

Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung

SYNTHESEBERICHT



Wichtige Fragen kurz beantwortet

Klima

Wie wird sich die Temperatur in Zukunft verändern?

Die Temperaturen werden in allen Jahreszeiten ansteigen. Die grösste Zunahme wird über dem Alpenbogen erwartet.

Wie verändern sich die zukünftigen Niederschläge?

Die Niederschläge werden im Sommer abnehmen, bis ins Jahr 2100 sehr deutlich. Während den übrigen Jahreszeiten werden sie leicht zunehmen (ausser im Süden). Auf der Alpennordseite werden die Jahresniederschläge leicht zunehmen, im Süden und im südlichen Wallis leicht abnehmen.

Wie wird sich die Verdunstung verändern?

Die Verdunstung wird geringfügig zunehmen. Im Vergleich zu den Niederschlägen ist diese Veränderung jedoch unbedeutend.

Was kann bezüglich verschiedener Extremereignisse gesagt werden?

Hitzewellen werden häufiger auftreten und länger dauern. Über die Intensität und Häufigkeit von zukünftigen Starkniederschlagsereignissen kann noch nichts Verlässliches gesagt werden.

Sind die Vorhersagen sicher?

Die Klimaszenarien sind insbesondere in Bezug auf den Niederschlag recht unsicher. Trotzdem gibt es deutliche Tendenzen in bestimmten Jahreszeiten. Die Unsicherheiten zeigen aber auch, auf welche Veränderungen man sich im Extremfall einstellen muss.

Schnee und Eis

Wie verändern sich Dauer und Mächtigkeit der Schneedecke?

Die Schneefallgrenze wird parallel zur Temperatur ansteigen. In Zukunft werden im Sommer Regionen bis 3500 m ü. M. schneefrei sein. Die Schneedeckendauer verkürzt sich bis ins Jahr 2100 um bis zu acht Wochen. Dazu wird die maximale Mächtigkeit der Schneedecke in grossen Höhen um 50 bis 70 Prozent abnehmen. Der Beitrag der Schneeschmelze zum Abfluss wird sich dadurch stark verringern.

Wie verändern sich die Gletscherflächen und -volumen?

Bis ins Jahr 2100 werden viele Gletscher weitgehend verschwunden sein. Bis dahin sind nur noch rund 25 Prozent der heutigen Flächen und Volumen der Schweizer Gletscher vorhanden.

Abfluss

Wie verändert sich die zukünftige Jahresabflussmenge?

In stark vergletscherten Gebieten wird das Jahresabflussvolumen gegenüber heute vorübergehend ansteigen, langfristig gesehen sinkt es jedoch. Im Tessin und im südlichen Wallis wird der Jahresabfluss bis 2100 leicht abnehmen. Im nördlichen Alpenraum werden sich die Abflussmengen kaum verändern. Diese Veränderungen bewegen sich im bisherigen Erfahrungsbereich.

Wie wird sich die saisonale Verteilung der Jahresabflüsse gestalten?

In den vergletscherten und schneereichen Einzugsgebieten gibt es eine eindeutige Verschiebung des saisonalen Abflussmaximums vom Sommer in den Spätfrühling hinein. Die mittleren Abflussmengen im Sommer und Herbst werden deutlich abnehmen, diejenigen des Winters etwas zunehmen.

Können diese Resultate weiter verwendet und für repräsentative Fallbeispiele quantifiziert werden?

Im Gebiet der Kraftwerke Mattmark werden die natürlichen Abflussmengen im Durchschnitt bis ins Jahr 2035 um etwa sechs, bis 2085 um etwa zwölf Prozent abnehmen. Im Einzugsgebiet der Gougrawerke liegen die Abnahmen für beide Zeiträume bei rund neun Prozent. Auch für die Kraftwerke Oberhasli liegen die Veränderungen im negativen Bereich: Die Abflüsse werden hier um drei (2035) bis sieben (2085) Prozent abnehmen.

Geschiebe

Wie verändern sich die Geschiebefrachten und der Geschiebetrieb?

Die mittleren transportierten Geschiebemengen werden aufgrund der sinkenden Abflussmengen tendenziell abnehmen, die lokalen Bedingungen müssen aber immer berücksichtigt werden. Das saisonale Maximum der transportierten Geschiebemengen wird sich vom Sommer in den Frühling hinein verschieben. Über jene Geschiebemengen, die bei Hochwasserereignissen transportiert werden, kann keine Aussage gemacht werden.

Auswirkungen auf die Produktion und den Umsatz

Wie wird sich die fassbare Wassermenge verändern?

Je nach Dimensionierung der Fassung kann die fassbare Wassermenge zunehmen – trotz leicht sinkendem Gesamtabfluss aufgrund des übers Jahr gesehen ausgeglicheneren Abflussregimes.

Wie verändert sich die Produktion der einzelnen Kraftwerke?

Bis zur nahen Zukunft (2035) sind nur kleine Veränderungen zu erwarten, im südlichen und östlichen Wallis eher im leicht negativen Bereich. Die Unsicherheiten sind relativ gross und betragen 10 Prozent. In den tiefer gelegenen Gebieten der zentralen und östlichen Voralpen liegen die Veränderungen mit null bis neun Prozent im positiven Bereich.

Für die ferne Zukunft (2085) sind die Trends in den hoch gelegenen Gebieten im südlichen und östlichen Wallis negativ. Es muss mit mittleren Einbussen in der Produktion von vier bis acht Prozent gerechnet werden, wobei im Extremfall auch kaum Veränderungen beziehungsweise Einbussen von 20 Prozent berechnet wurden.

Kann man für den gesamten Kraftwerkpark die generellen Folgen der Klimaänderung auf die Wasserkraft abschätzen?

Resultate aus einzelnen Kraftwerksbetrieben lassen sich nicht verallgemeinern.

Einleitung

Der Wasserkreislauf ist über das Wetter direkt mit dem Klima verbunden, welches natürlichen und zunehmend auch anthropogenen Einflüssen unterworfen ist. Im Alpengebiet reagiert der Wasserkreislauf besonders sensitiv auf die Klimaerwärmung: Veränderungen in der Dauer der Schneedecke und langfristiges Gletscherschmelzen oder -wachsen haben einen unmittelbaren Einfluss auf die verfügbaren Wasserressourcen.

In der Schweiz werden rund 56 Prozent der elektrischen Energie durch Wasserkraft produziert. Durch den Klimawandel ausgelöste Veränderungen im Wasserkreislauf müssen deshalb so weit wie möglich in die mittel- und langfristige Planung des Baus und Betriebs der Wasserkraftanlagen mit einbezogen werden.

«Swisselectric research» und das Bundesamt für Energie BFE möchten künftig eine verlässliche quantitative Datenbasis. Deshalb haben die beiden Institutionen nach einer erfolgreich durchgeführten Vorstudie im Jahre 2008 ein Forschungsprojekt zu diesem Thema lanciert. Die meisten hydraulischen Kraftwerke der Schweiz befinden sich im Wallis, deshalb haben die Dienststelle für Energie und Wasserkraft des Kantons Wallis sowie die «Forces Motrices Valaisannes» (FMV SA) ein ergänzendes Projekt ins Leben gerufen,

das den Schwerpunkt bei den lokal stark beeinflussten Themen Gletscher, Schnee und Geschiebe gesetzt hat. Das Forschungsprojekt hat die Auswirkungen auf den Kraftwerksbetrieb und die Stromproduktion anhand mehrerer Fallstudien in unterschiedlichen Kraftwerkstypen untersucht. Die Untersuchungen sind in verschiedensten Einzugsgebieten durchgeführt worden (Abbildung a). Die Forschungsprojekte wurden unter der Koordination des Netzwerkes Wasser im Berggebiet und unter der Leitung des Geographischen Instituts der Universität Bern und der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft von sechs Forschungsgruppen durchgeführt. Der vorliegende Synthesebericht gibt zusammenfassend Auskunft über die wichtigsten Forschungsergebnisse. Die angewandten Methoden und detaillierten Resultate sind in zwölf Fachberichten zusammengefasst, welche elektronisch verfügbar sind (vgl. Literaturverzeichnis).

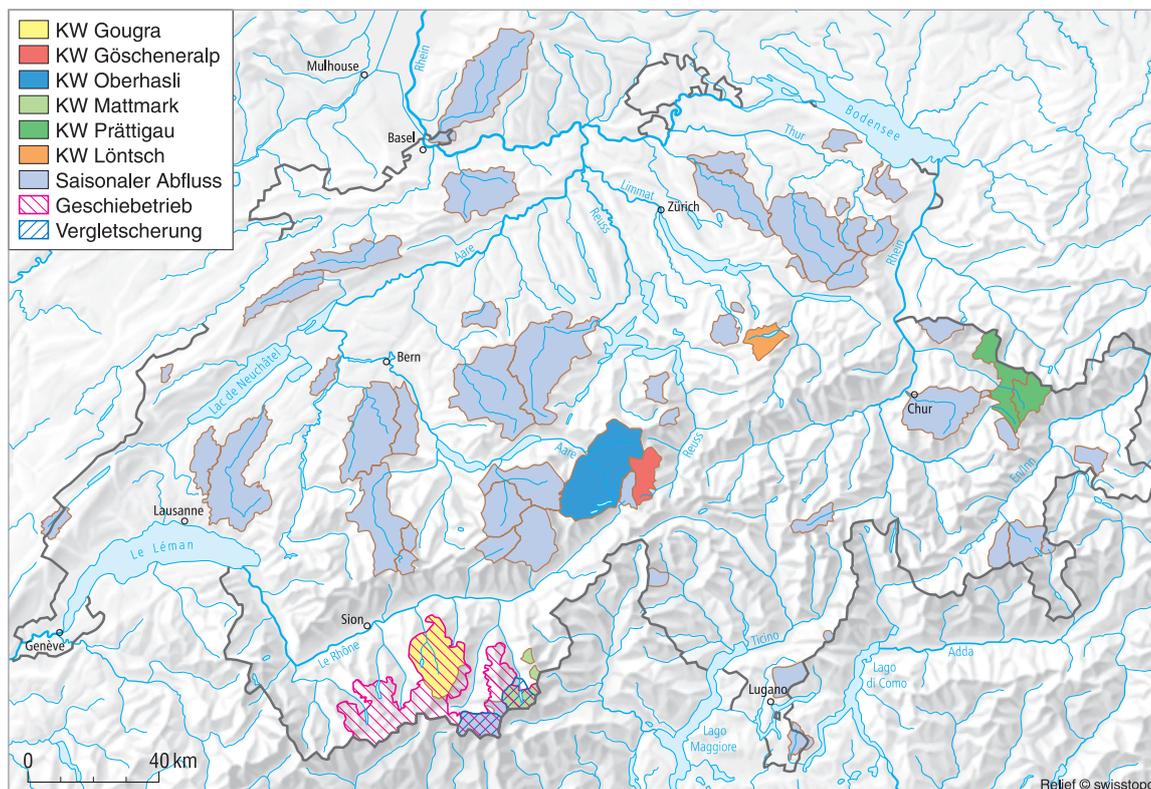


Abbildung a: Im Rahmen des Projektes wurden Untersuchungen zur Veränderung des Kraftwerkbetriebs, des saisonalen Abflusses, des Geschiebetriebes und der Vergletscherung durchgeführt.

Grundlagen

Grundlage für alle Arbeiten in diesem Projekt bilden die Resultate der Klimamodellierung – ein Projekt, das Temperatur- und Niederschlagsänderungen für die Schweiz modelliert hat (Abbildung b). Basis für diese Modellierung bildeten langjährige Wetterbeobachtungsreihen von MeteoSchweiz sowie die aktuellsten Resultate des europäischen Forschungsprojektes ENSEMBLES. Anhand dieser Daten wurden nun die Modelle zur Abbildung der Gletscherprozesse, des Wasserkreislaufes und des Geschiebetransportes angewendet: Ein hydrologisches Modell berechnet die Auswirkungen der Temperatur- und Niederschlagsänderungen auf den Abfluss, die Abflussregimes sowie auf Extremereignisse (Hoch-/Niedrigwasser). Im Gletschermodell werden – ebenfalls auf Basis der Niederschlags- und Temperaturänderungen – künftige Gletscherflächen, -dicken und -volumen berechnet. Zudem wird modelliert, wo sich durch die Gletscherschmelze neue Seen bilden könnten. Diese Resultate über die Veränderung des Abflussverhaltens und der Vergletscherung bilden anschliessend die Grundlage für die Modellierung des Feststofftransportes (Geschiebemodel). Im Rahmen dieser Untersuchungen wird der Eintrag von Sedimentmaterial in die Kraftwerksanlagen (Speicherseen, Wasserleitungen, Turbinen) berechnet. Schliesslich werden in einem letzten Modell – basierend auf den vorangehenden Untersuchungen zu Hydrologie, Vergletscherung und zum Geschiebe – die Konsequenzen für den Kraftwerksbetrieb und die Energieproduktion modelliert. In diese Modelle wurden auch die technischen Beschreibungen der Kraftwerksanlagen und die Betriebsregeln mit einbezogen. Zudem sind Informationen über das Preisgefüge notwendig. In den Zukunfts-Modellierungen bleiben diese Grundlagen und Annahmen in der Regel unverändert.

Alle Analysen werden jeweils für zwei zukünftige Zeitfenster durchgeführt: Die nahe Zukunft umfasst den Zeitraum von 2021 bis 2050 (hier verkürzt als Periode 2035 bezeichnet), die weiter entfernte Zukunft umschliesst den Zeitabschnitt von 2070 bis 2099 (im

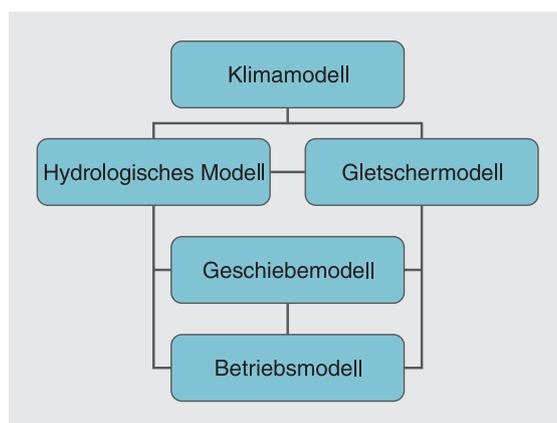


Abbildung b: Schematische Darstellung der Modellkette.

Bericht Periode 2085 genannt). Da die Konzessionen der Wasserkraftwerke bis zu 80 Jahre laufen, ist eine Modellierung, die weit in die Zukunft hineinreicht, sehr wünschenswert. Die zwischen 1980 und 2009 gemessenen Werte bilden in praktisch allen Teilstudien die Referenzwerte. Als Antrieb für die globalen Klimamodelle wurde in den Modellrechnungen mit wenigen Ausnahmen das weltweit gebräuchliche Treibhausgas-Emissionsszenario A1B des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) verwendet. Dieses Szenario ist ein aus heutiger Sicht realistisches mittleres Emissionsszenario (Abbildung c).

Unsicherheiten

Die Resultate der vorliegenden Untersuchungen sind mit vielen Unsicherheiten verbunden: Die Emissionsszenarien unterliegen diversen schwer vorhersehbaren Fakten (Bevölkerungsveränderungen, Entwicklungen in Technologie, Wirtschaft und Politik). Zudem sind auch die Resultate der Klima-, Abfluss- und Gletschermodellierung Unsicherheiten unterworfen: Einerseits können nicht alle relevanten Prozesse detailgetreu abgebildet werden, andererseits ist die Datenlage oft nicht ganz ausreichend. Um diese Unsicherheiten etwas fassbarer zu machen, wurden jeweils verschiedene Modelle für die Klima-, Abfluss- und Gletscherentwicklung verwendet. Die Resultate zeigen, dass die Grössenordnung und Richtung der Veränderungen bezüglich Temperatur, Gletscher und Schneedecke in den Modellen gut übereinstimmen. Bei den Niederschlägen und Abflüssen hingegen weisen die Resultate der verschiedenen Modelle zum Teil Werte mit unterschiedlichen Vorzeichen auf.

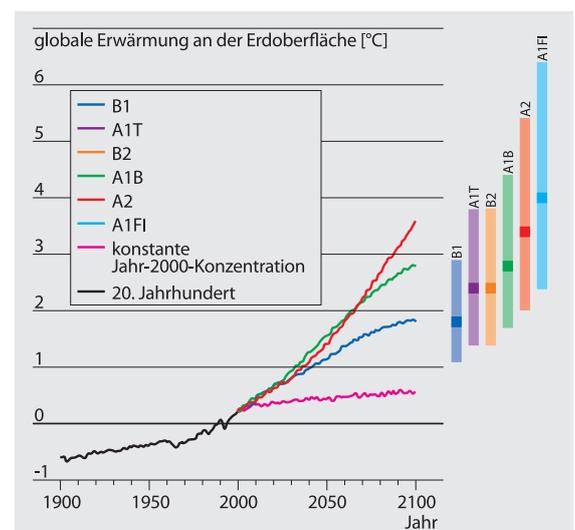


Abbildung c: Von den sechs Szenarien des IPCC-Berichtes wurde im Rahmen dieser Untersuchungen das A1B-Szenario verwendet (grüne Kurve). Diesem liegen Annahmen einer stark wachsenden globalen Wirtschaft, einer zunehmenden Bevölkerungszahl und einer Energieversorgung, die sich zur einen Hälfte aus erneuerbaren und zur anderen Hälfte aus fossilen Energieträgern zusammensetzt, zugrunde. Balken rechts: Bandbreite der Modell-Werte; dunkle Linien in den Balken: beste Schätzwerte [1].

Kapitel 1: Klima

Das Wichtigste in Kürze

- Durch den Klimawandel steigen die Temperaturen im Sommer und im Winter am stärksten an.
- Die Temperaturzunahme findet während des ganzen Jahres statt und ist grösser als die natürliche Variabilität.
- Über dem Alpenbogen steigen die Temperaturen besonders stark an.
- Dauer und Häufigkeit von Hitzeperioden werden zunehmen.
- Die Niederschlagsänderungen für das Szenario 2035 liegen meist innerhalb der bisher beobachteten Variabilitäten.
- Die sommerlichen Niederschlagsmengen werden in der fernen Zukunft abnehmen.
- Auf der Alpennordseite werden die Jahresniederschläge zunehmen, im Süden der Schweiz werden sie geringer ausfallen.
- Wahrscheinlich werden Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen zunehmen (unsichere Datenlage).

Die in diesem Kapitel präsentierten Resultate stützen sich auf den Fachbericht *Klimaszenarien für hydrologische Impactstudien in der Schweiz* [A].

Bisherige Veränderungen

Auf der ganzen Welt wird seit ungefähr 1850 an unzähligen Stationen das Klima aufgezeichnet. Lange Messreihen, welche die Lufttemperatur und den Niederschlag aufzeichnen, lassen Aussagen über die einzelnen Jahre im Vergleich zum langjährigen Mittel zu. Die Analysen der langjährigen Messreihen zeigen eine deutliche Zunahme der globalen Temperatur: Zwischen 1956 und 2005 ist es pro Dekade um fast das Doppelte wärmer geworden als in der Zeit zwischen 1906 und 2005. Das erste Jahrzehnt dieses Jahrtausends stellt die wärmste Dekade seit Messbeginn dar. Die Erwärmung der Ozeane, das Abschmelzen von Schnee- und Eisflächen sowie der Anstieg des Meeresspiegels hängt mit dieser Temperaturzunahme zusammen [1].

Auch in der Schweiz lässt sich diese Erwärmung beobachten: Die Temperaturen haben in den vergangenen 30 Jahren um 0.35 °C pro Jahrzehnt zugenommen (Abbildung 1.1). Die Zunahme pro Dekade ist damit 1.6 Mal grösser als der durchschnittliche Anstieg auf der Nordhemisphäre [2]. Zudem zeigt sich eine Veränderung der Niederschlagsverhältnisse: Der durchschnittliche Jahresniederschlag hat im 20. Jahrhundert um ca. acht Prozent zugenommen – in der Nordschweiz sogar um 20 bis 30 Prozent (Abbildung 1.2).

Aufgrund der steigenden Temperaturen nehmen auch die Verdunstungsraten zu: Dadurch bleiben die Abflussverhältnisse trotz steigender Jahresniederschläge konstant [3].

Szenarien für die Schweiz bis 2099

Jahresgang

Temperatur: Die Modellrechnungen zeigen, dass die Temperaturen im Sommer und im Winter besonders stark zunehmen werden. Für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) beträgt der Anstieg gegenüber dem Zeitraum 1980 bis 2009 etwa +1.5 °C, für die Periode 2070 bis 2099 +3.0 bis 4.5 °C. In Abbildung 1.3 wird anhand der Stationen Sion und Davos zudem exemplarisch ersichtlich, dass die Temperaturen in der fernen Zukunft während des ganzen Jahres ansteigen werden. Dieser Anstieg ist deutlich höher als die in der Vergangenheit gemessene natürliche Variabilität. Die Szenarien der verschiedenen Klimamodellketten unterscheiden sich vor allem im Sommer und Winter (2021 bis 2050), resp. im Sommer und Herbst (2070 bis 2099) sehr deutlich voneinander. Die modellierten Temperaturänderungen sind deshalb während diesen Jahreszeiten mit Unsicherheiten behaftet. Ein Vergleich der beiden Standorte Sion und Davos zeigt, dass sich die Temperaturänderungen in den beiden Regionen ähnlich verhalten werden. Allerdings weisen die Sommertemperaturen in Sion aufgrund des stärkeren südeuropäischen Einflusses eine grössere Zunahme auf als jene in Davos.

Niederschlag: Da die Niederschlagsänderung sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft häufig innerhalb der natürlichen Variabilität liegt, kann keine klare Aussage über Veränderungen gemacht werden. Einzig für die Sommermonate der Periode 2070 bis 2099 ist eine deutliche Abnahme der Niederschlagsmengen, die ausserhalb der natürlichen Schwankungen liegt, ersichtlich (Abbildung 1.4). Die Stationen Sion und Davos zeigen auch hier einen sehr ähnlichen Verlauf.

Räumliche Muster der Änderungen

Bei einer räumlich differenzierten Darstellung der Resultate ist eine hohe zeitliche Auflösung nicht sinnvoll – ganz im Gegensatz zu den jahreszeitlichen Verläufen. Die anschliessenden Resultate werden deshalb zeitlich als saisonal gemittelte Werte präsentiert.

Temperatur: Die Temperaturänderungen sind schweizweit relativ homogen – einzig über dem Alpenbogen ist jeweils im Sommer eine stärkere Erwärmung zu erwarten (Abbildung 1.5).

Niederschlag: In Abbildung 1.6 sind die jährlichen Niederschlagsänderungen für die zwei Zeitfenster dieser Studie dargestellt. Insbesondere für die ferne Zukunft ist die räumliche Verteilung relativ heterogen: Während im Flachland und an den nördlichen Alpenrändern die Jahresniederschlagsmengen zunehmen, ist im alpinen und südlichen Teil der Schweiz sowie im Jura eine leichte Abnahme der jährlichen Niederschläge zu

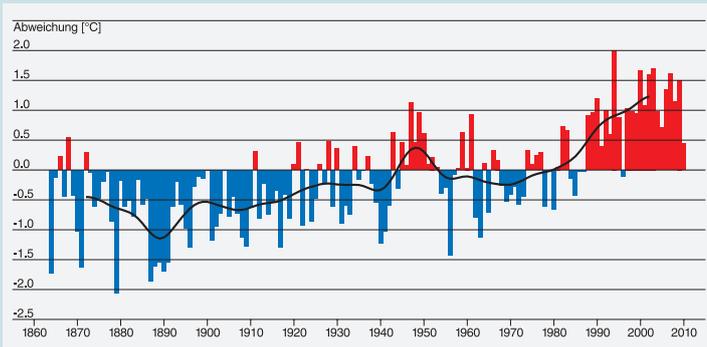


Abbildung 1.1: Abweichungen der mittleren Jahrestemperatur vom Durchschnitt der Jahre 1961 bis 1990 in der Nordschweiz. Blau: Jahre unter dem Durchschnitt. Rot: Jahre über dem Durchschnitt. Schwarze Linie: 20-jähriges gewichtetes Mittel [4].

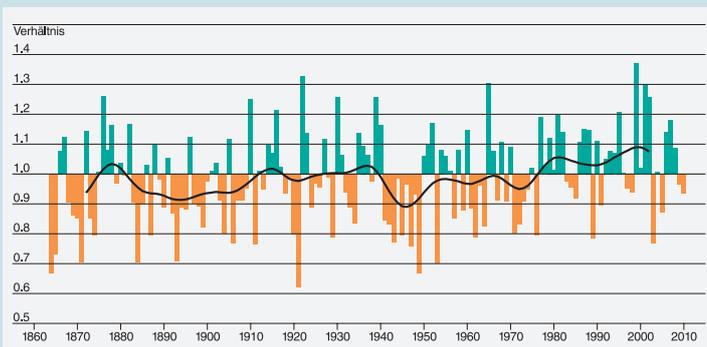


Abbildung 1.2: Mittlere Jahresniederschläge zwischen 1864 und 2010 in der Nordschweiz im Verhältnis zum Durchschnitt zwischen 1961 und 1990. Grün: Jahre über dem Durchschnitt. Orange: Jahre unter dem Durchschnitt. Schwarze Linie: 20-jähriges gewichtetes Mittel [4].

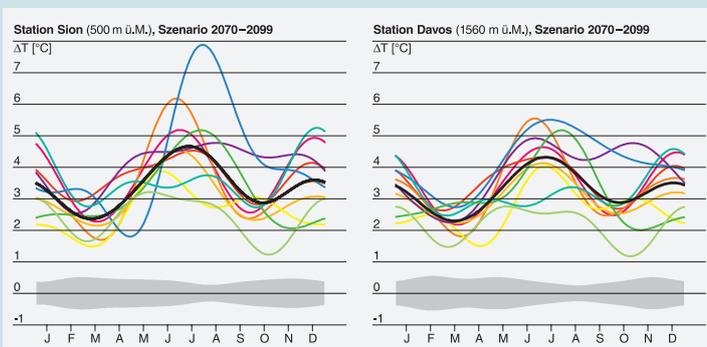


Abbildung 1.3: Jahresgang der Temperaturänderung ΔT im Vergleich zur Referenzperiode 1980 bis 2009 der zehn Klimamodellketten für die Periode 2070 bis 2099 für die Stationen Sion und Davos. Schwarze Linie: Mittelwert des Ensembles. Graues Band: ± 1 Standardabweichung der natürlichen Variabilität [A].

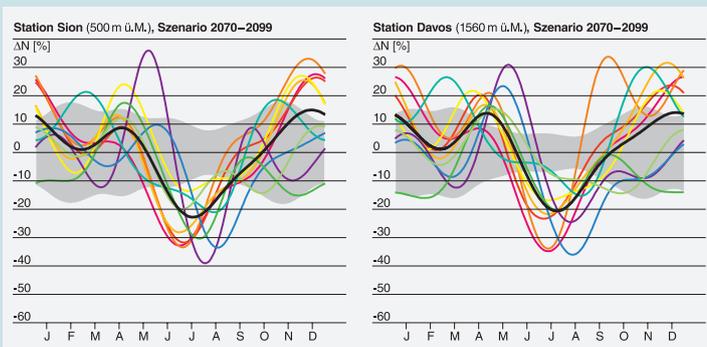


Abbildung 1.4: Jahresgang der Niederschlagsänderung ΔN im Vergleich zur Referenzperiode 1980 bis 2009 der zehn Klimamodellketten für die Periode 2070 bis 2099 für die Stationen Sion und Davos. Schwarze Linie: Mittelwert des Ensembles. Graues Band: ± 1 Standardabweichung der natürlichen Variabilität [A].

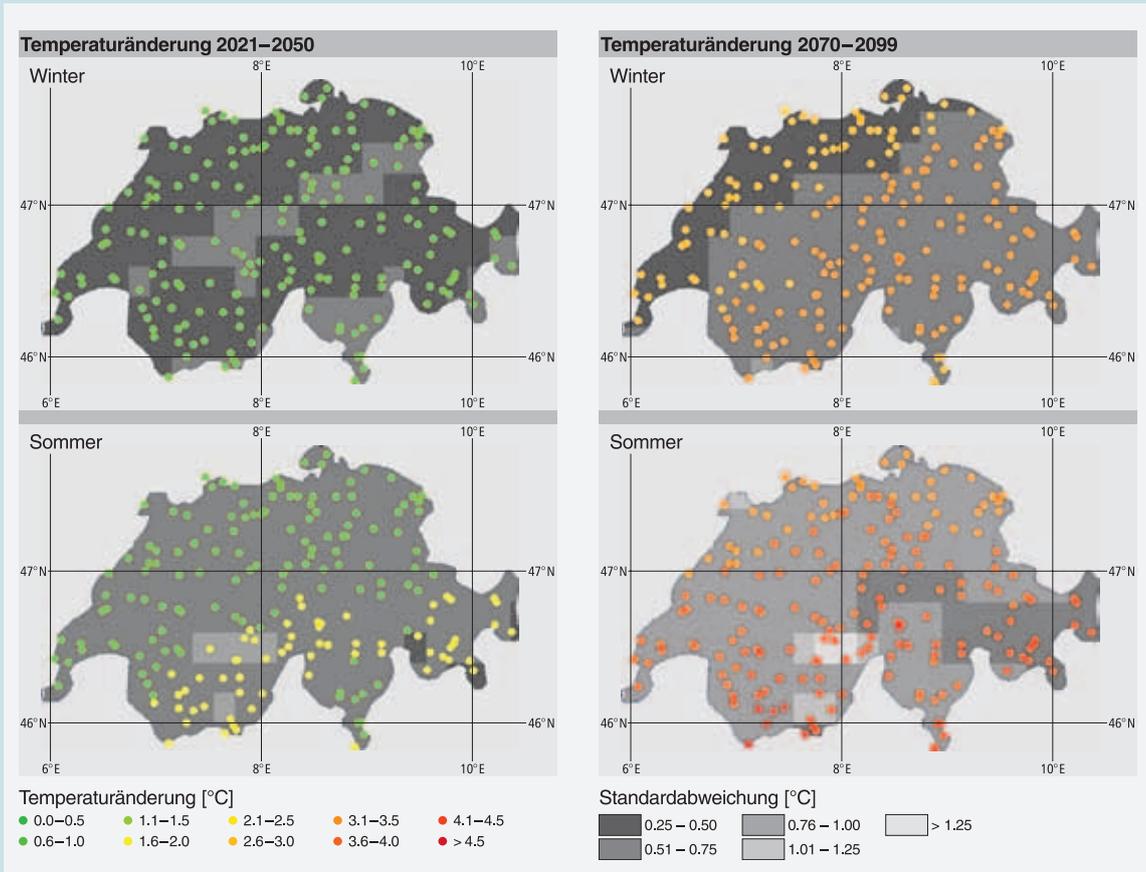


Abbildung 1.5: Räumliches Muster der Temperaturänderungen im Sommer und Winter des Ensemble-Mittels von 2021 bis 2050 (links) und 2070 bis 2099 (rechts) relativ zu 1980 bis 2009. Farbskala: Absolute Temperaturänderung. Graue Schattierung: Standardabweichung der saisonalen Temperaturänderung aller 10 Klimamodellketten. Je dunkler die Fläche, desto geringer die Modellunsicherheit [A].

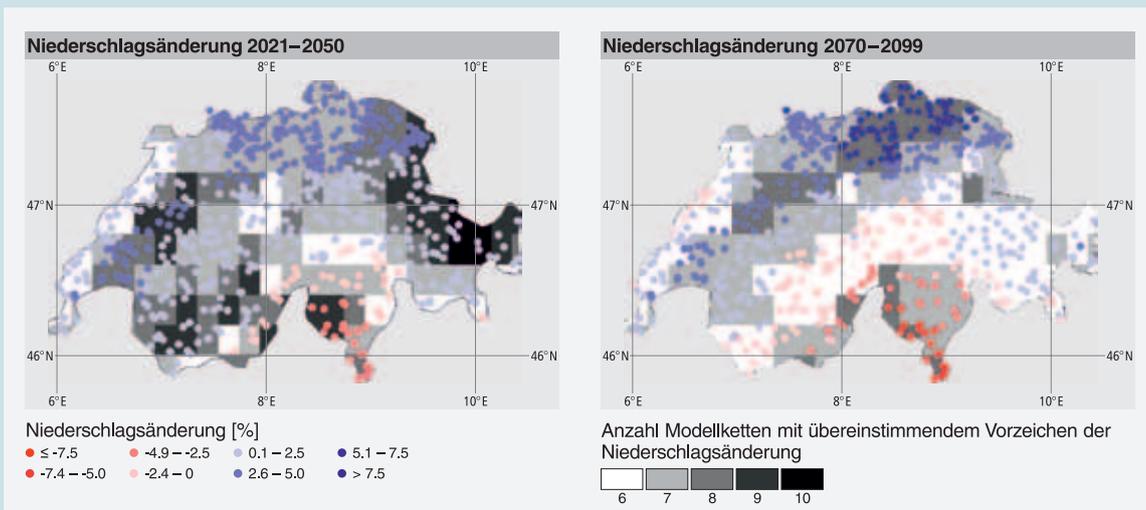


Abbildung 1.6: Relative jährliche Niederschlagsänderungen für die Perioden 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099 im Verhältnis zu 1980 bis 2009. Die graue Schattierung zeigt die Anzahl der Klimamodellketten mit übereinstimmendem Vorzeichen der Niederschlagsänderung. Je dunkler die Fläche, desto besser die Übereinstimmung und umso geringer die Modellunsicherheit [A].

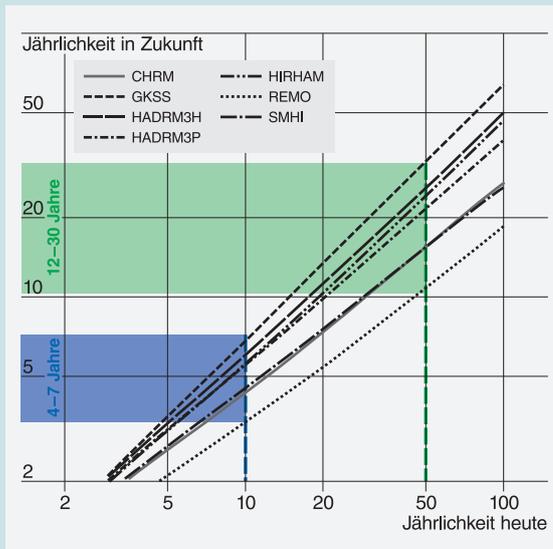


Abbildung 1.7: Jährlichkeit von Extremereignissen (Ein-Tages-Starkniederschläge) im Frühling für den nördlichen Alpenraum. Die Breite der Balken auf der Ordinate zeigt die Unsicherheit der Vorhersage. Ein heute im Durchschnitt alle zehn Jahre auftretendes Ereignis könnte in Zukunft alle vier bis sieben Jahre auftreten. Die diagonalen Linien zeigen die verschiedenen Modelle [5].

erkennen. Auffallend ist, dass zurzeit die grössten Niederschlagsmengen (bis 3000 mm/Jahr) in jenen Gebieten zu verzeichnen sind, in denen der zukünftige Niederschlag deutlich abnehmen wird.

Im Gegensatz dazu wird in vielen Regionen, die bisher als niederschlagsarm galten (900–1400 mm/Jahr), deutlich mehr Regen oder Schnee fallen. Das heute schon trockene Wallis bildet eine Ausnahme: Es befindet sich in einem Übergangsbereich, die Veränderungen sind deshalb gering. Insgesamt führt dies zu einer Verringerung der regionalen Niederschlagsunterschiede.

Extremereignisse

Durch die Temperaturzunahme und die damit verbundene höhere Luftfeuchtigkeit gehen viele Experten davon aus, dass Starkniederschlagsereignisse häufiger und intensiver werden (siehe Abbildung 1.7). Auch Experimente mit globalen Zirkulationsmodellen kommen zum gleichen Schluss [5]. Die Grafik stellt zudem die grossen Unsicherheiten bei der Vorhersage von Extremereignissen dar. Es ist möglich, dass aufgrund der zunehmenden Winterniederschläge und der steigenden Temperaturen in den Wintermonaten im Mittelland und im Jura vermehrt Hochwasserereignisse auftreten werden [2].

Auch Hitzewellen und die damit verbundenen Trockenheiten haben in den vergangenen Jahrzehnten zugenommen. Dieser Trend wird sehr wahrscheinlich anhalten oder zunehmen: Bis 2100 könnte jeder zweite Sommer so warm werden wie der Hitzesommer 2003 [2]. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ist sowohl in der Westschweiz, im Tessin als auch in der Nordostschweiz mit einer Zunahme von Hitzewellen zu rechnen [2].

Kapitel 2: Schnee und Gletscher



Das Wichtigste in Kürze

- Pro Grad Erwärmung sinkt die Dauer der saisonalen Schneedecke oberhalb von 1200 Metern Höhe um etwa 25 Tage.
- Die maximalen Schneewasserwerte sinken in den höher gelegenen Gebieten bis ins Jahr 2100 um etwa 50 bis 70 Prozent.
- Die Schneeverteilung der heutigen schneearmen Winter wird bis 2085 zum Normalfall werden.
- Bis ins Jahr 2085 wird der Schnee während des Sommers bis auf 3500 m ü. M. vollständig abschmelzen.
- Die Schweizer Gletscher schmelzen bis ins Jahr 2100 zu einem grossen Teil ab.
- Durch die Gletscherschmelze werden sich neue Seen bilden. Sie bergen Chancen für die Wasserkraftnutzung und Risiken bezüglich Naturgefahren.

Die in diesem Kapitel präsentierten Resultate stützen sich auf die Fachberichte zu den Gletschern [C, D].

Die Schneedecke und das Gletschereis gelten in Bezug auf den jahreszeitlichen Verlauf der Abflüsse in hochgelegenen Gebieten schweizweit als wichtigste hydrologische Faktoren. Die Temperatur ist sowohl für die Form des Niederschlags (Schnee oder Regen) als auch für das Ausmass der Gletscher- und Schneeschmelze entscheidend: Die Klimaerwärmung beeinflusst damit die beiden Faktoren direkt. Abhängig von der Witterung des vorangehenden Winters speichert die Schneedecke jährlich rund vier bis 20 Milliarden Kubikmeter Wasser, zum Zeitpunkt ihrer maximalen Ausdehnung im März oder April. Ein beeindruckender Vergleich: Alle Speicherseen der Schweiz haben ein Fassungsvermögen von ungefähr vier Milliarden Kubikmeter. Die Schneedecke schmilzt in der Regel bis zum Ende des Sommers weitgehend ab. In grosser Höhe wandelt sich ein kleiner Teil in Firn um. Damit wurden bisher die Gletscher genährt.

Die Schweizer Gletscher umfassen heute eine Reserve von rund 60 Milliarden Kubikmeter Wasser, welche hauptsächlich in früheren Jahrhunderten aufgebaut wurde. Dieses Volumen ist etwa gleich gross wie der Niederschlag, der durchschnittlich pro Jahr in der Schweiz fällt.

Entwicklung der Schneedecke

Die Schneefallgrenze entspricht ungefähr der Nullgradgrenze der Lufttemperatur. Steigt die Temperatur, so wandert auch die Schneefallgrenze in die Höhe. Untersuchungen haben gezeigt, dass die winterliche Schneefallgrenze bei einer Erwärmung von einem Grad um ungefähr 200 Meter ansteigt. Bisher lag die Schneefallgrenze im Winter durchschnittlich bei rund 900 m ü. M.

Seit den frühen 1980er Jahren hat die Dauer der Schneedecke vor allem unterhalb von 1800 m ü. M. um 20 bis 40 Prozent abgenommen – dies im Vergleich zum langjährigen Mittel [6].

Eine Modellrechnung [B] in 16 verschiedenen Einzugsgebieten (von den Hochalpen bis ins Mittelland) hat gezeigt, dass die Schneedeckendauer ab etwa 1200 Metern Höhe bis ins Jahr 2035 um rund 25 Tage kürzer sein wird (Abbildung 2.2). Die Modellsicherheiten sind allerdings vor allem im Bereich zwischen 1200 und 2000 m ü. M. ziemlich gross. Die Untersuchungen im Einzugsgebiet des Göschenalpsees [K] zeigen einerseits, dass sich die Winter bis ins Jahr 2085 auf allen Höhenstufen um fünf bis acht Wochen verkürzen werden. Andererseits wird erwartet, dass das ganze Gebiet während des Sommers bis auf eine Höhe von 3500 Meter schneefrei sein wird (Abbildung 2.3). Die Gletscher vor Ort werden dann nicht mehr mit Schnee genährt.

Die Untersuchungen zur Entwicklung des Schneewasserwertes bestätigen diese Ergebnisse und kommen in allen Gebieten und mit allen Klimamodellen zu ähnlichen Resultaten. Der Zeitpunkt des Schneereservenmaximums verschiebt sich um zwei bis vier Wochen in Richtung Jahresanfang. Die Reduktion des Maximums ist mit 20 bis 50 Prozent bis ins Jahr 2035 und mit 50 bis 70 Prozent bis ins Jahr 2085 beträchtlich. Die Variabilität zwischen schneereichen und schneearmen Wintern bleibt bis 2035 gross, nimmt aber bis 2085 beachtlich ab. Im Einzugsgebiet des Stausees Mattmark werden bis ins Jahr 2085 jene Winter, die heute als schneearm bezeichnet werden, zum Normalfall werden (Abbildung 2.1). Im Sommer bleibt hier nur in grossen Höhen Schnee liegen. Der Beitrag der Schneeschmelze zum Abfluss verringert sich bis 2035 durchschnittlich um etwa 130 ±40 Millimeter, bis 2085 um rund 300 ±60 Millimeter pro Jahr.

In hochgelegenen Einzugsgebieten wird damit die Fläche, auf welche Regen fällt, immer grösser. Somit fliesst immer mehr Wasser direkt ins Abflusssystem.

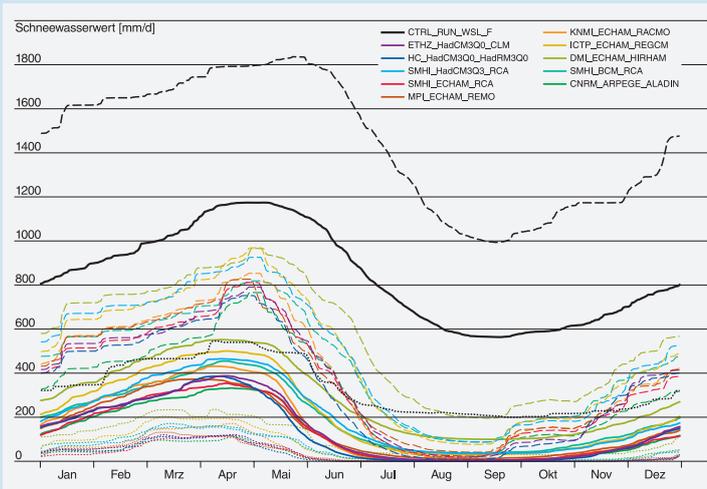


Abbildung 2.1: Einzugsgebiete der Kraftwerke Mattmark AG: Berechnete mittlere Schneewasserwerte [mm] für die Referenzperiode 1980 bis 2009 (schwarze Kurven) und für die Periode 2085 (farbige Kurven). Die farbigen Kurven zeigen die Ergebnisse der verschiedenen Klimamodellierungen. Dargestellt sind die 2.5- (gepunktet), 50- (ausgezogen) und 97,5 %-Quantile (gestrichelt) [H].

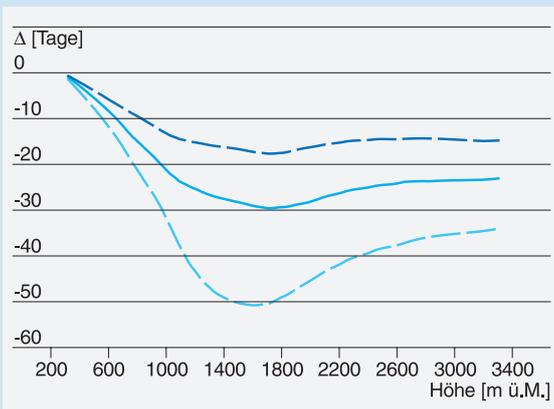


Abbildung 2.2: Veränderung der mittleren Schneedeckendauer mit mindestens etwa 20 cm Schnee in Abhängigkeit von der Höhe über Meer von 1980 bis 2009 bis zur Periode 2035. 5-, 50- und 95 %-Quantile [B].

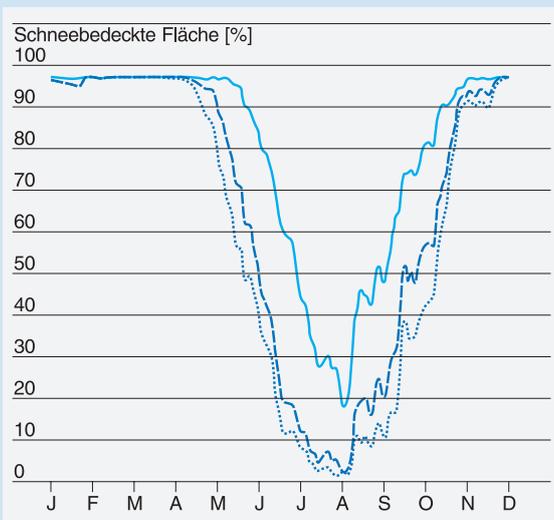


Abbildung 2.3: Schneebedeckung im Einzugsgebiet des Göschenalpsees im Verlauf des Jahres. Referenzperiode 1981 bis 2010 (ausgezogen) im Vergleich zu den IPCC-Szenarien A2 (gestrichelt) und B2 (gepunktet) für 2085 [K].

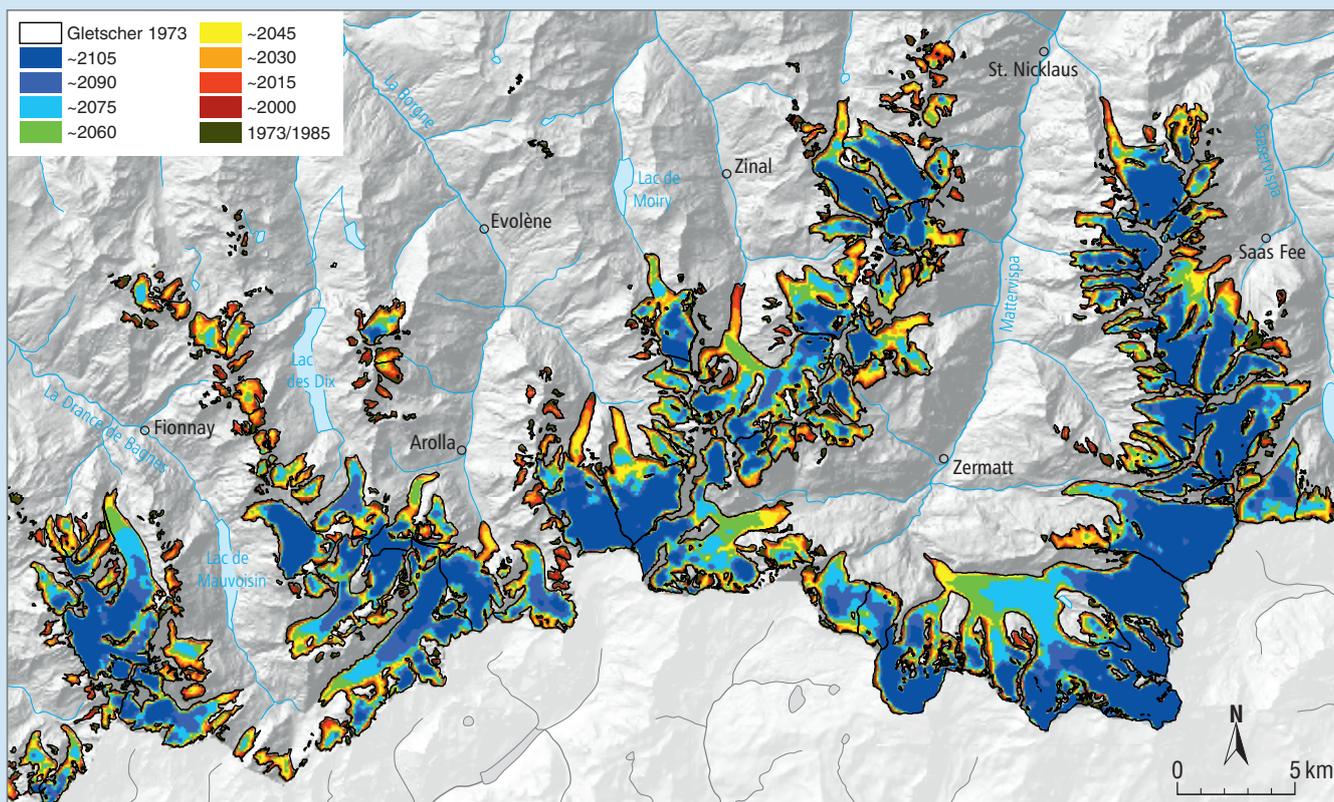


Abbildung 2.4: Entwicklung der Gletscherflächen bis zum angegebenen Jahr (s. Legende) für das südliche Wallis. Berechnung mithilfe der geschätzten Dickenabnahme [C].

Entwicklung der Gletscher

Im Verlauf des Winters lagert sich eine Schneedecke auf dem Gletscher ab. Im Sommer schmilzt dieser Schnee auf dem unteren Teil des Gletschers vollständig ab, im oberen Teil mindestens teilweise. Zusätzlich schmilzt jeweils ein Teil des Eises aus dem unteren Gletscherbereich. Wird dieses Abschmelzen durch das Anlagern von Schnee im oberen Teil kompensiert, so bleibt die Gesamtmasse des Gletschers im betreffenden Jahr unverändert: Man spricht von einer ausgeglichenen Massenbilanz. In nassen und kühlen Jahren wie zum Beispiel 1912 bis 1920 und 1974 bis 1981 [7] ist die Massenbilanz positiv: Die Gletscher lagern viel Eis an, nur ein kleiner Teil schmilzt. In warmen Jahren hingegen ist die Bilanz negativ und die Gletscher zehren von ihren Reserven. Dies ist seit 1985 der Fall. Dadurch speisen die Gletscher die Gewässer zusätzlich.

Mit Satellitendaten und topografischen Informationen konnte die Geometrie des Untergrundes der Gletscher und damit die Eisdicke aller Schweizer Gletscher abgeschätzt werden [C]. Für einige grössere Gletscher wurde zudem mittels Radarmessungen das Gletscherbett vermessen [D, 9]. Mit diesen Daten und mithilfe der Klima-

szenarien (vgl. Kapitel 1) führte man detaillierte Untersuchungen bezüglich des zukünftigen Abschmelzens der Eismassen durch (Abbildung 2.4) [C, D]. Zudem konnten für alle Eisflächen und -volumen der Schweiz Hochrechnungen durchgeführt werden (Abbildung 2.6). Dabei wird klar, dass die Gletscher sehr stark zurückgehen werden. Ihre Flächen und Volumen werden bis ins Jahr 2100 nur noch etwa 15 Prozent der Ausdehnungen des Höchststands von 1850 betragen. Die Unsicherheiten sind allerdings gross und können bis zu 30 Prozent betragen.

Für den Gornergletscher und die Gletscher im Einzugsgebiet des Stausees Mattmark wurden detaillierte Berechnungen zu den Flächen- und Volumenveränderungen durchgeführt [D]. Abbildung 2.5 zeigt beispielhaft die Entwicklung der Gletscherfläche, der Eisdicke und des Volumens des Gornergletschers: Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts bleiben nur noch 37 Prozent der heutigen Gletscherflächen und 21 Prozent der -volumen übrig; die Eisdicke wird also massiv zurückgehen. Die zukünftige Entwicklung der Vergletscherung in den untersuchten Einzugsgebieten ist in den Tabellen 2.1 und 2.2 zusammengefasst.

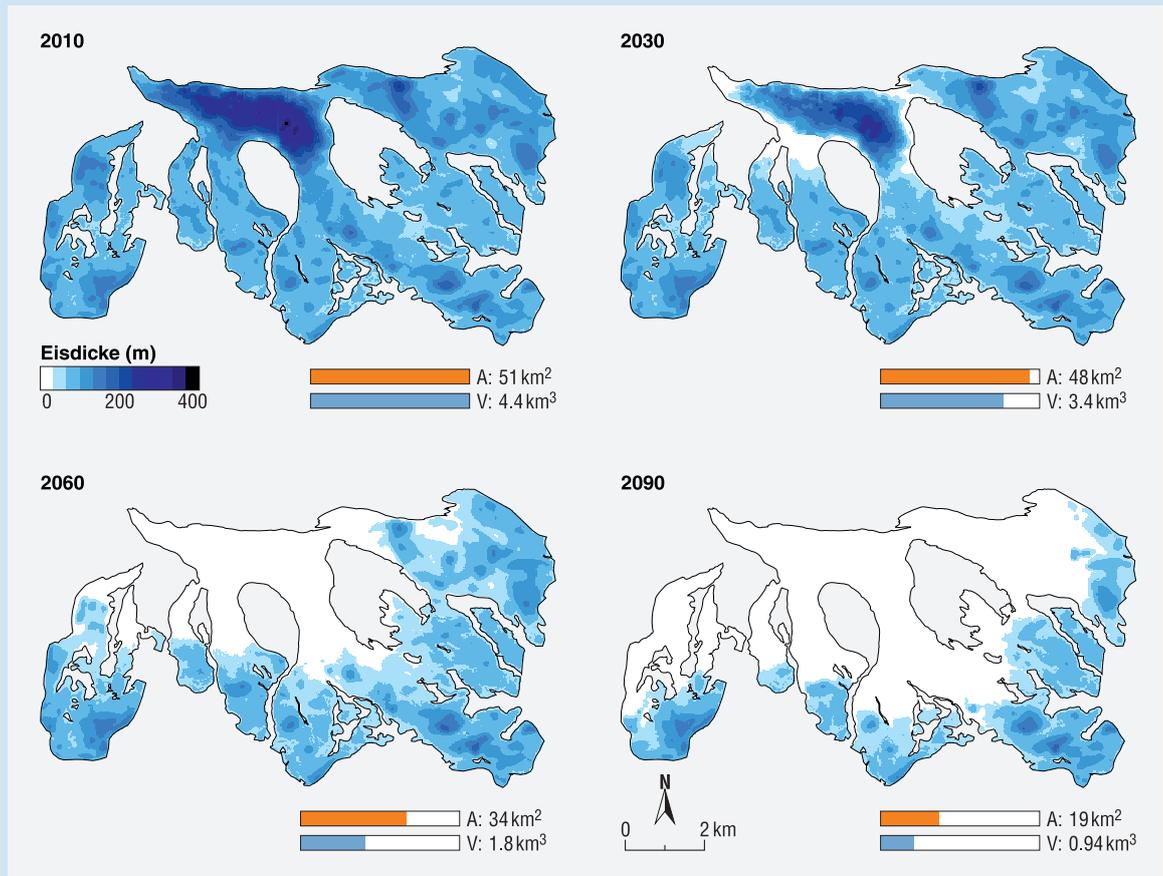


Abbildung 2.5: Entwicklung der Gletscherflächen A, des Eisvolumens V und der Eisdicken (Farbskala) im Einzugsgebiet des heutigen Gornergletschers. Weisse Flächen zeigen Bereiche, in denen mehr als die Hälfte von 100 Simulationen ein Verschwinden der Gletscher vorhersagen [D].

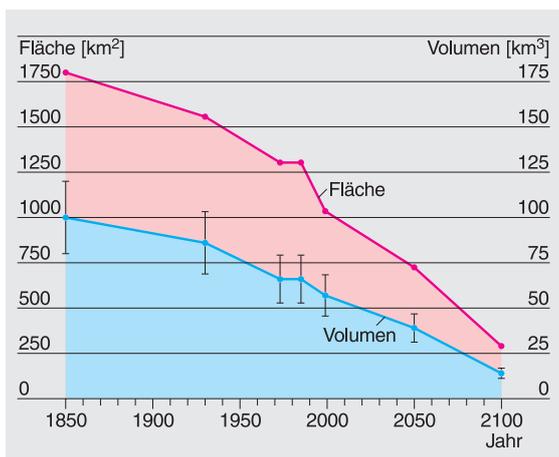


Abbildung 2.6: Verlauf der Gletscherflächen und -volumen in den Schweizer Alpen (mit Unsicherheitsbalken für die Volumenänderung) [C, 8, 9].

Wenn die Gletscher in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts teilweise oder ganz verschwunden sein werden, können sich in den Übertiefungen der Gletscherbetten neue Seen bilden (Abbildung 2.7). Es ist möglich, dass sich so etwa 500 neue Seen mit einer totalen Fläche von rund 50 Quadratkilometern und

Tabelle 2.1: Entwicklung der Gletscherflächen in den Einzugsgebieten der untersuchten Kraftwerke [C, D, H, I, J, K]

| Kraftwerk | Einzugsgebietsgrösse [km ²] | Gletscherfläche | | |
|--------------------------|---|-----------------|----------|----------|
| | | 1985 [%] | 2035 [%] | 2085 [%] |
| Mattmark | 86 | 35 | 19 | 9 |
| Gougra (Val d'Anniviers) | 253 | 19 | 15 | 10 |
| Gornera | 81 | 68 | 58 | 30 |
| Oberhasli | 450 | 23 | 15 | 8 |
| Göscheneralp | 96 | 25 | 14 | 6 |
| Prättigau | 283 | 3 | 3 | – |
| Löntsch (Klöntal) | 83 | 3 | 2 | – |

Tabelle 2.2: Entwicklung der Gletschervolumen von ausgewählten Einzugsgebieten [D].

| Gebiet | Einzugsgebietsgrösse [km ²] | Gletschervolumen [km ³] | | | |
|----------|---|-------------------------------------|------|------|------|
| | | 2010 | 2030 | 2060 | 2090 |
| Mattmark | 65.7 | 1 | 0.7 | 0.3 | 0.06 |
| Gornera | 80.9 | 4.4 | 3.4 | 1.8 | 0.9 |

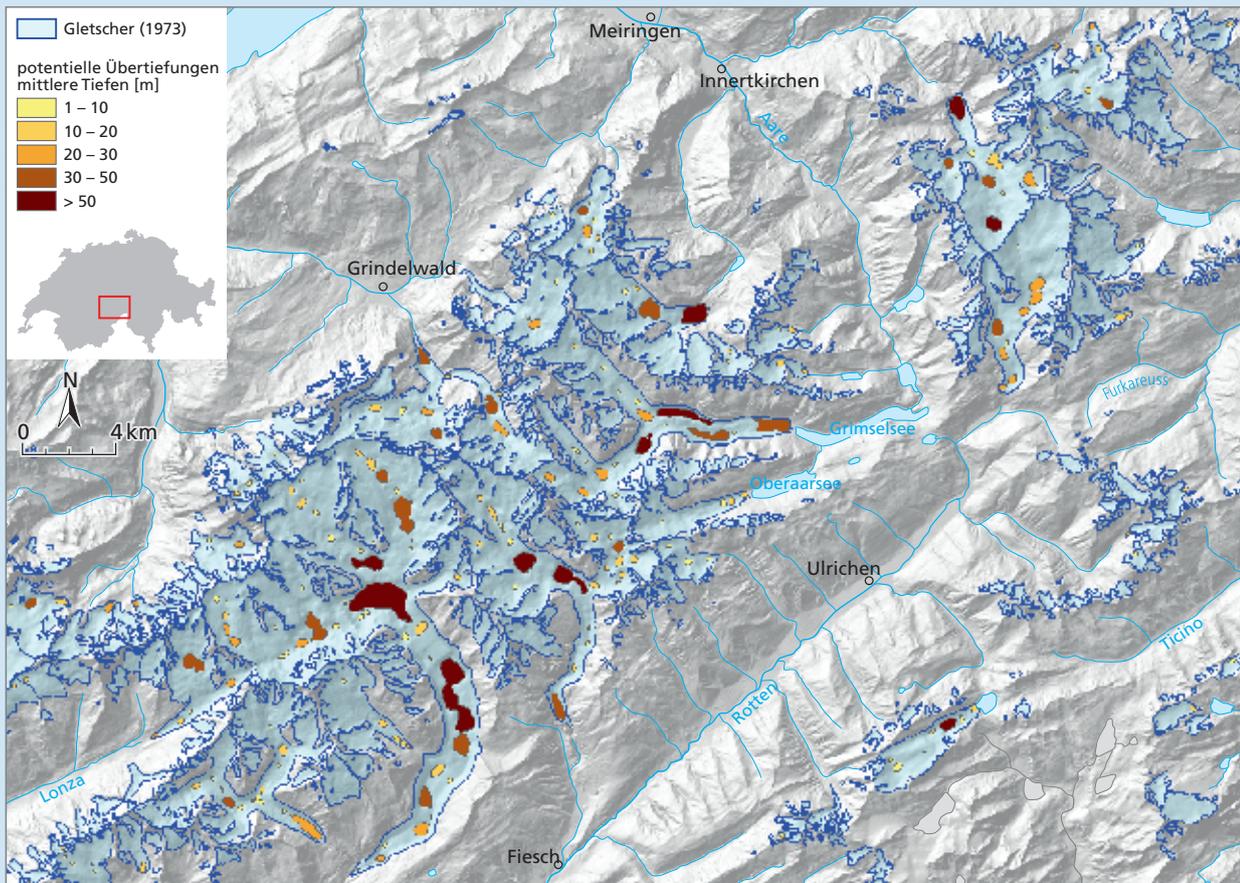


Abbildung 2.7: Gebiete mit potentiellen Seen in der Aletsch- und Furkaregion mit Angabe der Seetiefen [C].

einem Volumen von rund zwei Kubikkilometern bilden werden [C]. Damit käme etwa die Hälfte des heutigen totalen Stauseevolumens der Schweiz dazu. Die grössten Seen mit Volumen von über 50 Millionen Kubikmetern sind vor allem im Wallis zu erwarten: Unter dem Grossen Aletschgletscher, dem Gornergletscher, dem Glacier d'Otemma und dem Glacier de Corbassière. Lokal (beispielsweise beim Aletschgletscher) ist es möglich, dass sich die Gletscher durch den Wasserkontakt noch rascher zurückziehen werden.

Möglicherweise sind diese Seen für die Wasserkraftnutzung von Interesse, denn sie speichern viel Wasser. Doch sie bergen auch ein Risiko: Es ist gut möglich, dass sich die Bergflanken nach der Gletscherschmelze destabilisieren und als Bergstürze oder Hangrutschungen in die durch die Schmelze gebildeten Seen stürzen werden. So ausgelöste Flutwellen könnten ins Tal fließen und dort verheerende Zerstörungen verursachen. Die neuen Seen haben daneben aber einen weiteren positiven Effekt: Das neu anfallende Geschiebe kann sicher zurückgehalten werden. All diese Fragen werden zurzeit im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP61 untersucht.

Kapitel 3: Abflüsse und Abflussregimes



Das Wichtigste in Kürze

- Der durchschnittliche jährliche Abfluss aus stark vergletscherten Gebieten steigt vorübergehend an. Gegen 2100 sinkt er in den nördlich der Alpen gelegenen Einzugsgebieten auf etwa den Stand von 1961 bis 1990. Im südlichen Wallis und auf der Alpensüdseite sinkt er wegen der geringeren Niederschläge unter den Stand von 1961 bis 1990.
- Das jahreszeitliche Maximum der Abflüsse aus heute vergletscherten Gebieten verschiebt sich vom Sommer in Richtung Frühjahr. Dadurch werden die Abflussregimes etwas ausgeglichener, auch in den Unterläufen.
- Im Spätsommer und Herbst sind bedeutend tiefere Abflüsse zu erwarten – insbesondere nach trockenen Sommern.
- In abflussarmen Jahren werden die Flüsse künftig noch weniger Wasser führen.
- Die Verdunstung steigt generell leicht an, sie bleibt aber im Vergleich zum Jahresniederschlag klein.

Die Grundlage dieses Kapitels bilden die Fachberichte [B] und [F bis K].

Rückblick

Detaillierte Informationen über das Wasserangebot sind zentral für eine optimale Nutzung der Wasserkraft. Betreiber von Wasserkraftwerken benötigen deshalb für die Planung der Einrichtungen und des Betriebs Trends über die mittel- und langfristigen Entwicklungen des verfügbaren Wassers. Um die komplexen Prozesse und Zusammenhänge zu verstehen, sind Analysen der Daten aus der Vergangenheit notwendig. Sie bilden die Grundlage für die prospektiven Arbeiten [10].

Entwicklungen im Einzugsgebiet des Rheins

Die Messreihe des Abflusses des Rheins bei Basel geht bis ins Jahr 1808 zurück und stellt die längste hydrologische Beobachtungsreihe Mitteleuropas dar. Das Einzugsgebiet erstreckt sich über eine Fläche von fast 36'000 Quadratkilometern (67 Prozent der Fläche der Schweiz) und deckt den ganzen nördlichen Alpenraum der Schweiz ab. Diese Daten sind deshalb ideal für Analysen der hydrologischen Entwicklungen in der Schweiz.

Die Messungen seit 1808 zeigen keine grossen Veränderungen bezüglich der Jahresabflussmengen (Abbildung 3.1). Die Verteilung des Abflusses über das Jahr hinweg hat sich jedoch deutlich verändert: Seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts nehmen die durchschnittlichen Sommerabflüsse ab und jene des Winters zu (Abbildung 3.2). Diese saisonale Verschiebung wird einerseits durch den winterlichen Niederschlag, der aufgrund der steigenden Temperaturen immer häufiger als Regen fällt, verursacht. Der Niederschlag der Wintermonate fliesst damit direkt ins Abflusssystem. Dazu entsteht in den

Sommermonaten weniger Schmelzwasser. Andererseits wird im Sommer in alpinen Speicherseen Wasser gesammelt, das dann im darauf folgenden Winter für die Stromerzeugung verwendet wird. Dadurch steigt die Abflussmenge während des Winters zusätzlich an. Die innerjährliche Variabilität nimmt deshalb signifikant ab, das Abflussregime wird ausgeglichener. In den Sommer- und Herbstmonaten haben die Niederschläge abgenommen, die Abflussmengen in diesen Jahreszeiten sind deshalb geringer ausgefallen [10, 11].

Veränderungen im Abflussregime

Das Abflussregime beschreibt den mittleren Verlauf des Abflusses innerhalb eines Jahres. Zur Berechnung der Regimes werden für jeden Monat des Jahres die sogenannten Pardékoefizienten bestimmt. Dies ist der Quotient aus dem mittleren Monats- und dem mittleren Jahresabfluss [12]. Dadurch wird ersichtlich, wie gross der jeweilige Anteil des Monatsabflusses am Jahresabfluss ist. Die Pardékoefizienten unterschiedlicher Fließgewässer lassen sich direkt vergleichen. Das Abflussregime liefert damit wichtige Informationen für die Nutzung von Gewässern, sei es zur Stromproduktion, für die Wasserversorgung, die Bewässerung oder die Flussschifffahrt [12].

Die Regimes in der Schweiz lassen sich räumlich in drei Klassen einteilen: Alpine, mittelländische und jurassische sowie südalpine Regimes. Abbildung 3.3 zeigt, wie stark sich die Abflussverteilungen unterscheiden können.

Regimeänderungen in der Vergangenheit

Analysen des Abflussverhaltens von 56 ausgewählten Einzugsgebieten zeigen, dass sich die Regimes seit Messbeginn verändert haben: In stark vergletscherten Gebieten hat der Abfluss in Frühling, Sommer und Winter zugenommen. Auch die jährlichen Abflussmengen sind angestiegen. Der Grund hierfür liegt bei den wärmeren Temperaturen, die dazu führen, dass die Gletscher- und Schneeschmelze früher im Jahr stattfindet. Dazu bildet sich mehr Schmelzwasser. Die nivalen und pluvialen Abflussregime weisen kaum Veränderungen auf (Abbildung 3.4), der jährliche Abfluss ist bis heute ziemlich konstant geblieben. Die Regimes des Juras präsentieren eine deutliche Verschiebung der Abflussspitzen vom April in den März hinein. Dies führt zu einer Umklassierung von nivo-pluvial jurassien zu pluvial jurassien. Für die Regimes des Tessins lassen sich aufgrund der kurzen Datenreihen keine klaren Aussagen machen [B].

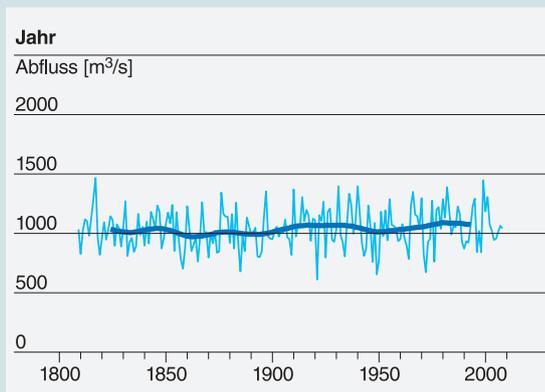


Abbildung 3.1: Mittlere Jahresabflussmengen in m^3/s für den Rhein bei Basel 1808 bis 2007. Dunkelblaue Linie: 30-jähriger Mittelwert [10].

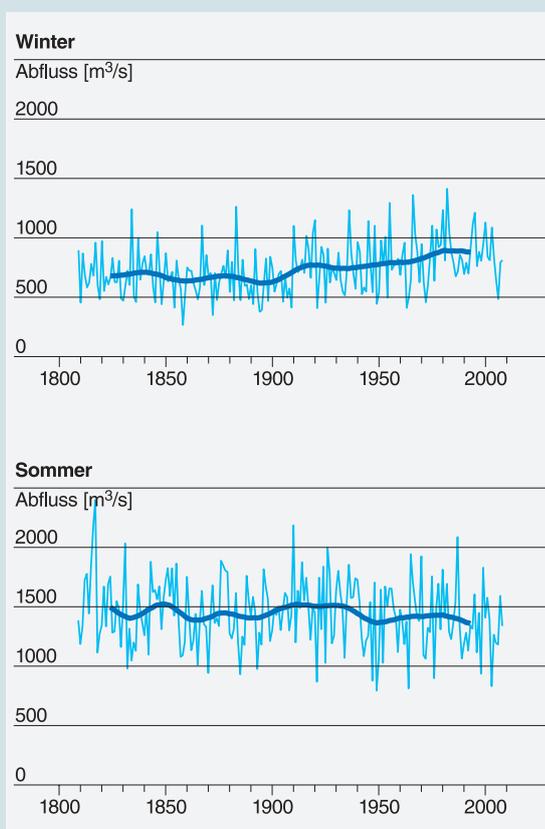


Abbildung 3.2: Mittlere Abflussmengen in m^3/s des Rheins bei Basel für den Winter und den Sommer 1808 bis 2007. Dunkelblaue Linie: 30-jähriger Mittelwert [10].

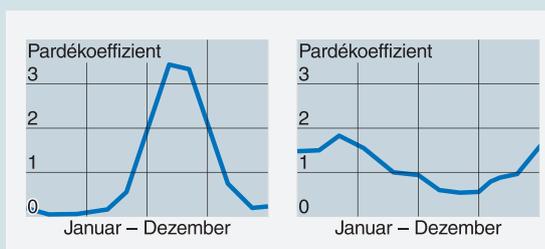


Abbildung 3.3: Verlaufskurven verschiedener Abflussregimes. Die horizontale Achse bildet den Verlauf des Jahres ab, auf der vertikalen Achse sind die Pardékoefizienten aufgetragen. Links: alpines Regime, rechts: jurassisches Regime [13].

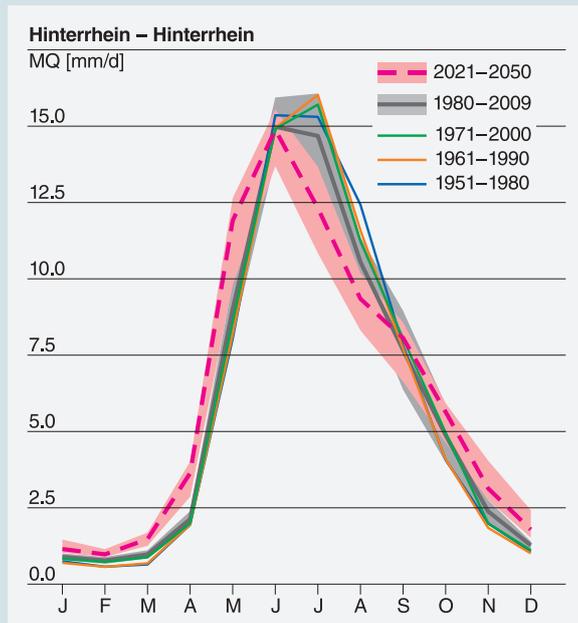


Abbildung 3.4: Zehnjährige mittlere Abflussregimes für den Hinterrhein [B].

Blick in die Zukunft

Änderungen der Abflussmengen

Das jährliche Wasserangebot wird durch steigende Temperaturen, zunehmende Verdunstung und ein verändertes Niederschlagsregime überall stark beeinflusst. In den vergletscherten Gebieten kommen die sich ändernden Schmelzwassermengen hinzu.

Modellrechnungen in den Untersuchungsgebieten zeigen: Die **Verdunstung** nimmt in der Periode 2035 in allen untersuchten Einzugsgebieten um drei bis fünf Prozent zu, während der Periode 2085 sogar um vier bis neun Prozent. In absoluten Zahlen sind dies nur etwa 15 beziehungsweise 27 Millimeter pro Jahr. Im Vergleich zu den einflussreichen Veränderungen bei den Niederschlagsmengen sind diese Zahlen unbedeutend. In grossen Höhen ist die Abschätzung der Verdunstung relativ unsicher.

Die Veränderungen im **Bodenwasserspeicher** sind unbedeutend: Die Speicher befinden sich oft in hoch gelegenen Einzugsgebieten, haben deshalb eine geringe Mächtigkeit und damit ein kleines Wasserspeichervermögen.

Änderungen der Abflüsse in teilvergletscherten Einzugsgebieten

Anhand der Messungen am Gornergletscher (Abbildung 3.5) zeigt sich im Detail, wie sich die Abflüsse in den teilvergletscherten Einzugsgebieten seit 1900 verändert haben und wie sie sich in Zukunft entwickeln werden. Durch den zukünftigen Anstieg der Schneefallgrenze wird weniger Schnee auf und neben den Gletschern abgelagert, die sommerliche Schneeschmelze wird den Abfluss deshalb nur wenig beeinflussen. Der Regenanteil (Flüssigniederschlag) an der Abflussmenge wird zunehmen. Durch die Temperaturzunahme im Sommer wird der Gletscher intensiver schmelzen. Die Schmelzwassermenge nimmt also vorübergehend zu.

In der fernen Zukunft wird die vergletscherte Fläche deutlich abnehmen, es entsteht wieder weniger Schmelzwasser. Geht man von einer gleich bleibenden Niederschlagsmenge aus, so wird übers ganze Jahr gesehen wieder etwa gleich viel Wasser abfliessen wie in jenen Jahren, als die Massenbilanz der Gletscher noch ausgeglichen war. Dies selbst dann, wenn die Gletscher vollständig abgeschmolzen sind.

Laut den Modellrechnungen wird der Niederschlag gegen Ende des 21. Jahrhunderts jedoch etwas abnehmen. Zudem dürfte die Verdunstung aufgrund der höheren Temperaturen leicht zunehmen. Deshalb erreichen die Abflussmengen in heute nur wenig oder mässig vergletscherten Einzugsgebieten im Jahr 2100 tiefere Werte als zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Die jahreszeitliche Abflussverteilung wird sich markant verändern, wie das Beispiel der Gornera zeigt (Abbildung 3.6): Bei wärmeren Temperaturen und noch immer grossen Gletscherflächen steigt der Sommerabfluss vorübergehend an (bis etwa ins Jahr 2050). Um 2085, wenn der Gletscher deutlich kleiner sein wird, sinkt die sommerliche Abflussspitze. Zudem beginnt und endet die Schneeschmelze früher im Jahr, die saisonale Spitze verschiebt sich in den Frühsommer hinein. Ausserdem sinkt der Abfluss im Spätsommer oder Herbst deutlich, besonders in trockenen Jahren. Im Winter werden die Abflüsse etwas grösser. Je stärker ein Einzugsgebiet vergletschert ist, desto deutlicher sind diese jahreszeitlichen Veränderungen zu beobachten.

Im langjährigen Jahresmittel verändern sich die Abflüsse in den untersuchten Gebieten im Vergleich zur Referenzperiode 1980 bis 2009 unterschiedlich: Für vergletscherte Gebiete im südlichen Wallis wird eine Abnahme um sechs bis neun Prozent (2035), beziehungsweise zehn bis zwölf Prozent (2085), erwartet [H, J]. In den Gebieten der Kraftwerke Oberhasli geht man von einer Abnahme um durchschnittlich drei (2035) beziehungsweise sieben Prozent (2085) aus [I]. Beim Göscheneralpsee wird keine Veränderung oder aber ein Anstieg um sechs bis 23 Prozent für die beiden

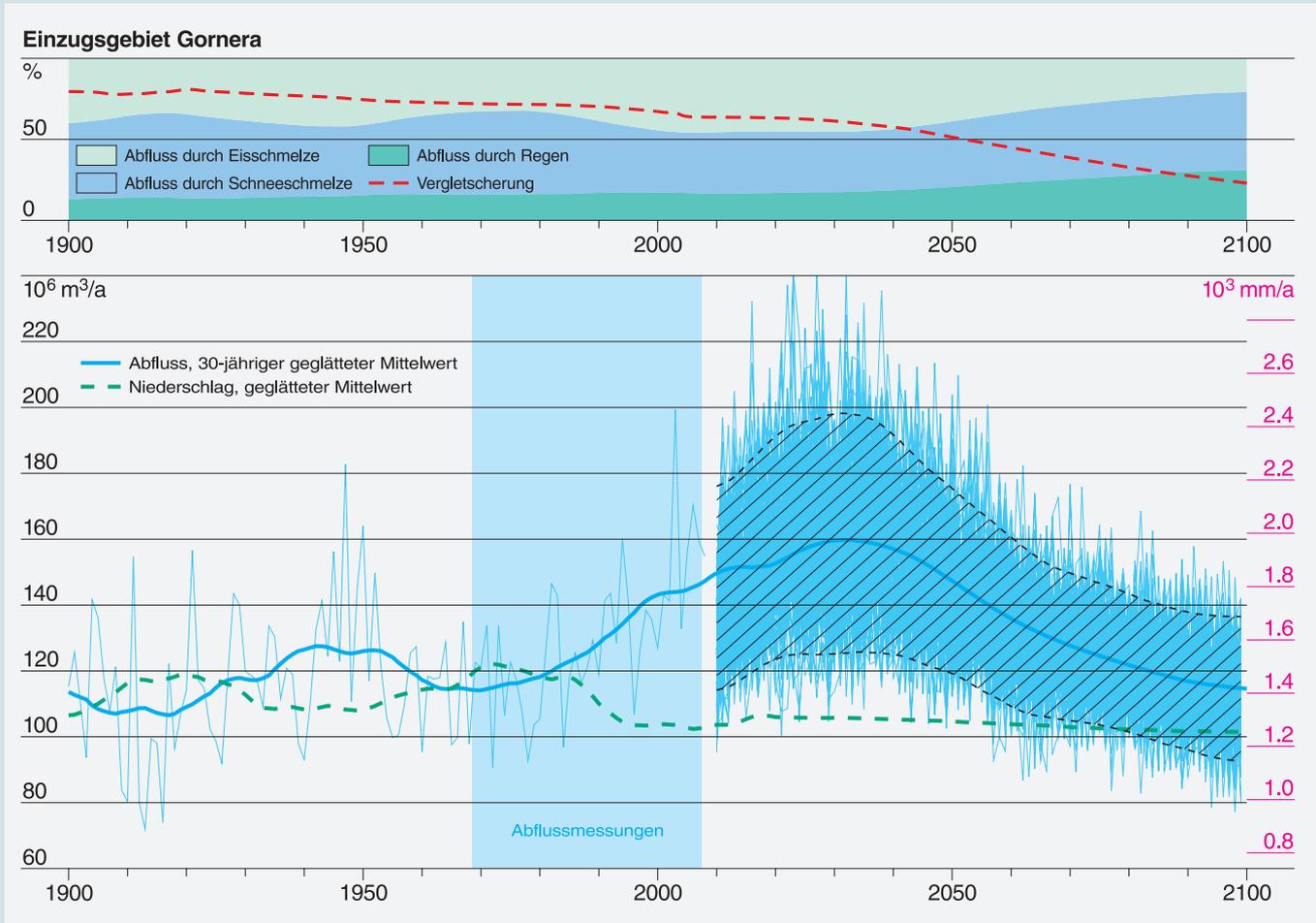


Abbildung 3.5: Jahresabfluss an der Messstation Gornera (Grande Dixence) unterteilt in Anteile, die durch Schneeschmelze (blau), Eisschmelze (hellgrün) sowie direktem Abfluss aus Regen (dunkelgrün) entstehen (im oberen Bereich). Die rote Linie zeigt den Grad der Vergletscherung im Einzugsgebiet. Der Abfluss wird künftig durch zusätzliche Eisschmelze zunehmen, später wird er durch die Schneeschmelze dominiert. Die schraffierte Fläche gibt den Unsicherheitsbereich, der von den Klimaszenarien stammt, an [D].

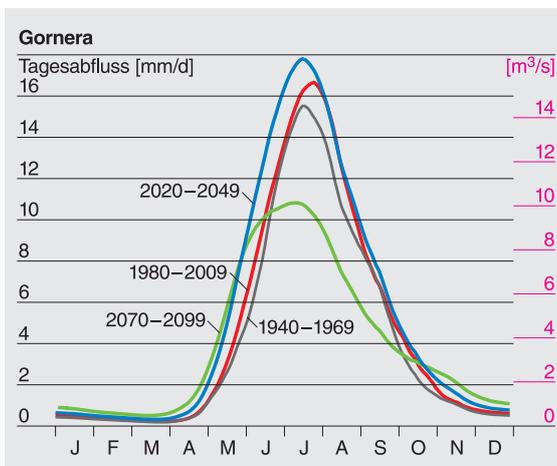


Abbildung 3.6: Veränderung der mittleren jahreszeitlichen Verteilung der Abflüsse für die Gornera [D].

Zeitperioden erwartet (je nach verwendetem hydrologischem Modell). Das Modell sagt einen vorübergehenden Anstieg um ganze 13 Prozent (Periode 2035) für das Gebiet der Rhone bis Gletsch voraus [B]. Dieser Anstieg wird durch Untersuchungen von [14] bestätigt. In den weniger hoch gelegenen Gebieten nördlich der Alpen verändern sich die jährlichen Abflüsse: Die Berechnungen verraten eine Spannweite von einer Abnahme um eineinhalb bis hin zu einer Zunahme um vier Prozent [B]. Im Süden wurden durch geringer ausfallende Niederschläge Abnahmen von zwei bis vier Prozent berechnet [B]. All diese kleineren Veränderungen sind im Vergleich zur beobachteten Variabilität oft unbedeutend und statistisch nicht signifikant.

| Abflussregimetypen | | Rhone – Gletsch | Kraftwerk Göscheneralp | Simme – Oberried | Kraftwerk Mattmark | Kraftwerk Gougra | Hinterrhein – Hinterrhein | Landquart – Klosters | Kraftwerk Oberhasli | Dischmabach – Davos | Mönchbach – Trittwald | Stützbach – Davos | Plessur – Chur | Löntsch – Staumauer | Taschinasbach – Grünsch | Minster – Euthal | Simme – Oberwil | Sitter – Appenzell | Sense – Thörishaus | Glatt – Herisau | Broye – Payerne | Töss – Neftenbach | Ergolz – Liestal | Birse – Moutier | Riale di Calneggia – Caviggno | Cassarate – Pregassona |
|-------------------------|--|-----------------|------------------------|------------------|--------------------|------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|----------------|---------------------|-------------------------|------------------|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------|
| a-glaciaire | | H K | K | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| b-glaciaire | | S1 | | H K | K | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| a-glacio-nival | | | | S1 | | K | H | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| b-glacio-nival | | S1 | | S1 | | K | H K | K | H | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| nivo-glaciaire | | | | | | S1 | S1 | S1 | K | K | K | | | | | | | | | | | | | | | |
| nival alpin | | S2 | | S2 | | | | S2 | S1 | S1 | S1 | H K | K | | H | | | | | | | | | | | |
| nival de transition | | | | | | S2 | | | | | | | S1 | | K | H | H K | H K | | | | | | | | |
| nivo-pluvial préalpin | | | | | | | | | | | | | | | | K | S1 | | | | | | | | | |
| pluvial supérieur | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | H | | | | | | |
| pluvial inférieur | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | H | H K | | | | |
| nivo-pluvial jurassien | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | K | H | | |
| pluvial jurassien | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | H | | | |
| nival méridional | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | H K | |
| nivo-pluvial méridional | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | S1 | |
| pluvio-nival méridional | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | H K |
| pluvial méridional | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | S1 |

Abbildung 3.7: Übersicht über die zeitlichen Veränderungen der Abflussregimes aller untersuchten Einzugsgebiete [B, F, G, H, I, J, K]. Markiert sind Einzugsgebiete mit Regimeänderungen.

Eine frühere Studie [15] hat mit älteren Klimaszenarien für elf alpine Einzugsgebiete eine Abflussverminderung von fünf bis 15 Prozent (im Mittel sieben Prozent) bis 2035 und von zwölf bis 30 Prozent (im Mittel 16 Prozent) bis zur Periode 2085 berechnet. Die in dieser Studie berechneten Veränderungen sind also moderater ausgefallen.

Veränderung der Abflussregimes

Im Gegensatz zu den Veränderungen der jährlichen Abflussvolumen sind die Veränderungen in den jahreszeitlichen Verteilungen der Abflussregimes ausgeprägt und statistisch meistens signifikant. Eine Übersicht dazu gibt Abbildung 3.7. In den meisten glazialen und nivalen Gebieten (Gegenden mit einer mittleren Höhe von über 1500 m ü. M.) finden grosse Verschiebungen statt: Das Abflussregime hat sich seit 1970 um eine oder zwei Regime-Stufen verändert oder wird dies in der nahen oder spätestens in der fernen Zukunft tun (Abbildung 3.4). Entsprechend reagieren auch die von der Schnee-

schmelze beeinflussten Gebiete im Jura und Tessin. Bei den vom Niederschlagsgeschehen dominierten Gebieten des Mittellandes konnten keine Regimeverschiebungen beobachtet werden.

Diese Veränderungen bedeuten in den höher gelegenen Gebieten eine Verschiebung der saisonalen Abflussspitze um drei bis sechs Wochen in Richtung Frühjahr. Die winterlichen Abflüsse werden dabei zunehmen, die sommerliche Spitze abnehmen und im Spätsommer oder Herbst wird deutlich weniger Abfluss zu beobachten sein. Die Abflüsse sind übers Jahr gesehen etwas ausgeglichener. Die Niedrigwasserperiode während des Winters bleibt in den höher gelegenen Gebieten bestehen [B, F].

Kapitel 4: Geschiebe



Das Wichtigste in Kürze

- Die vorhandenen Sedimentmengen übersteigen die Transportkapazitäten insbesondere in Gletscherbächen stark.
- Die grössten Geschiebemengen werden künftig tendenziell etwas früher im Jahr transportiert – es findet eine Verschiebung vom Sommer in den Frühling hinein statt.
- Die ausgetragenen Sedimentmengen nehmen in gut der Hälfte der untersuchten Einzugsgebiete (38) ab – dies durch die sinkenden Abflussmengen.
- Die lokalen Bedingungen sind für konkrete Aussagen entscheidend.
- Die künftige Entwicklung von Starkniederschlagsereignissen ist unsicher. Es ist deshalb kaum vorhersehbar, wie sich der Feststofftransport durch diese Extremereignisse verändern wird.

Die in diesem Kapitel präsentierten Resultate stützen sich auf den Fachbericht *Auswirkungen der Klimaänderung auf die Geschiebefracht [E]*.

Der Feststofftransport aus den Einzugsgebieten der Wasserkraftanlagen kann zu Verlandungen von Stauseen und einem damit verbundenen sinkenden Speichervolumen, zur Abnutzung von Turbinen und zu Beschädigungen an den Wasserfassungen führen. Dies bringt hohe Betriebs- und Unterhaltskosten für die Betreiberfirmen mit sich. Die WSL hat aus diesen Gründen im Rahmen der vorliegenden Studie in den Einzugsgebieten der vier Walliser Kraftwerke Grande Dixence SA, Gougra SA, Mattmark AG und Mauvoisin SA Untersuchungen durchgeführt. Anhand dieser Analysen soll herausgefunden werden, wie sich der Geschiebetransport in der nahen und fernen Zukunft entwickeln könnte.

Um aussagekräftige Resultate zu erhalten, sind sowohl langjährige Messreihen als auch Feldbeobachtungen notwendig: Die Kraftwerksbetreiber stellten zahlreiche Informationen bezüglich Abfluss, Sedimentfrachten und dem Klima der jeweiligen Einzugsgebiete zur Verfügung. Um zusätzliche Informationen zu Gerinnegeometrie, Korngrößenverteilung und Geomorphologie zu erhalten, wurden umfangreiche Feldmessungen durchgeführt.

Der Geschiebetrieb

Die Materialmenge, welche durch Wasser mobilisiert (vom Untergrund gelöst) und transportiert werden kann, ist vom Geschiebepotential und von der Transportkapazität des Gerinnes abhängig. Das Geschiebepotential wird durch das Vorhandensein von transportierbarem Material, den Vergletscherungsgrad, die Ausdehnung

Relativer Geschiebetransport von 2021–2050 im Verhältnis zur Periode 1980–2009

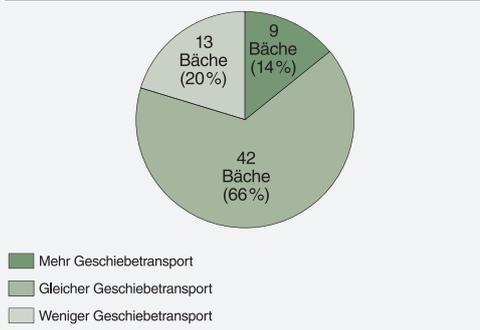


Abbildung 4.1: Geschiebetransportänderungen in 64 untersuchten Bächen für die Periode 2021 bis 2050 im Vergleich zu den Beobachtungen während der Referenzperiode von 1980 bis 2009. Mehr Geschiebetransport entspricht einem Wert von >120 Prozent der Geschiebemengen der Referenzperiode, weniger Geschiebetransport einem Wert von <80 Prozent der Referenzperiode. Ein gleicher Geschiebetransport gilt für Geschiebemengen zwischen 80 und 120 Prozent der Werte der Referenzperiode [E].

Relativer Geschiebetransport von 2070–2099 im Verhältnis zur Periode 1980–2009



Abbildung 4.2: Geschiebetransportänderungen in 64 untersuchten Bächen für die Periode 2070 bis 2099 im Vergleich zu den Beobachtungen während der Referenzperiode von 1980 bis 2009. Mehr Geschiebetransport entspricht einem Wert von >120 Prozent der Geschiebemengen der Referenzperiode, weniger Geschiebetransport einem Wert von <80 Prozent der Referenzperiode. Ein gleicher Geschiebetransport gilt für Geschiebemengen zwischen 80 und 120 Prozent der Werte der Referenzperiode [E].

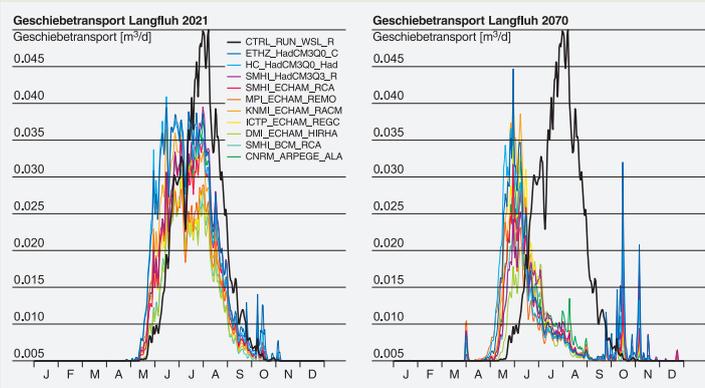


Abbildung 4.3: Saisonale Verteilung der Geschiebetransporte für je zehn Szenarien der Perioden 2021 bis 2050 (links) und 2070 bis 2099 (rechts) im Vergleich zu den Beobachtungen der Referenzperiode von 1980 bis 2009 (schwarz) für das Einzugsgebiet Langfluh (Grande Dixence) [E].

des Permafrostes und die Vegetationsbedeckung bestimmt. Die Transportkapazität eines Gerinnes ist einerseits vom geringsten Gefälle innerhalb des Flussverlaufes abhängig, da dort die Schleppspannungen an der Sohle am kleinsten sind. Unterhalb dieser Stelle werden nur jene Geschiebemengen verfrachtet, die der Transportkapazität des flachsten Gewässerabschnitts entsprechen. Andererseits bestimmt die Abflussmenge die Transportkapazität mit. Da das Klima diese Faktoren stark beeinflusst, werden sich diese durch die globale Erwärmung und die damit einhergehenden Temperatur- und Niederschlagsänderungen verändern. Die Resultate der vorangehenden Kapitel zu den Themen Klima und Gletscher bilden deshalb die Grundlage für die Geschiebeuntersuchungen:

- Die Intensität des **Niederschlags** beeinflusst die transportierbare Geschiebemenge stark: Je grösser die Niederschlagsmenge, desto mehr Material kann mobilisiert und transportiert werden. Deshalb wird insbesondere während Starkniederschlagsereignissen sehr viel Geschiebe befördert. Damit allerdings Material ausgetragen werden kann, ist ein kritischer Abfluss nötig, welcher als untere Grenze für den Stofftransport gilt. Unterhalb dieser Abflussmenge findet kein Sedimentaustrag statt.
- Die sich zurückziehenden **Gletscher** legen Flächen frei, die zum Teil aus Lockermaterial bestehen. Dieses ist anfällig auf Erosions- und Transportprozesse. Die Bedingungen für den Sedimenttransport nach dem Gletscherrückzug sind jedoch sehr unterschiedlich.

Änderungen bezüglich des Niederschlags, des Abflusses und der Vergletscherung

Die für die Station Zermatt berechneten Klimaszenarien (Kapitel 1) dienen als Referenz für die Abfluss- und Gletschermodellierungen und die darauf aufbauenden Berechnungen der Geschiebeszenarien:

Niederschlag: Für die Regionen rund um die vier Einzugsgebiete wurden für den Sommer deutliche Niederschlagsabnahmen modelliert. Während den übrigen Jahreszeiten werden die Niederschlagsmengen leicht zunehmen, dies allerdings innerhalb der natürlichen Variabilität. Die jährlichen Niederschlagssummen werden im Durchschnitt um zirka drei Prozent abnehmen.

Abfluss: Die gesamte jährliche Abflussmenge wird in Normaljahren abnehmen – dies gegenüber der Referenzperiode. Zudem wurde eine Vorverschiebung der abflussreichsten Wochen von Ende Juli auf Anfang Juni modelliert. In den Wintermonaten wird der Abfluss aufgrund der steigenden Temperaturen und der damit verbundenen Veränderung der Niederschlagsform (Regen statt Schnee) zunehmen. Insgesamt wird der Abfluss dadurch über die Jahreszeiten ausgeglichener.

Gletscher: Die Modellierungen der Gletscher zeigen eine deutliche Abnahme der Vergletscherung in der Zukunft (Tabelle 2.1).

Auswirkungen auf den Geschiebehaushalt

Für insgesamt 64 Bäche wurde der Geschiebetransport untersucht: 36 im Gebiet der Grande Dixence, neun in jenem der Kraftwerke Gougrou, neun im Einzugsgebiet der Kraftwerke Mattmark und zehn rund um das Gebiet von Mauvoisin. In den Abbildungen 4.1 und 4.2 werden nur diejenigen Bäche dargestellt, in denen unabhängig von Starkniederschlagsereignissen ein Feststofftransport stattfindet.

Die durch die Klimaänderung bedingten geringeren mittleren Abflüsse werden für rund die Hälfte der betrachteten Bäche einen Rückgang der Geschiebefrachten mit sich bringen, vor allem für die Periode 2070 bis 2099 (Abbildungen 4.1 und 4.2). Zudem zeigt sich auch eine Veränderung des saisonalen Verlaufs des Stofftransports: Während die maximalen Geschiebemengen heute meist in den Sommermonaten Juli und August anfallen, verschiebt sich ihr Auftreten in Zukunft aufgrund der veränderten Abflussregimes in den Frühsommer (Abbildung 4.3) oder sogar vom Frühling in den Winter hinein. Während Starkniederschlagsereignissen sind hohe Sedimentmengen zu erwarten. Wie sich diese in Zukunft entwickeln werden, ist aufgrund der noch unzuverlässigen Angaben über die Veränderung von Starkniederschlagsereignissen nur schwer modellierbar.

Sedimentverfügbarkeit am Beispiel des Turtmannals

Zur Bestimmung der potentiellen Sedimentverfügbarkeit und des Sedimentgeschehens in der Zukunft sind gebietsspezifische Kenntnisse unumgänglich. Wie stark der Geschiebehaushalt von den lokalen Gegebenheiten wie Hangneigung, Vegetationsbedeckung, einmündende Seitentäler, Art des von schmelzenden Gletschern frei gelegten Materials, natürliche oder gebaute Rückhaltelemente etc. bestimmt wird, zeigt sich im folgenden Beispiel des hinteren Turtmannals (südliches Seitental des Rhonetals).

Am oberen, südlichen Ende des Turtmannals befinden sich die beiden Gletscherzungen des Turtmann- und Bruneggletschers mit einer Gesamtgletscherlänge von 5.8 bzw. 4.6 Kilometern. Die Eismassen haben um sich herum einen Sedimentkörper aus lockerem Moränenmaterial gebildet. Zusätzlich zu diesem Material befindet sich in einem seitlich ins Haupttal einmündenden Tal, dem Innern Wängertälli, potentiell erodierbares Material in Form von Moränenschutt. Gesamthaft befinden sich 32 ± 13 Millionen Kubikmeter potentiell

erodierbare Sedimentmaterialmengen im Gebiet des hinteren Turtmannals. Ein Austrag des Sedimentmaterials in den Turtmann-Stausee, welcher das Gebiet im Norden begrenzt, wird von vielen Gebietseigenschaften bestimmt und an einigen Stellen durch lokalgeografische Gegebenheiten *limitiert*:

- Die seitlich ins Turtmannal einmündenden Hängetäler Wängertälli und Pipijtälli enthalten zum Teil nur sehr wenig Sedimentmaterial. Dazu sind die Täler durch einen Felsriegel vom Haupttal abgegrenzt. Dieser verhindert einen Materialaustrag ins Turtmannal.
- Die über Zuleitungen an den Stausee angeschlossenen Hängetäler Frili-, Büomatt- und Brändjittälli verfügen über Entsander, welche Feinsedimente zurückhalten.
- Schmelzen die Gletscher weiter, so werden sie sich vorerst auf einen felsigen Untergrund ohne Sedimente zurück ziehen. Danach wandern sie über eine flache Stufe, die zu einem sehr geringen Sedimentaustrag beiträgt.
- Ein oberhalb des künstlichen Sedimentbeckens liegender Rundhöcker wirkt sich dämmend auf den Sedimentaustrag aus. Die Turtmänner erodiert zwar immer mehr Rundhöcker-Felsmaterial weg und schneidet den dahinter liegenden Sedimentkörper an, so dass mit einem höheren Sedimentaustrag gerechnet werden müsste. Die Neigung ist jedoch so gering (3.7 Grad) und die Vegetation wirkt derart stabilisierend, dass kein zusätzliches Sedimentmaterial dazu stossen wird.
- Die vorderen Seitenmoränen der beiden grossen Gletscher haben eine geringe Mächtigkeit und verfügen zudem über eine Vegetationsbedeckung, die eine stabilisierende Wirkung auf das Lockermaterial hat.

Andere Standorte weisen für den Austrag von Geschiebematerial *förderliche Eigenschaften* auf:

- Die unbewachsenen und steilen Bereiche der hinteren Seitenmoränen des Turtmann- und Bruneggletschers sind kaum gegen Austragungsprozesse geschützt. Dazu bewirken die steigenden Temperaturen eine Destabilisierung des Permafrostes.
- Der Schuttkegel im Innern Wängertälli ist durch den schwindenden Permafrost ebenfalls destabilisiert und somit anfällig auf Sedimentaustragungen.

An diesen beiden Stellen muss deshalb in Zukunft mit einem zusätzlichen Lockermaterialaustrag gerechnet werden. Das potentielle Austragungsvolumen beträgt hier total 27 Millionen Kubikmeter.

Kapitel 5: Wasserkraftnutzung



Das Wichtigste in Kürze

- Vermutlich sinkt die langfristige Produktion in hoch gelegenen Walliser Speicherkraftwerken.
- In schneebedeckten und weniger vergletscherten Gebieten werden sich die saisonalen Zuflüsse stark verändern: Im Winter wird mehr Wasser vorhanden sein, im Sommer weniger. Dies führt häufig zu grösseren Fassungskmengen und damit zu einer steigenden Produktion – trotz geringer ausfallenden Jahresabflussmengen.
- Laufkraftwerke werden durch die in Zukunft ausgeglicheneren Regimes von den Abflussänderungen profitieren.
- Die Veränderungen bewegen sich oft im bisherigen Schwankungsbereich (Erfahrungsbereich).
- Die Resultate aus den einzelnen Kraftwerksbetrieben lassen sich nicht verallgemeinern.

Die Fachberichte zu den sechs Fallstudien KW Löntsch [F], Kraftwerke Prättigau [G], KW Mattmark [H], KW Oberhasli [I], FM Gougra [J] und Stausee Göscheneralp [K] bilden die Grundlage dieses Kapitels.

Fassungskmenge – Grundlage für die Stromproduktion

Für Betreiber von Wasserkraftwerkenanlagen ist die sogenannte *Fassungskmenge* die entscheidende hydrologische Grösse. Sie ist abhängig von der Dimensionierung einer Wasserfassung, den täglich vorliegenden Abflüssen des Fliessgewässers und der einzuhaltenden Restwassermenge (Abbildung 5.1). Die Fassungskmenge und damit die Stromproduktion sind zudem vom saisonalen Abfluss abhängig. Ein ausgeglichenes Abflussregime führt zu einer Fassungskmenge, die nahe an der Dimensionierungs-Fassungskmenge (Abbildung 5.1) liegt. Aufgrund der Klimaänderung haben sich die saisonalen Abflussspitzen in höher gelegenen Gebieten in Richtung Frühjahr verschoben, so dass im Sommer weniger und im Winter mehr Abfluss beobachtet werden kann. Dieser Effekt wird sich in Zukunft noch verstärken. Zudem werden die Jahresabflussmengen in den vergletscherten Gebieten langfristig eher abnehmen (vgl. Kapitel 3).

Die erhöhten Winterabflüsse können mit Ausnahme allfälliger Dotierwasser vollständig abgeleitet werden. Die Fassungskmengen im Winter werden deshalb ansteigen. Im Sommer kann auch in Zukunft in den meisten Fällen noch gleich viel Wasser gefasst werden (Abbildung 5.2). Deshalb wird die Fassungskmenge in den nächsten Jahrzehnten trotz niedrigerem Jahresabfluss ansteigen. In Kraftwerksanlagen wie beispielsweise Laufkraftwerken, welche das anfallende Wasser nicht speichern können und sofort turbinieren, kann

mehr Strom produziert werden als früher. In Speicherkraftwerken mit hauptsächlich natürlichen Zuflüssen kommt dieser Effekt allerdings nicht zum Tragen. Hier entscheiden vor allem die totalen jährlichen Abflussmengen über die Stromproduktion.

Bisherige Entwicklung der Fassungenmengen

Um mehr Informationen über die potentiellen Fassungenmengen zu erhalten, wurden in 51 über die ganze Schweiz verteilten kleinen und mittleren Fließgewässern Analysen durchgeführt. Diese brachten zum Vorschein, dass sich die Jahresvolumen in den vergangenen 50 Jahren kaum verändert haben. Durch die saisonalen Veränderungen konnte das gefasste Wasser übers Jahr verteilt ausgeglichener gespeichert werden [16]: Die Klimaveränderung und teilweise höhere Winterniederschläge haben zu einem saisonalen Ausgleich der Abflüsse geführt. Durch die starke Gletscherschmelze steht dazu in den Alpen momentan mehr Wasser zur Verfügung – dies aber nur vorübergehend. Diese Fassungenmengen-Änderungen widerspiegeln sich auch in der Stromproduktion: Unter Berücksichtigung der zunehmenden Produktionskapazität ist die in der Schweiz hydraulisch erzeugte Stromproduktion seit 1960 angestiegen (Abbildung 5.3).

Zukünftige Entwicklung der Stromproduktion – Fallstudien

Die zur Verfügung stehende Wassermenge, die mögliche Stromproduktion und der erzielte Umsatz sind nicht immer linear miteinander verbunden – der Kraftwerkstyp und die individuellen Auslegungen der einzelnen Anlagen sind wegweisend. Die Resultate lassen sich deshalb kaum auf andere Anlagen übertragen. In mehreren Fallstudien konnten die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Stromproduktion nach dem in der Einleitung in Abbildung b skizzierten Vorgehen abgeschätzt werden.

Die Anlage der **Kraftwerke Oberhasli AG (KWO)** ist mit neun Kraftwerken, acht Speicherseen (195 Millionen Kubikmeter) und einem Pumpspeicherkraftwerk eine komplexe und weit verzweigte Anlage. Für die elf teilweise hochalpinen Teileinzugsgebiete wurde bei leicht abnehmenden zukünftigen Niederschlägen und insbesondere einem weiteren Gletscherrückgang eine Abflussabnahme sowie eine markante Verschiebung des saisonalen Abflussmaximums um drei bis sechs Wochen in Richtung Frühjahr ermittelt [1]. Der modellierte Rückgang der Zuflüsse in den einzelnen Teileinzugsgebieten beträgt bis zur Periode 2035 null bis -7.5 Prozent (im Mittel -2.8 Prozent), bis in die ferne Zukunft -1.0 bis -14.0 Prozent (im Mittel -6.5 Prozent). Diese mittleren Veränderungen liegen im Bereich der heutigen Variabilitäten; die trockenen Jahre liegen jedoch deutlich unterhalb der aktuellen Minima. Die veränderten Abflussregimes führen im Fall der KWO nicht zu einem

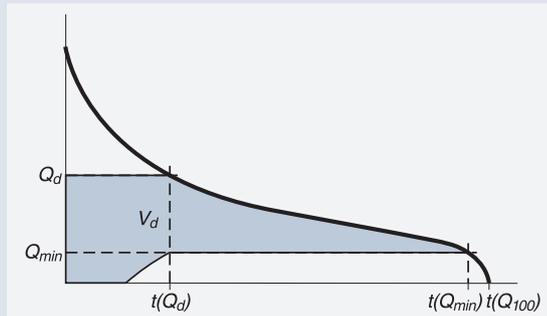


Abbildung 5.1: Mittlere relative Abfluss-Häufigkeitsverteilung (Dauerkurve). Q_d : Dimensionierungsabfluss der Wasserfassung. Q_{min} : Dotierwassermenge; V_d : Dimensionierungs-Fassungsmenge [16].

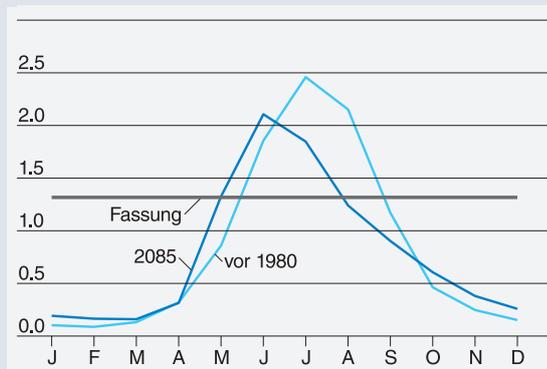


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung des mittleren Jahresganges der Monatsabflüsse: früher (vor 1980): Regime b-glaciaire, Szenario 2085: Regime b-glazio-nival. Dimensionierung der Fassung = 25-Prozent-Quantil der Tagesabflüsse. Der Jahresabfluss ist um fünf Prozent gesunken, die Fassungenmenge hat sich jedoch um neun Prozent erhöht.

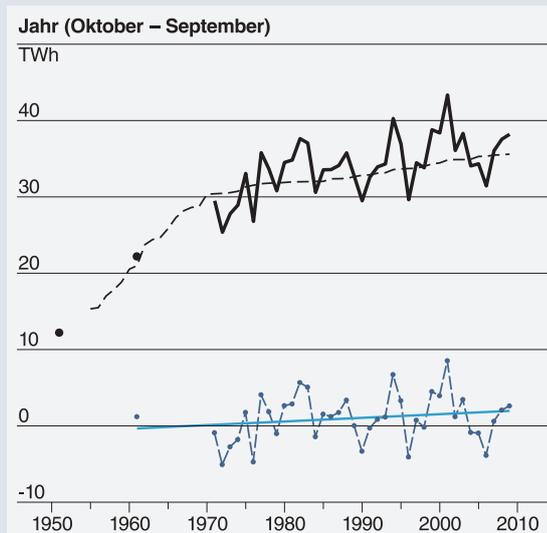


Abbildung 5.3: Stromproduktion in TWh von Schweizer Wasserkraftwerken zwischen 1950 und 2009. Die ausgezogene schwarze Kurve gibt den Verlauf der tatsächlichen jährlichen Produktion wieder. Die gestrichelte Linie bildet die durchschnittliche potentielle Produktionsmenge (Produktionskapazität) ab. Die blaue Kurve zeigt die im Vergleich zur ansteigenden Produktionskapazität trendbereinigte beobachtete Produktionsveränderung an, die Geraden deren Trend [16].

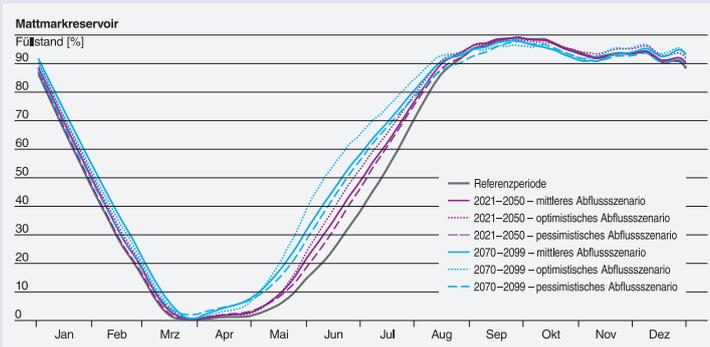


Abbildung 5.4: Berechnete Ausnutzung der Speicherkapazität des Stausees Mattmark und des Ausgleichsbeckens Zerbeiggern [H].

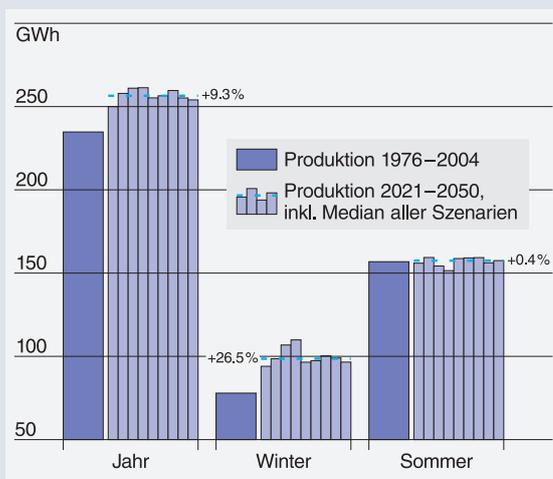


Abbildung 5.5: Energieproduktion Gesamtsystem KW Prättigau 1976 bis 2004 gegenüber 2021 bis 2050 (9 Klimaszenarien). Winter: Oktober bis April (7 Monate). Sommer: Mai bis September (5 Monate) [G].

grundsätzlich anderen Bewirtschaftungsmuster. Die Akkumulationsperiode wird unter den veränderten hydrologischen Bedingungen allerdings kürzer, die abflussarme Zeit hingegen länger. Unter dem gegenwärtigen Ausbaustand der KWO würde der Umsatz durch diese Veränderungen in der Periode 2035 um drei bis sechs Prozent zurückgehen, bis in die ferne Zukunft um ein bis 17 Prozent. Durch eine Realisierung des Investitionsprogrammes KWoplus (Leistungserhöhung, grössere Pumpspeicherkapazität und zusätzliches Speichervolumen) könnten die Verluste deutlich reduziert werden. Der Umsatzrückgang würde dann bis zur Periode 2035 nur zwei bis fünf, bis in die ferne Zukunft ein bis zwölf Prozent betragen. Dies zeigen die Modellrechnungen.

Das **Kraftwerk Mattmark** umfasst einen Speicher von insgesamt 100 Millionen Kubikmeter Inhalt und die beiden Zentralen Zerbeiggern und Stalden. In Zerbeiggern ist zudem eine Pumpstation installiert. Im Einzugsgebiet des Kraftwerks Mattmark sind zukünftig insbesondere im Sommer geringere Niederschläge zu erwarten [H]. Zudem verkleinern sich die Gletscher-

flächen so rasch, dass die Schmelzwasserzuflüsse bereits ab ungefähr 2020 geringer ausfallen werden [D, H]. Insgesamt muss bis zur Periode 2035 mit einer Reduktion der mittleren jährlichen Abflussmengen um sechs Prozent (± 5.0 Prozent) und bis 2085 um zwölf Prozent (± 6.0 Prozent) gerechnet werden. Das saisonale Maximum der Abflüsse verschiebt sich dabei um fünf bis acht Wochen in Richtung Frühjahr. Modellrechnungen mit einem Betriebsmodell, welches den Ertrag bei heutigen Strommarkt-Randbedingungen berechnet, zeigen für ein mittleres Klimaszenario nur geringe Veränderungen [H]. Verwendet man ein optimistisches Szenario, so kann vorübergehend mit etwa sieben Prozent und bis 2085 mit rund drei Prozent Produktions- und Ertragssteigerungen gerechnet werden. Rechnet man allerdings mit einem pessimistischen Klimaszenario, so betragen die Produktionseinbußen 14 (Szenario 2035) beziehungsweise 22 Prozent (Szenario 2035), die Umsatzeinbußen machen dann neun (Szenario 2035) beziehungsweise 13 Prozent (Szenario 2035) aus. Im Winter ist eine leichte Zunahme, im Sommer eine ausgeprägte Abnahme der Produktion zu erwarten – dies bis zur Periode 2085. Alle Einflüsse wirken sich auf den Verlauf des Füllgrads der Speicher aus (Abbildung 5.4).

Die Anlagen der **Gougrou SA** bestehen aus vier Kraftwerken mit zwei Speichern, die total 78 Millionen Kubikmeter Wasser fassen können. Die vor allem im Sommer verminderten Niederschläge führen zusammen mit den abnehmenden Schmelzwassermengen der kleiner werdenden Gletscher zu einer Abnahme der Abflüsse um rund neun Prozent. Das saisonale Maximum der Abflüsse verschiebt sich um rund sechs Wochen in Richtung Frühjahr [J]. Diese Veränderungen erfordern keine baulichen Anpassungen an den bestehenden Anlagen. Die Betriebsregeln müssen jedoch angepasst werden: So führen beispielsweise die saisonalen Abflussänderungen zu einer Anpassung der Revisionszeiten [J]. Parallel zu den Veränderungen der Abflüsse wird die Produktion und damit die Rentabilität zurückgehen.

Die Wasserkraftwerkgruppe **KW Prättigau** umfasst neun Wasserfassungen, drei Kraftwerksstufen und kleine Saisonspeicher (elf Millionen Kubikmeter). Die Kraftwerkgruppe entspricht weitgehend einem Laufkraftwerk. Die heute meist glazionivalen Regimes in den sieben Einzugsgebieten werden sich in Zukunft deutlich verändern: Es ist mit höheren Abflüssen von September bis Mai sowie tieferen Abflüssen von Juni bis August zu rechnen [G]. Die Zuflüsse werden sich je nach Einzugsgebiet unterschiedlich verändern, bis 2035 sollte jedoch im Mittel mit -6.0 bis $+8.0$ Prozent Zuflussänderungen gegenüber dem Zeitraum von 1976 bis 2005 gerechnet werden. Dies würde einer winterlichen Produktionssteigerung um 20 bis 40 Prozent entsprechen – bei kaum veränderter Sommerproduktion.

Über das ganze Jahr gesehen entspräche dies einer durchschnittlichen Zunahme um 9.3 Prozent, (Abbildung 5.5).

Eine Analyse der Dauerkurven hat zudem gezeigt, dass sich ein Ausbau der Hauptfassung in Klosters nicht lohnen würde, da die Fassungskapazität im Sommer auch künftig nur an einzelnen zusätzlichen Tagen überschritten wird. Diese Fallstudie zeigt den Effekt der besseren Ausnützung der Fassungskapazität im Winter deutlich (Abbildung 5.5).

Das **Speicherkraftwerk Löntsch** (Klöntalersee) umfasst einen Speichersee (40 Millionen Kubikmeter) in einem natürlichen Einzugsgebiet sowie eine Zentrale. Die saisonale Abflussverteilung wird sich auch hier verändern: Im Herbst, Winter und Frühling wird dem Speicher mehr Abfluss zufließen, im Sommer weniger [F]. Insgesamt kann im Vergleich zur Periode 1998 bis 2009 mit einer Veränderung des Zuflusses um -0.3 bis +6.1 Prozent (im Mittel +2.2 Prozent) bis zur Periode 2035 gerechnet werden. Diese Veränderungen liegen allerdings im Streubereich der bisherigen Messungen. Durch eine Anpassung des monatlichen Produktionsprofils kann (bei unverändertem Preismodell) mit einer Produktionsänderung von -0.4 bis +6.1 Prozent (Abbildung 5.6) und einer Umsatzsteigerung um +1.0 bis 6.5 Prozent gerechnet werden. Eine Sensitivitätsanalyse hat dazu gezeigt, dass die Produktion bei einem grösseren Zufluss konstant ansteigt. Auch der Umsatz steigt zunächst linear an. Erst ab etwa 50 Prozent mehr Zufluss flacht der Umsatz ab.

Das **Speicherkraftwerk Göschenen** umfasst mehrere Wasserfassungen und Zuleitungstollen sowie den Göschenalpsee als zusätzlichen Speicher (70 Millionen Kubikmeter). Der saisonale Spitzenabfluss verschiebt sich bis zur Periode 2035 um etwa drei Wochen, bis in die ferne Zukunft um sechs Wochen in Richtung Frühling. Entsprechend verändert sich auch das heutige glaziale Regime in Richtung nival alpin [K]. Die mittleren Zuflüsse verändern sich je nach verwendetem Klimamodell sowie in Abhängigkeit vom hydrologischen Modell im Bereich von -0.6 bis +23.0 Prozent bis zur Periode 2035 sowie zwischen -1.9 bis +22.0 Prozent bis zur Periode 2085. Angesichts dieser grossen Unsicherheiten und aufgrund der unbekanntenen Preisentwicklung können keine verlässlichen Umsatzzahlen berechnet werden [K]. Die Produktion steigt proportional zu den Zuflüssen.

Zusammenfassend kann aufgrund der oben beschriebenen Fallstudien festgehalten werden, dass die unterschiedliche Höhenlage und Vergletscherung sowie insbesondere die unterschiedliche Entwicklung der Niederschläge gegen Ende des Jahrhunderts die Produktion entscheidend beeinflussen.

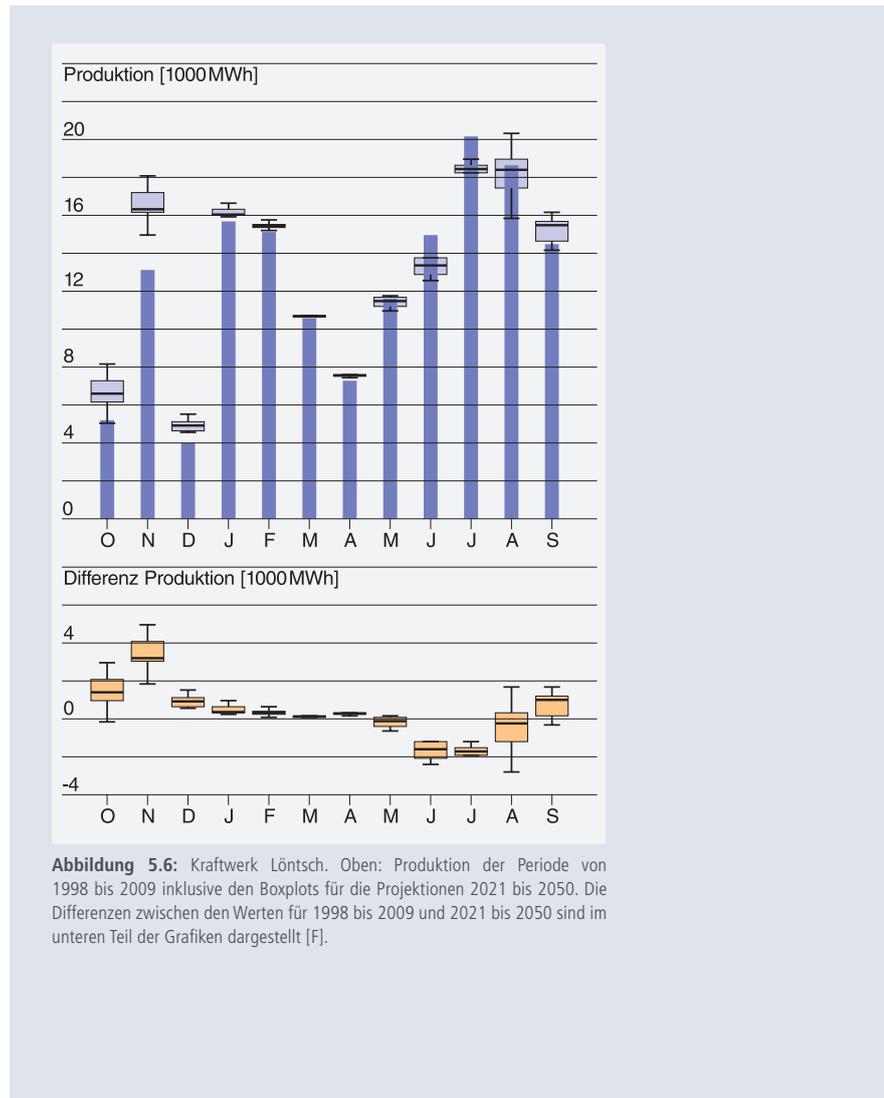


Abbildung 5.6: Kraftwerk Löntsch. Oben: Produktion der Periode von 1998 bis 2009 inklusive den Boxplots für die Projektionen 2021 bis 2050. Die Differenzen zwischen den Werten für 1998 bis 2009 und 2021 bis 2050 sind im unteren Teil der Grafiken dargestellt [F].

Die Niederschlagsannahmen sind nach wie vor unsicher. Deshalb sind sowohl die Abfluss- wie auch die Produktionsänderungen nicht sehr genau vorhersehbar. Bis in die nahe Zukunft (2035) sind nur kleine Veränderungen zu erwarten, im südlichen und östlichen Wallis eher im leicht negativen Bereich, wobei hier mit Unsicherheiten von ± 10 Prozent gerechnet werden muss. In den tiefer gelegenen Gebieten der zentralen und östlichen Voralpen hingegen liegen die Veränderungen mit null bis neun Prozent im positiven Bereich. Für die ferne Zukunft (2085) sind die Trends für die hoch gelegenen Gebiete des südlichen und östlichen Wallis negativ. Es muss mit mittleren Produktionseinbussen von vier bis acht Prozenten gerechnet werden, wobei im Extremfall auch kaum Veränderungen beziehungsweise Einbussen um 20 Prozent berechnet wurden. Die vorliegenden Fallstudien lassen schweizweit keine einfache Abschätzung der Produktionserwartung zu. Dazu sind zur Zeit detaillierte Hochrechnungen im Gang.

Vergleich mit anderen Resultaten

Ein Vergleich mit Resultaten aus ähnlichen Studien, in denen der Einfluss der Klimaänderung mittels Modellkopplung untersucht wurde, zeigt Unterschiedliches: [17] schätzten für das Speicherkraftwerk Mauvoisin eine Produktionsabnahme um rund 3 Prozent. Dies für die Periode 2070 bis 2099 und im Vergleich zu den Jahren zwischen 1961 und 1990. Das Einzugsgebiet des Mauvoisin-Kraftwerks ist stark vergletschert (> 40 Prozent) und deshalb intensiv vom Gletscherschwund betroffen. [18] schätzte für das benachbarte Speicherkraftwerk Grande Dixence eine Zunahme der Produktion um rund 26 Prozent für die Periode 2031 bis 2060 (Referenzperiode 1961 bis 1990). Dabei wurde neben den klimabedingten Veränderungen der Zuflussmengen auch die Veränderung in der Stromnachfrage berücksichtigt.

Aufgrund einer Studie in elf alpinen Einzugsgebieten [15] schätzte das Bundesamt für Energie die Auswirkungen der Klimaänderung auf die gesamtschweizerischen Abflussmengen so ein: Weil der Abfluss um rund sieben Prozent zurückgehen wird, ist mit einer Abnahme der hydroelektrischen Produktion um denselben Betrag zu rechnen [19].

Dazu wird in [F, G] festgehalten, «dass eine Hochrechnung der Abflussprojektionen nach [15] auf die gesamte Schweiz problematisch ist, da nicht alle Einzugsgebiete der schweizerischen Wasserkraftwerke einen alpinen oder gar hochalpinen Charakter aufweisen. Andererseits entspricht die natürlich anfallende Wassermenge nicht zwingend der für die Wasserkraft nutzbaren bzw. fassbaren Menge. Somit lassen sich auch die hier vorliegenden Resultate nicht verallgemeinern und schweizweit anwenden». Aktuell können jedoch die in [19] publizierten Annahmen noch nicht endgültig bewertet werden.

Literatur

Fachberichte

Der vorliegende Synthesebericht stützt sich inhaltlich auf die von den Projektbeteiligten verfassten Fachberichte:

- [A] Klimaszenarien für hydrologische Impaktstudien in der Schweiz: T. Bosshard, S. Kotlarski, T. Ewen, Ch. Schär
- [B] Swiss discharge regimes in a changing climate: P. Hänggi, T. Bosshard, R. Weingartner
- [C] Grossräumige Modellierung von Schwundszenerarien für alle Schweizer Gletscher: F. Paul, A. Linsbauer, W. Haeberli
- [D] Veränderungen der Gletscher und ihrer Abflüsse – Fallstudien Gorner und Mattmark: A. Bauder, D. Farinotti
- [E] Auswirkung der Klimaänderung auf die Geschiebefracht – Sektorielle Studie Wallis, Modul D: M. Raymond Pralong, J. M. Turowski, A. Beer, D. Rickenmann, V. Métraux, T. Glassey
- [F] Einfluss der Klimaänderung auf die Stromproduktion des Wasserkraftwerks Löntsch 2021 – 2050: P. Hänggi, T. Bosshard, S. Angehrn, E. Helland, D. Rietmann, B. Schädler, R. Schneider, R. Weingartner
- [G] Einfluss der Klimaänderung auf die Stromproduktion der Wasserkraftwerke im Prättigau 2021 – 2050: P. Hänggi, T. Bosshard, D. Job, B. Schädler, R. Weingartner
- [H] Klimaänderung und Wasserkraft – Fallstudie Mattmark AG: M. Raymond Pralong, M. Stähli, M. Zappa, Ch. Dupraz, Ch. Mueller
- [I] Klimaänderung und Wasserkraft – Fallstudie Kraftwerke Oberhasli AG: M. Stähli, M. Zappa, A. Ludwig, M. Ossia, A. Fankhauser
- [J] Klimaänderung und Wasserkraft – Fallstudie Kraftwerke Gougra AG: M. Raymond Pralong, M. Stähli, M. Zappa, F. Widmer
- [K] Klimaänderung und Wasserkraft – Fallstudie Stausee Göscheneralp: M. Stähli, M. Zappa, T. Jonas, F. Bobierska
- [L] Literaturstudie zum Einfluss der Klimaänderung auf die zukünftige Wasserkraftnutzung: N. Boogen, D. Spreng

Die Fachberichte können auf der Website

<http://www.hydrologie.unibe.ch/projekte/ccwasserkraft.html> eingesehen werden.

Zusätzlich verwendete Literatur

- [1] IPCC (Hrsg.), 2008: Klimaänderung 2007. Synthesebericht. Berlin.
- [2] Bosshard, T., Fischer, A., Kress, A., Kull, C., Liniger, M. A., Lustenberger, A. und Scherrer, S., 2001: Swiss Climate Change Scenarios CH2011.
- [3] OCCC/ProClim (Hrsg.), 2007: Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Bern.
- [4] MeteoSchweiz (2011): Klima Schweiz – Trends heute. In: http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_heute/trends_schweiz.html (August 2011).
- [5] Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J. und Vidale, P. L., 2006: Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. In: Journal of geophysical Research 111.
- [6] Latenser, M. und Schneebeli, M., 2003: Long-term snow climate trends of the Swiss Alps 1931–1999. In: International Journal of Climatology 23:733–750.
- [7] Huss, M., Bauder, A., Funk, M. und Hock, R., 2008: Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. In: Journal of Geophysical Research 133.
- [8] Maisch, M., Wipf, A., Deneher, B., Battaglia, J. und Benz, C., 2000: Die Gletscher der Schweizer Alpen. Vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich. Schlussbericht NFP31.
- [9] Farinotti, D., Huss, M., Bauder, A. und Funk, M., 2009: An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. In: Global and Planetary Change 68:225–231.
- [10] Hänggi, P. und Weingartner, R., 2009: Zur Veränderung der hydrologischen Rahmenbedingungen für die Wasserkraftnutzung im Rheineinzugsgebiet bis Basel 1808–2007. In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 39:53–62.
- [11] Hänggi, P., Weingartner, R., 2011: Innerannual variability of runoff and climate within the Upper Rhine River basin, 1808–2007. In: Hydrological Sciences Journal 56 (1):34–50.
- [12] Aschwanden, H., Weingartner, R., 1985: Die Abflussregimes der Schweiz. Publikation Gewässerkunde, Nr. 65, Bern.
- [13] Weingartner, R., Aschwanden, H., 1992: Abflussregimes als Grundlagen zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In: Weingartner, R. und Spreafico, M. (Hrsg.): Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.2. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [14] Huss, M., Jouvet, G., Farinotti, D. und Bauder, A., 2010: Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat. In: Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 7:345–387.
- [15] Horton, P., Schaeffli, B., Hingray, B., Mezghani, A. und Musy, A., 2005: Prediction of climate change impacts on Alpine discharge regimes under A2 and B2 SRES emission scenarios for two future time periods (2020–2049, 2070–2099), Technical report.
- [16] Hänggi, P. und Weingartner, R., 2011: Variations in discharge volumes for hydropower generation in Switzerland (submitted).
- [17] Schäfli, B., Hingray, B. und Musy, A., 2007: Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and related modelling uncertainties. In: Hydrol. Earth Syst. Sc. 11:1191–1205.
- [18] Westaway, R., 2000: Modelling the potential effects of climate change on the Grande Dixence hydro-electricity scheme, Switzerland. In: Journal of the chartered Institution of Water and Environmental Management 14(3):179–185.
- [19] Bundesamt für Energie BFE, 2007: Die Energieperspektiven 2035 – Band 1. Synthese, Bern.

Impressum

Herausgeber

Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie SGHL
Hydrologische Kommission CHy

Projektleitung

Rolf Weingartner, Geographisches Institut der Universität Bern GIUB
Massimiliano Zappa, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Projektkoordination

Mélanie Raymond Pralong, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
Christoph Plattner, Netzwerk Wasser im Berggebiet NWB
Diana Soldo, Netzwerk Wasser im Berggebiet NWB
Michael Lehning, Netzwerk Wasser im Berggebiet NWB

Auftraggeber

Swisselectric Research, Bern
Bundesamt für Energie BFE, Bern
Kanton Wallis, Dienststelle für Energie und Wasserkraft DEWK des Kantons Wallis, Sion
Forces Motrices Valaisannes FMV SA, Sion

Lenkungsausschuss Hauptstudie

Philippe Méan, Alpiq
Christian Holzner, Bundesamt für Energie BFE
Michel Piot, Bundesamt für Energie BFE
Pankraz Freitag, Netzwerk Wasser im Berggebiet NWB
Michael Paulus, swisselectric research

Expertengruppe Hauptstudie

Jörg Aeberhard, Alpiq
Jörg Huwyler, Axpo
Andreas Stettler, Berner Kraftwerke BKW FMB Energie AG
Jakob Rhyner, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL - SLF
Roger Pfammatter, Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband SWV
Walter Hauenstein, Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband SWV

Lenkungsausschuss Sektorielle Studie Wallis

Frédéric Zuber, Dienststelle für Energie und Wasserkraft DEWK des Kantons Wallis
Moritz Steiner, Dienststelle für Energie und Wasserkraft DEWK des Kantons Wallis
Jean Pralong, Forces Motrices Valaisannes FMV SA
Paul Michellod, Forces Motrices Valaisannes FMV SA
Philippe Amacker, Forces Motrices Valaisannes FMV SA

Beteiligte

AF-Colenco AG, Wasserbau und Umwelt
Axpo AG
Berner Kraftwerke BKW FMB Energie AG
Centre for Energy, Policy and Economics CEPE der ETH Zürich
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
Energie Ouest Suisse EOS
Geographisches Institut der Universität Bern GIUB
Geographisches Institut der Universität Zürich GIUZ
Institut für Atmosphäre und Klima IAC der ETH Zürich
Kraftwerke Oberhasli AG KWO
Netzwerk Wasser im Berggebiet NWB
Institut für Schnee- und Lawinenforschung WSL - SLF
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW der ETH Zürich

Unterstützung von

Forces motrices de la Gougra SA / Alpiq
Forces motrices de Mauvoisin SA / Axpo
Grande Dixence SA / Alpiq
Kraftwerke Göschenen AG / CKW
Kraftwerke Löntsch AG / Axpo
Kraftwerke Mattmark AG / Axpo
Prättigauer Kraftwerke / Repower

Autoren

Donat Job (AF-Colenco AG)
Sonja Angehrn, Eivind Helland, Daniel Rietmann, Robert Schneider (Axpo)
Christian Dupraz, Christian Mueller (BKW)
Nina Boogen, Daniel Spreng (CEPE)
Florian Widmer (EOS)
Pascal Hänggi, Rolf Weingartner (GIUB)
Wilfried Haeblerli, Andreas Linsbauer, Frank Paul (GIUZ)
Thomas Bosshard, Tracy Ewen, Sven Kotlarski, Christoph Schär (IAC)
Andreas Fankhauser (KWO)
Florian Bobierska, Tobias Jonas (WSL - SLF)
Andreas Bauder, Daniel Farinotti, Stephanie Usselman (VAW)
Alexander Beer, Thierry Glassey, Andreas Ludwig, Valentin Métraux, Mina Ossiaa, Mélanie Raymond Pralong, Dieter Rickenmann, Manfred Stähli, Jens M. Turowski, Massimiliano Zappa (WSL)

Redaktion Synthesebericht

Barbara Lustenberger, Geographisches Institut der Universität Bern GIUB
Bruno Schädler, Geographisches Institut der Universität Bern GIUB

Grafik

Alexander Hermann, Geographisches Institut der Universität Bern GIUB

Lektorat

Bianca Guggenheim, Zürich

Korrektorat

Felix Hauser, Geographisches Institut der Universität Bern GIUB

Übersetzung

Jean-Jacques Daetwyler, Sciencepress

Layout/Gestaltung

Simone Kummer, Centre for Development and Environment der Universität Bern CDE

Druck

Publikation Digital AG

Bildnachweise

Titelbild: KWO
Kapitel 1: Bild: KWO / Foto: R. Bösch
Kapitel 2: Bild: BAFU
Kapitel 3: Bild: BAFU / Foto: Beat Sigrist
Kapitel 4: Bild: BAFU / Foto: Beat Sigrist
Kapitel 5: Bild: Officine Idroelettriche di Blenio SA

Bezug

Hydrologische Kommission CHy der Akademie der Naturwissenschaften
Schweiz SCNAT c/o Geographisches Institut der Universität Bern
Hallerstrasse 12, 3012 Bern
<http://chy.scnatweb.ch>

Zitervorschlag: Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL) und Hydrologische Kommission (CHy) (Hrsg.) 2011: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung – Synthesebericht. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 38, 28 S., Bern.

ISBN 978-3-033-02970-5

ISSN 1421-1130

© SGHL und CHy

