

### **5.3 Seen**

#### **5.3.1 Künstliche Seen**

In den künstlichen Seen herrscht aufgrund des Sedimenteintrages aus den Zubringern ein Auflandungsproblem. Die anfallenden Sedimente werden direkt bei der Einleitung in den See abgelagert und es entsteht ein Delta. Dies geschieht, weil die Fließgeschwindigkeiten in den Seen sehr tief sind. Dadurch unterbrechen die künstlichen Seen in den Bergen den Sedimenttransport beinahe komplett (BAFU 2017).

Um den Sedimenttransport ins Unterwasser zu reaktivieren, können Sedimentumleitungsstollen gebaut werden, wie beispielsweise beim Stausee Solis an der Albula. So können die Sedimente im Unterwasser des Stauwerks wieder dem Gewässer beigegeben werden. Eine weitere Möglichkeit den Geschiebetrieb unterstrom eines künstlichen Sees zu reaktivieren, besteht darin, ein künstliches Hochwasser zu erzeugen. Dies jedoch in Kombination mit Kiesschüttungen im Gewässer im Unterwasser des Stauwerks damit genügend Material zur Verfügung steht. Diese Massnahme hat aber nur einen andauernden Effekt, wenn sie regelmässig durchgeführt wird (DÖRING ET AL. 2018).

#### **5.3.2 Natürliche Seen**

Bei den natürlichen Seen besteht im Zusammenhang mit den Sedimenten vor allem in den Deltas ein Problem durch die Auflandungen. Die Sedimente werden von den Bächen und Flüssen in die Seen transportiert und lagern sich direkt bei der Einmündung in den See ab. Dies weil die Fließgeschwindigkeiten in den natürlichen Seen analog zu den künstlichen Seen sehr tief sind. Im Gegensatz zu den künstlichen Seen kann jedoch kein Sedimentumleitungsstollen erstellt werden, welcher die Sedimente um den See herumleitet. Die natürlichen Seen unterbrechen den Sedimenttransport komplett.

### **5.4 Grundwasser**

Das Grundwasser ist nicht aktiv am Sedimenttransport beteiligt, die Sedimentprozesse in den Oberflächengewässern haben jedoch einen Einfluss auf das Grundwasser. So führen Eintiefungen durch Erosionen in den Gewässern dazu, dass der Grundwasserspiegel absinkt und somit z.B. Auen von ihrer Wasserzufuhr abgetrennt werden und die Gewässerdynamik abnimmt oder Trinkwasserfassungen ihre Leistungsfähigkeit verlieren. Weiter führt ein hoher Anteil an Feinsedimenten in der Sohle zu einer Verstopfung des Porenraums (Kolmation). Dies behindert den Wasseraustausch zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser (BAFU 2017).



## 5.5 Flora und Fauna

Die Morphologie natürlicher Fliessgewässer wird stark von der Sedimentdynamik geprägt, also von Mobilisierung, Transport und Ablagerung von Geröll, Kies und Sand. Sedimente tragen zur Entstehung neuer Lebensräume für spezialisierte Organismen wie Pionierpflanzen bei und fördern die Biodiversität in und an Fliessgewässern. Zum Beispiel wird für kieslaichende Fische und Insektenlarven eine lockere Sedimentablagerung benötigt. Diese wird durch einen intakten Sedimenttransport erreicht (BAFU 2017 und SCHÄLCHLI, ABEGG + HUNZINGER 2005).

Durch einen regelmässigen Sedimenttransport werden zudem die Selbstreinigungsprozesse von Fliessgewässern gefördert. Bleibt der Sedimenttransport aus, wird beispielsweise das Wachstum von Algen und Wasserpflanzen nicht unterbunden und es kann zu einem übermässigen Wachstum kommen.

## 5.6 Das Wichtigste in Kürze

- Wildbäche sind die Hauptgeschiebequellen für die unterliegenden Gewässer. Durch das grosse Gefälle und die hohen Fliessgeschwindigkeiten und dem daraus folgenden erhöhten Geschiebetrieb kommt es zu einer Eintiefung des Gerinnes. Mit Wildbachsperrn wurde dies unterbunden. Dies führte jedoch zu einem Sedimentdefizit in den nachfolgenden Gewässern. Mit durchgängigen Geschiebesammlern und naturnahen Verbreiterungen wird heute versucht, den Geschiebetrieb zu reaktivieren.
- Sowohl bei künstlichen wie auch bei natürlichen Seen wird der Sedimenttransport unterbrochen. Bei einem künstlichen See kann mithilfe eines Sedimentumleitungsstollens oder einer Stauraumspülung der Sedimenttransport reaktiviert werden. Dies ist bei einem natürlichen See nicht möglich, weil das abfliessende Gewässer zu wenig tief unter dem Wasserspiegel des einleitenden Gewässers liegt und die Sedimente sich in einem See direkt bei der Einleitung ablagern.
- Flüsse oberstrom von Seen unterscheiden sich von Flüssen unterstrom von Seen dahingehend, dass sie mit mehr Sedimenten gespiesen werden. Die Sedimente in den Flüssen können zu Auflandungen in den Gerinnen führen und infolgedessen steigt die Auftretenswahrscheinlichkeit von Überschwemmungen oft. Mit Kanalisierungen, Mäanderdurchstichen und Uferverbauungen wurde die Geschiebetransportkapazität in den Flüssen gefördert. Dies führte zu einer Abnahme der Gewässer- und Lebensraumdynamik. Mit der Auflösung der Uferverbauungen und der Renaturierung und Verbreiterung der Gewässer und der Beigabe von Kiesschüttungen wird die Sedimentdynamik heutzutage wieder gefördert.
- Flüsse unterstrom von Seen haben einen bedeutend geringeren Sedimenttransport. Bezüglich der Problematiken mit Auflandungen wurden jedoch dieselben Massnahmen ergriffen, um diese einzudämmen. Für die Reaktivierung des Geschiebetriebs werden die Lösungsansätze für die Flüsse oberstrom der Seen angewandt.
- Das Grundwasser wird indirekt auch vom Sedimenttransport beeinflusst. So führt die Eintiefung eines Gerinnes zum Absinken des Grundwasserspiegels. Die Kolmation kann die Infiltration von Flusswasser ins Grundwasser unterbinden oder einschränken.

## **6 AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS**

*SCHLÜSSELWÖRTER: Niederschläge, Winterhochwasser, Niedrigwasser, Gletscherschmelze, Gletscherrückgang, Permafrostrückgang, Schwebstoffkonzentration, Sedimenttransport, Geschiebeumlagerung, Erosion, Ablagerung, Geschiebemobilisierung, Hangrutschungen, Laichzeit, Verlandung, Seespülung*

### **6.1 Auswirkungen auf die Einflussfaktoren des Sedimenttransportes**

#### **6.1.1 Einleitung**

Im Abschnitt 6.1 werden kurz die Auswirkungen des Klimawandels auf die für den Sedimenttransport relevanten Einflussfaktoren beschrieben. Genauere und detailliertere Informationen zu den einzelnen Themen ausser Klimawandel und Niederschläge (siehe dazu NCCS 2018) finden sich in den jeweiligen Kapiteln des HydroCH2018-Berichts.

#### **6.1.2 Klimawandel**

Der Klimawandel führt in der Schweiz zu einer Zunahme der durchschnittlichen Temperatur sowie der Temperaturmaxima, zu grösseren Niederschlagsintensitäten, einer Zunahme der Verdunstung und zum Abschmelzen der Gletscher und dem Ansteigen der Permafrostgrenze. Jedoch sind die Veränderungen des Klimas insbesondere auf regionaler Ebene sehr schwer vorherzusagen. Im Winter nehmen die Niederschläge tendenziell zu und im Sommer ab. Es wird erwartet, dass der mittlere Abfluss in den Schweizer Gewässern abnehmen wird. Es ist vor allem im Südtessin und im Mittelland vermehrt mit Trockenperioden zu rechnen. Weltweite Messungen zeigen, dass sich die Temperaturen global und regional verändert haben und eine Erwärmung stattfindet (NCCS 2018). Die Anzahl sehr heisser Sommertage wird sich bis 2060 voraussichtlich von einem auf drei bis 17 Tage erhöhen während sich die Nullgradgrenze um 400 bis 650 m erhöhen wird (NCCS 2018).

#### **6.1.3 Niederschläge**

Aufgrund der grossen regionalen, saisonalen und jährlichen Variabilität des Niederschlags können aus den vorhandenen Messungen keine statistisch signifikanten Aussagen bezüglich einer Niederschlagsentwicklung gemacht werden (PERROUD UND BADER 2013). Dies weil die Bildung von Hochwassern neben den örtlichen Gegebenheiten stark vom Niederschlag bestimmt wird, welcher wiederum vom Klimawandel beeinflusst wird. Durch die Erhöhung der Temperaturen kann die Atmosphäre mehr Wasserdampf aufnehmen. Dies kann zu einer Erhöhung der Niederschlagsintensität führen, wodurch grössere Hochwasser resultieren können. Die Niederschläge im Winter werden vermehrt nicht mehr als Schnee liegenbleiben, sondern direkt als Regen abfliessen. Der stärkste jährliche Eintagesniederschlag wird im Sommer wie auch im Winter um rund 10% zunehmen (NCCS 2018).

#### **6.1.4 Abflussregime**

Die Abflussregimes ändern sich dahingehend, dass die grossen Abflüsse nicht mehr nur im Sommer und Spätsommer auftreten, sondern bereits früher oder später im Jahr erfolgen können (OCCC 2007). Dies weil durch die erhöhten Temperaturen im Winter der Niederschlag nicht mehr in Schneeform gespeichert wird, sondern direkt

als Regen abfließt (KOHS 2007). Der Abfluss nimmt somit bereits im Winter und Fröhsommer zu. Auch nimmt die Eintretenswahrscheinlichkeit von Winterhochwasser zu. Durch diese Änderungen vom Zeitpunkt der grossen Abflüsse ändert sich auch der Zeitpunkt, zu welchem Geschiebe transportiert wird. Die grossen Geschiebeumlagerungen in den Gewässern werden nicht mehr nur im Sommer, sondern bereits im Fröhsling auftreten können. Durch die Winter- und Fröhslinghochwasser wird vermehrt auch Geschiebe verlagert, zu einem Zeitpunkt in welchem bisher wenig bis kein Sedimenttransport stattgefunden hat (RAYMOND PRALONG ET AL. 2011 und LEITUNGSGRUPPE NFP 61 2015).

Für das Projekt Hydro-CH2018 wurden die Veränderungen der Abflussregimes der Schweiz in den letzten 150 Jahren untersucht (WEINGARTNER 2019) und die Trends und Voraussagen stimmen mit den oben aufgeführten etwas früher publizierten Aussagen überein.

#### 6.1.4.1 Niedrigwasser

Niedrigwasserabflüsse werden sowohl im Sommer wie auch im Herbst ausgeprägter ausfallen (KOHS 2007), d.h. werden häufiger und über längere Perioden von früher bis später im Jahr als heute auftreten. Die Niedrigwasserabflüsse werden zudem noch tiefer ausfallen. MEYER ET AL. (2011) kamen zum Schluss, dass die Abflusswerte sommerlicher Niedrigwasserperioden sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft abnehmen werden. Sie halten es für wahrscheinlich, dass infolge des Klimawandels längere meteorologische Trockenperioden auftreten werden. Dies führe dazu, dass die Auswirkungen auf das Niedrigwasser noch stärker ausfallen.

KOHN ET AL. (2019) fanden im Rahmen des Projektes Hydro-CH2018 grosse Unsicherheiten in Grundlagen, Methoden und Resultaten und gehen eher von schwachen Abflussminderungen in Zukunft aus, während im Winter höhere Niedrigwasserabflüsse zu erwarten seien. Zudem hätten die im 21. Jahrhundert beobachteten Extrem-Niedrigwasserereignisse wie z.B. 2003 nicht dasselbe Ausmass angenommen wie frühere Ereignisse 1540, 1921 und 1947.

#### 6.1.4.2 Hochwasser

Das Auftreten von extremen Hochwasserereignissen in kleineren und mittleren Einzugsgebieten ist meist unerwartet, somit kann eine Aussage zu deren Auftreten nur sehr generell gemacht werden (NAEF UND WERNLI 2016). Aufgrund der topographischen Vielfalt in der Schweiz gibt es regional starke Unterschiede in den Abflussregimes bzw. hochwasserverursachenden Prozessen. Die verschiedenen Gebietstypen werden sich mit dem Klimawandel unterschiedlich entwickeln. Die KOHS (2007) unterschied drei Gebiete:

- Unterhalb 1'500 m ü.M.: Zunahme der Winter-Hochwasserspitzen, generelle Abnahme der Sommer-Hochwasser, jedoch weiterhin starke Gewitterereignisse, die v.a. kleinere Einzugsgebiete betreffen.
- (Nord-)Alpen über 1'500 m ü.M.: Höhere Winterabflüsse, kleine Fröhsling-Schmelzhochwasser mit grösseren Spitzen.
- Alpensüdseite: Grössere Hochwasser in Winter und Fröhsling, kleinere Abflussspitzen im Sommer, Jahreshochwasser weiterhin im Herbst, jedoch eher noch grösser.

In den Jahreszeiten ohne explizite Nennung werden keine grossen Änderungen erwartet. In einer neueren Studie unterschieden KÖPLIN ET AL. (2014) fünf Regimetypen (mit jeweiligem Beispielgewässer in Klammern):

- Pluvial (Urtenen): Höhere Winter- und Zunahme mittlerer Jahreshochwasser, stärkere Saisonabhängigkeit.
- Nivo-pluvial (Kleine Emme): Hochwassersaison verschiebt sich von Spätsommer in Herbst/Winter und wird länger, mittlere Jahreshochwasser nehmen nur leicht zu.
- Nival alpin (Muota): Hochwassersaison verschiebt sich von Spätsommer in Herbst und wird länger, Zunahme mittlerer Jahreshochwasser.
- Glazial (Chärstelenbach): Schwächere Saisonabhängigkeit und Zunahme mittlerer Jahreshochwasser.
- Südalpin (Moesa): Schwächere Saisonabhängigkeit, leichte Zunahme mittlerer Jahreshochwasser bis ca. 2050, dann leichte Abnahme.

Gesamthaft wird mit einer Zunahme sowohl der mittleren Jahreshochwasser als auch der Maximalhochwasser gerechnet, wobei anzumerken ist, dass zur Berücksichtigung der Starkniederschläge ein eher konservativer Ansatz gewählt wurde.

Bezüglich Sommerhochwasser werden zwei Mechanismen propagiert. Die KOHS (2007) geht davon aus, dass die Hochwasser im Flachland eher kleiner ausfallen, weil die Böden durch verringerte Niederschläge und erhöhte Verdunstung mehr Wasser aufnehmen. MARTY ET AL. (2009) nehmen für alpine Gebiete in Graubünden an, dass intensivere Niederschläge auf ausgetrocknete Böden zu grösseren Hochwassern führen, da die Wasseraufnahmefähigkeit der Böden kurzfristig eher klein ist.

### 6.1.4.3 Gletscher und Schnee

Modellrechnungen zeigen, dass die Gletscher bis zum Ende des 21. Jahrhunderts einen starken Rückgang erfahren werden. Ab diesem Zeitpunkt werden die meisten Einzugsgebiete in der Schweiz eisfrei sein. Dies hat einen direkten Einfluss auf den Abfluss in den Gewässern (FUNK ET AL. 2011).

Durch den Rückgang der Gletscher kann mehr Geschiebe mobilisiert werden. Durch grosse Regenereignisse, Hangrutschungen, Felsstürze und Murgänge wird dieses Material ins Tal verfrachtet. Dies kann zu Veränderungen der Bach- und Flussläufe führen und so das Abflussverhalten kurz- und langfristig massgeblich verändern (OCCC 2003 und KOHS 2007). Solche Massenbewegungen können Flutwellen in Stauseen auslösen. Insbesondere bei einem vollen Stausee werden die Unterlieger und die Stauanlage durch die Flutwelle gefährdet und das Flussbett allenfalls stark verändert (PROCLIM-, OCCC UND NFS KLIMA 2003).

Der Gletscherrückgang hat ausserdem zur Folge, dass sich je nach Topografie Seen im Gletschervorfeld bilden wie z.B. der Favergessee beim Plaine-Morte-Gletscher (srf.ch). Diese haben oft instabile Ufer und der Wasserstand schwankt teils stark. Dies kann ein Ausbrechen der Wassermassen provozieren, was wiederum zu Hochwasser mit Überschwemmungen und gar Murgängen führen kann (MARTY ET AL. 2009). Diese neuen Seen bieten jedoch auch Möglichkeiten für eine Nutzung im Wasserversorgungs- und Wasserkraftbereich (HAEBERLI ET AL. 2016).

Die vorliegenden Rechercheergebnisse wurden im Rahmen des Projektes Hydro-CH2018 von AYALA ET AL. (2019) bestätigt. Bezüglich Schnee stellen MARTY ET AL. (2019) fest, dass Mischlawinen zunehmen dürften und solange die Erwärmung 4 °C

nicht übersteigt auch Regen auf Schnee-Ereignisse. Erstere beginnen als Pulverschneelawinen und enden als Muren im Tal und haben aufgrund der tiefen Reibung eine hohe Auslauflänge und transportieren auch viel Sedimente talwärts. Letztere sind typische Hochwasserverursacher, da sie durch gleichzeitige Schneeschmelze und Regen in kurzer Zeit zu hohen Abflüssen und somit auch hohem Sedimenttransport führen können.

### 6.1.5 Permafrost

Das Eis in den Permafrostböden hält oft grosse Mengen an Schutt oder Fels zusammen. Taut der Boden auf, können die Gesteinsmassen je nach Topografie ins Rutschen geraten und ins Tal stürzen, wie z.B. seit 2009 wiederholt am Spreitgraben in Guttannen ([spreitgraben.ch](http://spreitgraben.ch)) oder der Bergsturz von Bondo 2017 an der Nordflanke des Piz Cengalo, der einen Murgang im Val Bondasca ausgelöst und acht Menschenleben gefordert hat ([gr.ch](http://gr.ch)).

Dabei hat der Schnee wegen seiner isolierenden Wirkung einen grossen Einfluss auf die Temperaturentwicklung im Permafrost. So verhindert eine Schneedecke im Winter das Eindringen der Kälte und das Abkühlen des Permafrostes und im Sommer schützt der Schnee vor der Hitze. Bohrlochuntersuchungen und Simulationen haben gezeigt, dass sich der Permafrost in der Schweiz um 0.5 bis 0.8 °C erwärmt hat (HARRIS ET AL. 2003).

Im Rahmen des Projektes Hydro-CH2018 hielten NÖTZLI UND PHILLIPS (2019) fest, dass der Gebirgspermafrost in der Schweiz in eisreichem Untergrund bis in eine Tiefe von etwa 10 m und im steilen Fels oberhalb von 3'500 m ü.M. bis ins Jahr 2100 verschwunden sein wird und die Zunahme der Auftauschicht und die Permafrostdegradation zu Massenbewegungen und gefährlichen Prozessketten bis in tiefe Lagen beitragen sowie negative Auswirkungen auf die Wasserqualität stromabwärts haben können.

### 6.1.6 Wasserqualität

Die Wasserqualität wird bestimmt durch den Stoffeintrag (Mikroverunreinigungen, Nährstoffe, Trübung durch Feststoffe etc.), die Wassertemperatur aber auch durch den ökomorphologischen Zustand des Gewässers, wobei die Kolmation ein wichtiger Faktor ist. Die höheren Temperaturen im Winter beeinflussen die Zirkulation des Seewassers und somit auch dessen Wasserqualität. Die Konzentration von Schwebstoffen in den Gewässern wird zunehmen. Durch die Verlängerung der Zeit, in welcher Hochwasserabflüsse stattfinden können, nimmt auch die Zeit zu, in welcher das Wasser belastet wird. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Wasserqualität (BINDERHEIM UND GÖGGEL 2007 und MÜLLER ET AL. 2018).

Der Anteil von Gletscherwasser am Abfluss wird zu Beginn dieses Jahrhunderts zunehmen und gegen Ende abnehmen. Sobald die Gletscher verschwunden sind, wird auch der Schmelzwasseranteil ausbleiben (LEITUNGSGRUPPE NFP 61 2015). Dieses Schmelzwasser kann einen Einfluss auf die Wasserqualität haben.

Im Rahmen des Hydro-CH2018-Projektes wurde von BENATEAU ET AL (2019) eine sehr detaillierte Studie durchgeführt, in der weiterführende Informationen zu finden sind.

## 6.2 Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport

### 6.2.1 Einleitung

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport in den verschiedenen Gewässertypen diskutiert. Eine Veränderung des Sedimenttransportes wirkt sich auch auf die Flora und Fauna in den Fließgewässern aus. Die zu erwartenden Veränderungen auf den Sedimenttransport sind in Abb. 9 summarisch grafisch dargestellt.

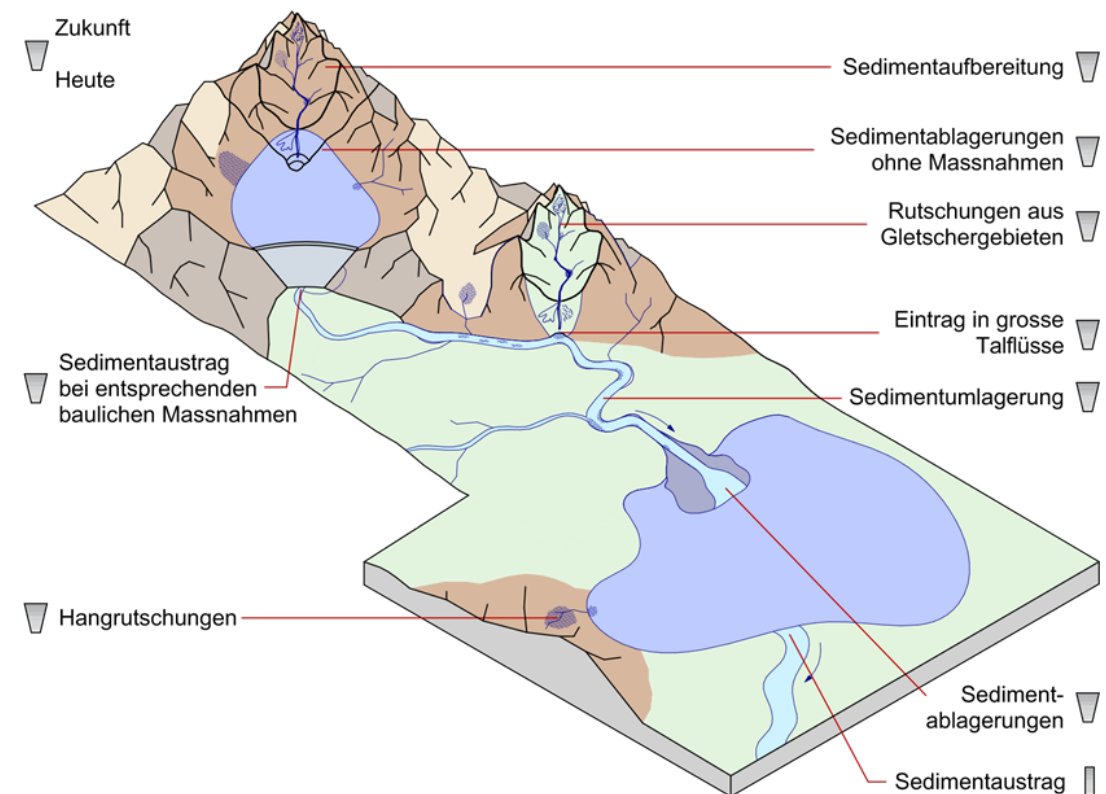


Abb. 9: Prognostizierte Veränderungen an einem Beispiel-Gewässersystem.

### 6.2.2 Fließgewässer

#### 6.2.2.1 Wildbäche

Wildbäche, welche sich direkt unterstrom von Gletschern befinden, sind stark von der Schnee- und Eisschmelze bestimmt. Durch den Rückgang der Gletscher wird der Abfluss in diesen Gewässern direkt beeinflusst. Die Jahresabflüsse werden in diesen Bächen durch die Gletscherschmelze zunehmen. Nach dem Abschmelzen der Gletscher wird der Abfluss jedoch wieder stark abnehmen. Die Abflüsse werden dann nicht mehr von den Gletschern beeinflusst (LEITUNGSGRUPPE NFP 61 2015).

Durch den erhöhten Abfluss aus den Gletschern und die freiwerdenden, erodierbaren Seitenmoränen und Flächen wird auch mehr Geschiebe in den Gewässern unterstrom der Gletscher transportiert. Dies kann sowohl in Form von natürlichem Geschiebetransport wie auch in Form von Hangrutschungen und Felsstürzen erfolgen.

Hangrutschungen und Felsstürze sind hangabwärts gerichtete Massenbewegungen aus Locker- oder Felsmaterial. Wasser kann ein auslösender Faktor bei Hanginstabilitäten sein. Werden die Winter aufgrund des Klimawandels wärmer und niederschlagsreicher, so wird während dieser Jahreszeit der Boden gesättigt. Dadurch kann der Boden instabil werden und Hangrutschungen und Felsstürze können häufiger auftreten (MARTY ET AL. 2009).

STOFFEL UND BENISTON (2006) untersuchten die Häufigkeit von Murgangereignissen im Ritigraben im Mattertal seit dem Jahr 1570. Mithilfe der Bohrkerne, die den Bäumen auf dem Schüttkegel entnommen wurden, konnten die von aufprallenden Steinen erzeugten Verletzungen der Bäume erkannt und datiert werden. Die Untersuchungen haben ergeben, dass Murgänge vermehrt in feuchten Perioden und aufgrund heftiger aber örtlich begrenzter Gewitter auftraten.

Aus Simulationen folgerten STOFFEL UND BENISTON (2006), dass Murgangereignisse in Zukunft nicht häufiger auftreten würden. Die Sommer würden zunehmend trocken sein und die Niederschläge hauptsächlich im Frühling und Herbst auftreten. In trockenen Sommern könnten die wenigen Niederschlagsereignisse jedoch viel extremer ausfallen, was zu grösseren Murgangereignissen führen kann.

#### **6.2.2.2 Bäche und Flüsse oberstrom von Seen**

In den Bächen und Flüssen vor den Seen wird der Sedimenttransport zunehmen. Dies weil die Wildbäche, welche aufgrund des Rückzugs der Gletscher einen erhöhten Sedimenttransport aufweisen, in diese Fliessgewässer münden. So werden mehr Sedimente in diese Bäche und Flüsse eingebracht und weitertransportiert. Da aber heute schon beim Gefällsknick am Übergang von steilen zu flachen Gewässern nicht immer und überall alle eingetragenen Sedimente vollständig weitertransportiert werden können, wird sich diese bestehende Problematik noch deutlich akzentuieren. Bereits bestehende Defizite in puncto Schutz vor Hochwasser werden sich verschärfen und an heute unproblematischen Stellen können neue Defizite entstehen.

Der Sedimenttransport in diesen Gewässern wird durch bestehende Entnahmen, Geschiebesammler und Sperren weiterhin beeinflusst bleiben. Im Zuge der Reaktivierung des Geschiebetriebes kann der Transport gefördert werden (SCHÄLCHLI, ABEGG + HUNZINGER 2005).

#### **6.2.2.3 Flüsse unterstrom von Seen**

Flüsse, welche einem See entspringen, werden keinen erhöhten Sedimenttransport haben. Erst wenn der erste bedeutende Zufluss mit Sedimenttransport in diese Flüsse einmündet, werden mehr Sedimente geführt. Der Sedimenttransport dieser Flüsse wird weiterhin beeinträchtigt bleiben. Einzig aus den Zuflüssen wird mehr Material eingebracht, welches jedoch weitertransportiert wird (SCHÄLCHLI, ABEGG + HUNZINGER 2005).

#### **6.2.2.4 Flusstauhaltungen**

Bei Flusstauhaltungen können die Massnahmen, mit denen Sedimente weitergeleitet werden sollen, auf verschiedenen Prinzipien basieren. So können die Sedimente z.B. ausgebaggert oder so lange zurückgehalten werden, bis ein Weitertransport oder eine Spülung möglich ist (SCHÄLCHLI, ABEGG + HUNZINGER 2005). Werden infolge des Klimawandels mehr Sedimente transportiert, führt dies bei Flusstauhaltungen

zu einem früheren Verlanden und somit zu kürzeren Intervallen zwischen Spülungen oder Ausbaggerungen.

Für Anlagen, die den Charakter einer Talsperre haben (z.B. Wettingen an der Limmat oder Mühleberg am Wohlensee) gelten eher die nachfolgenden Ausführungen zu künstlichen Seen.

## **6.2.3 Seen**

### **6.2.3.1 Künstliche Seen**

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Sedimentzufuhr und somit auch die Verlandungsrate in den Schweizer Stauseen künftig zunehmen werden (LEITUNGSGRUPPE NFP 61 2015). Trübestrome in Stauseen führen in langgezogenen und engen Stauseen im Alpenraum zu jährlichen Sedimentablagerungen von 0.5 bis 1 m Mächtigkeit. 40 bis 50 Jahre Betrieb können ausreichen, dass die Auslassorgane durch die Ablagerungen beeinträchtigt werden.

Es werden vermehrt Spülungen notwendig sein, um die Auslassorgane oder den gesamten Stauraum von den Ablagerungen zu befreien. Die unterschiedlichen Sedimentspülungen erfolgen je nach benötigtem Umfang bei unterschiedlichen Seeständen. So können grossräumige Spülungen nur bei vollständig entleertem See erfolgen. Das Spülwasser kann nicht für die Stromproduktion verwendet werden und beeinflusst die Betriebs- und Unterhaltskosten somit massgeblich (RAYMOND PRALONG ET AL. 2011). Zudem haben das Spülwasser und die Feinsedimentkonzentration einen Einfluss auf das Unterwasser (BAFU 2017). Weiter werden vermehrt bauliche Massnahmen wie zum Beispiel Umleitstollen oder Höherlegung von Fassungsbauwerken benötigt, um die Sedimente um den künstlichen See herum- oder hindurchzuleiten bzw. bei ungehinderter Verlandung immerhin die Fassungsbauwerke möglichst sedimentfrei zu halten.

Für vier Einzugsgebiete im Wallis (Grande Dixence, Gougra, Mattmark und Mauvoisin) wurde der Einfluss des Klimawandels auf den Geschiebetransport untersucht. Die Analyse hat für die verschiedenen Einzugsgebiete unterschiedliche Zukunftsprognosen ergeben. Einige Teileinzugsgebiete zeigen keine Verschiebung oder Veränderung, andere zeigen eine Zu- respektive Abnahme des Geschiebetransportes, teilweise kombiniert mit einer Verschiebung der Spitzen von den Sommermonaten in den Frühling (RAYMOND PRALONG ET AL. 2011). Allerdings wurden zwei bedeutende Faktoren nicht berücksichtigt: die Veränderung des Feststofftransportes durch Starkniederschläge und die Sedimentverfügbarkeit (letztere nur bei einem von 64 Einzugsgebieten). Es ist davon auszugehen, dass beide Faktoren einen entscheidenden Einfluss auf die Resultate hätten.

### **6.2.3.2 Natürliche Seen**

Bei den natürlichen Seen besteht aufgrund ihrer Grösse oft kein Problem mit Verlandungen der gesamten Seen. Jedoch wird durch den erhöhten Sedimenttransport der Flüsse und Bäche vor den Seen mehr Material in diese transportiert. Dieses Material wird durch die abnehmende Fliessgeschwindigkeit im Deltabereich abgelagert. Dadurch werden die Deltas in die Seen grösser. Dies führt zu einem Abflachen des Flusslaufes, weil dieser eine längere Fliessstrecke zu überbrücken hat. Dadurch kann im Falle eines Hochwassers aufgrund der Sedimentablagerungen die Wahrscheinlichkeit von Ausuferungen steigen. Dies ist bereits heute ein übliches Szenario für eine Überflutung im Deltabereich der Seen und viele Hochwasserschutzkonzepte



beachten diesen Umstand. Jedoch sollte mit Blick auf den erhöhten Sedimenttransport infolge freiwerdenden Erosionsflächen durch den Gletscherrückgang eine Bewirtschaftung der Sedimentablagerungen in Betracht gezogen werden (NCCS 2018).

Untersuchungen haben gezeigt, dass bei vielen Seen zunehmend Sedimente in den Flachwasserzonen erodiert werden. Dies hängt vor allem mit den starken saisonalen Wasserspiegelschwankungen zusammen (HOFMANN UND DISSANAYAKE 2018).

#### 6.2.4 Grundwasser

Durch den erhöhten Sedimenttransport kann es bei Fließgewässern zu einer Erhöhung der Sohlenlage kommen. In der Regel ist dies mit einem Anstieg des Grundwasserspiegels verbunden. Da aber auch deutlich mehr Schwebstoffe erwartet werden, kann dies aufgrund von Kolmation dazu führen, dass das Grundwasser an den betroffenen Abschnitten nicht mehr im selben Ausmass von Fluss- bzw. Bachwasser gespiesen wird. Dadurch kann es in diesen Abschnitten nach einer gewissen Zeit, wenn die Kolmation ihre Wirkung entfaltet, zu Absenkungen des Grundwasserspiegels kommen. Gleichzeitig ist durch den erhöhten Sedimenttransport ein vermehrtes Umlagern des Sohlmaterials möglich. Dies würde eine Kolmation der Sohle vermindern und somit zu einer grösseren Infiltration von Flusswasser ins Grundwasser führen. Es handelt sich um komplexe, teils widerläufige Prozesse, die im Einzelfall zu prüfen sind.

#### 6.2.5 Abfluss- und Sedimenttransportregime

In Abb. 10 werden für einen alpinen Beispielbach mit einem teilvergletscherten Einzugsgebiet das heutige und zukünftige Abflussregime in einer Jahresganglinie dargestellt. Die Berechnungen der heutigen und zukünftigen mittleren monatlichen Abflusswerte erfolgten mit dem hydrologischen Modell PREVAH (VIVIROLI ET AL. 2009). Die durchgezogene blaue Linie beschreibt die berechneten heutigen mittleren monatlichen Abflüsse in  $\text{m}^3/\text{s}$ . Die gestrichelte blaue Linie zeigt die entsprechenden zukünftigen monatlichen Abflusswerte, welche die Mittelwerte von 39 Klimaszenarien für die Periode 2071 bis 2100 darstellen (BRUNNER ET AL. 2019). In diesem Beispiel tragen die Gletscher im Einzugsgebiet im Frühling noch wesentlich zum mittleren zukünftigen Abfluss bei. Die grünen Blöcke zeigen die Hauptlaichzeit der Bachforelle auf (BADOUX ET AL. 2014).

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf den zukünftigen Sedimenttransport für dieses Beispielgebiet aufzuzeigen, werden die täglichen Abflüsse der Grösse nach geordnet und in Form einer Dauerkurve dargestellt (Abb. 11). Die Dauerkurve zeigt, an wie vielen Tagen im Jahr ein bestimmter Abfluss überschritten wird. Für diesen alpinen Beispielbach wird angenommen, dass bei einem Abfluss grösser als  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  der Sedimenttransport einsetzt. Dies bedeutet, dass Sedimentumlagerungen nur stattfinden, wenn der Abfluss im Gerinne grösser ist als  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Durch die grösseren, häufigeren und länger andauernden Hochwasserabflüsse in der Zukunft wird an mehr Tagen im Jahr ein Abfluss von mehr als  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  herrschen – vgl. die blauen Linien, die sich auf die linke Skala beziehen. Somit wird auch an mehr Tagen im Jahr Geschiebe transportiert – vgl. die grünen Linien, die sich auf die rechte Skala beziehen.

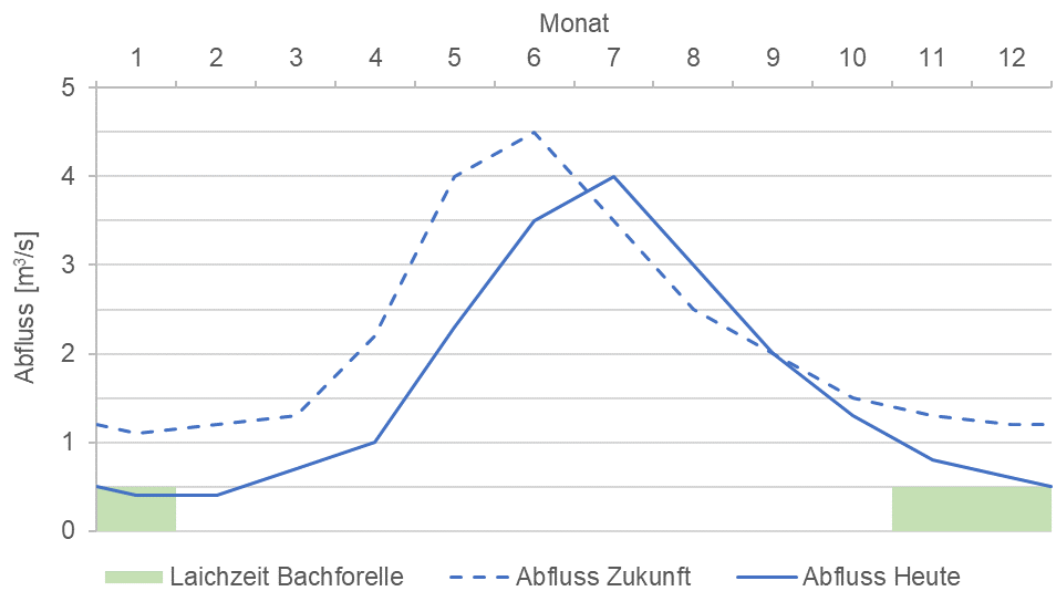


Abb. 10: Heutige und zukünftige mittlere **Monatsabflüsse** für einen alpinen Beispielsbach mit vergletschertem Einzugsgebiet, dargestellt in einer Jahresganglinie.

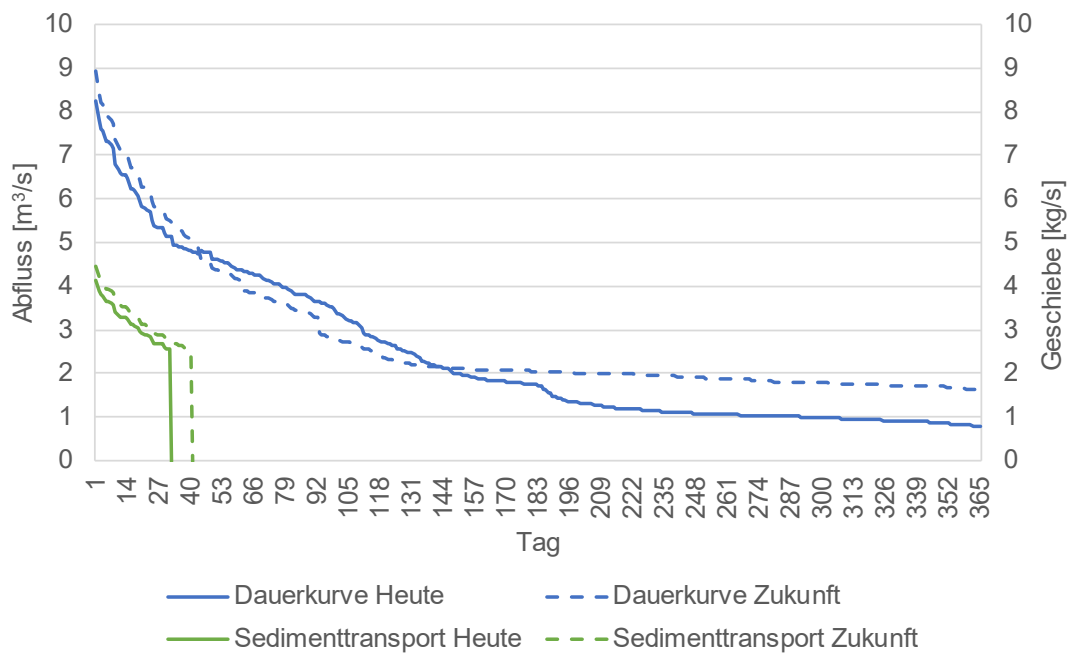


Abb. 11: Heutige und zukünftige mittlere **Tagesabflüsse** für einen alpinen Beispielsbach, dargestellt in einer Dauerkurve.

---

## 6.2.6 Flora und Fauna

### 6.2.6.1 Flora

Die Sedimentdynamik wird unter anderem von der Vegetation rund um das Gewässer beeinflusst. Durch Wurzeln von Pflanzen im Uferbereich werden die Ufer vor Erosion geschützt. Dichte Ansammlungen von Wasserpflanzen am Gewässergrund und Schwemmholz führen zu einem vermehrten Rückhalt von Sedimenten und Geschiebe. Durch Algen kann es zu einem weiteren Rückhalt von Sedimenten kommen (BAFU 2017).

Der Sedimenttransport steuert die Bildung der Lebensräume entlang von Gewässern. Feinsedimente auf den Vorländern sind ein optimaler Nährstoffboden für die Bildung von Hartholzauen. Umlagerungen von Kiesbänken und damit verbundene Änderung in der Durchlässigkeit von Wasser und Sauerstoff führen zu neuen Lebensräumen für Erstbesiedler (BAFU 2017).

Durch die Zunahme neuer Pflanzen aufgrund der Erwärmung der Gewässer und der neuen Bildung von Wachstumsflächen kann auch eine Erhöhung der Nahrungsquellen resultieren, welche einen direkten Einfluss auf die Zunahme der Bestände von Lebewesen hat (BAFU 2017).

### 6.2.6.2 Fauna

Die Auswirkungen des Klimawandels lassen sich am Beispiel der Bachforelle, einer der wichtigsten Fischarten in Schweizer Gewässern, aufzeigen. Durch den Klimawandel ist dieser Fisch direkt betroffen. Sei dies durch die Änderung der Gewässertemperatur oder durch die Veränderung des Sedimenttransportes. Die Bachforellen vermehren sich dadurch, dass sie von Ende Oktober bis Anfang Januar ihren Laich auf der Gewässersohle im Kies in Laichgruben vergraben. Steigt nun aufgrund des Klimawandels die Wahrscheinlichkeit für Winterhochwasser, ist die Laichzeit der Bachforelle und anderer Fische, welche in dieser Zeit laichen, direkt betroffen. Durch die Hochwasserabflüsse werden die Laichgruben der Fische beschädigt und der abgelegte Laich kann ausgespült werden. In Gebirgsflüssen werden diese Erosionen früher im Jahr und während eines längeren Zeitraumes im Jahr auftreten. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Reproduktion der Fische und kann zu einer Abnahme der Fischpopulation führen. Weiter können frühe Frühlingshochwasser fatale Folgen für die Brütlinge haben, wenn das Hochwasserereignis direkt mit der Weiterentwicklung der Fische zusammentrifft (BADOUX ET AL. 2014 und BURKHARDT-HOLM 2009).

Gesamthaft zeichnet sich aufgrund des Klimawandels ein eher negatives Bild für die Laichaktivität der Bachforelle in den Gebirgsflüssen. Dies vor allem im Hinblick auf den veränderten Sedimenttransport (BADOUX ET AL. 2014 und BURKHARDT-HOLM 2009).

Neben dem Geschiebetrieb hat auch die Schwebstoffkonzentration einen Einfluss auf die Lebewesen im Gewässer. Eine erhöhte Schwebstoffkonzentration kann beträchtliche gesundheitliche Folgen für die Fische haben. Besonders das frühe Einsetzen der Hochwasser und die daraus resultierenden Schwebstoffbelastungen auf die Jungfische und Brütlinge im Frühling kann negative Folgen für die Fischpopulation haben (BURKHARDT-HOLM 2009).

### 6.2.6.3 Fazit Flora und Fauna

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte nur auf einzelne Beispiele eingegangen werden. Es sei darauf hingewiesen, dass insbesondere Schwebstoffe eine grosse Auswirkung auf das ganze Ökosystem haben (GRASSO ET AL. 2011). Abschliessend kann gesagt werden, dass sich durch den Klimawandel und den daraus folgenden Sedimenttransportänderungen sowohl positive wie auch negative Aspekte für die Flora und Fauna ausbilden können (BAFU 2017).

## 6.3 Das Wichtigste in Kürze

<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Niederschläge werden sich intensivieren und im Winter wird vermehrt Regen anstelle von Schnee fallen.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Bei den Abflussregimen ändert sich hauptsächlich der Zeitpunkt der grossen Abflüsse. So wird durch die früher einsetzende Schneeschmelze bereits im Frühling ein grösserer Abfluss herrschen. Auch werden im Winter gegenüber heute erhöhte Abflüsse und auch vermehrt Hochwasser erwartet.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Niedrigwasserzustände werden ausgeprägter sein, d.h. häufiger auftreten und noch tiefere Abflüsse aufweisen.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Zeitspanne, in der Hochwasser auftreten, wird sich ausdehnen. So werden Winterhochwasser wahrscheinlicher, die grossen Hochwasserereignisse werden jedoch immer noch im Sommer erwartet.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Gletscherschmelze wird zunehmen und ein Grossteil der Gletscher wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts nicht mehr vorhanden sein. Dies führt zwischenzeitlich – bis die Gletscher gänzlich abgeschmolzen sind – zu einem grösseren Anteil von Schmelzwasser in den Gewässern. So wird in Gewässern unterstrom von Gletschern im Frühling und Sommer hauptsächlich Schmelzwasser abfliessen. Nach dem Abschmelzen der Gletscher wird der Abfluss in niederschlagsarmen Perioden stark zurückgehen.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Permafrostgrenze wird ansteigen, was zu grösseren Instabilitäten der Bergflanken führt.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Wasserqualität ändert sich aufgrund der höheren Temperaturen und den unter Umständen veränderten Stoffeinträgen.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>In den Wildbächen wird es zu einer Erhöhung des Sedimenteintrages kommen. Durch den Gletscherrückgang wird neues Material freigelegt und durch intensivere Niederschläge wird es zu mehr Hangrutschungen und Murgängen kommen. Die Wildbäche müssen so gestaltet werden, dass sie das neue Material problem- und gefahrlos abtransportieren können und sich nicht zu sehr eintiefen.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Bei den Bächen und Flüssen oberstrom von Seen ist es wichtig, dass diese das anfallende Material weiterleiten und es nicht zu grossen Auflandungen kommt, die den Hochwasserschutz über die zulässigen Grenzen beeinträchtigen. Bei Revitalisierungsprojekten ist auch die Niedrigwassersituation zu beachten.</li> </ul>

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Bei den Flüssen unterstrom der Seen wird sich nur bedingt etwas ändern. Dies weil die natürlichen Seen praktisch einen kompletten Unterbruch im Sedimenttransport bewirken.</li></ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Bei Flusstauhaltungen mit erhöhtem Sedimenttransport infolge des Klimawandels wird es zu einer schnelleren Verlandung der Stauhaltung kommen. Die Stauräume müssen häufiger gespült oder ausgebagert werden.</li></ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Den künstlichen Seen wird durch den erhöhten Sedimenttransport in den Wildbächen mehr Material zugeführt. Es ist deshalb wichtig, dass mithilfe von geeigneten Massnahmen dafür gesorgt wird, dass das Material weitertransportiert werden kann, z.B. mit Sedimentumleitstollen.</li></ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Bei den natürlichen Seen wird sich im Hinblick auf den Sedimenttransport infolge des Klimawandel nur bedingt etwas ändern. Dies weil die natürlichen Seen bereits jetzt den Sedimenttransport unterbrechen und das eingetragene Material im Bereich der Deltas abgelagert wird.</li></ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Je nach Lage des Grundwassers kann es infolge einer Auflandung durch vermehrten Sedimenttransport sowohl zu einem Anstieg als auch zu einer Senkung des Grundwasserspiegels kommen. Werden jedoch mehr Sedimente umgelagert und es kommt zu einer vermehrten Sohlerneuerung und somit zu weniger Kolmation, kann mehr Wasser ins Grundwasser infiltrieren.</li></ul> |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Die Flora und die Fauna können vom erhöhten Sedimenttransport sowohl positiv als auch negativ beeinflusst werden.</li></ul>  |

## 7 VERFAHREN ZUM MONITORING VON SEDIMENTEN

*SCHLÜSSELWÖRTER: Schwebstoffe, Probenahme, Geschiebe, Sedimente, Murgang*

### 7.1 Einleitung

Aktuell gibt es abgesehen vom Schwebstoffmessnetz des BAFU keine systematischen Messungen des Sedimenttransportes. Es werden nur vereinzelt Messungen im Rahmen von wissenschaftlichen Studien durchgeführt. Um die tatsächlichen Transportraten von Schwebstoffen und Geschiebe zu erfassen und die Auflandungs- und Erosionsprozesse zu quantifizieren, ist der interessierende Gewässerabschnitt zu überwachen. Dies erfolgt mittels Monitoring, wobei mehrere Möglichkeiten einzeln oder in Kombination zum Einsatz kommen können. Auch für ein Warnsystem bei Murgängen kann ein solches Monitoring eingesetzt werden. Im Folgenden werden einige Methoden gezeigt.

### 7.2 Schwebstoffe

Schwebstoffe werden nur bei ausreichenden Turbulenzen transportiert, ansonsten sinken sie zu Boden. Daher ist der Schwebstofftransport sowohl zeitlich als auch räumlich sehr variabel. Soll der Schwebstofftransport genau ermittelt werden, ist der Querschnitt in mehrere Abschnitte zu unterteilen, an denen jeweils auf unterschiedlichen Höhen (Vielpunktentnahme) oder integriert auf die gesamte Höhe (Integrationsentnahme) die Schwebstoffkonzentration und die Fließgeschwindigkeit gemessen werden. Werden die Messungen wiederholt durchgeführt, kann die räumliche und zeitliche Variabilität des Feststofftransportes aufgezeichnet werden. Mögliche Messmethoden werden in den nachfolgenden Abschnitten kurz beschrieben (HABERSACK ET AL. 2008).

#### 7.2.1 Direkte Probenahme

Bei der direkten Probenahme wird dem Gewässer eine Probe entnommen, um anschliessend die Schwebstoffe im Labor untersuchen zu können. Es werden folgende drei Probenahmen unterschieden: Stichprobenahme, Pumpenprobenahme und isokinetische Probenahme.

Die Abteilung Hydrologie des BAFU betreibt seit den 1960er-Jahren ein Messnetz mit aktuell 13 Stationen, an denen zweimal pro Woche Wasserproben entnommen werden (GRASSO ET AL. 2007).

#### 7.2.2 Indirekte Erfassung

Bei der indirekten Erfassung werden mit verschiedenen Sensoren die durch die Schwebstoffe verursachten Veränderungen aufgenommen. So kann die Feststoffkonzentration im fließenden Wasser ermittelt werden. Es werden folgende Methoden angewandt: Streulichtprinzip, optische Transmission, Ultraschallmessungen und Laserbeugungsmessung.

Die Abteilung Hydrologie des BAFU hat ein eigenes Verfahren entwickelt, um mit Trübungsmessungen die Schwebstofffrachten zu ermitteln (GRASSO ET AL. 2007).

### 7.3 Geschiebe

Der Geschiebetransport hängt insbesondere vom Abfluss ab und kann während eines Ereignisses stark variieren. Mögliche Messmethoden werden in den beiden nachfolgenden Abschnitten kurz beschrieben (SPREAFICO ET AL. 2005).

### 7.3.1 Direkte Messmethode

Bei der direkten Messung des Geschiebetriebes wird das Geschiebe aufgefangen und für genauere Untersuchungen entnommen. Parameter wie Kornverteilung und Gewicht können so bestimmt werden. Die Werkzeuge zur direkten Geschiebebefassung sind folgende: Geschiebefangkorb, Geschiebeschlitze und Geschiebefalle.

### 7.3.2 Indirekte Messmethode

Die indirekte Methode misst den Geschiebetrieb, ohne dass das Geschiebe auf irgendeine Art aufgefangen werden muss. So kann über längere Zeit ohne Unterbruch gemessen werden. Das Geschiebe steht jedoch anschliessend nicht für Untersuchungen bereit (keine Auswertung der Korngrössenverteilung möglich). Folgende Werkzeuge bzw. Methoden werden angewandt: Unterwassermikrofon, Radiotracer, Echolot und Tracer-Steine.

## 7.4 Murgang

Beim Monitoring kann zwischen Erfassung mit und ohne Kontakt zur Mure unterschieden werden. Mögliche Messmethoden werden in den beiden nachfolgenden Abschnitten kurz beschrieben (HÜBL UND MIKOŠ 2014).

### 7.4.1 Murgangerfassung mit Kontakt

Die Murgangerfassung mit Kontakt kann verwendet werden, um andere Messinstrumente auszulösen. So kann zum Beispiel eine vom Murgang aktivierte Reissleine die Aufnahme einer Videokamera oder die Sohlenlagenerfassung mit Distanzsensoren auslösen. Andere Verfahren messen die vom Murgang ausgehenden Kräfte und können diese auch über eine längere Zeitspanne detailliert aufzeichnen. Somit können auch Aussagen über die Dimensionen des Murgangs gemacht werden. Die Erfassung erfolgt über Reissleinen, Neigungsmesser, Murgangwaagen und Kraftaufnehmer.

### 7.4.2 Kontaktlose Murgangerfassung

Zur Messung der Abflusstiefe werden über dem Gerinne Sensoren installiert, die den Abstand zur Sohle messen. Bei der Installation ist darauf zu achten, dass die Sensoren genügend weit über dem Gerinne installiert werden, damit sie bei einem Ereignis nicht beschädigt werden. Die kontaktlose Erfassung erfolgt mit folgenden Werkzeugen bzw. Methoden: Ultraschallsensoren, Radar-/Lasersensoren, Videokameras und Geophone, terrestrische Vermessung.

## 7.5 Das Wichtigste in Kürze

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Schwebstoffe können direkt mit Gewässerproben oder indirekt mit Trübungsmessungen erfasst werden.</li></ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Geschiebe kann direkt mit Probenahme oder indirekt hauptsächlich akustisch erfasst werden.</li></ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Murgänge können mit Kontakt oder kontaktlos erfasst werden. Erfassungen mit Kontakt sind Installationen im Gerinne, welche einen Murgangdurchgang aufzeichnen können. Bei der kontaktlosen Murgangerfassung werden Sensoren verwendet, welche bei einem Murgang das Ereignis aus der Distanz aufzeichnen.</li></ul> |

## 8 WERKZEUGE ZUR MODELLIERUNG DES SEDIMENTTRANSPORTES

*SCHLÜSSELWÖRTER: Numerische Modellierung, 1D-Modellierung, 2D-Modellierung, 3D-Modellierung, hydraulische Modellierung, physikalische Modellierung, hybride Modellierung*

### 8.1 Einleitung

Für die Planung wasserbaulicher Massnahmen ist eine möglichst genaue Kenntnis über den Sedimenttransport in einem Fliessgewässer nötig. Hierbei sind sowohl Kurzzeitprognosen für Einzelereignisse von Bedeutung wie z.B. Hochwasser, als auch langfristige Aussagen über die Entwicklung der Sohlenlage.

Die dreidimensionalen Strömungs- und Feststofftransportprozesse in natürlichen Gerinnen sind sehr komplex. Die Auswirkungen von natürlichen oder menschlichen Eingriffen im Gerinne müssen deshalb vereinfacht betrachtet werden. Es werden Modelle verwendet, die die Natur vereinfacht, aber für die Fragestellung genügend präzise nachbilden. Grundsätzlich kann unterschieden werden zwischen numerischen, hydraulischen oder hybriden Modellen.

Numerische Modelle basieren auf mathematischen Beschreibungen der natürlichen Prozesse und werden heute fast ausschliesslich mit Computern betrieben. Hydraulische Modelle werden physisch – meistens massstabsgetreu verkleinert – in einem Labor aufgebaut. Bei hybriden Modellen werden numerische und hydraulische Modelle kombiniert. Je nach Fragestellung muss abgewogen werden, welches Modell in welchem Detaillierungsgrad gewählt wird.

### 8.2 Numerische Modellierung

Die Geschiebemischung der Sohle und die Geschiebeabgabe kann mit Einkorn-, Zweikorn- oder Mehrkornmodellen nachgebildet werden. Beim Einkornmodell wird die Kornverteilung des Geschiebes auf eine mittlere Korngrösse vereinfacht, beim Mehrkornmodell können mehrere Fraktionen berücksichtigt werden. Je nach Fragestellung ist ein adäquates Modell zu wählen. Zur Berechnung des Sedimenttransportes werden empirische Geschiebetransportformeln eingesetzt, die sorgfältig projektspezifisch gewählt werden müssen.

Man unterscheidet zwischen drei numerischen Modelltypen: ein-, zwei- und dreidimensional – 1D, 2D und 3D. Die Anzahl Dimensionen bezieht sich dabei auf den oder die Fliessvektoren – die Topografie muss immer dreidimensional erfasst werden.

#### 8.2.1 Numerische 1D-Modelle

Bei der eindimensionalen Modellierung wird das Gerinne mit Querprofilen nachgebildet. Das 1D-Modell rechnet mit über das Querprofil gemittelten hydraulischen Grössen. Infolgedessen herrschen im gesamten Abflussquerschnitt die gleiche Fliessgeschwindigkeit und Schubspannung. Effekte auf Grund von Sekundärströmungen wie beispielsweise Kolkbildungen in Kurvenaussenbereichen können deshalb nicht abgebildet werden. Die Sohle erodiert oder landet auf der ganzen Breite gleichmässig auf. Diese Modelle sind aufgrund ihres Aufbaus eher für die Modellierung von makro- und mesoskaligen Fragestellungen geeignet.

#### 8.2.2 Numerische 2D-Modelle

Als Grundlage für die 2D-Modellierung wird ein detailliertes Geländemodell benötigt. Dies ermöglicht die Modellierung der Flussgeometrie auch in lateraler Richtung. Die



hydraulischen Kenngrößen sind im Gegensatz zur eindimensionalen Modellierung flächig verfügbar. Hauptsächlich werden mit 2D-Modellen Fragestellungen im mesoskaligen Bereich beantwortet. Beispielsweise können so Ausuferungen, Wasserausbreitung in einer Ebene oder Aufweitungen modelliert werden. Sekundärströmungen und die dadurch auftretenden Effekte können nicht nachgebildet werden. Die Ergebnisse sind tiefengemittelt.

### 8.2.3 Numerische 3D-Modelle

Heute werden 3D-Programme vor allem für Reinwasserabfluss und feste Berandungsflächen in der Praxis verwendet. Durch die Komplexität der dreidimensionalen Modelle sind für die Berechnungen leistungsstarke Rechner notwendig.

Die Berechnung des Sedimenttransportes mit beweglicher Sohle ist in 3D-Modellen möglich. Jedoch gibt es heute noch keine 3D-Modelle, mit welchen sich beispielsweise die eigendynamische Entwicklung der Flussmorphologie in einer lokalen Aufweitung voraussagen lässt. Insbesondere kann bei dreidimensionalen Strömungssituationen im Uferbereich der Ort und die Tiefe des daraus resultierenden Kolks nicht bestimmt werden. In diesem Themenbereich wird an Universitäten und Forschungsinstitutionen geforscht. Es wird aber voraussichtlich noch einige Zeit dauern, bis Programme zur Berechnung des Geschiebetransportes mit beweglicher Sohle für ausgeprägte lokale dreidimensionale Strömungssituationen für die Praxis zur Verfügung stehen.

## 8.3 Hydraulische Modellierung

Komplizierte Vorgänge wie Feststofftransport, kleinräumige Strömungsphänomene und 3D-Effekte und insbesondere Schwemmholztransport sind oft schwer numerisch auszudrücken oder es gibt gar keine Ansätze. Mit hydraulischen Modellversuchen – auch als physikalische oder physische Modellversuche bezeichnet – können genauere Resultate erzielt werden und mit dem entsprechenden Modellgesetz auf die Natur übertragen werden. Allerdings können bei hydraulischen Modellen Projektänderungen oft nur mit grösserem Aufwand umgesetzt werden.

Wird mit einem hydraulischen Modell der Geschiebetransport untersucht, ist meistens eine bewegliche Sohle vorzusehen. Dabei wird die Sohle mit einer an die Natur angelehnten Geschiebemischung nachgebildet. So können der Geschiebetransport und durch die Strömung verursachte Sohlenveränderungen nachgebildet werden.

In einem hydraulischen Modell können nur Körner grösser als 0.2 mm hydraulisch korrekt nachgebildet werden. Bei kleineren Körnern treten im Modell andere Sohlenstrukturen (Riffel und Dünen) auf als in Natur, wodurch die Reibungsverhältnisse im Modell mit denjenigen in der Natur nicht mehr übereinstimmen. Im Weiteren gehen noch kleinere Körner in Schwebelag über. Das heisst, dass beispielsweise bei einem Massstab von 1:30 nur Körner grösser als 6 mm Durchmesser korrekt nachgebildet werden können.

## 8.4 Hybride Modellierung

Hybridmodelle sind eine Kombination aus numerischer und hydraulischer Modellierung. Dabei kann das numerische Modell zur Vordimensionierung des hydraulischen Modells angewandt werden. Umgekehrt können gewisse Parameter und/oder Erkenntnisse aus einem hydraulischen Modell helfen, ein numerisches Modell zu kalibrieren. Mit dem numerischen Modell können ausserdem Langzeitfragestellungen beantwortet werden, die im hydraulischen Modell zu viel Zeit beanspruchen würden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, mit dem numerischen Modell grosse Gebiete

abzubilden und mit dem hydraulischen Modell Details in diesem Gebiet zu untersuchen.

## 8.5 Das Wichtigste in Kürze

- Um den Sedimenttransport abzuschätzen gibt es mehrere Möglichkeiten. Es gibt numerische Modellierungen, bei welchen der Geschiebetrieb in einem Gerinne mit einem Programm am Computer berechnet wird. Weiter gibt es die Möglichkeit von hydraulischen Modellversuchen, bei welchen ein Abschnitt eines Gerinnes in einem verkleinerten Massstab in einem Labor abgebildet wird. Eine Kombination aus diesen beiden Varianten ist das Hybridmodell.
- In der numerischen Simulation gibt es drei verschiedene Modelltypen. Die 1D-Modellierung ist die einfachste. In dieser Modellierung wird der Geschiebetrieb in eine Flussrichtung abgebildet. Die 2D-Modellierung ist detaillierter, braucht aber entsprechend mehr Inputinformationen und Rechenzeit. Die Ergebnisse sind tiefengemittelt. Bei der 3D-Modellierung nimmt die Rechenzeit und der Aufwand für die Modellerstellung stark zu. Heutzutage werden 3D-Modelle vor allem für Reinwasserabfluss mit fester Berandungsfächen in der Praxis eingesetzt.
- Hydraulische Modellversuche werden für eine spezifische Fragestellung aufgebaut. Oft sind diese Fragestellungen numerisch nicht genügend genau berechenbar oder die bekannten und implementierten Berechnungsmethoden können die realen Verhältnisse nicht abbilden (z.B. Schwemmholz).
- Hybridmodelle bestehen aus einem hydraulischen Modell für einen bestimmten Teil des untersuchten Gerinneabschnitts. Im numerischen Modell werden meistens grössere Abschnitte nachgebildet. Mit den Resultaten aus den hydraulischen Versuchen können die numerischen Versuche kalibriert oder umgekehrt aus dem numerischen Modell die Inputs für die hydraulischen Versuche erzeugt werden.

## 9 OFFENE FRAGEN UND FORSCHUNGSLÜCKEN

Zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport gibt es nach wie vor offene Fragen wie auch Forschungslücken. Auf diese wird in den beiden nachfolgenden Abschnitten eingegangen und der Forschungsbedarf dargelegt.

### 9.1 Forschung

Die Änderung des Sedimenttransportes infolge des Klimawandels wurde für kleinere Einzugsgebiete und Wildbäche untersucht (FUNK ET AL. 2011, RAYMOND PRALONG ET AL. 2011 und NCCS 2018). Für grössere Fliessgewässer oder Gewässersysteme gibt es jedoch noch keine vergleichbaren Untersuchungen. Es wird empfohlen die Veränderung des Geschiebeaufkommens in allen relevanten Einzugsgebieten der Schweiz quantitativ zu untersuchen.

In gletscherdominierten Einzugsgebieten sind bis jetzt vor allem die Verhältnisse untersucht worden, die bis zum Verschwinden des Gletschers herrschen. Über die Verhältnisse für die Zeit, wenn die Gletscher abgeschmolzen sind, ist bis jetzt wenig untersucht worden.

Die Quantifizierung der Veränderung des Schwebstoffaufkommens aufgrund des Gletscherrückgangs ergäbe wichtige Hinweise für die künftige Wasserqualität.

Bei der numerischen Modellierung des fluvialen Sedimenttransportes sind grosse Fortschritte gemacht worden. Ohne Kalibrierungs- bzw. Validierungsmöglichkeiten sind aber nach wie vor höchstens 1D-Simulationen über lange Perioden und Fliessstrecken verlässlich. Es gibt ermutigende Beispiele von parallel durchgeführten numerischer 2D-Modellierung und hydraulischen Modellversuchen, wo gute Übereinstimmungen erzielt wurden (BETTLER ET AL. 2014). Aber auch hier fehlen Vergleiche numerisches Modell/Natur über grosse Strecken und lange Zeitperioden. Für die Validierung wären auch Sedimenttransportmessungen an mittleren und grossen Gewässern im Mittelland hilfreich, so wie sie bereits an Wildbächen und Bächen vorgenommen werden.

Hyperkonzentrierte Abflüsse wie sie z.B. 2010 in Innertkirchen an der Hasliaare stattgefunden haben, können in Zukunft häufiger auftreten. Dabei kann im Vergleich zum fluvialen Sedimenttransport in kurzer Zeit viel mehr Geschiebe bei gleichzeitig geringerem Abfluss transportiert werden. Hyperkonzentrierte Abflüsse sind noch wenig erforscht. Mit Forschungsprojekten ist der Transportmechanismus bei hyperkonzentrierten Abflüssen zu untersuchen. Ansätze für die hydraulische und numerische Modellierung sind zu entwickeln.

Murgänge sind im Gegensatz zu hyperkonzentrierten Abflüssen eingehender untersucht worden; es gibt jedoch auch diesbezüglich noch Forschungsbedarf. Für die numerische Modellierung stehen nur wenige Programme zur Verfügung, mit welchen aber weder Bauwerke noch deren Wirkung modelliert werden können. Projektbezogene physikalische Modellierungen werden zwar seit 2006 erfolgreich betrieben, allerdings nur für viskose Ereignisse (SPEERLI ET AL. 2008). Es fehlen nach wie vor Ansätze zur Modellierung von granularen Ereignissen und bisher Vergleichsmöglichkeiten mit Naturereignissen.

Mit der prognostizierten Änderung von Abflussregimes und Geschiebeaufkommen ist mit einer Änderung der Habitate und somit deren Bewohnern zu rechnen. Wie sich

diese Habitate verändern ist jedoch nicht grossflächig untersucht worden. Hier besteht Forschungsbedarf.

## 9.2 Entwicklung von neuen Systemen/Konzepten

In Speicherseen und Flusstauhaltungen werden grössere Mengen von Sedimenten abgelagert und dadurch die Nutzungsmöglichkeiten der Anlage langfristig reduziert oder der Betrieb in Frage gestellt. Mit dem Sedimentumleitstollen Solis an der Albula wurde der Problematik der Ablagerung von Sedimenten in einem Speichersee begegnet (ethz.ch). Diese Umleitstollen sind jedoch sehr teure Bauwerke und können auch nicht überall umgesetzt werden. Im Wägital wird das Ausgleichsbecken Rempen (ROTA 2010) regelmässig gespült, obwohl es auch hier einen Sedimentumleitstollen gibt. Allenfalls können neue Systeme/Konzepte entwickelt werden, um das Problem der Stauraumverlandung zu entschärfen.

Es gibt geschiebedurchgängige Flusstauhaltungen, was bei bestehenden Anlagen bedeutet, dass Klappenwehre vollständig abgesenkt bzw. Schützen komplett hochgezogen werden müssen. Dies ist aufgrund der Wehrreglemente und der Wahrung des Unterliegerschutzes insbesondere bei Hochwasserereignissen, wenn am meisten Geschiebe transportiert wird, jedoch an den wenigsten Anlagen praktikabel oder aufgrund ökologischer Randbedingungen nicht erlaubt. Systematische Untersuchungen der heutigen Praxis bei solchen Anlagen und deren Auswertung können zu neuen Konzepten, bzw. Lösungsansätzen führen.

Es gibt noch keine erprobten und bewährten Methoden, mit denen der bereits bestehenden aber aufgrund des Klimawandels zunehmenden Problematik der Auflandung im Gefällsknick zwischen Berg und Tal (siehe Abb. 4) begegnet werden kann.

Durch zunehmenden Sedimenttransport und extremere Ereignisse wird mehr Sediment aus den Gerinnen und insbesondere Geschiebesammlern zu entfernen sein, dessen Zusammensetzung jedoch ungünstiger ausfallen kann (deutlich mehr Feinanteile, organisches Material, allenfalls auch Plastik und dergleichen). Diesbezüglich sind Prozesse und Konzepte zu entwickeln, die die Triage vereinfachen, den Wiederverwertungsanteil erhöhen und den zu deponierenden Anteil minimieren.

Die Veränderung des Grundwasserhaushaltes infolge veränderten Geschiebeaufkommen stellt eine vielfältige Herausforderung dar. Grundwasserpumpwerke müssen für neue Niveaus, Wasserpiegelschwankungen und Wasserbeschaffenheiten gerüstet sein. Zudem können grundwassergespiesene Habitate verändert werden. Ob hier mit sanften menschlichen Eingriffen negative Auswirkungen abgefedert und allfällige positive Auswirkungen verstärkt werden können, ist noch zu erforschen.

Diverse Vorgänge werden auch bezüglich juristischen Aspekten zu beleuchten sein. Im Notrecht ist nach extremen Ereignissen der Handlungsspielraum relativ gross. Wie sieht aber die Lage bei "Normal-", bzw. "Dauerbetrieb" aus? Wie können verbreiterte/zusätzliche Gewässer-Trassen ausreichend ausgeschieden und der Raumbedarf für Deponien nachhaltig gesichert werden?

## 10 QUELLENVERZEICHNIS

### 10.1 Literatur

- AYALA A., FARINOTTI D., BAVAY M., MARTY C., HUSS M. UND STOFFEL M. 2019. Glaciers. Hydro-CH2018 synthesis report chapters: "Future Changes in Hydrology". VAW ETH Zürich, WSL Birmensdorf, SLF Davos, Departement für Geowissenschaften Uni Fribourg, Institut des sciences de l'environnement Uni Genf. (Originalsprache Englisch.)
- BADOUX A., PETER A., RICKENMANN D., JUNKER J., HEIMANN F., ZAPPA M. UND TUROWSKI J. M. 2014. Geschiebetransport und Forellenhabitate in Gebirgsflüssen der Schweiz: mögliche Auswirkungen der Klimaänderung. Wasser Energie Luft. Heft 3/2014. S. 200-209. Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband. Baden.
- BAFU (HRSG.). 2017. Bundesamt für Umwelt. Geschiebe- und Habitatsdynamik. Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. Bern.
- BENATEAU S., GAUDARD A., STAMM C. UND ALTERMATT F. 2019. Climate change and freshwater ecosystems. Impacts on water quality and ecological status. Hydro-CH2018 Project. eawag. Dübendorf. (Originalsprache Englisch.)
- BETTLER M., HERZOG B., LANZ M. UND SPEERLI J. 2014. Vergleich einer numerischen und hydraulischen Modellierung am Beispiel der Geschiebedotierstrecke Aare Innerkirchen. Tagungsband 2 Internationales [Wasserbau-]Symposium 2014. Wasser- und Flussbau im Alpenraum. VAW-Mitteilung 228. ETH Zürich.
- BEZZOLA G. R. 2017. Vorlesungsmanuskript Flussbau. Fassung HS 2017. Professur für Wasserbau. ETH Zürich.
- BINDERHEIM E. UND GÖGGEL W. 2007. Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer. Äusserer Aspekt. Umwelt-Vollzug Nr. 0701. BAFU und eawag. Bern.
- BRUNNER M., BJÖRNSSEN GURUNG A., SPEERLI J., KYTZIA S., BIELER S., SCHWERE D. UND STÄHLI M. 2019. Hydro-CH2018 Wasserspeicher. Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? WSL und HSR. Birmensdorf und Rapperswil. 25.04.2019.
- BURKHARDT-HOLM P. 2009. Klimawandel und Bachforellentrückgang – gibt es einen Zusammenhang? Resultate aus der Schweiz. Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung. Jahrgang 21, Nr. 2. S. 177-185. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. April 2009.
- DÖRING M., TONOLLA D., ROBINSON C. T., SCHLEISS A., STÄHLY S., GUFLER C., GEILHAUSEN M. UND DI CUGNO N. 2018. Künstliches Hochwasser an der Saane – Eine Massnahme zum nachhaltigen Auenmanagement. Wasser Energie Luft. Heft 2/2018. S. 119-127. Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband. Baden.
- FUNK M., BAUDER A., FARINOTTI D., USSELMANN S. UND GABBI J. 2011. Gletscher- und Abflussveränderungen im Zeitraum 1900-2100 in sieben Einzugsgebieten der Schweiz. VAW-Teilprojekt von CCHydro. VAW ETH Zürich. Mai 2011.
- GRASSO A., JAKOB A UND SPREAFICO M. 2007. Abschätzung der Schwebstofffrachten mittels zweier Methoden (Beispiel Hochwasser August 2005). Wasser Energie

- Luft. Heft 3/2007. S. 273-280. Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband. Baden.
- GRASSO A., BÉROD D, HEFTI D. UND JAKOB A. 2011. Monitorage de la turbidité des cours d'eau Suisse. Wasser Energie Luft. Heft 1/2011. S. 48-52. Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband. Baden. (Originalsprache Französisch.)
- HABERSACK H., HAIMANN M., KERSCHBAUMSTEINER W. UND LALK P. 2008. Schwebstoffe im Fließgewässer. Leitfaden zur Erfassung des Schwebstofftransportes. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien. Dezember 2008.
- HAEBERLI W., BÜTLER M., HUGGEL C., FRIEDLI T., SCHAUB Y. UND SCHLEISS A. 2016. New lakes in deglaciating high-mountain regions – opportunities and risks. Climatic Change. Jahrgang 139, Nr. 2. S. 201-214. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. November 2016. (Originalsprache Englisch.)
- HARRIS C., VONDER MÜHLL D., ISAKSEN K., HÄBERLI W., SOLID J. L., KING L., HOLMLUND P., DRAMIS F., GUGLIELMIN M. UND PALACIOS D. 2003. Warming permafrost in European mountains. Global and Planetary Change 39. S. 215-225. Elsevier. Amsterdam. (Originalsprache Englisch.)
- HOFMANN H. UND DISSANAYAKE P. 2018. Hochaufgelöste, numerische Modellierung von Wellen, Strömungen und dem Sedimenttransport in der Flachwasserzone des Bodensees. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, HyWa. 62. Jahrgang. Heft 6. S. 387-399. Bundesanstalt für Gewässerkunde, im Auftrag der Fachverwaltungen des Bundes und der Länder. Koblenz.
- HÜBL J. UND MIKOŠ M. 2014. Monitoring von Murgängen. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz. Jahrgang 78, Heft 173. Verein der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs. Wien. Juni 2014.
- KOHN I., STAHL K. UND STOELZLE M. 2019. Low Flow Events – a Review in the Context of Climate Change in Switzerland. Environmental Hydrological Systems. Faculty of Environment and Natural Resources University of Freiburg im Breisgau. Februar 2019. (Originalsprache Englisch.)
- KOHS. 2007. Kommission für Hochwasserschutz, Wasserbau und Gewässerpflege. Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. Ein Standortpapier der KOHS. Wasser Energie Luft. Heft 1/2007. S. 55-60. Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband. Baden.
- KÖPLIN N., SCHÄDLER B., VIVIROLI D UND WEINGARTNER R. 2014. Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change. Hydrological Processes. Jahrgang 28, Nr. 4. S. 2567-2578. John Wiley & Sons, Ltd. Hoboken. 15.02.2014. Online-Publikation bereits 19.04.2013. (Originalsprache Englisch.)
- LANE E. W. 1955. The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering. Proceedings ASCE, Journal of the Hydraulics Division 81, paper no. 745. S. 1-17. New York. (Originalsprache Englisch.) Zit. in BEZZOLA (2017).
- LEITUNGSGRUPPE NFP 61 (HRSG.). 2015. Nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz – NFP 61 weist Wege in die Zukunft. Gesamtsynthese im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung». Schweizerischer Nationalfonds. Bern.

- MARTY C., PHILLIPS M., LEHNING M., WILHELM C. UND BAUDER A. 2009. Klimaänderung und Naturgefahren in Graubünden. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. 7/2009. S. 201-209. Schweizerischer Forstverein. Zürich.
- MARTY C., BAVAY M., FARINOTTI D., AYALA A., HUSS M. UND STOFFEL M. 2019. Snow. Hydro-CH2018 synthesis report chapters: "Future Changes in Hydrology". VAW ETH Zürich, WSL Birmensdorf, SLF Davos, Departement für Geowissenschaften Uni Fribourg, Institut des sciences de l'environnement Uni Genf. (Originalsprache Englisch.)
- MEYER R., SCHÄDLER B., VIVIROLI D. UND WEINGARTNER R. 2011. Klimaänderung und Niedrigwasser. Auswirkungen der Klimaänderung auf die Niedrigwasserverhältnisse im Schweizer Mittelland für 2021-2050 und 2070-2099. Schlussbericht CCHydro – Modul 4. Geographisches Institut Universität Bern. 30.11.2011.
- MÜLLER S., SIEBER U., ESTOPPEY R., HAERTEL-BORER S., LEU C. UND SCHÄRER M. 2018. Schutz und Weiterentwicklung der Gewässer. AQUA & GAS No. 4. S. 20-28. Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches. Zürich.
- NAEF F. UND WERNLI H. 2016. Starkniederschläge und Hochwasser. BAFU-Projekt 2006-02060/1614/03. ETH Zürich und Hybest GmbH Zürich. April 2016. (Originalsprache Englisch – ungeachtet des deutschen Titels.)
- NOETZLI J. UND PHILLIPS M. 2019. Mountain Permafrost Hydrology. WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung Davos. (Originalsprache Englisch.)
- NCCS (HRSG.). 2018. National Centre for Climate Services. CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. Zürich.
- OCCC. 2003. Organe consultatif sur les changements climatiques. Extremereignisse und Klimaänderung. Bern. September 2003.
- OCCC. 2007. Organe consultatif sur les changements climatiques. Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Bern. März 2007.
- PATT H. (HRSG.). 2016. Fließgewässer- und Auenentwicklung. Grundlagen und Erfahrungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- PERROUD M. UND BADER S. 2013. Klimaänderung in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. Umwelt-Zustand Nr. 1308. Bundesamt für Umwelt, Bern und Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, Zürich.
- PROCLIM-, OCCC UND NFS KLIMA. 2003. Forum for Climate and Global Change, Organe consultatif sur les changements climatiques und Nationaler Forschungsschwerpunkt Klima. Wasserkraft und Klimawandel in der Schweiz. Vision 2030. Climate Talk – Dialog zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. Tagungsunterlage. Bern. 29.10.2003.
- RAYMOND PRALONG M., TUROWSKI J. M., RICKENMANN D., BEER A., MÉTRAUX V. UND GLASSEY T. 2011. Auswirkungen der Klimaänderung auf die Geschiebefracht in Einzugsgebieten von Kraftwerksanlagen im Kanton Wallis. Wasser Energie Luft. Heft 4/2011. S. 278-285. Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband. Baden.
- ROTA A. 2010. Das Kraftwerk Wägital. TEC21 Heft 37. espazium Verlag. Zürich.

- SCHÄLCHLI, ABEGG + HUNZINGER. 2005. (Mitarbeit Hunziker, Zarn & Partner.) Geschiebe- und Schwebstoffproblematik in Schweizer Fließgewässern. Zürich. 03.11.2005.
- SCHÜRCH M., HÖHN E., HUNKELER D., MATOUSEK F. UND TURBERG P. 2012. Klimaänderung und deren Auswirkungen auf die Grundwasserressourcen – Resultate des gleichnamigen Workshops vom 11. Mai 2012. Swiss Bulletin für angewandte Geologie. Vol. 17/2, 2012. S. 85-92. O.O.
- SPEERLI J., SCHATZMANN M., GROB M. UND SOLÈR R. 2008. Erfahrungen aus der Nachbildung der Briener Murgänge im physikalischen Modell. Tagungsband 1 Internationales [Wasserbau-]Symposium 2008. Neue Anforderungen an den Wasserbau. VAW-Mitteilung 207. ETH Zürich.
- SPREAFICO M., LEHMANN C. UND NAEF O. 1996. Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen. Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie. Mitteilung Nr. 4. Bern.
- SPREAFICO M., LEHMANN C., JAKOB A. UND GRASSO A. 2005. Feststoffbeobachtung in der Schweiz. Ein Tätigkeitsgebiet der Landeshydrologie. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 8. Bundesamt für Wasser und Geologie. Bern.
- STOFFEL M. UND BENISTON M. 2006. On the incidence of debris flows from the early Little Ice Age to a future greenhouse climate: A case study from the Swiss Alps. Geophysical Research Letters. Jahrgang 33, Nr. 16. American Geophysical Union. Washington, D.C. (Originalsprache Englisch.)
- VIVIROLI D., ZAPPA M., GURTZ J. UND WEINGARTNER R. 2009. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. Environmental Modelling & Software. Jahrgang 24, Nr. 10. S. 1209-1222. Elsevier Amsterdam. (Originalsprache Englisch.)
- VISCHER D. 2003. Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz. Von den Anfängen bis ins 19. Jahrhundert. Berichte des BWG, Serie Wasser. Bundesamt für Wasser und Geologie. Biel. Oktober 2003.
- WEINGARTNER R. 2019. Veränderungen der Abflussregimes der Schweiz in den letzten 150 Jahren. Gruppe für Hydrologie. Geographisches Institut der Universität Bern.

## 10.2 Online

<https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/forschung/wasserbau/abgeschlossene-projekte/sediment-bypass-tunnel-in-the-solis-reservoir-2010.pdf> (10.08.2019)

[https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/bvfd/awn/dokumentenliste\\_afw/20170828\\_Kurzbericht\\_Expertengruppe\\_20171215\\_dt.pdf](https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/bvfd/awn/dokumentenliste_afw/20170828_Kurzbericht_Expertengruppe_20171215_dt.pdf) (09.08.2019)

<https://www.spreitgraben.ch/cms/hintergrund.html> (09.08.2019)

<https://www.srf.ch/news/panorama/gletschersee-auf-der-plaine-morte-ist-uebergeschwappt> (09.08.2019)