



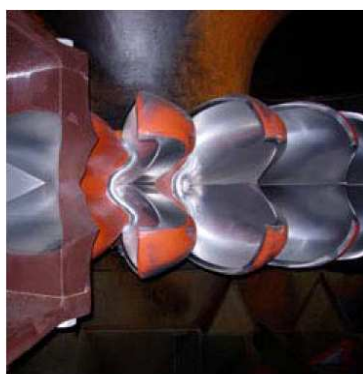
# NWB

Netzwerk Wasser im Berggebiet

Réseau de l'eau dans les régions de montagne  
Rete dell'acqua nelle regioni di montagna  
Rait per l'aua en las regiuns da muntogna  
Mountain Water Network

## Projekt Klimaänderung und Wasserkraftnutzung

### Schlussbericht der Vorstudie



2. Auflage

Bern und Davos, 2009

# Impressum

## Autoren

Pascal Hänggi, Geographisches Institut Universität Bern  
Christoph Plattner, Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel Landschaft

## Herausgeber

Geographisches Institut Universität Bern  
Netzwerkwasser im Berggebiet, Davos

## Kontakt

Geographisches Institut Universität Bern  
Gruppe für Hydrologie  
Hallerstrasse 12  
CH-3012 Bern

Telefon: +41 (0)31 631 80 15  
Fax: +41 (0)31 631 85 11  
Email: sekretariat@hydrologie.unibe.ch  
URL: <http://www.hydrologie.unibe.ch>

Netzwerk Wasser im Berggebiet  
c/o WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF  
Flüelastrasse 11  
CH-7260 Davos Dorf

Telefon: +41 (0)81 417 02 35  
Fax: +41 (0)81 417 01 10  
Email: [netzwerkwasser@slf.ch](mailto:netzwerkwasser@slf.ch)  
URL: <http://www.netzwerkwasser.ch>

## Begleitgruppe

Dr. Michael Paulus, Swisselectric Research  
Prof. Dr. Christoph Schär, Eidg. Technischen Hochschule Zürich  
Dr. Manfred Stähli, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft Birmensdorf  
Prof. Dr. Rolf Weingartner, Geographisches Institut Universität Bern

## Auftraggeber

Swisselectric Research

## Auftragnehmer

Netzwerk Wasser im Berggebiet

in Zusammenarbeit mit der Gruppe für Hydrologie der Universität Bern, der Eidg. Technischen Hochschule Zürich und der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| MANAGEMENT SUMMARY .....                              | I         |
| <b>1. EINLEITUNG .....</b>                            | <b>1</b>  |
| <b>2. METHODE .....</b>                               | <b>2</b>  |
| <b>3. WISSENSSTAND.....</b>                           | <b>4</b>  |
| 3.1    WISSENSSTAND ZUM KLIMA.....                    | 4         |
| 3.2    WISSENSSTAND ZUR HYDROLOGIE .....              | 8         |
| 3.3    WISSENSSTAND ZUR WASSERKRAFT .....             | 19        |
| 3.4    ZUSAMMENFASSUNG .....                          | 28        |
| <br>  |           |
| <b>4. SCHLUSSBEMERKUNGEN UND FESTSTELLUNGEN .....</b> | <b>30</b> |
| <b>5. AUSBLICK .....</b>                              | <b>32</b> |
| <b>6. LITERATURVERZEICHNIS .....</b>                  | <b>34</b> |
| <b>7. VERWANDTE PROJEKTE .....</b>                    | <b>41</b> |
| <b>8. GESPRÄCHE .....</b>                             | <b>42</b> |

## Management Summary

Im 4. Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC wird für die nächsten ca. 100 Jahre neben einer Zunahme der Oberflächentemperatur für verschiedensten Regionen der Erde eine signifikante Veränderungen des Wasserhaushalts vorhergesagt (IPCC 2007). In der Schweiz sollen die jährlichen Niederschlagsmengen bis ins Jahr 2050 abnehmen (OcCC 2007). Die Auswirkungen dieser und weiterer klimabedingter Veränderungen für die Wasserkraftnutzung in der Schweiz werden erst in neuerer Zeit untersucht und diskutiert. Allerdings sind entsprechende Aussagen in einer unübersichtlichen Vielzahl von Studien verstreut und für die Praxis nicht sehr hilfreich. Dementsprechend schwierig ist es für die Stromwirtschaft und die Wasserkraftunternehmen, den aktuellen Wissensstand über das komplexe Wirkungsgefüge zwischen der Klimaänderung und der Wasserkraftnutzung zu erfassen, den Handlungsbedarf zu erkennen und rechtzeitig entsprechende Strategien zu definieren bzw. Massnahmen einleiten zu können.

Das **Ziel der vorliegenden Vorstudie** im Rahmen des Projekts „Klimaänderung und Wasserkraftnutzung“ ist es, eine umfassende Übersicht über den aktuellen Wissensstand zum Zusammenhang zwischen der Klimaänderung und der Wasserkraftnutzung zu erarbeiten und die Basis für die anschliessenden Hauptstudie zu schaffen.

In der Vorstudie wurden primär zwei **Methoden** kombiniert:

1. Literaturrecherche zum Thema Klimaänderung und Wasserkraftnutzung und Aufbereitung der Kernaussagen im vorliegenden Schlussbericht der Vorstudie.
2. Experten-Workshop und Experten-Gespräche zur Einschätzung des aktuellen Wissensstands sowie zur Ableitung des Handlungsbedarfs für die Hauptstudie.

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden 103 zumeist wissenschaftliche Publikationen verarbeitet, die relevanten Kernaussagen qualitativ ausgewertet und in Tabellen zusammengeführt.

Die **inhaltliche Auswertung** der Literatur im Rahmen der Vorstudie zeigt, dass man im Jahr 2000 - in der damals gängigen Erwartung einer generellen Zunahme des Niederschlags in der Schweiz - als Folge der Klimaänderung noch von einer Zunahme des hydroelektrischen Potenzials ausging. Für das Kraftwerk Grande Dixence, beispielsweise, wurde für den Zeitraum 2031 bis 2060 eine potenzielle Zunahme der Produktion von +26% modelliert (Westaway 2000). Wenige Jahre später wurde auf der Basis einer neueren Generation von globalen und regionalen Klimamodellen für die Schweiz erstmals eine Niederschlagsabnahme ermittelt (Frei 2004). Darauf aufbauend, wurde bis ins Jahr 2050 ein Rückgang des mittleren Abflusses und ein entsprechend reduziertes hydraulisches Potenzial von etwa 7% errechnet (Horton et al. 2005, Piot 2006a, BFE 2007). Wie drastisch die erwarteten Produktionseinbussen im Einzelfall vermutlich sein werden, zeigt das Beispiel Mauvoisin, für das bis zum Zeitraum 2070 bis 2099 verglichen mit heute eine um 36% tiefere Produktion prognostiziert wird (Schäfli et al. 2007). Inzwischen kommen mehrere Studien übereinstimmend zum Schluss, dass die Klimaänderung massgebliche Auswirkungen auf die Stromproduktion in der Schweiz haben wird: Einerseits müssen die Wasserkraftwerke mit einem veränderten und reduzierten Wasserdargebot rechnen, und andererseits wird auch bei den Atomkraftwerken mit einer Abnahme der Produktion gerechnet (infolge der abnehmenden Kühlleistung von Gewässern, OcCC 2007). Für die Wasserkraft werden die stärksten Veränderungen der hydrologischen Verhältnisse für alpine Einzugsgebiete in mittleren bis höheren Lagen vorausgesagt. Dabei handelt es sich um Einzugsgebiete, in denen die Schnee- und Gletscherschmelze heute einen hohen Anteil am gesamten Abfluss ausmacht. Weil sich durch die Klimaänderung sowohl die Form (tendenziell mehr Regen und weniger Schnee) als auch die Saisonalität und Menge des Niederschlags (tendenzielle Zunahme im Winter, tendenzielle Abnahme im Sommer) massgeblich verändern dürfte, wird von

einem jahreszeitlichen Ausgleich des Abflussregimes ausgegangen. Obwohl damit auch mehr Flexibilität für die Kraftwerksbetreiber prognostiziert wird, muss sowohl bei Speicher- als auch bei Laufkraftwerken langfristig mit Produktionseinbussen gerechnet werden (OcCC 2007). Diese Aussage wird auch durch die aktuellste Studie des BAFU, BFE 2007 gestützt, welche primär für den Wintertourismus und die Wasserkraftnutzung grosse volkswirtschaftliche Schäden vorhersagt.

Eine **methodische Auswertung** relevanter Literaturstellen belegt, dass die überwiegende Mehrzahl der bisherigen Studien die einzelnen Aspekte der komplexen Systemkette Klimaänderung-Wasserkraft isoliert behandeln. Studien, welche die gesamte Systemkette ganzheitlich, d.h. gleichzeitig sowohl klimatologische, hydrologische als auch kraftwerksbetriebliche Aspekte abdecken, sind eher selten. Die Aussagen dieser Studien beschränken sich zudem auf Mittelwerte, auf einer meist groben räumlichen und zeitlichen Skala (Meso- bis Makroskala) oder gelten primär für ausgewählte Kraftwerke. In der Schweiz fehlen demnach Untersuchungen, welche klimatologische, hydrologische und kraftwerksbetriebliche (und evtl. sogar strommarktbezogene) Modelle für verschiedene, repräsentative Einzugsgebiete / Kraftwerke koppeln, und welche gleichzeitig von verschiedenen klimatischen Szenarien in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung ausgehen. Letzteres wäre aber notwendig, um Wirtschaftlichkeitsberechnungen sowie zukünftige Investitionsentscheide für den konkreten Einzelfall (z. B. bei Neukonzessionierungen) fundiert durchführen zu können, und um mittels einer Hochrechnung über den nationalen Kraftwerkspark zu einer generellen Abschätzung der Folgen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung für die ganze Schweiz zu gelangen. Hinzu kommt, dass Extremereignisse (z. B. Starkniederschläge, lang anhaltende Hitze- oder Kältewellen, Trockenperioden, ... etc.) bisher beinahe ausschliesslich retrospektiv, also aus der Sicht bereits abgelaufener Ereignisse, analysiert wurden. Aussagen über die Häufigkeit und Intensität von solchen Ereignissen in der Zukunft, und insbesondere über deren Auswirkungen auf die Stromproduktion bzw. -nachfrage, fehlen weitgehend. Quantitative Aussagen zur Häufigkeit von Hoch- und von Niedrigwasserereignissen wären aber für die Wasserkraftbetreiber (primär im Rahmen von Neukonzessionierungen) von grossem Interesse. Damit können die Anlagen für die zu erwartenden Hoch- und Niedrigwassersituationen ausgelegt werden.

Mit Blick auf derartige Fragen wurden in verschiedensten Ländern umfassende Projekte bzw. Programme initiiert (in Österreich: Programm „Hydklima“, vgl. Nachtnebel, Fuchs 2001, in Deutschland: Programm „KLIWA“, vgl. Katzenberger, Weber 2007, in Skandinavien: Programme „Climate Change and Energy Production CCEP“, „Climate, Water and Energy CWE“ und „Nordic Project on Climate and Energy CE“, vgl. Sælthun et al. 1998 und Bergström et al. 2007). Die im Rahmen der vorgeschlagenen Hauptstudie geplanten Aktivitäten sind mit diesen internationalen Studien abzustimmen und deren inhaltliche und methodische Erkenntnisse zu berücksichtigen. Dies gilt auch bei der Betrachtung anderer, für die Hauptstudie relevanter Projekte (z. B. EU-Forschungsprojekt ENSEMBLES). Insbesondere gilt es bei den Klimaszenarien, die jüngst erzielten Fortschritte bei der Abschätzung von Unsicherheiten im physikalischen Verständnis durch eine Kombination von verschiedenen globalen und regionalen Klimamodellen (sog. „Multi-Model-Approach“; vgl. Christensen et al. 2002) in die Methodik einfliessen zu lassen. Damit werden Aussagen zur Wahrscheinlichkeit und Güte von Klimaprognosen, bzw. der daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen, möglich. Diese wertvollen, international anerkannten und konsistenten Vorarbeiten könnten in einem nächsten Schritt zur Beantwortung von spezifischen Fragen der Wasserkraft in der Schweiz angewendet, und mittels Downscaling-Verfahren auf die interessierenden Regionen heruntergebrochen werden.

Im Rahmen der Hauptstudie sollen einerseits (unter anderem auch auf der Basis der erwähnten Klimadaten aus dem EU-Forschungsprojekt ENSEMBLES) die hydrologischen Veränderungen für eine grössere Anzahl von typischen Einzugsgebieten / Kraftwerken ermittelt werden, und über eine anschliessende Hochrechnung über den gesamten Kraftwerkspark die generellen Folgen der Klimaänderung für die Wasserkraft in der Schweiz abgeschätzt werden. Gemäss Aussagen von Wasserkraftbetreiber wäre andererseits für sehr aktuelle (z. B. in

Neukonzessionierung befindliche) Fallbeispiele zusätzlich eine tiefer gehende Analyse von betrieblichen und sicherheitstechnischen Aspekten wertvoll (hydrologische Veränderungen und Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit, Dimensionierung von Wasserfassungen, Dimensionierung für Hochwasser- und Überlastsituationen, mobilisierbares Geschiebe im Einzugsgebiet, Veränderung des Geschiebetriebs, Verlandungsproblematik, ... etc.). Dieser Aspekt soll in der Hauptstudie ebenfalls angegangen werden.

# 1. Einleitung

Die Wasserkraftnutzung bildet das Rückgrat der Stromerzeugung in der Schweiz. Veränderungen der Wasserverfügbarkeit wirken sich insofern nicht nur direkt auf die betroffenen Wasserkraftunternehmen aus, sondern auch indirekt auf die volkswirtschaftlich bedeutsame Wertschöpfung für die Gesellschaft. Aus diesen Gründen sind verlässliche Informationen über die Wasserverfügbarkeit und fundierte Angaben über mittel- bis langfristige Trends nicht nur für die Wasserkraftbranche vital.

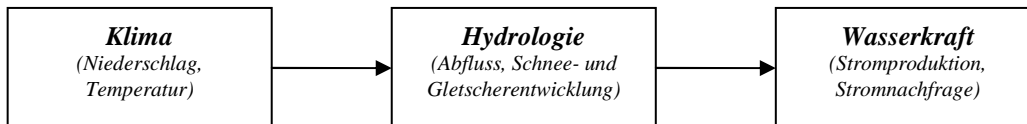
Im 4. Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC wird für die nächsten ca. 100 Jahre von einem globalen Anstieg der mittleren Oberflächentemperatur von 0.6° bis 4.1° Celsius ausgegangen und in verschiedenen Regionen der Erde eine signifikante Veränderungen des Wasserhaushalts erwartet (IPCC 2007). Anlässlich einer von ProClim (Forum for Climate and Global Change) und VSE (Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen) organisierten Tagung zum Thema „Wasserkraft und Klimawandel in der Schweiz – Vision 2030“ stellten Fachleute im Jahr 2003 fest, dass die Wasserkraftnutzung von der Klimaänderung höchstens marginal betroffen werde (ProClim 2003). Aufgrund neuerer Erkenntnisse bezüglich der Ausmasse des Klimawandels und einhergehend mit einer zunehmenden Sensibilisierung von Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit für Klimafragen, werden die Auswirkungen dieser Veränderungen für die Wasserkraftnutzung in der Schweiz erst in neuerer Zeit diskutiert. Aussagen über das zukünftige Klima der Schweiz sind möglich, jedoch mit Unsicherheiten behaftet, insbesondere in Bezug auf die Zukunft der sommerlichen Niederschläge. Eine regionale Differenzierung beispielsweise in Abhängigkeit des Kraftwerktyps, der Höhenlage, der Vergletscherung im Einzugsgebiet und/oder eine Differenzierung der Unterschiede zwischen der Alpennordseite, dem inneralpinen Bereich und der Alpensüdseite wurde bis anhin nicht, oder erst ansatzweise vorgenommen.

In der jüngsten Vergangenheit sind verschiedene hydro-meteorologische Modelle entstanden bzw. weiter entwickelt worden, welche eine regionale Differenzierung erlauben würden und - dank einer Kombination von mehreren, unterschiedlicher Klimamodellen und Klimaszenarien - eine Quantifizierung der Unsicherheiten, bzw. Angaben zur Wahrscheinlichkeit von gewissen Szenarien zulassen (eine gänzliche Elimination der Unsicherheiten ist aus prinzipiellen Gründen nicht möglich, da diese über Zeiträume von 50 bis 100 Jahren massgeblich von der wirtschaftlichen Entwicklung, der globalen Treibhausgasemissionen und der zu treffenden Klimaschutzmassnahmen bestimmt werden).

An einem Gespräch zwischen Swisselectric („Gruppe Bern“, ca. 20 Personen) und dem Netzwerk Wasser im Berggebiet wurde das Bedürfnis nach weiteren Abklärungen im Rahmen eines Projekts geäussert. Im vorliegenden Projekt „Klimaänderung und Wasserkraftnutzung“ wurde in der Vorstudie mittels einer Literaturrecherche, einem Expertenworkshop und verschiedenen weiteren Experteninterviews eine umfassende Übersicht über den aktuellen Wissensstand über den Zusammenhang zwischen der Klimaänderung und der Wasserkraft erarbeitet. Die Ergebnisse sind im vorliegenden Schlussbericht zusammengefasst.

## 2. Methode

Das komplexe System Klimaänderung und Wasserkraft wurde für die Literaturrecherche und den Workshop - im Sinne der Übersichtlichkeit und Verständlichkeit - in einem Modell als Systemkette mit den drei Elementen Klima, Hydrologie und Wasserkraft vereinfacht dargestellt (Abbildung 1).



**Abbildung 1: Modell des Systems Klimaänderung und Wasserkraft mit drei Elementen.**

Mit Hilfe dieser Systematisierung wurde nach verschiedenen Publikationen recherchiert, welche folgende Kriterien erfüllen:

- wissenschaftliche Relevanz
- geographische Relevanz der Studie mit einem Schwergewicht auf den Perimeter der Schweiz oder den angrenzenden Regionen
- zeitliche Aktualität mit besonderer Berücksichtigung von Publikationen ab dem Jahr 2000

Die Aussagen der einzelnen Studien wurden tabellarisch erfasst und einem der drei Systemelemente Klima, Hydrologie und Wasserkraft zugeordnet:

- Klima: Aussagen zu Veränderungen der hydrologisch relevanten Klimaparameter Niederschlag, Starkniederschlag und Temperatur.
- Hydrologie: Aussagen zu den klimabedingten Veränderungen des Abflusses, des Anteils Wassers aus dem Schneespeicher (abgeleitet aus der Entwicklung der Schneemenge, Schneehöhe und der Anzahl Tage mit geschlossener Schneedecke) und des Anteils Gletscherwasser (abgeleitet aus der Entwicklung der Gletscherlänge und -masse).
- Wasserkraft: Aussagen zu klimabedingten Veränderungen der Stromproduktion (allgemein und spezifisch für die Wasserkraft). Da die Stromproduktion bzw. der Kraftwerksbetrieb und der Strommarkt (über das Gesetz von Angebot und Nachfrage) eng miteinander verbunden sind, wurden hier auch einzelne Aussagen zur Stromnachfrage erfasst.

Bei der Zuordnung wurde auch die zeitliche Komponente berücksichtigt, so dass zwischen der sommerlichen, winterlichen und jährlichen Entwicklung der verschiedenen Parameter unterschieden werden kann (Tabelle 1).

**Tabelle 1: Symbole für die Darstellung der sommerlichen, winterlichen und jährlichen Entwicklung.**

| Entwicklung       | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | △      | ▲      | △    |
| Abnahme           | ▽      | ▼      | ▽    |
| keine Veränderung | ◇      | ◆      | ◇    |

Diese Wertung der Parameterentwicklung kann als objektiv angesehen werden, da mit wenigen Ausnahmen die meisten betrachteten Publikationen die Veränderungen für dieselben Zeiträume (1900-2100) machen und ihre Beobachtungen gegenüber der Referenzperiode 1960-1990 vergleichen. Insgesamt wurden so die Ergebnisse von 103 verschiedenen Publikationen systematisch zusammengetragen und kategorisiert, was beispielsweise eine Übersicht über die Entwicklung des Wasserangebots und der Extremereignisse möglich macht. Für eine bessere Anordnung wurden die Ergebnisse jeweils in „Resultate zur vergangenen Entwicklung“ und „Resultate zur zukünftigen Entwicklung“ unterteilt. Ersteres beinhaltet Aussagen zum Zeitraum vor, letzteres Aussagen zum Zeitraum nach heute. Hier soll noch erwähnt werden, dass einzelne Studien auch Aussagen zu mehreren Systemelementen, also beispielsweise sowohl zum Klima als auch zu Hydrologie, und zu mehreren Zeiträumen lieferten.

Mit Hilfe der Tabellen wurde versucht, die Auswirkungen der Klimaänderung auf die schweizerische Wasserkraftnutzung aufzuzeigen. Eine Zusammenfassung der Aussagen findet sich jeweils am Anfang eines jeden Kapitels.

## 3. Wissensstand

### 3.1 Wissensstand zum Klima

Dieses Kapitel stellt die wichtigsten Aussagen aus verschiedenen Literaturquellen und den Aussagen von Experten zur Klimaentwicklung in der Schweiz dar.

**Zusammenfassung:** Die Studien zur vergangenen klimatischen Veränderungen zeigen, dass die Temperaturen in den letzten zwei Dekaden des 20. Jahrhunderts in der ganzen Schweiz deutlich zugenommen haben. Die Erwärmung fand sowohl im Winter als auch im Sommer statt. Die Niederschlagsmenge hat im letzten Jahrhundert ebenfalls zugenommen. Dies trifft vor allem für das Winterhalbjahr zu, in dem auch eine Zunahme der Starkniederschläge zu verzeichnen war. Bei der Analyse der Starkniederschlagsentwicklung im Sommer sahen die Wissenschaftler keine zunehmende Tendenz. Im Allgemeinen zeigte sich, dass die Niederschlags- und Temperaturänderungen in der Schweiz stärker waren im Vergleich zum globalen Mittel.

Was die Schweiz in Zukunft bezüglich der Klimaänderung zu erwarten hat, wurden im Bericht des OcCC aus dem Jahr 2007 ausführlich dargestellt. Demnach wird die mittlere Temperatur bis 2050 weiter ansteigen (Winter: +2°C, Sommer: +3°C) und der Niederschlag übers Jahr gesehen abnehmen (Winter: Alpennordseite +8%, Alpensüdseite +11%; Sommer: Alpennordseite -17%, Alpensüdseite -19%).

Mit diesen Aussagen zur Veränderung des Jahresniederschlags lässt sich die Stromproduktion durch die Wasserkraft für die Zukunft nicht abschätzen. Die Aussagen sind zeitlich und räumlich zu wenig hoch aufgelöst und sind für Kraftwerksbetreibern (z.B. für Zukunfts- und Investitionsentscheide) nicht, oder nur sehr bedingt brauchbar. Deshalb wurde von den Kraftwerksbetreibern das Bedürfnis geäußert, die bestehenden, pauschalen Aussagen am Beispiel von verschiedenen Fallbeispielen zu präzisieren und zusätzlich auf die Auswirkungen von Extremereignissen wie Hitze- und/oder Kältewellen auszudehnen.

| Referenz             | Titel  | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum     | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |     |    |    |    |   |   |      |      |     | Kernaussagen |  |  |
|----------------------|--|----------------------------|-----------------|--|----|-----|----|----|----|---|---|------|------|-----|--------------|--|--|
|                      |  |                            |                 | N                                      | SN | T   | NQ | MQ | HQ | S | G | StPa | StPw | StN |              |  |  |
| Frei et al. 2006     | Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models | 1961---1990                | Europa          |  | ▲  |     |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  | Alpenregion:<br>- Winter: SN+<br>- Sommer: SN+   |
| Rebetez et al. 2006  | Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis   | 2003                       | Europa          |  |    | ▲▲▲ |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  | Analyse des aussergewöhnlichen Hitzesommers 2003.  |
| Scherrer et al. 2006 | Temperature trends in Switzerland and Europe: Implications for climate normals                               | 1864-.....2005             | Europa, Schweiz |  |    | ▲▲  |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  | - Die Einleitung enthält einen interessanten geschichtlichen Abriss, wie es zur Referenzperiode 1961-1990 kam. Dabei wird erklärt, dass nach Regel nach jeder vollendeten Dekade die Referenzperiode verschoben werden müsste (Heute müssten wir also die Referenzperiode 1971-2000 benutzen).<br>- Vergleicht man die Temperaturentwicklung mit verschiedenen 30-Jahren Referenzperioden zeigt sich, dass die Temperaturzunahme im Sommer noch stärker zum Vorschein kommt.<br>- Schätzungen für Änderungen der interannuellen Variabilität in den letzten Jahrzehnten zeigen eine schwache Zunahme der Variabilität im Sommer, und eine Abnahme derselben im Winter. |
| Begert et al. 2005   | Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000                            | 1864-.....2000             | Schweiz         | ◆▲◆                                    |    | ▲▲▲ |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  |
| Beniston 2005        | Mountain climates and climatic change: An overview of processes focusing on the European Alps                | 1900-----2000              | Europa, Alpen   |  | ▲  |     | ▲  |    |    |   |   |      |      |     |              |  | - Die Temperaturvariabilität ist in den Alpen grösser als sonst wo.<br>- N+, T+ (vor allem ab 1990)<br>- Die Abschätzung der Klimaänderung in den Alpen ist besonders schwierig, da hier viele verschiedene Faktoren zusammenspielen.  |
| Casty et al. 2005    | Temperature and precipitation variability in the european Alps since 1500                                    | 1500-.....2003             | Europa, Alpen   |  |    | ▲▲▲ |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  | - Winter und Sommer 1500-1900: T-<br>- Winter und Sommer 1900-2000: T+ (starker Anstieg seit 1950)<br>- Sommer 2003 war der wärmste und trockenste der letzten 500 Jahre   |
| Schmidli, Frei 2005  | Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century                  | 1901-----2000              | Schweiz         |  | ◆▲ |     |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  | - Winter: SN+ (10-30%, Nord- und Westschweiz)<br>- Herbst: SN+ (Ganze Schweiz)<br>- Sommer: SN=<br>- Frühling: SN=   |
| Xoplaki et al. 2005  | European spring and autumn temperature variability and change of extremes over the last half millennium      | 1500-.....2005             | Europa          |  |    | ▲▲▲ |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  | - 1995-2004: Wärmste Dekade der letzten 500 Jahre  |

N = Niederschlag (Wert)  
SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▼      | ▼      | ▼    |
| keine Veränderung | ◆      | ◆      | ◆    |

Im Text:

[+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz                | Titel   | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum     | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |     |    |    |    |   |   |      |      |     | Kernaussagen |  |  |  |
|-------------------------|---|----------------------------|-----------------|--|----|-----|----|----|----|---|---|------|------|-----|--------------|--|--|--|
|                         |   |                            |                 | N                                      | SN | T   | NQ | MQ | HQ | S | G | StPa | StPw | StN |              |  |  |  |
| Bader, Bantle 2004      | Das Schweizer Klima im Trend  | 1864-.....2001             | Schweiz         | ◇▲                                     | ▲  | ▲▲▲ |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Grosse Veränderungen des Klimas seit den 1980er Jahren</li> <li>- Alpennordseite: SN+</li> <li>- Alpensüdseite: SN=</li> </ul>  |
| Luterbacher et al. 2004 | European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500   | 1500-.....2004             | Europa          |  |    | ▲   |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1500-1900: Temperaturabnahme in Europa (-0.5°C)</li> <li>- 1900-2000: Temperaturzunahme</li> <li>- 2003 der heisseste Sommer in Europa der letzten 500 Jahre</li> <li>- Winter 1708/09 der kälteste der letzten 500 Jahre</li> </ul>  |
| Schär et al. 2004       | The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves   | 1864-.....2000             | Europa, Schweiz |  |    | ▲   |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hitzesommer 2003 war sehr ungewöhnlich.</li> <li>- Zunahme der interannuellen Variabilität der Temperatur um 100% &gt; 2003er Sommer können trotzdem vermehrt auftreten</li> </ul>  |
| Schmidli et al. 2002    | Mesoscale precipitation variability in the region of the European Alps during the 20th century  | 1900-.....1990             | Europa, Alpen   | ▲                                      | ◇▲ |     |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Westliche Alpen, Winter: N+ ( 20-30%), kein Zusammenhang mit NAO</li> <li>- Südliche Alpen, Herbst: N- ( 20-40%), Zusammenhang mit NAO</li> </ul>   |
| Böhm et al. 2001        | Regional temperature variability in the European Alps: 1760-1998 from homogenized instrumental time series  | 1760-.....1998             | Europa, Alpen   |  |    | ▲   |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- T+ (1.1°C)</li> <li>- stärkere Erwärmung in den Alpen feststellbar verglichen zum globalen Mittel</li> <li>- 1750-1890: T-</li> <li>- 1890-2000: T+</li> </ul>  |
| Frei, Schär 2001        | Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region  | 1901-.....1994             | Europa, Schweiz |  | ◇▲ |     |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sommer und Herbst: SN=, tendenziell aber Zunahme</li> <li>- Winter und Herbst: SN+</li> </ul>   |
| Jungo, Beniston 2001    | Changes in the anomalies of extreme temperature anomalies in the 20th century at Swiss climatological stations located at different latitudes and altitudes | 1900-.....1999             | Schweiz         |  |    | ▲▲▲ |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Frühling: T+ (vor allem Nachttemperatur)</li> <li>- Sommer: T+ (vor allem Nachttemperatur)</li> <li>- Herbst: T+</li> <li>- Winter: T+ (vor allem Nachttemperatur und in Lagen &gt; 1000 m ü. M.)</li> <li>- Allgemein: Abnahme der täglichen Temperaturvariabilität, da die minimalen Tagestemperaturen stärker angestiegen sind als die maximalen Tagestemperaturen</li> </ul>  |
| OcCC 2000               | Trockenheit in der Schweiz  | 1525-.....1995             | Schweiz         | ◇▲▲                                    |    |     |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- In früheren Jahrhunderten traten Dürren häufiger auf als heute.</li> <li>- Die Schweiz ist im Falle von Trockenheit aufgrund der alpinen Wasserreserven und den generell höheren Niederschlagsmengen im Berggebiet im Vergleich zu anderen europäischen Ländern privilegiert.</li> <li>- Aus den Daten des 20. Jh. sind für die Schweiz keine grossräumigen einheitlichen Trends erkennbar.</li> <li>- Unser gegenwärtiges Wissen über mögliche zukünftige Veränderungen der Trockenheit im Alpenraum ist beschränkt. Das Potential für signifikante Veränderungen ist jedoch gross.</li> </ul> |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▼      | ▼      | ▼    |
| keine Veränderung | ◇      | ◇      | ◇    |

Im Text:  
 [+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz             | Titel  | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum   | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |     |    |    |    |   |   |      |      |     | Kernaussagen |  |  |  |
|----------------------|--|----------------------------|---------------|--|----|-----|----|----|----|---|---|------|------|-----|--------------|--|--|--|
|                      |  |                            |               | N                                      | SN | T   | NQ | MQ | HQ | S | G | StPa | StPw | StN |              |  |  |  |
| Beniston et al. 2007 | Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections              | 2070-2100                  | Europa        |  | ▲  | ▲   |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Szenarios nach PRUDENCE</li> <li>- Auftretenshäufigkeit, Intensität und Dauer von Hitzewellen werden in Zentraleuropa zunehmen. Die Verhältnisse werden ähnlich sein wie heute in Südeuropa.</li> <li>- Zudem wird die interannuelle Variabilität grösser sein.</li> <li>- Winter: SN+ (Zentral- und Nordeuropa), SN- (Südeuropa)</li> <li>- Sommer: SN+ (Nordosteuropa), SN- (Südeuropa)</li> <li>- Windstürme werden zwischen 45-55°N zunehmen (exkl. Alpen)</li> </ul> |
| Frei et al. 2006     | Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models | 2071-2100                  | Europa        |  | ▲  |     |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alpenregion:</li> <li>- Winter: SN+</li> <li>- Sommer: SN+ (aber Modelle zeigen verschiedene Resultate)</li> </ul>  |
| Beniston 2005        | Mountain climates and climatic change: An overview of processes focusing on the European Alps                | 2071-2100                  |               | ▽                                      |    | ▲   |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Szenario: CO2-Verdoppelung</li> <li>- Es wird die Komplexität beschrieben, GCMs mit RCMs zu koppeln</li> <li>- Die Abschätzung der Klimaänderung in den Alpen ist besonders schwierig, da hier viele Faktoren zusammenspielen.</li> </ul>   |
| Beniston 2004        | Climatic change and its impacts: An overview focusing on Switzerland   | 2071-2100                  | Schweiz       | ▽▲▽                                    |    | ▲▲▲ |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  |  |
| Frei 2004            | Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion  | 2030<br>2050<br>2070       | Schweiz       | ▽▲▽                                    |    | ▲▲▲ |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | <p>Mittlere Erwartungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alpennordseite Winter: T+ (1.6°C), N+ (10%)</li> <li>- Alpennordseite Sommer: T+ (2.3°C), N- (15%)</li> <li>- Alpensüdseite Winter: T+ (1.6°C), N+ (10%)</li> <li>- Alpensüdseite Sommer: T+ (2.5°C), N- (23%)</li> </ul>  |
| Heimann, Sept 2000   | Climate change estimates of summer temperature and precipitation in the Alpine region                        | 2071-2100                  | Europa, Alpen | ▽                                      |    | ▲   |    |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Aussagen beziehen sich nur auf die Sommermonate.</li> <li>- T+ (3-5°C), N- (20%)</li> <li>- N+ nur über der Adria und in Teilen von Osteuropa</li> <li>- Stärkste Erwärmung wird im westlichen Teil der Alpen erwartet</li> </ul>   |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▽      | ▽      | ▽    |
| keine Veränderung | ◇      | ◇      | ◇    |

Im Text:  
 [+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

## 3.2 Wissensstand zur Hydrologie

Dieses Kapitel umfasst relevante Literaturstellen und Aussagen von Experten zur vergangenen und zukünftigen Auswirkung der Klimaänderung auf die Hydrologie.

**Zusammenfassung:** Die Studien zur Hydrologie zeigen, dass die mittleren jährlichen Abflussmengen und das Auftreten von Hochwassern in den letzten 100 Jahren zugenommen haben. Signifikant ist diese Zunahme vor allem im Winter. Im Sommer zeigen sich keine signifikanten Trends für eine Zunahme. Zudem hat die Temperaturzunahme auch eine Häufung von Trockenperioden sowie eine Abnahme von Schneehöhe und Dauer der Schneedecke bewirkt.

Für die Zukunft zeigen die neueren Studien, dass der mittlere Jahresabfluss einerseits wegen der Niederschlagsabnahme und andererseits wegen der Verdunstungszunahme abnehmen wird. Experten erwarten, dass der Einfluss der veränderten Verdunstung vor allem in nicht alpinen Gebieten gross sein werde. Die Abflussbildungsprozesse sind in alpinen Gebieten im Vergleich zur Verdunstung von grösserer Bedeutung. Damit quantifizierte Aussagen über die Auswirkungen der Klimaänderung im konkreten (alpinen) Einzugsgebiet möglich werden, sei die Veränderung der Verdunstung in Schnee- und/oder Ödlandschaften mit den heutigen Modellen weiter zu untersuchen.

In glazialen Einzugsgebieten, in denen der Anteil des Schmelzwassers aus der Gletscherschmelze am Jahresabfluss gross ist, wird in Zukunft in warmen Sommern eine Zunahme des Abflusses erwartet. Infolge der höheren Lufttemperaturen wird im Winter der Niederschlag vermehrt als Regen und weniger häufig als Schnee fallen. Dies bewirkt vor allem in mittleren und höheren Lagen, in denen der Anteil des Abflusses aus der Schneedecke gross ist bzw. bisher gross war, dass der Abfluss im Winter zunehmen wird. Die Abflussganglinie wird sich im Mittel über das Jahr gesehen ausgleichen und bei den Abflussregimes kommt es tendenziell zu einer Verschiebung von nivalen zu pluvialen Typen.

Zusätzlich zur Veränderung des mittleren Abflusses wird auch eine Veränderung im Hoch- und Niedrigwasserverhalten erwartet. Die Studien zeigen, dass in Zukunft die Hochwasserhäufigkeit im Winter zunehmen wird. Dies als Folge der Zunahme des mittleren Niederschlags und der Zunahme von Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen. Niedrigwasserperioden werden vermutlich vermehrt vor allem im Sommer und Herbst auftreten.

Viele Studien beschränken sich demnach bei den Aussagen zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf die Häufigkeit und Intensität von Hoch- und Niedrigwasserereignissen auf qualitative Aussagen oder auf generelle Tendenzen. Für die Dimensionierung von Wasserkraftwerken oder Wasserfassungen für Hoch- oder Niedrigwassersituationen benötigen die Werksbetreiber aber detaillierte und quantitative Angaben. Bemerkenswert ist, dass der Einfluss von Hochwassern auf Wasserkraftanlagen in der Vergangenheit noch kaum untersucht wurde, obwohl derartige Ereignisse von den Kraftwerksbetreibern beinahe lückenlos dokumentiert sind.

Neben dem Klima spielt beim Abflussbildungsprozess auch die Landschaft bzw. Landnutzung eine wichtige Rolle. Experten schliessen nicht aus, dass die Veränderung der Landschaft vor allem in kleinen Einzugsgebieten relevant für die Entwicklung des Abflusses sein könnte.

| Referenz  | Titel   | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum   | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |     |    |      |    |   |   |      |      |     | Kernaussagen |  |    |  |
|---|---|----------------------------|---|--|----|-----|----|------|----|---|---|------|------|-----|--------------|--|----|--|
|   |   |                            |   | N                                      | SN | T   | NQ | MQ   | HQ | S | G | StPa | StPw | StN |              |  |    |  |
| World Glacier Monitoring Service 2008                                   | Global glacier changes: facts and figures   | 1850-.....2005             | Global  |  |    |     |    |      |    |   |   |      |      |     |              |  |    | Die Organisation World Glacier Monitoring Service (WGMS) sammelt systematisch Daten zu Gletschern aus der ganzen Welt. Gesammelt werden Veränderungen in der Masse, des Volumens, der Fläche und der Länge von Gletschern. Dies sind wichtige Indikatoren in der Klimabeobachtung.<br>1850-2005, Zentral Europa: Der enorm schnelle Rückgang der Gletscher, welcher vor allem seit 1980 beobachtet werden kann, wird in Zukunft in vielen Region zu einer kompletten Enteisung führen. Zwischen 1850-1970 verloren die Gletscher 35% ihrer Masse, von 1970-2000 weitere 22%. Alleine im Sommer 2003 wurde ein Verlust von 5-10% der Gletschermasse beobachtet. |
| OcCC 2008   | Das Klima ändert - was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz | 1864-.....2000             | Schweiz   | ◊▲                                     | ◊▲ | ▲▲▲ |    |      |    |   |   |      |      |     |              |  | ▲  | Der Bericht fasst die wesentlichen Erkenntnisse des IPCC 2007 Reports für die Schweiz zusammen.  |
| Huss et al. 2008a   | Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865   | 1865-.....2006             | Schweizer Alpen, Aletsch-, Rhone-, Gries- und Silvretta-gletscher |  |    |     |    |      |    |   |   |      |      |     |              |  | ▲  | – Winter: Kein signifikanter Trend in der Veränderung der untersuchten Gletscher-Massenbilanzen erkennbar<br>– Sommer: Signifikante Rückgänge erkennbar<br>– Massenverluste in den 40er war grösser als derjenige von 1997-2006<br>– Jeder untersuchte Gletscher reagiert anders auf klimatische Veränderungen, auch Gletscher, welche geographisch gesehen sehr nahe beieinander liegen.  |
| Schädler 2008   | Geht uns das Wasser aus?  | 1901-.....2005             | Schweiz   | ▲                                      |    |     |    |      |    | ◊ |   |      |      |     |              |  |    | – In der Schweiz liegen 230 Mia. m3 Wasser in Reserven (Gletscher, Seen, Grundwasser), dies entspricht 5% der Wasserreserven von Europa (Fläche Schweiz in Europa: 0.4%)<br>– In der Schweiz stehen pro Jahr und Kopf ~5400 m3 Wasser zur Verfügung (Vergleich: Israel 115 m3, Niederlande 690 m3, Deutschland 1305 m3, Spanien 2750 m3)<br>– Beitrag der Schweiz am Gesamtabfluss: Rhein 34%, Rhone 41%, Po 53%   |
| Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes KHR 2007 | Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert  | 1901-.....2000             | Europa, Rhein   | ◊▲                                     |    | ▲▲  |    | ▽▽▲▲ |    |   |   |      |      |     |              |  | ▽▲ | Ausführliche Studie zur Veränderung des Abflusses im Rheineinzugsgebiet von 1901-2000. Für den Alpenrhein bis Basel werden folgende Aussagen gemacht:<br>– Winter: MQ+ (150 m3/s, davon ~60 m3/s wegen Stauraum Entleerung der Kraftwerke im Alpenraum), T+, N+, S- > mildere Winter<br>– Sommer: MQ- (100 m3/s), T+, N=<br>– Jahr: MQ+ (10%), HQ+ (Wert), NQ- (Häufigkeit; vor allem in den letzten 40 Jahren)<br><br>Wege der Klimaänderung wird in Zukunft mit vermehrten Extremen gerechnet, sowohl HQ+ als auch NQ+ (Häufigkeit).   |

N = Niederschlag (Wert)  
SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▽      | ▽      | ▽    |
| keine Veränderung | ◊      | ◊      | ◊    |

Im Text:  
[+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz                     | Titel   | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum              | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |   |    |    |    |   |   |      |      | Kernaussagen |     |  |  |
|------------------------------|---|----------------------------|--------------------------|--|----|---|----|----|----|---|---|------|------|--------------|-----|--|--|
|                              |   |                            |                          | N                                      | SN | T | NQ | MQ | HQ | S | G | StPa | StPw |              | StN |  |  |
| Collins 2007<br>Collins 2008 | Climatic variation, glacier recession and runoff from Alpine basins   | 1894-----2006              | Schweiz, Aare und Rhone  |  |    |   |    |    | ▲  |   |   | ▲    |      |              |     |  | Der Abfluss aus stark vergletscherten Gebieten (z.B. die Massa) folgte in der beobachteten Periode der mittleren Mai-September Lufttemperatur, so z.B. während den Warmperioden 1940-1950 und 1990-2000.   |
| Naef 2007                    | Extreme Hochwasser verstehen - Beispiele aus der Schweiz  | 1600-.....2000             | Schweiz                  |  |    |   |    |    |    |   |   | ◇    |      |              |     |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Für die Berechnung von Dimensionierungshochwassern reichen statistische Extrapolationen alleine nicht aus, es braucht dazu breit abgestützte hydrologische Untersuchungen, so z.B. das Verständnis der Abflussprozesse in einem Gebiet.</li> <li>Systematische Fehler in der P-Q-Beziehung können zudem die Berechnung von HQ verfälschen, was wiederum eine Einordnung in eine statistische Verteilung erschwert.</li> <li>Das Auftreten von Hochwassern erfolgt in Zyklen und ist nicht rein zufällig.</li> <li>Durch die Berücksichtigung von historischen Hochwassern lassen sich statistische Abschätzungen verbessern.</li> </ul> |
| Paul et al. 2007             | Calculation and visualisation of future glacier extent in the Swiss Alps by means of hypsographic modelling                           | 1973-----2005              | Schweizer Alpen          |  |    | ▲ |    |    |    |   |   | ▲    |      |              |     |  | GIS Modell, welches das Schwinden der Gletscher berechnen und darstellen kann: Seit 1973 haben die Gletscherflächen um 54% abgenommen, das Volumen nahm um 50% ab  |
| Schädler 2007                | Klimaänderung und Wasser in der Schweiz   | 1901-----2000              | Schweiz                  | ▲▲                                     |    |   |    |    |    |   |   | ◇    |      |              |     |  | <p>Seit letztem Gletscherhochstand (1850) haben die Gletscher mehr als die Hälfte ihres Volumens verloren. Gesamtschweizerisch stellt der Gletscherabfluss allerdings nur rund 1% des jährlichen Gesamtabflusses dar. Die Gletscher können den prognostizierten Abflussrückgang bis 2050 nicht kompensieren.</p> <p>1901-2000:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Jahr: N+ (8%), E+, Q=</li> <li>Winter: N+ (20-30%)</li> </ul>  |
| Schneider, Eugster 2007      | Climatic impacts of historical wetland drainage in Switzerland  | 1800-1850<br>1992-1997     | Schweiz                  |  |    |   |    |    |    |   |   |      |      |              |     |  | Einfluss der Landschaftsveränderung auf das Mikroklima gross   |
| Weingartner, Pfister 2007    | Wie ausserordentlich war das Niedrigwasser im Winter 2005/06? - Eine hydrologisch-historische Betrachtung des Rheinabflusses in Basel | 1808-.....2006             | Schweiz, Rhein bis Basel | ▲                                      |    | ▲ | ▼  |    |    |   |   |      |      |              |     |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Winter: Abflusserhöhung beim Rhein bei Basel im Mittel um 70 m<sup>3</sup>/s durch die Entleerung der Speicherseen</li> <li>Einfluss der Kraftwerke auf den Rheinabfluss grösser als allgemeine Gewässerkorrekturen, Juragewässerkorrektur, Meliorationen, veränderte Seeregulierungen etc.</li> <li>Winterklima: T+, N+, Erhöhung des NQ auch wegen des Klimas</li> <li>NQ traten im zweiten Teil des 20. Jh. vermehrt im September oder Oktober auf, also nicht wie normalerweise üblich im Winter</li> </ul>   |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▼      | ▼      | ▼    |
| keine Veränderung | ◇      | ◇      | ◇    |

Im Text:

[+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz                   | Titel  | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum                                   | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |      |   |    |    |    |    |   |      |      |     | Kernaussagen |  |  |  |
|----------------------------|--|----------------------------|---|--|------|---|----|----|----|----|---|------|------|-----|--------------|--|--|--|
|                            |  |                            |   | N                                      | SN   | T | NQ | MQ | HQ | S  | G | StPa | StPw | StN |              |  |  |  |
| Pfaundler, Wüthrich 2006   | Saisonalität hydrologischer Extreme  | 1900-----2000              | Schweiz                                       |  |      |   |    |    |    |    |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Klimaänderung hat bisher noch keine Veränderung im Auftreten von Hochwassern bewirkt</li> <li>Die HQ- sowie die NQ-Saisonalität zeigen ein relativ kontinuierliches Verhalten im Raum, ändern sich also nicht abrupt wie dies bei der Betrachtung der Abflussmenge sein kann, für welche in benachbarten Gebieten recht unterschiedliche NQ, MQ oder HQ auftreten können.</li> <li>Für die Typisierung in HQ- oder NQ-Saisonalität lässt sich die bestehende Abflussregimetypisierung übernehmen</li> </ul>   |
| Pfister et al. 2006        | Hydrological winter droughts over the last 450 years in the Upper Rhine basin: a methodological approach | 1550-.....2006             | Schweiz, Rhein bis Basel                      | ▲                                      |      | ▲ | ▼  |    |    |    |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Starke Trockenperioden waren im 20. Jh. rar. Dies weil die Winterniederschläge und -temperatur seit dem vorletzten Jahrhundert stetig zugenommen haben</li> <li>NQ-Verhältnisse traten meistens nach 4-monatigen Trockenphasen auf (Phasen mit wenig Niederschlag)</li> <li>Trockenphasen nicht nur auf die Schweiz beschränkt, sondern grossräumig</li> <li>Niedrigwasserperioden oft mit negativem NAO-Index verbunden</li> </ul>   |
| Rimmer 2006                | The changing climate of Swiss hydroelectric power production   | 1960-----2005              | Schweiz, Wallis, Val d'Arolla, Grande Dixence | △                                      | △△△△ |   | △  | △  |    | ▽△ |   |      |      |     |              |  |  | <p>Auswirkungen der Veränderungen des Arollagletschers auf die Wasserkraftnutzung (Grande Dixence) sind noch unklar. Stärker Schwankungen bei den Tagesabflüssen könnten die Speicherkapazität überschreiten, und allenfalls sogar verheerende Hochwasser auslösen.</p> <p>1960-2005:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Jahr: T+ (3°C), N+ (20%), ebenfalls Zunahme der in terannuellen Variabilität), MQ+ (40%, mehr Gletscherabfluss, temperaturgesteuert), Bewölkung+ (5-10%), Abnahme der Schneedecke und des Gletscherfläche, SN+</li> <li>Die Veränderungen sind hauptsächlich temperaturgesteuert und betreffen vor allem die Monate Juli und August und die Jahre ab 1982 (bis heute). Die Veränderung in T ist viel grösser als diejenige in Q.</li> </ul> |
| Scherrer, Appenzeller 2006 | Swiss Alpine snow pack variability: major patterns and links to local climate and large-scale flow       | 1958----1999               | Schweizer Alpen                               |  |      |   |    |    |    |    |   |      |      |     |              |  |  | <p>Die Schweizer Schneevariabilität kann in drei gut voneinander abgegrenzte Muster zerlegt werden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Das wichtigste Muster zeigt kleine geografische Unterschiede und erklärt ungefähr 50% der Jahr zu Jahr Variabilität.</li> <li>Das zweite Muster zeigt Unterschiede zwischen dem Alpennord- und Alpensüdhang auf. Es erklärt etwa 15% der Gesamtvariabilität.</li> <li>Das dritt wichtigste Muster ist vor allem in tiefen Lagen mitbestimmend, erklärt rund 8% der Gesamtvariabilität und ist höhenabhängig.</li> </ul>   |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | △      | ▲      | △    |
| Abnahme           | ▽      | ▼      | ▽    |
| keine Veränderung | ◇      | ◆      | ◇    |

Im Text:

[+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz                                 | Titel  | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum                     | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |     |    |     |    |   |      |      |     | Kernaussagen |  |  |  |
|--|--|----------------------------|---------------------------------|--|----|-----|----|-----|----|---|------|------|-----|--------------|--|--|--|
|  |  |                            |                                 | N                                      | SN | T   | NQ | MQ  | HQ | S | StPa | StPw | StN |              |  |  |  |
| Zemp et al. 2006                         | Alpine glaciers to disappear within decades?   |                            | Europa, Alpen                   |  |    | ▲   |    |     |    |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1870-1970: Massenverlust der Alpengletscher um 35%</li> <li>- 1870-2000: Massenverlust der Alpengletscher um 50%</li> <li>- T+ 3 °C würde bedeuten, dass die von Gletscher bedeckten Flächen um 80% abnehmen würden</li> <li>- T+ 5 °C würde bedeuten, dass die von Gletscher ganz z verschwinden würden</li> </ul> |
| Birsan et al. 2005<br>Birsan et al. 2004 | Streamflow trends in Switzerland   | 1931-----2000              | Schweiz                         |  |    | ▲▲▲ | ▼  | ◇▲▲ | ▲  |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Jahr: T+ (inkl. Abnahme der Variabilität), MQ+</li> <li>- Frühling: T+, NQ-, MQ+</li> <li>- Sommer: T+, MQ=, NQ=</li> <li>- Herbst: T+, NQ-, MQ+</li> <li>- Winter: T+, N+, NQ-, MQ+, HQ+</li> </ul>  |
| BWG 2005                                 | Hydrologie der Schweiz   | 1900-----2000              | Schweiz                         | ◇                                      |    | ▲   |    |     | ◇  |   |      |      |     |              |  |  |  |
| Frauenfelder et al. 2005                 | Worldwide Glacier Mass Balance Measurements: trends and first results of an extraordinary year in Central Europe | 2003                       | Alpenraum                       |  |    |     |    |     |    |   |      |      | ▲   |              |  |  | Während des Hitzesommers 2003 nahm das mittlere Wasseräquivalent in den alpinen Gletschern um rund 2.5 m ab. Zum Vergleich: mittlerer Verlust 1850-2000 in den Alpen beträgt 0.6 Wasseräquivalent.   |
| Zierl, Bugmann 2005                      | Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments   |                            | Schweiz, Deutschland, Alpenraum |  |    |     |    |     |    |   |      |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- T+, starker Einfluss auf die Schneedecke und somit auf das Abflussverhalten</li> <li>- Im ganzen Alpenraum kommt es zu Regimeänderungen</li> </ul>  |
| Bartels et al. 2004a                     | Klima und Wasserwirtschaft   | 1931-----2000              | Deutschland, Rhein              | ▲▲                                     | ▲  | ▲▲▲ |    |     |    | ▲ | ▼    |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Winter:</li> <li>- T+, N+, SN+ (35%)</li> <li>- Abnahme der Dauer einer geschlossenen Schneedecken unterhalb 800 m ü. M. um 40%</li> <li>- HQ+ (vor allem ab 70er Jahre)</li> </ul>   |
| Bartels et al. 2004b                     | Klimaveränderung und Wasserwirtschaft in Süddeutschland  | 1901-----2000              | Deutschland, Rhein              |  | ◇▲ | ▲   |    |     |    |   | ▲▼   |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Abnahme der Dauer der Schneedecke unter 400 m ü. M. um 30-40%</li> <li>- Abnahme der Dauer der Schneedecke über 700 m ü. M. um 10%</li> <li>- Jahr: T+ (0.5-1.2°C), HQ+</li> </ul>  |
| Beniston 2004                            | Climatic change and its impacts  | 1900-----2001              | Europa, Schweiz                 | ▼▲▲                                    |    | ▲▲▲ |    |     |    |   | ▼    |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Allgemeine Übersicht zum Klimasystem</li> <li>- Allgemeine Zusammenfassung zur Klimaänderung in der Schweiz</li> <li>- Abnahme der Dauer der Schneedecke (&lt; 10cm)</li> <li>- Abnahme der Schneehöhe</li> </ul>   |
| Scherrer et al. 2004                     | Trends in Swiss Alpine snow days: The role of local- and large-scale climate variability                         | 1958----1999               | Schweiz                         |  |    | ▲   |    |     |    |   | ▼    |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Abnahme der Dauer der Schneedecke in tiefen Lagen</li> <li>- NAO kann Trends in der Dauer der Schneetage erklären, nicht aber die interannuelle Variabilität</li> </ul>   |
| Latenser, Schneebeil 2003                | Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931-99)  | 1931-----1999              | Schweizer Alpen                 | ▲                                      |    |     |    |     |    |   | ▼    |      |     |              |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Seit 1960er Jahre Zunahme von starken Schneefällen</li> <li>- 1950er und 70er: Schneehöhen blieben gleich</li> <li>- 1980er: Schneehöhenzunahme</li> <li>- Gegen Ende des 20. Jh. signifikante Abnahme der Schneehöhen (vor allem in tieferen und mittleren Lagen)</li> </ul>                                       |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▼      | ▼      | ▼    |
| keine Veränderung | ◇      | ◇      | ◇    |

Im Text:

[+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz             | Titel  | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |     |    |    |    |   |   |      |      |     | Kernaussagen |  |  |  |
|----------------------|--|----------------------------|-------------|--|----|-----|----|----|----|---|---|------|------|-----|--------------|--|--|--|
|                      |  |                            |             | N                                      | SN | T   | NQ | MQ | HQ | S | G | StPa | StPw | StN |              |  |  |  |
| OcCC 2003            | Extremereignisse und Klimaänderung   | 1900-----2000              | Schweiz     | ◇                                      | ▲▲ | ▲▲▲ | ◇  |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | Es werden Massnahmen zum Schutz gegen Extremereignisse (z.B. Verbauungen) und gegen die anthropogene Klimaänderung (z.B. CO2-Reduktion) präsentiert<br>1900-2000:<br>- Jahr: T+ (0.6 °C)<br>- Häufung von Naturkatastrophen/Extremereignissen beobachtbar, jedoch unmöglich Trends festzustellen |
| Santschi et al. 2003 | Haben die Winterhochwasser in schweizerischen Fließgewässern zugenommen?                             | 1961----2000<br>1981-2000  | Schweiz     |  |    |     |    |    |    | ▲ | ◇ |      |      |     |              |  |  | Betrachtungszeitraum: Oktober-März<br>- HQ+ Mittelland und Jura<br>- HQ= Alpenraum<br>- HQ= 1981-2000  |
| Hisdal et al. 2001   | Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent?                                   | 1911-----1995              | Europa      |  |    |     | ◇  |    |    |   |   |      |      |     |              |  |  | Bei 600 untersuchten Abflusszeitreihen aus Europa wurden bis heute keine intensiveren oder häufigeren Trockenperioden seit 1911 festgestellt (Ausnahmen innerhalb der Periode 1962-1990: Spanien, Grossbritannien und teile Osteuropas)  |
| Nachtnebel 2001      | Die Hydrologie Österreichs unter dem Einfluss von Szenarien einer möglichen Klimaänderung (Hydklima) | 1965---1994                | Österreich  |  |    | ▲▲▲ |    | ▽  |    |   |   |      |      |     |              |  |  | Jahr: MQ- (16-18%)   |

N = Niederschlag (Wert)  
SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▽      | ▽      | ▽    |
| keine Veränderung | ◇      | ◇      | ◇    |

Im Text:

[+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz          | Titel   | Betrachteter Zeitabschnitt     | Studienraum            | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |        |      |    |    |    |    |   |      |      | Kernaussagen |     |  |  |
|-------------------|---|--------------------------------|------------------------|--|--------|------|----|----|----|----|---|------|------|--------------|-----|--|--|
|                   |   |                                |                        | N                                      | SN     | T    | NQ | MQ | HQ | S  | G | StPa | StPw |              | StN |  |  |
| OcCC 2008         | Das Klima ändert - was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz | 2001-----2100                  | Schweiz                | ▽▲                                     | ◇▲▲▲▲▲ | ▲▲▲▲ | ▽  |    |    | ▽▽ |   |      |      |              |     |  | <p>Der Bericht fasst die wesentlichen Erkenntnisse des IPCC 2007 Reports für die Schweiz zusammen. Aussagen für 2000-2100:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Jahr: T+ (3.5-7 °C), SN+</li> <li>- Winter: T+, N+, SN+, EN- (40% weniger Energiebedarf für Heizung)</li> <li>- Sommer: T+, N-, SN= (-30%), MQ- (vor allem fehlender Schmelzwasserabfluss)</li> </ul> <p>Schlussfolgerungen und Empfehlungen bzgl. Energiepolitik:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- "Die Anpassung an die Klimaänderung erfordert teure und langfristige ausrichtende Investitionen in die Infrastruktur. Dazu gehören etwa wasserbauliche Massnahmen, wasserregulierende Ersatzanlagen für die Gletscher, der Bau von neuen Kraftwerken oder hangstabilisierende Massnahmen."</li> <li>- "Eine sachliche Diskussion betreffend des zukünftigen Energiebedarfs und der Energieversorgung ist dringend. Die Steigerung der Energieeffizienz und damit die Verminderung der Nachfrage nach Energie muss erste Priorität erhalten. Die künftige Elektrizitätsproduktion soll ohne neue CO2-Emissionen gestaltet werden. Unumgängliche Zusatzemissionen müssen durch Emissionsminderungen in anderen Bereichen oder an anderen Orten kompensiert werden. Durch gezielte, wirksame Förderung erneuerbarer Energien können diese schneller zu konkurrenzfähigen Alternativen werden."</li> </ul> |
| Huss et al. 2008b | Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate                                 | 2007-----2050<br>2007-----2100 | Schweiz, Wallis, Zinal |  |        |      |    |    | ▲  | ◇  |   | ▲    |      |              |     | <p>2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Jahr: MQ+ (51%, Zunahme des Gletscherabflusses). Zudem Verlängerung der Schmelzphase (ab Juni bereits), höhere Abflüsse vor allem im Sommer</li> </ul> <p>2100:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Jahr: MQ=. Ab der zweiten Hälfte des 21. Jh. nehmen die Wassermengen dann kontinuierlich ab, bis auf das heutige Niveau. (Gletscher verschwinden beinahe ganz, Rückgang der Flächen aber auch der Gletschervolumen; verminderte Gletscherabflussmengen).</li> <li>- Saisonale Verschiebung der Abflüsse: Frühling MQ++, Sommer MQ-</li> <li>- Einfluss der Verdunstung auf den Wasserhaushalt als limitierende Grösse nimmt mit der Klimaerwärmung auch in hohen alpinen Lagen zu.</li> </ul> <p>Methodisch:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ansätze, welche den Gletscher nicht dynamisch darstellen können sind nicht geeignet um die Auswirkungen des Klimas auf den Gletscher transient für die nächsten 100 Jahre zu berechnen - höchstens aber für die nächsten 30 Jahre.</li> </ul> |  |
| Schädler 2008     | Geht uns das Wasser aus?  | 2030<br>2050<br>2070           | Schweiz                | ▽▲                                     |        |      |    |    | ▽▲ |    |   | ▲    | ▽    |              |     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gletscher: Zunächst MQ+, dann MQ-(=)</li> <li>- Die Schweiz bleibt trotz verminderter Abflussmengen das Wasserschloss Europas</li> </ul>  |  |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▽      | ▽      | ▽    |
| keine Veränderung | ◇      | ◇      | ◇    |

Im Text:  
 [+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz         | Titel   | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum     | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |     |    |    |    |   |   |      |      |     | Kernaussagen |  |  |  |
|------------------|---|----------------------------|-----------------|--|----|-----|----|----|----|---|---|------|------|-----|--------------|--|--|--|
|                  |   |                            |                 | N                                      | SN | T   | NQ | MQ | HQ | S | G | StPa | StPw | StN |              |  |  |  |
| OcCC 2007        | Klimaänderung und die Schweiz 2050  | 2050                       | Schweiz         | ▽▲                                     | ▲  | ▲▲▲ | ▽  | ▲  | ▽  |   |   |      |      |     |              |  |  | <p>Folgende Aussagen stehen im Bericht und wurden auch an einer Tagung vom 14. März 2007 in Bern präsentiert:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Die erwartete Erwärmung des Klimas verläuft bis 2050 noch weitgehend unabhängig von weltweiten Emissionsminderungsmaßnahmen, da sich diese erst längerfristig massgeblich auswirken werden. Sofern die Treibhausgasemissionen nicht massiv gesenkt werden, werden die Folgen der Erwärmung in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts, deutlich stärker ausfallen als dargestellt.</li> </ul> <p>Aussagen Klima:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Herbst, Winter und Frühjahr bis 2050: T+ von 2 °C (Unsicherheitsbereich 1–5 °C)</li> <li>– Sommer bis 2050: T+ von 3 °C (Unsicherheitsbereich 2–7 °C)</li> <li>– Winter: N+ (10%), SN+, HQ+, Kältewellen-</li> <li>– Sommer: N- (20%), Hitzewellen+, Trockenperioden+</li> </ul> <p>Aussagen Wasserwirtschaft:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Sommer und Herbst: MQ-</li> <li>– steigender Bewässerungsbedarf der Landwirtschaft: Konkurrenzsituation zwischen Ökosystemen, verschiedenen Verbrauchern und Regionen</li> <li>– Weniger Wasser: Einbussen in der Landwirtschaft und bei der Stromproduktion (v. a. Laufkraftwerken und bei wassergekühlten Kraftwerken)</li> <li>– Wasserversorgung wird jedoch mit grosser Wahrscheinlichkeit mit einem optimierten Wassermanagement gesichert sein</li> <li>– SN+: Erhöhtes Schadensrisiko</li> <li>– N+, Schnee-</li> <li>– Winter: HQ+ &gt;renaturierte und verbreiterte Flüsse zur Verringerung des Schadenpotenzials</li> </ul> |
| KOHS 2007        | Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz                                      |                            | Schweiz         |  |    |     |    |    |    | ▲ |   |      |      |     |              |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>– HQ+ (Häufigkeit und Abflussmenge)</li> <li>– Die aktuellen Grundsätze für den Hochwasserschutz erweisen sich mit Blick auf die zu erwartenden Auswirkungen der Klimaänderung als weitsichtig. Sie behalten deshalb ihre Gültigkeit und müssen weiter konsequent umgesetzt werden.</li> <li>– Die Dimensionierungsgrössen (Abflussmenge, Wasserfracht, Geschiebe) sind vorausschauend im oberen Entscheidungsbereich festzulegen.</li> </ul> |  |
| Paul et al. 2007 | Calculation and visualisation of future glacier extent in the Swiss Alps by means of hypsographic modelling | 2080                       | Schweizer Alpen |  |    | ▲   |    |    |    |   | ▽ |      |      |     |              |  | <p>GIS Modell, welches das Schwinden der Gletscher berechnen und darstellen kann. Bis 2080 werden rund 85% aller Gletscher (Anzahl) und 65% der Gletscherflächen verschwunden sein.</p>  |  |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▽      | ▽      | ▽    |
| keine Veränderung | ◇      | ◇      | ◇    |

Im Text:  
 [+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz              | Titel   | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum                                   | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |     |    |    |    |   |   |      |      | Kernaussagen |     |  |  |   |
|-----------------------|---|----------------------------|---|--|----|-----|----|----|----|---|---|------|------|--------------|-----|--|--|---|
|                       |   |                            |   | N                                      | SN | T   | NQ | MQ | HQ | S | G | StPa | StPw |              | StN |  |  |   |
| Schädler 2007         | Klimaänderung und Wasser in der Schweiz   | 2050                       | Schweiz                                       | ▽▲▽                                    | ▲  | ▲▲▲ | ▽  | ▽  |    |   |   |      |      |              |     |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anstieg der mittleren Schnee- und Permafrostgrenze um 150-600 m, weniger Tage mit Schnee</li> <li>- Winter: SN+ (im ungünstigsten Fall kann ein heute 100-jähriges Ereignis in Zukunft zu einem 20-jährigen werden)</li> <li>- Jahr: MQ- (7-12%), Abflussregimes werden sich um 1-2 Stufen nach unten verschieben</li> <li>- HQ: Nordschweiz &lt; 1500 m ü. M. HQ+ (Abflussmenge); Nordalpine Gebiete &gt; 1500 m ü. M. HQ=; Südschweiz HQ+ (Häufigkeit)</li> <li>- Gletscherrückzug und das Auftauen des Permafrostes bewirkt eine Geschiebezunahme in Gebieten zwischen 2300-2800 m ü. M. &gt; Höhere Gefahr von Murgängen in den Alpen</li> </ul> |
| Bronstert et al. 2006 | Vergleich und hydrologische Wertung regionaler Klimaszenarien für Süddeutschland                | 2021-2050                  | Süd-deutschland                               | ▲▲▲                                    |    | ▲▲▲ |    |    |    |   |   |      |      |              |     |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bei klimatologischen und hydrologischen regionalen Bewertungen sollen immer Downscaling-Verfahren angewendet werden, direkte GCM Daten sind nicht geeignet.</li> <li>- Es werden verschiedene Varianten für verschiedene klimatologische und hydrologische Fragestellungen diskutiert.</li> </ul>  |
| Horton et al. 2006    | Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty | 2070-2099                  | Schweiz, Alpen                                |  |    |     |    |    | ▽  |   |   |      |      |              |     |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Früheres Eintreten der Schneeschmelze</li> <li>- Stärkere Variabilität des Abflusses</li> <li>- Untersuchte Einzugsgebiete: Drance de Bagnes, Saaser Vispa, Lonza, Rhône à Gletsch, Weisse Lütschine, Minster, Tamina, Vorderrhein, Dischmabach, Rosegbach, Verzasca</li> </ul>  |
| KLIWA 2006            | Ergebnisse vom KLIWA-Symposium vom 25./26.10.2006 in Stuttgart.                                 |                            | Deutschland                                   |  |    |     |    |    |    |   | ▲ |      |      |              |     |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aus den Ergebnissen der KLIWA-Forschungen wurden erste Handlungsempfehlungen für die Wasserwirtschaft ausgesprochen:</li> <li>- Da vermehrt und grössere Hochwasser erwartet werden, wird eine Anpassung der Hochwasserschutzplanung vorgeschlagen</li> <li>- Zudem sollen die Bemessungsabflüsse erhöht werden</li> </ul>   |
| Rimmer 2006           | The changing climate of Swiss hydroelectric power production                                    | 2031-2070                  | Schweiz, Wallis, Val d'Arolla, Grande Dixence |  | ▲  |     | ▲  |    | ▽  |   |   |      |      |              |     |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Auswirkungen der Veränderungen des Arollagletschers auf die Wasserkraftnutzung (Grande Dixence) sind noch unklar. Stärker Schwankungen bei den Tagesabflüssen könnten die Speicherkapazität überschreiten und allenfalls sogar verheerende Hochwasser auslösen.</li> <li>- 2031-2060:</li> <li>- T+ (1.44 °C), N+ (72.5 mm), MQ- (Veränderung des Regimes, veränderte Bewirtschaftung des Sees nötig)</li> </ul>   |
| Kleinn et al. 2005    | Hydrologic simulations in the Rhine basin driven by a regional climate model                    | 2100                       | Rhein bis Köln                                |  |    |     |    |    |    |   |   |      |      |              |     |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Verwendung des Outputs eines 14km Grid RCM für die hydrologische Modellierung brachte keine signifikant anderen Resultate (N und T) als das 56km Grid RCM; auch nicht im Alpenraum.</li> <li>- Ausführliches Paper, wie vom GCM zum RCM heruntergebrochen wurde, und von diesem wiederum auf die Auflösung des hydrologischen Modells (WaSim-ETH).</li> </ul>  |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▽      | ▽      | ▽    |
| keine Veränderung | ◇      | ◇      | ◇    |

Im Text:  
 [+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung



| Referenz               | Titel  | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum  | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |     |      |    |     |    |      |   |      |      |     | Kernaussagen |  |  |   |
|------------------------|--|----------------------------|--|--|-----|------|----|-----|----|------|---|------|------|-----|--------------|--|--|---|
|                        |  |                            |  | N                                      | SN  | T    | NQ | MQ  | HQ | S    | G | StPa | StPw | StN |              |  |  |   |
| Schädler 2002          | Auswirkungen der Klimaveränderung auf alpine Gewässersysteme   |                            | Schweiz  | ▽▲▲                                    | ▲   | ▲▲▲▲ |    | ▲   |    | ▽▲   |   |      |      |     |              |  |  | – Anstieg der Schneefallgrenze um 200m, weiterer Rückgang der Gletscher<br>– Grosse Abflussregimeveränderungen von nival zu pluvial; heutige pluviale Regimes werden sich nicht gross verändern           |
| Voss et al. 2002       | Enhanced resolution modelling study on anthropogenic climate change: Changes in extremes of the hydrological cycle | 2060-2089                  | Global   | ▽▲                                     | ▲▲▲ |      |    |     |    |      |   |      |      |     |              |  |  | Szenario: CO2-Verdoppelung<br>In einem wärmeren Klima nehmen Starkniederschlagsereignisse generell zu.  |
| Middelkoop et al. 2001 | Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin                 | 2050                       | Rhein  | ▽▲▲                                    |     | ▲▲▲  |    | ▽▽▲ |    | ▽▲▲▽ |   |      |      |     |              |  |  | Aussagen beziehen sich auf den Alpenrhein.  |
| Nachtnebel, Fuchs 2001 | Die Hydrologie Österreichs unter dem Einfluss von Szenarien einer möglichen Klimaänderung (Hydklima)               | 2070-2099                  | Österreich   | ▽▲▽                                    |     | ▲▲▲  |    | ▽   |    |      |   |      |      |     |              |  |  | Jahr: MQ- (16-18%)  |
| Braun et al. 2000      | Consequences of climate change for runoff from Alpine regions  | 2100                       | Alpen<br>Vernagt-<br>bach,<br>Rofenache,<br>Venter<br>Ache,<br>Klausbach |  |     |      |    |     |    | ▲    |   |      |      |     |              |  |  | CO2-Verdoppelung<br>Vergletscherte Einzugsgebiete sensitiv auf Niederschlagsänderung, weniger auf Temperaturänderung<br>Sommer: HQ+ wenn Schneeschmelze und starke Sommerniederschläge zusammen auftreten |

N = Niederschlag (Wert)  
SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▽      | ▽      | ▽    |
| keine Veränderung | ◇      | ◇      | ◇    |

Im Text:

[+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

### 3.3 Wissensstand zur Wasserkraft

Dieses Kapitel stellt wichtige Aussagen aus verschiedenen Literaturquelle und den Aussagen von Experten zur vergangenen und zukünftigen Auswirkung der Klimaänderung auf die Wasserkraft dar.

**Zusammenfassung:** Die Studien zur Entwicklung der Stromnachfrage zeigen, dass diese in der Vergangenheit stetig angestiegen ist und in Zukunft weiter ansteigen wird. Zudem wird davon ausgegangen, dass es zu einer Veränderung der Saisonalität in der Stromnachfrage kommen wird (im Sommer werden vermehrt Kühltage erwartet, im Winter hingegen weniger Heiztage).

Auf Seiten der Stromproduktion hat die Klimaänderung kurz- und langfristig gesehen verschiedene Auswirkungen: Speicherkraftwerke mit glazialem Einzugsgebiet werden in naher Zukunft in besonders warmen und trockenen Jahren von einer verstärkten Gletscherschmelze profitieren und dadurch die gleichzeitig vermutlich unterdurchschnittlichen Niederschläge kompensieren können. Im Hitzesommer 2003 lag die Energieproduktion aus Wasserkraft beispielsweise nur 0.8% unter dem zehnjährigen Mittel, obwohl der mittlere Jahresniederschlag nur 70 bis 85% der normalen Werte erreichte (OcCC 2005). Laufkraftwerke mit kleinem Anteil von Gletschern im Einzugsgebiet werden in solchen Jahren aufgrund des geringeren Wasserangebots mit Produktionseinbußen rechnen müssen. In ferner Zukunft wird der Anteil von Strom aus der Wasserkraft (gleicher Kraftwerkspark vorausgesetzt) infolge der abnehmenden Niederschlagsmenge, dem Verschwinden der Gletscher und der Zunahme der Verdunstung mit grosser Wahrscheinlichkeit stagnieren oder sogar abnehmen.

Neben der Produktion wirkt sich die Klimaänderung auch auf den Betrieb und den Unterhalt von Kraftwerksanlagen aus. Experten erwähnen insbesondere die Veränderungen im Einzugsgebiet, welche z. B. einen höheren Geschiebe-, Schwebstoff- und Geschwemmseltrieb verursachen könnten und letztlich höhere Unterhaltskosten mit sich bringen könnten.

Experten weisen auch darauf hin, dass die Rolle der Wasserkraft im zukünftigen Markt der erneuerbaren Energien noch unklar sei. Zudem gelte es zu klären, wie das verfügbare Wasser während länger anhaltenden Trockenperioden optimal eingesetzt werden darf und wie das Wasser unter konkurrierenden Akteuren bzw. Nutzungsformen aufgeteilt werden kann (z. B. allfällige Konfliktsituationen zwischen industriellen Nutzern, Wasserkraftwerksbetreibern, Trinkwasserversorgern, Landwirten (Bewässerung), Ökologen, Atomkraftwerksbetreibern (Gewässertemperatur) ... etc.).

Allgemein fordern die Wasserkraftbetreiber (in Ergänzung zu den bestehenden, primär wissenschaftlichen Studien) praxistaugliche Aussagen und Hilfestellungen.

| Referenz                | Titel   | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |     |    |    |    |   |    |      |      | Kernaussagen |     |  |  |
|-------------------------|---|----------------------------|-------------|--|----|-----|----|----|----|---|----|------|------|--------------|-----|--|--|
|                         |   |                            |             | N                                      | SN | T   | NQ | MQ | HQ | S | G  | StPa | StPw |              | StN |  |  |
| Alpine Convention 2008  | Report on the State of the Alps - Waterbalance in the Alps                      | 1850-.....2000             | Alpenraum   |  |    | ▲▲▲ |    |    |    |   | ▼▲ |      |      |              |     |  | <p>Dieser Bericht der Alpenkonvention durchleuchtet das Thema Wasser im Alpenraum. Betrachtete Aspekte sind: Wasserqualität, -menge, Hydromorphologie, soziale und ökonomische Aspekte des Wassers, Schutz vor Naturgefahren, Auswirkungen der Klimaänderung und internationale Regelungen zwischen den Alpenländern.</p> <p>Kapitel "Wasserkraftnutzung":</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Wasserkraftnutzung ist auch in Zukunft wichtig für die Alpenregionen</li> <li>Bei Um- oder Neubauten von Anlagen soll auch der Umweltschutz berücksichtigt werden (Nachhaltigkeit).</li> <li>Als gutes Beispiel wird die Bewirtschaftung des Flusses Spöl durch die Engadiner Kraftwerke vorgestellt (Stichwort "Dynamisierung Restwasser"), wo sowohl für die Kraftwerksbetreiber als auch die Natur eine Win-Win Situation erreicht wurde.</li> <li>Bei Um- oder Neubauten von Anlagen mit langer Lebensdauer soll auch der Faktor "Klimaänderung" berücksichtigt werden, um sie "climate proofed" zu bauen.</li> </ul> <p>Kapitel "Klimaänderung":</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Klimaänderung wirkt sich stärker aus auf den Alpenraum als im globalen Mittel. Deshalb ist es wichtig, sich schon früh mit möglichen Änderungen auseinanderzusetzen. Die Berücksichtigung des Faktors "Klima" soll als Chance angesehen werden (vorausschauen und -denken).</li> <li>Die Auswirkungen auf die Ressource Wasser werden gewaltig sein, so dass gemeinsame Lösungsfindungen zwischen allen Nutzern unausweichlich sind (integrales Wassermanagement).</li> </ul> |
| BFE 2008                | Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2007                                      | 2007                       | Schweiz     |  |    |     |    |    |    |   |    | ▲    | ▲    | ▲            |     | Übersicht über die Schweizerische Elektrizitätsentwicklung in den vergangenen Jahren.  |  |
| Christenson et al. 2006 | Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland | 1901-.....2003             | Schweiz     |  |    |     |    |    |    |   |    | ▲▼   |      |              |     | <p>1901-2003, Symbole beziehen sich auf folgende Aussagen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Abnahme der Heiztage von 11-18% (je nach Schwellenwerttemperatur und Ortschaft: Davos, Zürich, Lugano und Genf)</li> <li>Zunahme der Kühltage (50-170%)</li> </ul> |  |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▼      | ▼      | ▼    |
| keine Veränderung | ◊      | ◊      | ◊    |

Im Text:

[+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz  | Titel            | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |   |    |    |    |   |   |      |      |     | Kernaussagen |   |   |
|-----------|------------------|----------------------------|-------------|--|----|---|----|----|----|---|---|------|------|-----|--------------|---|---|
|           |                  |                            |             | N                                      | SN | T | NQ | MQ | HQ | S | G | StPa | StPw | StN |              |   |   |
| OcCC 2005 | Hitzesommer 2003 | 2003                       | Schweiz     |  |    | Δ |    | ▽  |    |   |   |      |      | ◇   | Δ            | Δ | <p>Sommer 2003 war der trockenste und heisseste der letzten 500 Jahre. Klimamodelle zeigen, dass solche Sommer in Zukunft häufiger auftreten könnten</p> <p>Auswirkungen auf den Abfluss:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– verstärkte Gletscherschmelze &gt; Vergletscherte Gebiete verzeichneten höhere Abflussmengen, unvergletscherte weniger. Generell wurde ein starker Rückgang der Abflussmengen beobachtet.</li> </ul> <p>Auswirkungen auf die Stromproduktion:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Speicherkraftwerke profitierten wegen zusätzlichem Schmelzwasser Laufkraftwerke produzierten aufgrund geringerer Wasserführung weniger Strom</li> <li>– Allerdings lag insgesamt gesehen die Energieproduktion durch die Wasserkraft nur rund 0.8% unter dem Mittel der letzten 10 Jahre Andererseits wurde 2003 die höchste Nachfrage registriert, vor allem im Sommer (Kühlung)</li> </ul> |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | Δ      | ▲      | △    |
| Abnahme           | ▽      | ▼      | ▽    |
| keine Veränderung | ◇      | ◆      | ◇    |

Im Text:  
 [+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz             | Titel                                 | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |   |    |    |    |   |   |      |      | Kernaussagen |  |
|----------------------|---------------------------------------|----------------------------|-------------|--|----|---|----|----|----|---|---|------|------|--------------|--|
|                      |                                       |                            |             | N                                      | SN | T | NQ | MQ | HQ | S | G | StPa | StPw |              | StN  |
| IEA 2008             | World Energy Outlook 2008             | 2030<br>2050               |             |  |    |   |    |    |    |   |   |      |      | Δ            | <p>Δ Zentrale Energieherausforderung: Sichere und erschwingliche Versorgung und rasche Umstellung auf CO2-arme, leistungsfähige und umweltschonende Systeme, auch mit dem Ziel eine irreversible Schädigung des Klimasystems zu verhindern.</p> <p>2030:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Globale Zunahme des Primärenergieverbrauchs um 45% (grösstenteils wegen des Energiehungers von China und Indien)</li> <li>- EP+ der Wasserkraft, macht aber einen geringeren Anteil an der Gesamtenergieproduktion aus: Andere Energieträger verzeichnen ein stärkeres Wachstum und produzieren vermehrt Strom, wie z.B. Gas, Wind, Solar, Geothermie,...etc.</li> <li>- Es wird mit massiven Investitionen gerechnet, wobei die Hälfte für die Wahrung der gegenwärtigen Angebotskapazität aufgebracht werden muss (vor allem Erneuerung der Stromversorgungsinfrastrukturen kostet).</li> <li>- Die heute bekannten Ölreserven reichen bei gleichbleibendem Verbrauch bis 2050, diejenigen von Gas bis 2070. Der Förderrückgang beschleunigt sich jedoch erheblich.</li> </ul> |
| BFE 2007             | Die Energieperspektiven 2035 - Band 1 | 2035                       | Schweiz     | ▽                                      |    | Δ |    |    |    |   |   |      |      | ▽            | <p>Aus Sicht der Wasserkraft:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mit der Erneuerung von bestehenden Kraftwerken kann die künftigen Produktionseinbussen von 0.9 TWh bei der Umsetzung der minimalen Restwasserbestimmungen ausgeglichen werden. Nach 2035 sind jedoch höhere Restwassereinbussen möglich.</li> <li>- Bis 2035 wird mit einem Ausbau der Pumpspeicherwerke gerechnet, die rasch abrufbaren Spitzenstrom bereitstellen</li> <li>- Laufwasserkraft unterliegen grossen klimabedingten Schwankungen, die bis zu 5 TWh pro Jahr ausmachen</li> <li>- Die gesetzliche Regelung des Schwall und Sunks kann die Erträge sowie die betriebliche Flexibilität (Ausrichtung auf hochwertige Spitzenenergieproduktion) einschränken und die Gesteuerungskosten erhöhen</li> </ul>  |
| Kirchner et al. 2007 | Kälte- und Hitzewellen                | 2000-----2050              | Schweiz     |  |    |   |    |    |    |   |   |      |      | ▽            | <p>Δ Die Wasserkraft alleine ist in Extremsituationen (Hitze- und/oder Kältewellen inkl. Ausfall grösserer Anlagen) in der Lage, die Stromnachfrage zu decken. Doch je nach Szenario entstehen Engpässe bei der Zufriedenstellung der Grundlastnachfrage.</p>  |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▼      | ▼      | ▼    |
| keine Veränderung | ◊      | ◊      | ◊    |

Im Text:  
 [+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz   | Titel                | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |        |   |    |    |    |   |   |      |      | Kernaussagen |     |   |  |
|------------|----------------------|----------------------------|-------------|--|--------|---|----|----|----|---|---|------|------|--------------|-----|---|--|
|            |                      |                            |             | N                                      | SN     | T | NQ | MQ | HQ | S | G | StPa | StPw |              | StN |   |  |
| SCNAT 2007 | Denk-Schrift Energie | 2035<br>2050<br>2100       | Schweiz     | ▽▲                                     | ▲▲▲▲▲▲ |   |    |    |    |   |   |      |      |              | ▽   | ▲ | <p>Um die vom Menschen verursachte Klimaänderung zu stoppen, müssen die weltweiten Treibhausgasemissionen um 70% des heutigen Ausstosses (27 Mrd. t) auf 10 Mrd. t CO<sub>2</sub> reduziert werden. (1 t CO<sub>2</sub> ~ 400 l Erdöl ~ 500 W)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Wegen der grossen Trägheit sind Veränderungen am Klimasystem über viele Generationen hinweg irreversibel.</li> <li>– Sobald die weltweite konventionelle Erdölförderung den Peak Oil erreicht hat (erwartet um 2015-2035), ist ein erheblicher Preisanstieg bei den fossilen Brenn- und Treibstoffen zu erwarten.</li> <li>– Die Herausforderungen im Energie- und Klimabereich dulden keinen Aufschub der Entscheide mehr, weil viele Massnahmen nur im Zuge von Re-Investitionen kostengünstig durchgeführt werden können.</li> <li>– Die Schweiz hat momentan Emissionen von 6 t CO<sub>2</sub> pro Person und Jahr (inkl. Importe 10.7 t). Ziel wäre 1 t pro Person und Jahr.</li> <li>– Die Schweiz wird aufgrund ihrer geographischen Lage und Topographie mehr als andere europäische Länder von der Klimaänderung betroffen sein. Sie hat aber mit ihrer Forschungskapazität (Natur-, Ingenieur- und Sozialwissenschaft) ein hervorragendes Potenzial zum technologischen Vorreiter in ausgewählten Bereichen der erneuerbaren Energien und der effizienten Energiewandlung und Energienutzung sowie der Materialeffizienz und -substitution.</li> </ul> <p>2035</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– EN+ (4%), vermehrter Einsatz von Klima- und Kältegeräten</li> <li>– EP- (vor allem Laufkraftwerke wegen mangelnder oder extremer Wasserführung der Flüsse)</li> </ul> <p>2050</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Winter: Abnahme Heizenergiebedarf (-15% gegenüber 1984-2004)</li> <li>– Sommer: Zunahme Kühlbedarf (+150%)</li> <li>– EP+ (37.3 TWh; 2003: 34.3 TWh, Produktionssteigerung durch technologische Optimierungen)</li> </ul> <p>2100</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– T+, SN+, Hitzewellen+, Stürme+, HQ+, Gletscher-</li> <li>– Winter: N+, SN+, T+</li> <li>– Sommer: N-, SN+, T+, Dürren+, „2003-Sommer“ wird im Jahre 2100 ein "durchschnittlicher" Sommer sein</li> </ul> |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▽      | ▽      | ▽    |
| keine Veränderung | ◇      | ◇      | ◇    |

Im Text:  
 [+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz           | Titel                                    | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |   |    |    |    |   |   |      |      | Kernaussagen |     |  |   |
|--------------------|--|----------------------------|-------------|--|----|---|----|----|----|---|---|------|------|--------------|-----|--|---|
|                    |  |                            |             | N                                      | SN | T | NQ | MQ | HQ | S | G | StPa | StPw |              | StN |  |   |
| SATW 2007          | Energieressourcen: Zahlen und Fakten     |                            | Schweiz     |  |    |   |    |    |    |   |   |      |      |              | ◇   | Das Dokument gibt einen Überblick über die Grössenordnungen der für Entscheidungsträger wichtigen Angaben zu den Energieressourcen (Vorräte, Kosten, Emissionen, Potenziale usw.) in der Schweiz. Für die Wasserkraft wird folgendes festgehalten: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Potenzial: Zu einem grossen Teil ausgeschöpft (ausser im Bereich von Kleinkraftwerken oder Laufkraftwerken an Flüssen)</li> <li>– Risiken: Restwasser, Landschaftsschutz, Terroranschlag, Erdbeben</li> <li>– Versorgungssicherheit: langfristig eingeschränkt bei Trockenheit</li> <li>– Forschungsbedarf: Einfluss längerer Trockenperioden ohne Gletscher?</li> </ul> |   |
| UBS 2007           | Klimawandel: Ein heisses Thema.          |                            | Schweiz     |  |    |   |    |    |    |   |   |      |      |              | ◇   | Beinhaltet einen kurzen Überblick zur Klimaänderung. Anschliessend wird diskutiert, wie sich die Klimaänderung auf den Finanzmarkt auswirkt (Chancen und Risiken). <ul style="list-style-type: none"> <li>– Wirtschaft: Klimaänderung entgegenzutreten kostet, aber nichts zu machen könnte später noch viel mehr kosten</li> <li>– BIP kann bis zu 20% sinken bis gegen Ende dieses Jh.,</li> <li>– UBS geht davon aus, dass der Beitrag der Wasserkraft im kommenden Vierteljahrhundert weitgehend unverändert bleiben dürfte (global)</li> </ul>  |   |
| Axpo 2006          | Stromperspektiven 2020                   | 2020                       | Schweiz     |  |    |   |    |    |    |   |   |      |      | ▽            | ▽   | △  | – Steigender Stromverbrauch in der Schweiz (40-60 TWh bis 2050)<br>– Erste Versorgungslücken ab 2012 denkbar<br>– Erneuerbare Energien sind ausbaubar, aber auch limitiert bzgl. der Stromerzeugung. Diese Energieformen haben hohe Produktionskosten.  |
| Balmer et al. 2006 | Schweizer Wasserkraftwerke im Wettbewerb | 2000---2030                | Schweiz     |  |    |   |    |    |    |   |   |      |      | ▽            |     | △  | – Das in der Studie verwendete Strommarkt-Modell berechnet ab 2020 sowohl neue Gaskraftwerke als auch einen neuen Kernreaktor für die Deckung der Grundlast<br>– Gemäss Modell ist es für die Schweiz zunächst günstiger, ihre Stromexporte netto praktisch bis auf null zu reduzieren und erst dann, nach Abbau der Überkapazitäten, Konzessionen zu verlängern sowie Erneuerungs- und Ausbauprojekte zu realisieren<br>– Grenzkosten der Stromversorgung steigen im europäischen System kontinuierlich an und somit auch die zu erzielenden Preise (Sowohl für Grund- wie auch für die Spitzenlast)<br>– Im Vergleich mit den Nachbarländern sind in der Schweiz die Spitzenlastpreise ab dem Jahre 2010 am tiefsten<br>– Bemerkung: Studie berücksichtigt nicht die Änderung der klimatischen und hydrologischen Bedingungen |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | △      | ▲      | △    |
| Abnahme           | ▽      | ▼      | ▽    |
| keine Veränderung | ◇      | ◆      | ◇    |

Im Text:

[+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz                | Titel   | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum         | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |    |    |    |    |   |   |      |      | Kernaussagen |     |  |  |
|-------------------------|---|----------------------------|---------------------|--|----|----|----|----|----|---|---|------|------|--------------|-----|--|--|
|                         |   |                            |                     | N                                      | SN | T  | NQ | MQ | HQ | S | G | StPa | StPw |              | StN |  |  |
| Baur et al. 2006        | Potenzialanalyse Kleinwasserkraftwerke - Vorstudie zu Kraftwerken an Fließgewässern |                            | Schweiz, Thur, Töss |  |    |    |    |    |    |   |   |      |      |              |     |  | <p>Mit Hilfe einer Bottom-up und Top-down Analyse wurde eine genaue Abschätzung des vorhandenen technischen Potenzials für Kleinwasserkraftwerke (KWKW) für das Einzugsgebiet der Thur und Töss erstellt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Bottom-up: Mit Hilfe von kantonalen Wasserrechtsregistern und Sanierungsberichten Restwasser (Potenzial Töss: 470 kW)</li> <li>– Top-down: GIS-gestützten Potenzialanalyse (Potenzial Töss: 27000 kW, nicht erreichbar in der Praxis)</li> </ul> <p>Beide Ansätze liefern die gewünschte Abschätzung des Potenzials für KWKW in der Schweiz. Die Wahl der Methode hängt schlussendlich vom Hintergrund, den Anforderungen und dem Verwendungszweck der Potenzialschätzungen ab.</p> |
| Christenson et al. 2006 | Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland     | 1975-----2085              | Schweiz             |  |    |    |    |    |    |   |   |      | Δ▼   | Δ▼           |     |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>– 1975-2085: Abnahme der Heiztage von 13-87% (je nach Schwellenwert, Ortschaft, und Temperaturzunahme-Szenario), Zunahme der Kühltage (in Zürich Zunahme von bis zu 2100%!)</li> <li>– Lebensdauer eines Gebäudes in der Schweiz beträgt 50-100a; Deshalb soll beim Bau neuer Gebäude auch die Klimaänderung berücksichtigt werden.</li> </ul>  |
| Piot 2006a              | Einfluss der Klimaerwärmung auf das Energiesystem                                   | 2020-2049<br>2070-2099     | Schweiz             |  |    |    |    |    |    |   |   |      |      | ▼            | Δ   |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Stromproduktion: Resultate Hydrologie siehe Horton et al. 2005</li> <li>– Stromnachfrage: Bis 2035 Abnahme der Heizenergie um rund 35%, hingegen Mehrverbrauch von Strom für die Kühlung im Sommer.</li> </ul>  |
| Piot 2006b              | Elektrizität aus Wasserkraft  | 2050                       | Schweiz             |  |    |    |    |    |    |   |   |      |      |              |     |  | <p>Es bestehen noch Möglichkeiten, die Stromproduktion aus der Wasserkraft auszubauen (je nach Szenario mehr oder weniger). Jedoch werden in diesen Szenarien nicht die klimatischen und hydrologischen Rahmenbedingungen berücksichtigt.</p>  |
| VSE 2006                | Vorschau 2006 auf die Elektrizitätsversorgung der Schweiz im Zeitraum bis 2035/2050 | 2035<br>2050               | Schweiz             |  |    |    |    |    |    |   |   |      | ▼    | ▼            | Δ   |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Es wird mit einem weiteren ungebrochenen Anstieg der Stromnachfrage gerechnet.</li> <li>– Bewältigung der Nachfrage nur mit Kern- oder Gas-Kombi-Kraftwerken</li> <li>– Wasserkraft muss ebenfalls weiter ausgebaut werden, Potenzial reicht aber alleine nicht aus, um die steigende Nachfrage zu decken</li> </ul> <p>Speziell für die Wasserkraft gilt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Wasserkraft auch in Zukunft wichtig im europäischen Strommarkt als Regelenergie</li> <li>– Bis 2050 wird eine Reduktion der Elektrizitätsproduktion aus Wasserkraftanlagen aufgrund von Restwasservorschriften und Klimaänderungen von insgesamt 2.5 TWh prognostiziert</li> </ul>        |
| Frank 2005              | Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland | 2050-2100                  | Schweiz             |  |    | ▲▲ |    |    |    |   |   |      |      |              | Δ▼  |  | <p>Mit Hilfe eines Gebäudemodells wurde der Energieverbrauch bei einer künftigen Klimaerwärmung untersucht (2050-2100):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Winter: Abnahme des Heizenergieverbrauchs von 33-44%, Rückgang der Heiztage auf durchschnittlich 53 Tage</li> <li>– Sommer: Zunahme des Kühlenergieverbrauchs von 223-1050%</li> </ul>  |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▼      | ▼      | ▼    |
| keine Veränderung | ◊      | ◊      | ◊    |

Im Text:  
 [+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz           | Titel   | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum                | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |    |   |    |    |    |   |   |      |      | Kernaussagen |   |
|--------------------|---|----------------------------|----------------------------|--|----|---|----|----|----|---|---|------|------|--------------|---|
|                    |   |                            |                            | N                                      | SN | T | NQ | MQ | HQ | S | G | StPa | StPw |              | StN   |
| Hauenstein 2005    | Hydropower and climate change - A reciprocal relation: Institutional energy issues in Switzerland                                     | 2030-2055                  | Schweiz                    | ▲                                      |    |   |    |    |    | ▲ |   |      |      | ▽▲◇          | 1. Alpine Kraftwerke (1500-2500 m ü. M.):<br>– Eigentlich keine grossen Änderungen zu Heute, da mehr Winterniederschläge zu erwarten sind > Fraglich allerdings, ob die Winterniederschläge den Verlust der Gletscher ausgleichen können?<br>– Speicherseen haben eine wichtige Funktion bei der Hochwasserabminderung (Retention)<br><br>2. Laufkraftwerke (unter 500 m ü. M):<br>– grössere Stromproduktion im Winter und weniger im Sommer, da die Niederschläge im Winter nicht mehr als Schnee gespeichert werden, sondern direkt abflusswirksam werden<br>– eventuell Produktions-Engpass im Sommer, falls die Gletscher weg sind<br><br>Allgemein:<br>– Bedeutender als den Einfluss der Klimaänderung auf die Stromproduktion von Wasserkraftwerken wird die Veränderung in Politik und Gesellschaft auf die Wasserkraft sein |
| Horton et al. 2005 | Prediction of climate change impacts on Alpine discharge regimes under A2 and B2 SRES emission scenarios for two future time periods. | 2020-2049<br>2070-2099     | Schweiz, Alpen             |  |    |   |    |    | ▽  |   |   | △    | ▽    | ▽            | Untersuchte Einzugsgebiete: Drance de Bagnes, Saaser Vispa, Lonza, Rhône à Gletsch, Weisse Lütschine, Minster, Tamina, Vorderrhein, Dischmabach, Rosegbach, Verzasca  |
| Lehner et al. 2005 | The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis   | 2020-2029<br>2070-2079     | Europa                     |  |    |   |    |    |    |   |   |      | ▽    |              | Durch die Veränderung der Abflussregimes in vielen Gebieten Europas wird mit einer Abnahme des hydroelektrischen Potenzials gerechnet. In Süd- und Südosteuropa -25%.   |
| Piot 2005          | Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Wasserkraftproduktion in der Schweiz  | 2020-2049                  | Schweiz                    |  |    |   |    |    | ▽  |   |   |      | ▽    |              | Resultate: Siehe Horton et al. 2005   |
| Schäfli 2005       | Quantification of modelling uncertainties in climate change impact studies on water resources   | 2070-2099                  | Schweiz, Wallis, Mauvoisin |  |    |   |    |    | ▽  |   |   | ▽    | ▽    |              | Untersuchungsgebiet: Kraftwerk Mauvoisin, EZG: 169 km2, 1975-4314 m ü. M., Vergletscherungsgrad 40%<br><br>Es zeigte sich, dass die Unsicherheiten bei den Klimaberechnungen viel grösser sind als bei den anderen eingesetzten Modellen. Die Wahl der RCM ist genau so wichtig wie diejenige des GCM und des gewählten Emissionsszenario<br><br>– Abnahme der Stromproduktion durch die Wasserkraft um 36% wegen Regimeveränderung (von glazial zu nival) und Abnahme der mittleren Abflussmenge   |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | ▲      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▽      | ▽      | ▽    |
| keine Veränderung | ◇      | ◇      | ◇    |

Im Text:  
 [+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

| Referenz           | Titel   | Betrachteter Zeitabschnitt | Studienraum             | Aussagen zur Entwicklung der Parameter |       |   |    |    |    |   |   |      |      |     | Kernaussagen |   |  |  |
|--------------------|---|----------------------------|-------------------------|--|-------|---|----|----|----|---|---|------|------|-----|--------------|---|--|--|
|                    |   |                            |                         | N                                      | SN    | T | NQ | MQ | HQ | S | G | StPa | StPw | StN |              |   |  |  |
| BFE 2004           | Ausbaupotential der Wasserkraft   | 2050                       | Schweiz                 |  |       |   |    |    |    |   |   |      |      |     |              |   |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausbau bis 2035 im besten Fall um ~4.3 GWh, im schlechtesten Fall um ~0.7 GWh</li> <li>- Ab 2035 stetige Abnahme des Ausbaupotentials (Sanierung der ungenügend dotierten Restwasserstrecken bei den Konzessionserneuerungen)</li> <li>- Diese Studie berücksichtigt nicht die Folgen der Klimaänderung, sondern diskutiert die technischen und politischen Möglichkeiten eines Ausbaus der Wasserkraft.</li> </ul> |
| ProClim 2003       | Wasserkraft und Klimawandel in der Schweiz - Vision 2030  | 2030                       | Schweiz                 | ▽▲                                     | ▲▲▲▲▲ |   |    |    |    |   |   |      |      |     | ◇▲▽▽         |   |  | <p>Zur Klimaänderung betonten die Wasserkraftbetreiber, dass mit den zunehmenden Witterungsextremen ein höherer Unterhalt absehbar sei, doch sonst der Betrieb kurz- und mittelfristig nicht gross tangiert würde. Andere Experten waren hingegen der Meinung, das noch immer Forschungsbedarf bestehe (z. B. in den Bereichen „Wasserkraftwerke und Hochwasserschutz“ oder „Kopplung von Stromnachfrageprognosen und Klimaprognosen“)</p>                   |
| Arnell, Hulme 2000 | Implications of Climate Change for Large Dams and their Management  |                            | Global                  |  |       |   |    |    |    |   |   |      |      |     |              |   |  | <p>Wegen den Unsicherheiten bei Klimastudien muss die Wasserwirtschaft flexibler und anpassungsfähiger werden. Nur so kann sie auf verschiedenste Situationen rasch reagieren. Dies erreicht sie konkret, indem sie mehrere Szenarien bei der Planung und Bewirtschaftung von Stauwerken berücksichtigt. Dazu müssen aber noch geeignete Tools (z. B. Softwarelösungen) entwickelt werden.</p>   |
| Westaway 2000      | Modelling the potential effects of climate change on the Grande Dixence hydro-electricity scheme, Switzerland | 2031-2060                  | Schweiz, Grande Dixence | △                                      |       | △ |    | △  | △  |   |   |      |      |     | △            | △ |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Modellrechnung hat gezeigt, dass die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraft signifikant sind: Modellrechnungen erwarten einen höheren Input (Wassermenge) in den Lac des Dix und eine höhere Produktion um 26%, vor allem im Sommer</li> <li>- Hinweis: Einfaches Modell, welches auch die Bevölkerungsentwicklung berücksichtigt</li> </ul>  |

N = Niederschlag (Wert)  
 SN = Starkniederschläge (Häufigkeit)  
 T = Temperatur (Wert)

NQ = Niedrigwasser (Häufigkeit)  
 MQ = mittlerer Abfluss (Wert)  
 HQ = Hochwasser (Häufigkeit)  
 S = Anteil Wasser aus dem Schneespeicher  
 G = Anteil Wasser aus dem Gletscherspeicher

StPa = Stromproduktion allgemein  
 StPw = Stromproduktion aus Wasserkraft  
 StN = Stromnachfrage

|                   | Sommer | Winter | Jahr |
|-------------------|--------|--------|------|
| Zunahme           | △      | ▲      | ▲    |
| Abnahme           | ▽      | ▼      | ▽    |
| keine Veränderung | ◇      | ◆      | ◇    |

Im Text:  
 [+] Zunahme, [-] Abnahme, [=] keine Veränderung

### 3.4 Zusammenfassung

Die Aussagen über den Zusammenhang zwischen der Klimaänderung und der Wasserkraft und insbesondere über das Mass der Auswirkungen auf die Wasserkraftnutzung in den Alpen haben sich in den vergangenen Jahren kontinuierlich verändert, gekoppelt an die zum jeweiligen Zeitpunkt aktuellen Aussagen zur Klimaänderung:

Im Jahr **2000** wurde – in der damals gängigen Erwartung einer generellen Zunahme des Niederschlags in der Schweiz – als Folge der Klimaänderung noch von einer Zunahme des hydroelektrischen Potenzials ausgegangen. Für das Kraftwerk Grande Dixence, beispielsweise, wurde für den Zeitraum 2031 bis 2060 eine Zunahme der Produktion von +26% modelliert (Westaway 2000). Gestützt auf den 3. Bericht des IPCC aus dem Jahr 2001 wurde vom OcCC für den Alpenraum im Jahr **2002** für das 21. Jahrhundert noch immer eine Zunahme der Niederschläge vorhergesagt (mit tendenzieller Abnahme der Niederschläge im Sommer und einer Zunahme der Niederschläge im Winter sowie mit einer zunehmenden Schwankungen von Jahr zu Jahr) und bis 2050 nördlich der Alpen eine durchschnittliche Zunahme des jährlichen Abflusses um 10%, südlich der Alpen eine durchschnittliche Abnahme um 10% modelliert. Die stärksten Veränderungen der hydrologischen Verhältnisse wurden für alpine Einzugsgebiete in mittleren bis höheren Lagen vorausgesagt; Einzugsgebiete, in denen die Schnee- und Gletscherschmelze heute einen hohen Anteil am gesamten Abfluss ausmacht, und in denen sich durch die Klimaänderung sowohl die Form (mehr Regen, weniger Schnee) und der Zeitpunkt des Niederschlags (tendenzielle Zunahme im Winter, tendenzielle Abnahme im Sommer) massgeblich verändern werde.

Die Ansichten hinsichtlich der Folgen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung waren indes noch längere Zeit ziemlich geteilt. Anlässlich einer Tagung von ProClim im Jahr **2003** vertraten verschiedene Referenten die Meinung, dass in historischen Daten keine trendbestimmenden Auswirkungen durch die Klimaänderung auf den Betrieb von Wasserkraftwerken sichtbar seien und die Wasserkraft durch die Klimaänderung (mit Ausnahme des höheren Unterhalts durch die zunehmenden Witterungsextreme) kurz- bis mittelfristig nicht gross tangiert würde. In anderen Voten wurde entgegnet, dass – beispielsweise hinsichtlich der Koppelung von Stromnachfrageprognosen mit Klimaprognosen oder des Einsatzes von Speicherseen beim Hochwasserschutz – sehr wohl offene Fragen und ein Handlungsbedarf bestünde (ProClim 2003).

Im Jahr **2004** wurde auf der Basis einer neueren Generation von globalen und regionalen Klimamodellen aus dem EU-Projekt PRUDENCE (Christensen et al. 2002) für die Schweiz erstmals eine Niederschlagsabnahme ermittelt (Frei 2004). Darauf aufbauend wurde im Jahr **2005** eine Abnahme des mittleren Abflusses bis 2050 für die Alpen im Bereich von etwa 7% prognostiziert (Horton et al. 2005) und im Rahmen der „Energieperspektiven 2035“ des Bundesamts für Energie (BFE 2007) für die Schweiz ein entsprechend reduziertes mittleres hydroelektrisches Potenzial vorhergesagt. Wie drastisch die erwarteten Produktionseinbussen im Einzelfall vermutlich sein werden, zeigt das Beispiel Mauvoisin, für das im Jahr **2007** bis zum Zeitraum 2070 bis 2099 verglichen mit heute eine um 36% tiefere Produktion prognostiziert wird (Schäfli et al. 2007).

All diese Aussagen zur erwarteten Abnahme des Niederschlags und des hydroelektrischen Potenzials werden auch durch den unlängst publizierten Bericht des OcCC **2007** gestützt: „Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird auf der Alpennordseite im Winter eine Zunahme [Zunahme des Niederschlags; Anm. d. Autoren] von ungefähr 8% (Alpensüdseite 11%) erwartet, im Sommer eine Abnahme von rund 17% (Alpensüdseite 19%). (...) Die Verdunstung wird als Folge der Erwärmung generell weiter zunehmen. Wegen der Verminderung des Niederschlagvolumens und der Zunahme der Verdunstung wird das jährliche Abflussvolumen abnehmen, besonders im Süden, aber auch im Norden. Dies trotz des vorübergehenden Zuschusses von Schmelzwasser aus den abschmelzenden Gletschern.“

Inzwischen kommen demnach mehrere Studien übereinstimmend zum Schluss, dass die Klimaänderung massgebliche Auswirkungen auf die Stromproduktion in der Schweiz haben wird: einerseits müssen die Wasserkraftwerke mit einem signifikant reduzierten Wasserdargebot und die Atomkraftwerke mit einer (infolge der mit höheren Wassertemperaturen einhergehenden) Abnahme der Kühlleistung von Gewässern und entsprechenden Produktionseinschränkungen rechnen (OcCC 2007). Für die Wasserkraft werden die stärksten Veränderungen der hydrologischen Verhältnisse für alpine Einzugsgebieten in mittleren bis höheren Lagen vorausgesagt; Einzugsgebiete in denen die Schnee- und Gletscherschmelze heute einen hohen Anteil am gesamten Abfluss ausmacht. Weil sich durch die Klimaänderung sowohl die Form (tendenziell mehr Regen und weniger Schnee) als auch der Zeitpunkt des Niederschlags (tendenzielle Zunahme im Winter, tendenzielle Abnahme im Sommer) massgeblich verändern dürfte, wird von einem jahreszeitlichen Ausgleich der Abflussregime ausgegangen. Obwohl mit einer ausgeglicheneren Abflussganglinie möglicherweise mehr Flexibilität für die Kraftwerksbetreiber verbunden sein wird, muss sowohl bei Speicher- als auch bei Laufkraftwerken langfristig mit Produktionseinbussen gerechnet werden (OcCC 2007, BAFU, BFE 2007).

## 4. Schlussbemerkungen und Feststellungen

Neben den bereits erwähnten inhaltlichen Aussagen, können aufgrund der Literaturrecherche folgende Schlussbemerkungen und Feststellungen gemacht werden:

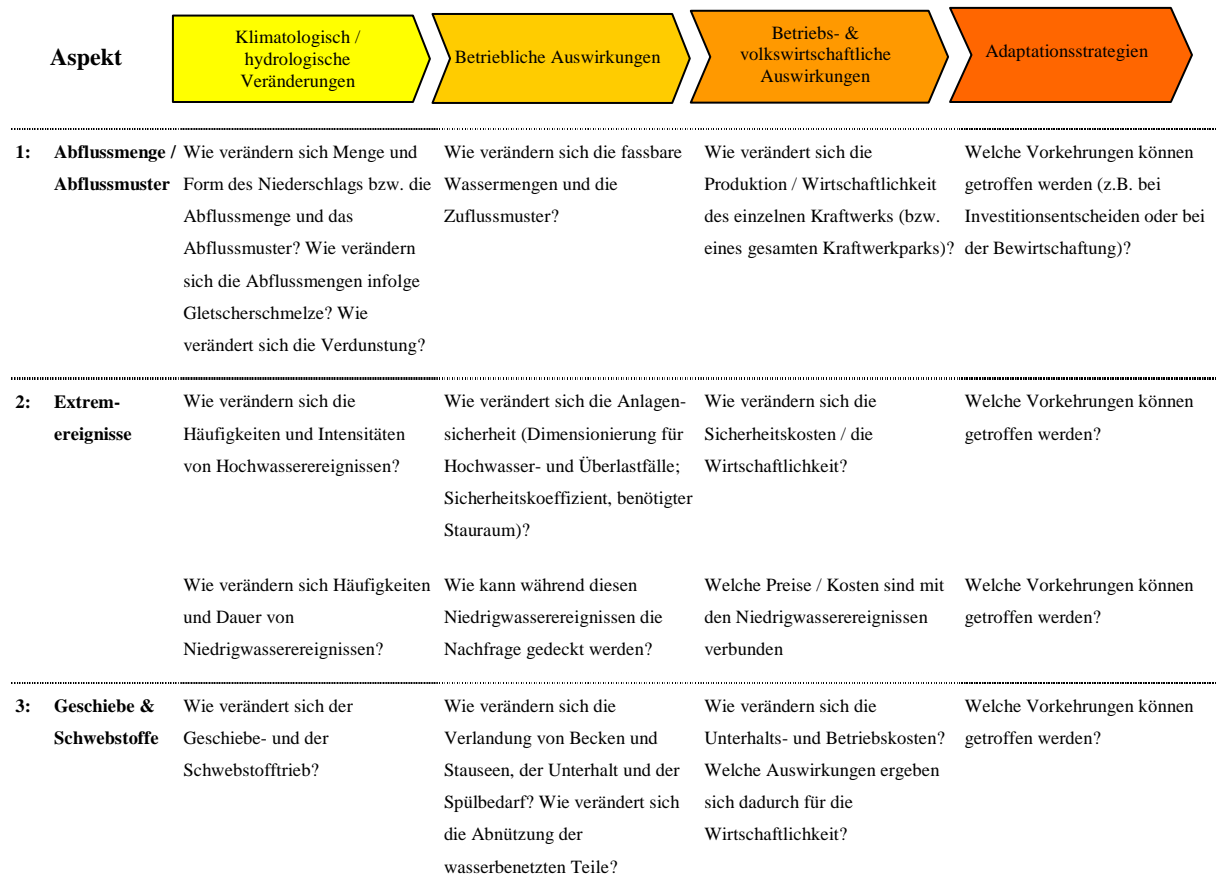
1. Die überwiegende Mehrzahl der bisherigen Studien behandeln die einzelne Aspekte der komplexen Systemkette Klimaänderung und Wasserkraft isoliert. Studien, welche die gesamte Systemkette ganzheitlich, also gleichzeitig sowohl klimatologische, hydrologische als auch kraftwerksbetriebliche Aspekte abdecken, sind rar. Insbesondere gibt es in der Schweiz bisher keine Studie, in welcher für verschiedene repräsentative Kraftwerke klimatologische, hydrologische und kraftwerksbetriebliche Modelle gekoppelt und die Folgen der Klimaänderung für verschiedene Regionen mit einheitlicher Methodik angegangen werden.
2. Die bisherigen Aussagen zu den für die Wasserkraft relevanten hydrologischen Parametern beschränken sich zumeist auf Mittelwerte auf einer groben räumlichen und zeitlichen Skala (Meso- bis Makroskala). Quantifizierte Aussagen zu Produktionsveränderungen liegen bisher nur vereinzelt vor und beschränken sich zumeist auf ein einzelnes Kraftwerk. Die Aussagen gelten demnach primär für das jeweilige Einzugsgebiet. Die Aussagekraft von Hochrechnungen für die Schweiz sind entsprechend limitiert und die bisherigen Ergebnisse für den einzelnen Wasserkraftbetreiber nicht sonderlich praxistauglich.
3. Extremereignisse (z. B. Starkniederschläge, lang anhaltende Hitze- oder Kältewellen, Trockenperioden, etc.) wurden bisher wenn überhaupt, beinahe ausschliesslich retrospektiv, aus der Sicht bereits abgelaufener Ereignisse analysiert wurden. Aussagen über die Häufigkeit und Intensität von solchen Ereignissen in der Zukunft und insbesondere über die Auswirkungen von solchen Ereignissen auf die Stromproduktion bzw. -nachfrage fehlen weitgehend.
4. Bemerkenswert ist, dass nur eine kleine Minderheit der Studien auf die in Zukunft möglicherweise akzentuierten Nutzungs- bzw. Interessenkonflikte unter den verschiedenen Akteuren (z. B. Landwirtschaft, Industrie, Wasserkraft, Trinkwasserversorgung, ... etc.) eingeht. Offen ist beispielsweise die gesellschaftliche Frage, wie das Wasser während länger anhaltenden Trockenperioden unter konkurrierenden Nutzungsformen aufgeteilt wird und wie viel Wasser der Wasserkraft im Konfliktfall letztlich zur Stromproduktion zur Verfügung steht.
5. Genauere Informationen über die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraft und über die zur Verfügung stehenden Wassermenge wären für die Kraftwerksbetreiber aus verschiedenen Gründen wertvoll: Einerseits steht bei verschiedenen Kraftwerken eine Neukonzessionierung an. In diesen konkreten Einzelfällen erfordern die fundierte Berechnung von fassbaren Wassermenge, die seriöse Auslegung der Anlagen auf Hochwasser- bzw. Überlastfälle und letztlich auch die Wirtschaftlichkeitsberechnung (als Basis für Zukunfts- und Investitionsentscheide) zeitlich und räumlich höher aufgelöste Prognosen der hydrologischen Parameter sowie quantifizierte Angaben zur Häufigkeit von Hoch- und von Niedrigwasserereignissen. Andererseits bedingt die Abschätzung der schweizweiten Folgen der Klimaänderung für die Wasserkraft eine fundierte Hochrechnung von (an typischen für die geographischen und kraftwerksbetrieblich repräsentativen Kraftwerken fundiert ermittelten) Produktionseinbussen über den gesamten Kraftwerkspark.
6. Verschiedene Länder haben zur Beantwortung derartiger Fragen gross angelegte Projekte bzw. Programme initiiert (in Österreich: Programm „Hydklima“, vgl. Nachtnebel, Fuchs 2001, in

Deutschland: Programm „KLIWA“, vgl. Katzenberger, Weber 2007, in Skandinavien: Programme „Climate Change and Energy Production CCEP“, „Climate, Water and Energy CWE“ und „Nordic Project on Climate and Energy CE“, vgl. Sælthun et al. 1998 und Bergström et al. 2007 und aktuell „Nordic Project on Climate and Energy CE“ in den Jahren 2003 bis 2006). Diese Projekte und Programme sind sowohl inhaltlich als auch methodisch im Hinblick auf die Hauptstudie sehr wertvoll.

7. Bei der Modellierung des globalen und regionalen Klimas sind in der jüngsten Vergangenheit grosse Fortschritte erzielt worden. Sehr wertvoll ist, dass bestehende Unsicherheiten im physikalischen Verständnis durch eine Kombination von verschiedenen globalen und regionalen Klimamodellen abgeschätzt werden können und inzwischen Aussagen zur Wahrscheinlichkeit von Klimaprognosen möglich sind (sog. „Multi-Model-Approach“; vgl. Christensen et al. 2002). Mit der Verfügbarkeit von weiteren Modellresultaten aus einem laufenden EU-Forschungsprojekt (ENSEMBLES 2007) wird die Methodik und die Datengrundlage für die Szenarien-Berechnungen noch weiter verbessert. Diese wertvollen, international anerkannten und konsistenten Vorarbeiten könnten in einem nächsten Schritt zur Beantwortung von spezifischen Fragen der Wasserkraft in der Schweiz angewendet und mittels Downscaling-Verfahren auf die interessierenden Regionen herunter gebrochen werden.

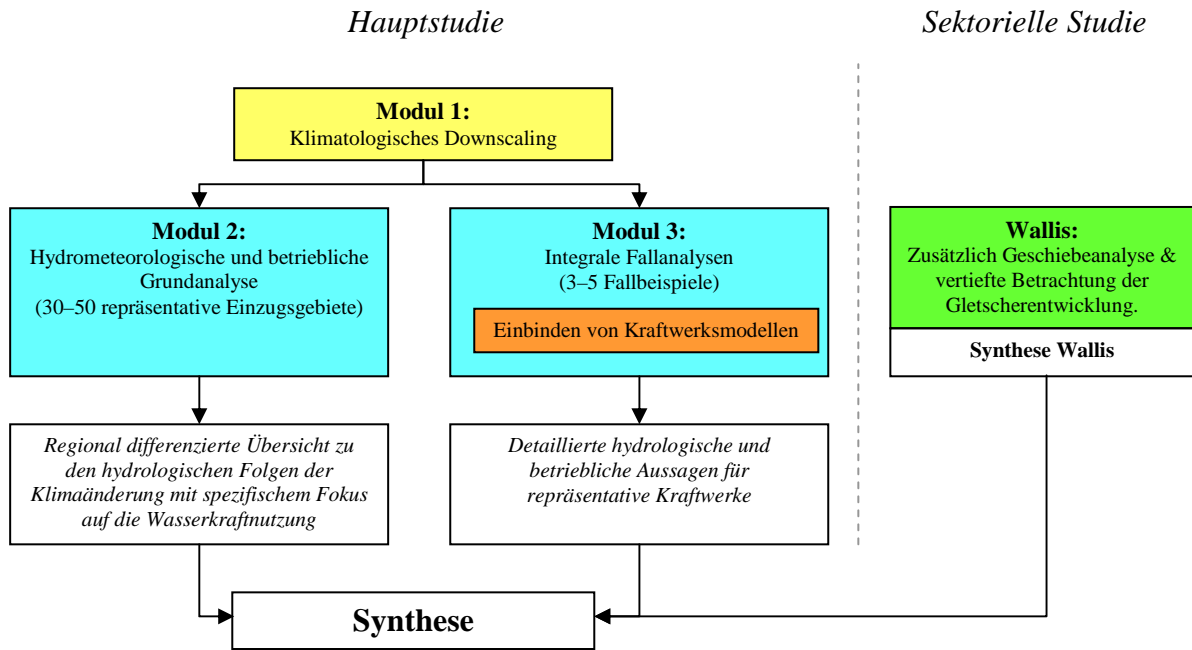
## 5. Ausblick

Auf der Basis des vorliegenden Schlussberichts der Vorstudie wurden im Gespräch mit verschiedensten Vertretern der Wasserkraftbranche relevante offene Fragen über den Zusammenhang zwischen der Klimaänderung und der Wasserkraftnutzung zusammengetragen (Abbildung 2).



**Abbildung 2: Relevante Fragestellungen zu verschiedenen Aspekten innerhalb des Themenbereichs Klimaänderung und Wasserkraftnutzung.**

Diese Fragestellungen werden nun seit 2008 in einem gemeinsamen Projekt, an dem verschiedene Forschungsinstitute beteiligt sind, bearbeitet. Dabei lassen sich verschiedene, sich ergänzende Themenschwerpunkte erkennen (Abbildung 3).



**Abbildung 3: Module der Hauptstudie des Projektes Klimaänderung und Wasserkraftnutzung und Themenschwerpunkte; Zusammenhang zur sektoriellen Studie.**

In Modul 1 werden die Klimaszenarien für die Perioden 2020–2050 und 2070–2100 in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung aufbereitet. Dazu werden vom Institut für Atmosphäre und Klima an der ETH Zürich (IAC) die Ergebnisse verschiedener grossskaliger Klimamodelle auf ausgewählte Regionen der Schweiz heruntergebrochen (downscaling). Diese Informationen werden anschliessend in der hydrologischen Modellierung (Module 2 und 3) dazu verwendet, um für repräsentative Einzugsgebiete der Schweiz Aussagen zu möglichen Veränderungen im Abflussverhalten auf Tagesbasis machen zu können. Zusätzlich wird in Modul 2 auch der Zeitraum seit 1900 retrospektiv analysiert. Diese Analyse bildet den Schlüssel zum Verständnis der heutigen Situation und zur Einordnung der zukünftigen Entwicklungen. Das Modul 2, das in der Gruppe für Hydrologie am Geographischen Institut der Universität Bern angesiedelt ist, deckt somit den Zeitraum 1900 bis 2050 ab. Im Rahmen des Moduls 3, das gemeinsam von der Gruppe für Hydrologie und Partnern der Elektrizitätswirtschaft ausgeführt wird, sollen die Auswirkungen der Klimaänderung auf den operationellen Betrieb von Wasserkraftanlagen studiert werden. Dazu ist vorgesehen, das klimatische Downscaling (Modul 1) mit einem räumlich-zeitlich hoch aufgelösten hydrologischen Modell und dieses wiederum mit dem Betriebsmodell eines Wasserkraftwerkes bzw. eines Wasserkraftwerksparks zu koppeln. Die Hauptstudie wird von Swisselectric Research und dem Bundesamt für Energie finanziert.

Die Hauptstudie wird durch eine im November 2008 begonnene regionale Studie ergänzt. Diese legt den Fokus auf die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung im Kanton Wallis. Hier steht vor allem die Frage der Bedeutung der Gletscherentwicklung für das Abflussverhalten und die Wasserkraftproduktion im Vordergrund. Zusätzlich soll auch die Rolle des (veränderten) Geschiebehaushaltes betrachtet werden. Diese Studie steht unter der Leitung der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL in Birmensdorf. Partner sind das Geographische Institut der Universität Zürich und die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW an der ETH Zürich. Diese sektorielle Studie wird vom Kanton Wallis finanziert.

Der aktuelle Zeitplan für das gesamte Projekt geht von einer dreijährigen Laufzeit bis Ende 2010 aus. Zu diesem Zeitpunkt sollen die Ergebnisse der einzelnen Studien vorliegen und in einer Gesamtsynthese zusammengefasst werden.

## 6. Literaturverzeichnis

- Alpine Convention (2008): Report on the State of the Alps. Waterbalance in the Alps. Draft version. Permanent Secretariat of the Alpine Convention. Innsbruck.
- Arnell, N. W.; Hulme, M. (2000): Implications of Climate Change for Large Dams and their Management. Thematic Review II.2 prepared as an input to the World Commission on Dams. World Commission on Dams. Cape Town. Online verfügbar unter <http://www.dams.org>, zuletzt geprüft am 28.02.2007.
- Axpo (2006): Stromperspektiven 2020. Axpo. Zürich. Online verfügbar unter <http://www.axpo.ch>, zuletzt geprüft am 15.03.2007.
- Bader, S.; Bantle, H. (2004): Das Schweizer Klima im Trend. Temperatur- und Niederschlagsentwicklung 1864-2001. MeteoSchweiz. Zürich.
- BAFU; BFE (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse). Bern.
- Balmer, Markus; Möst, Dominik; Spreng, Daniel (2006): Schweizer Wasserkraftwerke im Wettbewerb. Eine Analyse im Rahmen des europäischen Elektrizitätsversorgungssystems. Zürich: vdf Hochschulverlag.
- Bartels, H.; Hofius, K.; Katzenberger, P.; Krahe, P.; Weber, H. (2004a): Klima und Wasserwirtschaft. In: *Promet*, Jg. 30, H. 4, S. 168–180.
- Bartels, H.; Katzenberger, P.; Weber, H. (2004b): Klimaveränderung und Wasserwirtschaft in Süddeutschland. In: *Wasserwirtschaft*, Jg. 94, H. 4, S. 15–19.
- Baur, M.; Dettli, R.; Weingartner, Rolf; Viviroli, Daniel; Imhof, P.; Fässler, M.; Gerhardinger, Hubert (2006): Potenzialanalyse Kleinwasserkraftwerke - Vorstudie zu Kraftwerken an Fließgewässern. Programm Kleinwasserkraft. Herausgegeben von Bundesamt für Energie. Bern.
- Begert, Michael; Schlegel, Thomas; Kirchofer, W. (2005): Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY*, Jg. 25, H. 1, S. 65–80. Online verfügbar unter doi:10.1002/joc.1118.
- Beniston, Martin (2004): *Climatic change and its impacts. An overview focusing on Switzerland*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Beniston, Martin (2005): Mountain climates and climatic change: An overview of processes focusing on the European Alps. In: *PURE AND APPLIED GEOPHYSICS*, Jg. 162, H. 8-9, S. 1587–1606. Online verfügbar unter DOI:10.1007/s00024-005-2684-9.
- Beniston, Martin; Stephenson, B. David; Christensen, Ole Bøssing; Ferro, A.T. Christopher; Frei, Christoph; Goyette, Stéphane et al. (2007): Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. In: *CLIMATIC CHANGE*, Jg. 81, S. 71–95. Online verfügbar unter DOI:10.1007/s10584-006-9226-z.
- Bergström, Sten; Jóhannesson, T.; Aðalgeirsdóttir, G.; Ahlstrøm, A.; Andreassen, L. M.; Andréasson, J. et al. (2007): Impacts of climate change on river runoff, glaciers and hydropower in the Nordic area. Joint final report from the CE Hydrological Models and Snow and Ice Groups. REYKJAVÍK.

- BFE (2004): Ausbaupotential der Wasserkraft. Unter Mitarbeit von F. Laufer, S. Grötzinger und M. Peter et al. Herausgegeben von Bundesamt für Energie. Electrowatt-Ekono. Bern.
- BFE (2007): Die Energieperspektiven 2035 - Band 1. Synthese. Herausgegeben von Bundesamt für Energie. Bern.
- BFE (2008): Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2007. Bundesamt für Energie. Bern.
- Birsan, Marius-Victor; Molnar, Peter; Burlando, Paolo; Pfandner, Martin (2005): Streamflow trends in Switzerland. In: JOURNAL OF HYDROLOGY, Jg. 314, H. 1-4, S. 312–329. Online verfügbar unter doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.008.
- Birsan, Marius-Victor; Molnar, Peter; Pfandner, Martin; Burlando, Paolo (2004): Trends in schweizerischen Abflussmessreihen. In: WASSER ENERGIE LUFT, Jg. 96, H. 1/2, S. 29–38.
- Böhm, R.; Auer, Ingeborg; Brunetti, Michele; Maugeri, Maurizio; Nanni, Teresa; Schöner, Wolfgang (2001): Regional temperature variability in the European Alps: 1760-1998 from homogenized instrumental time series. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY, Jg. 21, H. 14, S. 1779–1801. Online verfügbar unter DOI:10.1002/joc.689.
- Braun, L. N. (Hg.) (2002): Das Wasser der Alpen: Hydrologische Empfindlichkeit der Alpenregion gegenüber einer Klimaveränderung.
- Braun, L. N.; Weber, M.; Schulz, M. (2000): Consequences of climate change for runoff from Alpine regions. In: ANNALS OF GLACIOLOGY, Jg. 31, S. 19–25.
- Bronstert, A.; Kolokotronis, V.; Schwandt, D.; Straub, H. (2006): Vergleich und hydrologische Wertung regionaler Klimaszenarien für Süddeutschland. In: Hydrologie und Wasserwirtschaft, Jg. 50, H. 6, S. 270–287.
- BWG (2005): Hydrologie der Schweiz. Ausgewählte Aspekte und Resultate. Unter Mitarbeit von Manfred Spreafico und Rolf Weingartner. BWG. Bern.
- Casty, C.; Wanner, Heinz; Luterbacher, Jürg; Esper, J.; Böhm, Reinhard (2005): Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY, Jg. 25, H. 14, S. 1855–1880. Online verfügbar unter DOI:10.1002/joc.1216.
- Christensen, J. H.; Carter, T. R.; Giorgi, F. (2002): PRUDENCE employs new methods to assess European Climate Change. In: EOS Transactions American Geophysical Union, Jg. 82, H. 13, S. 147. Online verfügbar unter doi:10.1029/2002EO000094.
- Christensen, J. H.; Christensen, O. B. (2003): Severe summertime flooding in Europe. In: NATURE, Jg. 421, H. 6925, S. 805–806. Online verfügbar unter doi:10.1038/421805a.
- Christenson, M.; Manz, H.; Gyalistras, D. (2006): Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland. In: ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT, Jg. 47, H. 6, S. 671–686. Online verfügbar unter doi:10.1016/j.enconman.2005.06.009.
- Collins, David N. (2007): Climatic variation, glacier recession and runoff from Alpine basins. In: Heinonen, M. (Hg.): Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water, S. 103–108.
- Collins, David N. (2008): Climatic warming, glacier recession and runoff from Alpine basins after the Little Ice Age maximum. In: ANNALS OF GLACIOLOGY, Jg. 48, H. 1, S. 119–124.
- Etchevers, P.; Golaz, C.; Habets, F.; Noilhan, J. (2002): Impact of a climate change on the Rhone river catchment hydrology. In: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERES, Jg. 107, H. D16. Online verfügbar unter DOI:10.1029/2001JD000490.

- Frank, T. (2005): Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland. In: ENERGY AND BUILDINGS, Jg. 37, H. 11, S. 1175–1185. Online verfügbar unter doi:10.1016/j.enbuild.2005.06.019.
- Frauenfelder, Regula; Zemp, Michael; Haeberli, Wilfried; Hoelzle, Martin (2005): Worldwide Glacier Mass Balance Measurements: trends and first results of an extraordinary year in Central Europe. In: Ice and Climate News, H. 6, S. 9–10.
- Frei, Christoph (2004): Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion. Zürich.
- Frei, Christoph; Schär, Christoph (2001): Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. In: JOURNAL OF CLIMATE, Jg. 14, H. 7, S. 1568–1584. Online verfügbar unter doi:10.1175/1520-0442(2001)014<1568:DPOTIR>2.0.CO;2.
- Frei, Christoph; Schöll, Regula; Fukutome, Sophie; Schmidli, Jürg; Vidale, Pier Luigi (2006): Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. In: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERES, Jg. 111, H. D6, S. -. Online verfügbar unter doi:10.1029/2005JD005965.
- Gasser, D.; Hauser, L.; Quirici, R.; Preuschoff, P.; Schläpfer, M.; Wegmann, R. et al. (2003): Einfluss von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Abfluss der Thur. In: WASSER ENERGIE LUFT, Jg. 95, H. 11/12, S. 337–343.
- Hauenstein, Walter (2005): Hydropower and climate change - A reciprocal relation: Institutional energy issues in Switzerland. In: MOUNTAIN RESEARCH AND DEVELOPMENT, Jg. 25, H. 4, S. 321–325.
- Heimann, D.; Sept, V. (2000): Climate change estimates of summer temperature and precipitation in the Alpine region. In: THEORETICAL AND APPLIED CLIMATOLOGY, Jg. 66, H. 1-2, S. 1–12. Online verfügbar unter DOI:10.1007/s007040070029.
- Hisdal, H.; Stahl, K.; Tallaksen, L. M.; Demuth, S. (2001): Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY, Jg. 21, H. 3, S. 317–+. Online verfügbar unter DOI:10.1002/joc.619.
- Horton, Pascal; Schäfli, Bettina; Mezghani, A.; Hingray, B.; Musy, A. (2005): Prediction of climate change impacts on Alpine discharge regimes under A2 and B2 SRES emission scenarios for two future time periods. Bundesamt für Energie.
- Horton, Pascal; Schäfli, Bettina; Mezghani, A.; Hingray, B.; Musy, A. (2006): Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty. In: HYDROLOGICAL PROCESSES, Jg. 20, H. 10, S. 2091–2109. Online verfügbar unter DOI:10.1002/hyp.6197.
- Huss, Matthias; Bauder, Andreas; Funk, Martin; Hock, R. (2008a): Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. In: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-EARTH SURFACE, Jg. 113, H. F1, S. -. Online verfügbar unter doi:10.1029/2007JF000803.
- Huss, Matthias; Farinotti, Daniel; Bauder, Andreas; Funk, Martin (2008b): Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. In: HYDROLOGICAL PROCESSES, S. 1–14.
- IEA (2008): World Energy Outlook 2008. Executive summary. Herausgegeben von International Energy Agency IEA.
- Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes KHR (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert. Analyse, Veränderungen, Trends. Unter Mitarbeit von Jörg Uwe

- Belz, Gerhard Brahmer und Hendrik Buiteveld et al. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes KHR. Lelystad. (Bericht der KHR, I-22).
- IPCC (2007): Klimaänderung 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Bern/Wien/Berlin.
- Jasper, K.; Calanca, P.; Gyalistras, D.; Fuhrer, J. (2004): Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basins. In: CLIMATE RESEARCH, Jg. 26, H. 2, S. 113–129.
- Jungo, P.; Beniston, Martin (2001): Changes in the anomalies of extreme temperature anomalies in the 20th century at Swiss climatological stations located at different latitudes and altitudes. In: THEORETICAL AND APPLIED CLIMATOLOGY, Jg. 69, H. 1-2, S. 1–12. Online verfügbar unter DOI:10.1007/s007040170031.
- Katzenberger, B.; Weber, H. (2007): KLIWA. Online verfügbar unter <http://www.kliwa.de>, zuletzt geprüft am 11.12.2006.
- Kirchner, Almut; Piot, Michel; Rits, Vincent (2007): Kälte- und Hitzewellen. Energieperspektiven 2035 - Exkurs Nr. 18. Bundesamt für Energie. Bern.
- Kleinn, Jan; Frei, Christoph; Gurtz, Joachim; Luthi, D.; Vidale, P. L.; Schär, Christoph (2005): Hydrologic simulations in the Rhine basin driven by a regional climate model. In: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERES, Jg. 110, H. D4, S. -. Online verfügbar unter doi:10.1029/2004JD005143.
- KLIWA (Hg.) (2006): Ergebnisse vom KLIWA-Symposium vom 25./26.10.2006 in Stuttgart.
- KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. In: WASSER ENERGIE LUFT, Jg. 99, H. 1, S. 55–60.
- Latenser, M.; Schneebeli, M. (2003): Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931-99). In: INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY, Jg. 23, H. 7, S. 733–750. Online verfügbar unter doi:10.1002/joc.912.
- Lehner, B.; Czisch, G.; Vassolo, S. (2005): The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis. In: ENERGY POLICY, Jg. 33, H. 7, S. 839–855. Online verfügbar unter doi:10.1016/j.enpol.2003.10.018.
- Luterbacher, Jürg; Dietrich, D.; Xoplaki, E.; Grosjean, Martin; Wanner, Heinz (2004): European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. In: SCIENCE, Jg. 303, H. 5663, S. 1499–1503. Online verfügbar unter DOI:10.1126/science.1093877.
- Middelkoop, H.; Daamen, K.; Gellens, D.; Grabs, W.; Kwadijk, J. C. J.; Lang, H. et al. (2001): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. In: CLIMATIC CHANGE, Jg. 49, H. 1-2, S. 105–128. Online verfügbar unter DOI:10.1023/A:1010784727448.
- Nachtnebel, H.-P.; Fuchs, Martin (2001): Die Hydrologie Österreichs unter dem Einfluß von Szenarien einer möglichen Klimaänderung (Hydklima). Wien.
- Naef, Felix (2007): Extreme Hochwasser verstehen - Beispiele aus der Schweiz. In: Gutknecht, Dieter (Hg.): Wiener Mitteilungen. Extreme Abflussereignisse: Dokumentation - Bedeutung - Bestimmungsmethoden (206), Bd. 206, S. 59–68.
- OcCC (2000): Trockenheit in der Schweiz. Herausgegeben von Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung OcCC. Bern.
- OcCC (2002): Das Klima ändert - auch in der Schweiz. Die wichtigsten Ereignisse des dritten Wissensstandsberichts des IPCC aus der Sicht der Schweiz. Unter Mitarbeit von Christian Albrecht, P. Baccini

und A. Baranzini et al. Herausgegeben von Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung und Intergovernmental Panel on Climate Change (OcCC). Bern.

OcCC (2003): Extremereignisse und Klimaänderung. Herausgegeben von Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung OcCC. Bern.

OcCC (2005): Hitzesommer 2003. Herausgegeben von Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung OcCC. Bern.

OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung OcCC (Bern). Bern.

OcCC (Hg.) (2008): Das Klima ändert - was nun. Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. Bern: OcCC.

Paul, Frank; Maisch, Max; Rothenbuhler, C.; Hoelzle, Martin; Haeberli, Wilfried (2007): Calculation and visualisation of future glacier extent in the Swiss Alps by means of hypsographic modelling. In: GLOBAL AND PLANETARY CHANGE, Jg. 55, H. 4, S. 343–357. Online verfügbar unter doi:10.1016/j.gloplacha.2006.08.003.

Pfaundler, Martin; Wüthrich, Thomas (2006): Saisonalität hydrologischer Extreme. Das zeitliche Auftreten von Hoch- und Niederwasser in der Schweiz. In: WASSER ENERGIE LUFT, Jg. 98, H. 2, S. 77–82.

Pfister, Christian; Weingartner, Rolf; Luterbacher, Jürg (2006): Hydrological winter droughts over the last 450 years in the Upper Rhine basin: a methodological approach. In: HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL-JOURNAL DES SCIENCES HYDROLOGIQUES, Jg. 51, H. 5, S. 966–985.

Piot, Michel (2005): Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Wasserkraftproduktion in der Schweiz. In: WASSER ENERGIE LUFT, Jg. 97, H. 11/12, S. 365–367.

Piot, Michel (2006a): Einfluss der Klimaerwärmung auf das Energiesystem. Energieperspektiven 2035 - Exkurs Nr. 3. Bundesamt für Energie. Bern.

Piot, Michel (2006b): Elektrizität aus Wasserkraft. Energieperspektiven 2035 - Exkurs Nr. 10. Bundesamt für Energie. Bern.

ProClim (Hg.) (2003): Wasserkraft und Klimawandel in der Schweiz - Vision 2030. Climate Talk – Dialog zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. Tagung vom Februar 2003. Bern.

Rebetez, M.; Mayer, H.; Dupont, O.; Schindler, D.; Gartner, K.; Kropp, J. P.; Menzel, A. (2006): Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. In: ANNALS OF FOREST SCIENCE, Jg. 63, H. 6, S. 569–577. Online verfügbar unter DOI:10.1051/forest:2006043.

Rimmer, Chris (2006): The changing climate of Swiss hydroelectric power production. An analysis of Haut Glacier d'Arolla meltwater discharge characteristics. Cambridge. University of Cambridge, Department of Geography.

Sælthun, Nils Roar; Aittoniemi, P.; Bergström, Sten; Einarsson, K.; Jóhannesson, T.; Lindström, G. et al. (1998): Climate change impacts on runoff and hydropower in the Nordic countries. Final report from the project "Climate Change and Energy Production". Nordic Council of Ministers.

Santschi, Delia; Weingartner, Rolf; Peter, Armin (2003): Haben die Winterhochwasser in schweizerischen Fliessgewässern zugenommen. Beitrag zum Projekt „Netzwerk Fischrückgang Schweiz“. In: Fischnetz-info, H. 11, S. 8–10.

- SATW: Energieressourcen: Zahlen und Fakten. Nutzung, Potentiale und Risiken verschiedener Energieressourcen in der Schweiz. Pressemitteilung vom 2007. Online verfügbar unter <http://www.satw.ch>, zuletzt geprüft am 05.03.2007.
- Schädler, Bruno (2002): Auswirkungen der Klimaveränderung auf alpine Gewässersysteme. In: EAWAG news, H. 55, S. 24–26.
- Schädler, Bruno (2007): Klimaänderung und Wasser in der Schweiz. Erwartete Auswirkungen für die Wasserwirtschaft bis 2050. In: Gas, Wasser, Abwasser, H. 9, S. 663–669.
- Schädler, Bruno (2008): Geht uns das Wasser aus. In: Gas, Wasser, Abwasser, H. 10, S. 763–769.
- Schäfli, Bettina (2005): Quantification of modelling uncertainties in climate change impact studies on water resources. Application to a glacier-fed hydropower production system in the Swiss Alps. Dissertation. Betreut von A. Musy. Lausanne. EPFL Lausanne.
- Schäfli, Bettina; Hingray, B.; Musy, A. (2007): Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and related modelling uncertainties. In: HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES, H. 11, S. 1191–1205.
- Schäfli, Bettina; Horton, Pascal; Hingray, B.; Mezghani, A.; Musy, A. (2005): Impacts potentiels d'un changement climatique sur les régimes hydrologiques alpins. In: WASSER ENERGIE LUFT, Jg. 97, H. 11/12, S. 346–351.
- Schär, Christoph; Vidale, P. L.; Lüthi, D.; Frei, Christoph; Häberli, C.; Liniger, Mark A.; Appenzeller, Christof (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. In: NATURE, Jg. 427, H. 6972, S. 332–336. Online verfügbar unter doi:10.1038/nature02300.
- Scherrer, Simon C.; Appenzeller, Christof (2006): Swiss Alpine snow pack variability: major patterns and links to local climate and large-scale flow. In: CLIMATE RESEARCH, Jg. 32, H. 3, S. 187–199.
- Scherrer, Simon C.; Appenzeller, Christof; Laternser, M. (2004): Trends in Swiss Alpine snow days: The role of local- and large-scale climate variability. In: GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, Jg. 31, H. 13, S. -. Online verfügbar unter doi:10.1029/2004GL020255.
- Scherrer, Simon C.; Appenzeller, Christof; Liniger, Mark A. (2006): Temperature trends in Switzerland and Europe: Implications for climate normals. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY, Jg. 26, H. 5, S. 565–580. Online verfügbar unter doi:10.1002/joc.1270.
- Schmidli, J.; Frei, Christoph (2005): Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY, Jg. 25, H. 6, S. 753–771. Online verfügbar unter doi:10.1002/joc.1179.
- Schmidli, J.; Schmutz, C.; Frei, Christoph; Wanner, Heinz; Schär, Christoph (2002): Mesoscale precipitation variability in the region of the European Alps during the 20th century. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY, Jg. 22, H. 9, S. 1049–1074.
- Schneider, N.; Eugster, W. (2007): Climatic impacts of historical wetland drainage in Switzerland. In: CLIMATIC CHANGE, Jg. 80, H. 3-4, S. 301–321. Online verfügbar unter doi:10.1007/s10584-006-9120-8.
- SCNAT (2007): Denk-Schrift Energie. Energie effizient nutzen und wandeln ; Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung in der Schweiz. Bern: Akademien der Wissenschaften Schweiz (SCNAT).
- Shabalova, M. V.; van Deursen, W. P.A.; Buishand, Adri T. (2003): Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model. In: CLIMATE RESEARCH, Jg. 23, H. 3, S. 233–246.

UBS (2007): Klimawandel: Ein heisses Thema. Unter Mitarbeit von K. E. Reimann, J. Baker und A. Bolli et al. UBS AG, Wealth Management Research. Zürich.

Voss, Reinhard; May, Wilhelm; Roeckner, Erich (2002): Enhanced resolution modelling study on anthropogenic climate change: Changes in extremes of the hydrological cycle. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY, Jg. 22, H. 7, S. 755–777. Online verfügbar unter doi:10.1002/joc.757.

VSE (2006): Vorschau 2006 auf die Elektrizitätsversorgung der Schweiz im Zeitraum bis 2035/2050. VSE. Aarau. Online verfügbar unter <http://www.strom.ch>, zuletzt geprüft am 15.03.2007.

Weingartner, Rolf; Pfister, Christian (2007): Wie ausserordentlich war das Niedrigwasser im Winter 2005/06? - Eine hydrologisch-historische Betrachtung des Rheinabflusses in Basel. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Jg. 51, H. 1, S. 22–26.

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, Jg. 14, H. 3, S. 179–185.

World Glacier Monitoring Service; United Nations Environment Programme (Hg.) (2008): Global glacier changes: facts and figures. Zürich: World Glacier Monitoring Service.

Xoplaki, E.; Luterbacher, Jürg; Paeth, H.; Dietrich, D.; Steiner, N.; Grosjean, Martin; Wanner, Heinz (2005): European spring and autumn temperature variability and change of extremes over the last half millennium. In: GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, Jg. 32, H. 15, S. -. Online verfügbar unter DOI:10.1029/2005GL023424.

Zemp, Michael; Haeberli, Wilfried; Hoelzle, Martin; Paul, Frank (2006): Alpine glaciers to disappear within decades. In: GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, Jg. 33, H. 13. Online verfügbar unter doi:10.1029/2006GL026319.

Zierl, B.; Bugmann, H. (2005): Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments. In: WATER RESOURCES RESEARCH, Jg. 41, H. 2. Online verfügbar unter doi:10.1029/2004WR003447.

## 7. Verwandte Projekte

| Projektname  | Studienraum         | Bemerkung  |
|--------------|---------------------|--|
| PRUDENCE     | Europa              | Prediction of regional scenarios and uncertainties for defining European climate change risks and effects, PRUDENCE<br><a href="http://prudence.dmi.dk">http://prudence.dmi.dk</a>                                 |
| ENSEMBLES    | Europa              | Ensemble prediction system for climate change in Europe<br><a href="http://www.ensembles-eu.org">http://www.ensembles-eu.org</a>   |
| STARDEX      | Europa              | Statistical and regional dynamical downscaling of extremes for European regions<br><a href="http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex">http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex</a>                               |
| HYDKLIMA     | Österreich          | Die Hydrologie Österreichs unter dem Einfluss von Szenarien einer möglichen Klimaänderung, HYDKLIMA<br><a href="http://iwhw.boku.ac.at/climate_change_deu.html">http://iwhw.boku.ac.at/climate_change_deu.html</a> |
| KLIWA        | Deutschland, Bayern | Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, KLIWA<br><a href="http://www.kliwa.de">http://www.kliwa.de</a>   |
| CE           | Skandinavien        | Climate and Energy CE<br><a href="http://www.os.is/ce">http://www.os.is/ce</a>   |
| CES          | Skandinavien        | Nordic project in climate and energy systems<br><a href="http://www.os.is/ces">http://www.os.is/ces</a>  |
| CWE          | Skandinavien        | Climate, Water and Energy CWE<br><a href="http://www.os.is/cwe">http://www.os.is/cwe</a>   |
| GLOWA-Dabube | Europa, Donau       | Global Change and the Hydrological Cycle<br><a href="http://www.glowa-danube.de">http://www.glowa-danube.de</a>  |
| ACQWA        | Europa              | Assessing Climate impacts on the Quantity and quality of Water, ACQWA<br><a href="http://www.acqwa.ch">http://www.acqwa.ch</a>   |
| StartClim    | Österreich          | Auswirkungen der Klimaänderung auf Österreich<br><a href="http://www.austroclim.at">http://www.austroclim.at</a>   |

(Liste ist nicht abschliessend)

## 8. Gespräche

Workshops zum Thema Klimaänderung und Wasserkraft, Teilnehmer: Markus Balmer (ETHZ), Dr. Tracy Ewen (ETHZ), Peter Hässig (BKW FMB AG), Dr. Walter Hauenstein (SWV), Dr. Cornelia Luchsinger (BKW FMB AG), Dr. Michael Paulus (Swisslectric Research), Michel Piot (BFE), Dr. Bruno Schädler (BAFU), Prof. Christoph Schär (ETHZ), Dr. Manfred Stähli (WSL), Prof. Rolf Weingartner (GIUB), Christoph Plattner (Kompetenznetzwerk Wasser im Berggebiet) und Pascal Hänggi (GIUB).

Treffen zwischen Herrn Peter Molinari (Engadiner Kraftwerke AG), Christoph Plattner (Kompetenznetzwerk Wasser im Berggebiet) und Pascal Hänggi (GIUB).

Treffen zwischen Herrn Michel Piot (BFE), Ruedi Sigg (BFE), Christoph Plattner (Kompetenznetzwerk Wasser im Berggebiet) und Pascal Hänggi (GIUB).

Treffen zwischen Herrn Peter Hässig (BKW FMB AG), Christian Dupraz (BKW FMB AG), Raffaele Chiacchia (BKW FMB AG), Christoph Plattner (Kompetenznetzwerk Wasser im Berggebiet) und Pascal Hänggi (GIUB).

Treffen zwischen Herrn Walter Bernegger (Engadiner Kraftwerke AG) und Christoph Plattner (Kompetenznetzwerk Wasser im Berggebiet).

Treffen zwischen Herrn Erich Kaufmann (NOK), Robert Schneider (NOK) und Christoph Plattner (Kompetenznetzwerk Wasser im Berggebiet).

Telefongespräch zwischen Herrn Dr. Heinz Peter Tscholl (KWO) und Pascal Hänggi (GIUB).