Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 103 (2011)

Heft: 4

Artikel: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz 2021-205 : Hchrechnung

Autor: Hänggi, Pascal / Weingartner, Rolf / Balmer, Markus

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941824

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz 2021–2050 – Hochrechnung

Pascal Hänggi, Rolf Weingartner, Markus Balmer

Zusammenfassung

Im Rahmen der Synthesearbeiten zum Projekt «Klimaänderung und Wasserkraftnutzung» (SGHL und CHy, 2011) wurde eine Abschätzung durchgeführt, wie sich die Klimaänderung auf die mittlere Stromproduktion der Schweiz in der nahen Zukunft (2021–2050) auswirken könnte. Als Grundlage dazu dienten (a) Simulationen möglicher Abflussveränderungen in repräsentativen Einzugsgebieten der Schweiz, (b) die in mehreren Fallstudien aus der Modellkette «Klimaszenario – hydrologisches Modell – Betriebsmodell» abgeleiteten Veränderungen der mittleren Stromproduktion, (c) die Kraftwerkstypologie nach Balmer (2011) sowie (d) eine Gliederung der Schweiz in Regionen mit ähnlichem Klimaänderungssignal. Die Hochrechnung geht – unter Annahme der heutigen Produktionsmuster – für den Zeitraum 2021–2050 im Vergleich zu 1980–2009 im Winter von einem Anstieg der mittleren Produktion von rund 10% und im Sommer von einer Abnahme zwischen 4 und 6% aus. Diese saisonalen Veränderungen bewirken auf das Jahr gesehen eine leichte Zunahme zwischen 0.9 und 1.9%. Insgesamt zeigen die Ergebnisse – unter Berücksichtigung der Modellunsicherheiten –, dass sich die mittlere Stromproduktion aus der Wasserkraftnutzung gegenüber heute nicht wesentlich verändern wird. Diese Ergebnisse lassen sich allerdings nicht generell auf einzelne Kraftwerke übertragen. So muss aus regionaler Sicht bei den Wasserkraftwerken im Tessin und im südlichen Wallis mit einer leichten Produktionsabnahme gerechnet werden. Ausserdem ist zu beachten, dass Effekte wie etwa eine Veränderung von Extremereignissen, die den täglichen Betrieb massgeblich beeinflussen, bei den Hochrechnungen nicht berücksichtigt wurden.

1. Einleitung

Die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Stromproduktion durch Wasserkraft in der Schweiz wurden in einem Projekt Klimaänderung und Wasserkraftnutzung eingehend untersucht (SGHL und CHy, 2011). Einerseits lieferte die Studie Aussagen über Veränderungen in den natürlichen Abflussmengen für den Zeitraum 2021–2050. Andererseits wurden mittels Kopplung von klimatologischen, hydrologischen und betrieblichen Modellen die Auswirkungen der Klimaänderung für die Jahre 2021–2050 an verschiedenen Wasserkraftwerken bzw. Fallstudien untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass bei den natürlichen Abflussmengen 2021–2050 im Vergleich zu den Verhältnissen 1980–2009 mit einer saisonalen Verschiebung des Wasserangebots gerechnet werden muss, mit signifikant höheren Mengen im Winter und niedrigeren im Sommer. Die Jahresabflussmengen bleiben dabei konstant, mit Ausnahme von stark vergletscherten Einzugsgebieten, wo für 2021–2050 zum Teil höhere Jahresabflüsse projiziert werden. Die Resultate der Auswirkungen auf die Stromproduktion sind unterschiedlich, je nachdem wie das Kraftwerk technisch und betrieblich ausgelegt ist. Einige Fallstudien zeigen, dass die saisonalen Verschiebungen in den Zuflussmengen zu günstigeren Bedingungen bei der Stromproduktion führen können, da im Winter mehr Wasser gefasst wird und im Sommer die maximalen Fassungskapazitäten meist nicht unterschritten werden. Durch Optimierung des Produktionsfahrplans kann eine Abminderung der Produktionsmenge verhindert, oder sogar eine Steigerung erreicht werden.

Aus den Ergebnissen der Fallstudien kann geschlossen werden, dass eine Verallgemeinerung der Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz schwierig ist. Zum einen unterscheidet sich jedes Wasserkraftwerk in Bezug auf seine Betriebsweise und technische Ausstattung. Zum andern zeigen die Studien zu den Veränderungen in den natürlichen Abflussmengen, dass je nach Region andere Auswirkungen auf die hydrologischen Verhältnisse zu erwarten sind.

Um die Auswirkungen der Klimaänderung auf die gesamte schweizerische Wasserkraftnutzung abzuschätzen, wurde hier versucht, beiden Umständen Rechnung zu tragen. Die Hochrechnung basiert auf den Ergebnissen der Studie Klimaänderung und Wasserkraftnutzung (SGHL und CHy, 2011) und der Datenbank HYDROGIS (Balmer, 2011), in welcher technische und physiographische Kenngrössen eines Grossteils der schweizerischen Wasserkraftanlagen erfasst sind. Die im Projekt Klimaänderung und Wasserkraftnutzung verwendeten Klimaszenarien aus dem EU-Projekt ENSEMBLES (Linden und Mitchell, 2009) für den Zeitraum 2021–2050 sind allesamt konsistent (Bosshard et al., 2011a), womit sich alle Berechnungen auf dieselben Grundlagen abstützen. Im Folgenden wird auf die Methode zur Übertragung der Resultate aus den Fallstudien auf die schweizerische Wasserkraftanlagen eingegangen, inkl. den zugrundeliegenden Daten (Kap. 2). Danach werden in Kap. 3 die Resultate präsentiert, gefolgt von der Diskussion und den Schlussfolgerungen (Kap. 4 und 5).

2. Daten und Methode

2.1 Allgemeines Vorgehen

Bild 1 zeigt den schematischen Ablauf der Hochrechnung der Resultate aus den einzelnen Studien des Projektes Klimaänderung und Wasserkraftnutzung auf die Schweiz. Die Hochrechnung basiert auf einer Kombination zweier Klassierungen:

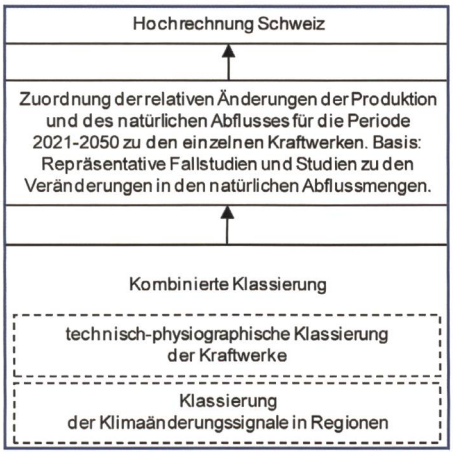

Bild 1. Schematischer Ablauf der Hochrechnung.

Bei der ersten Klassierung wurden technisch und physiographisch ähnliche Wasserkraftanlagen nach ausgewählten Kriterien gruppiert (Kap. 2.2.1). Bei der zweiten Klassierung wurden Klimaänderungssignale nach Regionen gruppiert (Kap. 2.2.2). Die kombinierte Klassierung beschreibt demnach Kraftwerksgruppen, welche sich in Bezug auf technisch-physiographische Eigenschaften und zu erwartende Klimaänderungssignale unterscheiden (Kap. 2.2.3). Diese kombinierte Klassierung wurde in einem weiteren Schritt verwendet, um die Resultate der Fallstudien (nachfolgend als repräsentative Fallstudien bezeichnet) und der Untersuchungen zu den Veränderungen der natürlichen Abflussmengen zu übertragen (vgl. *Bild 2*). Dabei wurden relative Änderungen der Produktionsmengen und natürlichen Abflussmengen zwischen der Referenzperiode und 2021–2050 den mittleren Produktionserwartungen der einzelnen Kraftwerke zugeordnet. Dies geschah unter Berücksichtigung der jeweiligen Speicherkapazitäten der Kraftwerke, resultierend in der Hochrechnung für die Schweiz (Kap. 2.3).

2.2 Klassierung der Wasserkraftwerke und Klimaänderungssignale

2.2.1 Klassierung der Wasserkraftwerke

Verschiedene technische und räumliche Informationen zu den Wasserkraftanlagen der Schweiz wurden im Rahmen einer Dissertation in der Datenbank HYDROGIS zusammengetragen (Balmer, 2011). Das GIS-Modell beschreibt jede Wasserkraftanlage anhand von Einzugsgebiet, Wasserentnahmen, Speichersee oder Stauraum, Talsperre, Stollen und Zuleitungen, Zentralen, Wasserrückgaben, Restwasser- sowie Schwall- und Sunkstrecken. Dabei sind 283 Kraftwerke mit einer mittleren Produktionserwartung von 19 849 GWh im Sommer und 15 376 GWh im Winter erfasst. Der Vergleich mit der Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz (BFE, 2011) zeigt, dass in der Datenbank HYDROGIS die grösseren Kraftwerke vollständig erfasst sind.

Mit Hilfe der Datenbank und einer Clusteranalyse wurden die erfassten Kraftwerke in Klassen eingeteilt (vgl. Balmer, 2011). Dabei wurde eine Auswahl von technischen Informationen und physiographischen Variablen der einzelnen Wasserkraftanlagen verwendet:

Physiographische Variablen

- Mittlere Höhe des Einzugsgebietes mH [m ü.M.] (Swisstopo, 2011)
- Fläche des Einzugsgebietes A [km^2]
- Vergletscherungsgrad Vgl [%] (BFS, 1997)
- Mittlerer jährlicher Gebietsniederschlag N [mm] (Sevruk und Kirchhofer, 1992)

Technische Variablen (BFE, 2011b; Balmer, 2011)

- Kumulierte Ausbauwassermenge aller Wasserfassungen QA [m^3/s]
- Nutzvolumen der Reservoirs NV [Mio m^3]
- Installierte Turbinenleistung TP [MW]
- Ausbauwassermenge der Turbinen TQ [m^3/s]
- Mittlere Produktionserwartung im Sommer ProdSo [GWh]
- Mittlere Produktionserwartung im Winter ProdWi [GWh]
- Installierte Pumpenleistung PP [MW]
- Mittlere Konsumerwartung aller Zubringerpumpen PK [GWh]

Die physiographischen Variablen kennzeichnen indirekt die vorherrschenden hydrologischen Eigenschaften. So steht die mittlere Höhe des Einzugsgebiets auch als Indikator für die mittlere Gebietstemperatur und zusammen mit dem Vergletscherungsgrad für die vorherrschenden Abflussregimes. Die technischen Variablen weisen hauptsächlich auf die Bewirtschaftung der jeweiligen Kraftwerksanlage hin, wobei die letzten beiden Variablen speziell Informationen zum Einsatz von Pumpen liefern. Die resultierenden technisch-physiographischen Klassen enthalten demnach Kraftwerke, welche innerhalb der einzelnen Klassen in Bezug auf die oben genannten Variablen ähnlich sind.

2.2.2 Klassierung der Klimaänderungssignale in Regionen

In den Fallstudien und zur Abschätzung der Abflüsse für die Periode 2021–2050 wurden hydrologische Modelle verwendet. Diese wurden mit verschiedenen Temperatur- und Niederschlagsszenarien für die Periode 2021–2050 angetrieben, welche mit Hilfe von Klimaprojektionen aus dem EU-Projekt ENSEMBLES (Linden und Mitchell, 2009) und beobachteten Temperatur- und Niederschlagswerten für die Schweiz aufbereitet wurden (Bosshard et al., 2011a): Für die Berechnung der Klimaänderungssignale wurden zunächst Klimamodellberechnungen (Auflösung 25 km × 25 km) auf Stationsstandorte der Meteoschweiz interpoliert (Temperatur: 188 Standorte; Niederschlag: 507 Standorte). Aus den interpolierten Zeitreihen wurden anschliessend die Klimaänderungssignale zwischen der Periode 1980–2009 (CTL) und 2021–2050 (SCE) berechnet. Dazu wurde mit einem einfachen gleitenden Mittel sowohl für die CTL- als auch die SCE-Periode der mittlere klimatologische Jahresgang ermittelt. Die Änderung des Jahresganges zwischen der CTL- und SCE-Periode entspricht dem Klimaänderungssignal. Für die Temperatur wurde dabei die Differenz SCE-CTL betrachtet, im Falle des Niederschlages die relative Änderung SCE/CTL. Das gleitende Mittel ermöglicht eine lückenlose Repräsentation des Jahresgangs des Klimaänderungssignals (entspricht einer Zeitreihe mit Änderungssignale vom 1. Januar bis zum 31. Dezember).

Mit Hilfe einer Clusteranalyse wurden die Klimaänderungssignale in Klassen eingeteilt, bzw. Regionen mit gleichen zu erwartenden Klimaänderungen gebildet. Dabei wurden nur jene Stationsstandorte berücksichtigt, für welche sowohl für die Temperatur als auch für den Niederschlag Änderungssignale vorlagen. Dies war an 158 Standorten der Fall. Aus den beiden Jahresverläufen der Änderungssignale wurde anschliessend stationsweise eine einzelne Zeitreihe gebildet, bzw. die beiden Jahresverläufe wurden aneinandergekettet. Die neu entstandenen Zeitreihen dienten als Grundlage für die Berechnung der Ähnlichkeiten zwischen den einzelnen Stationsstandorten. Als Ähnlichkeitsmass zwischen zwei Standorten i und k wurde dabei

$$d(x_i, x_k) = 1 - |corr(x_i, x_k)| \qquad (1)$$

berechnet, mit dem Korrelationskoeffizient nach Spearman (vgl. Begert, 2008). Zur Bildung der Cluster diente das Complete-Linkage Verfahren, in welchem die Distanz zwischen zwei Cluster durch die jeweils weitest entfernten Nachbarn definiert wird (Bahrenberg et al., 2003). Durch Auftragen der jeweiligen Distanzen zwischen den ge-

bildeten Clustern wurde die Anzahl Klassen bzw. Regionen abgeschätzt, wobei grosse Distanzen zwischen den Clustern auf grosse Unterschiede zwischen den Klimaänderungsregionen hinweisen (Begert, 2008; Wilks, 2006). Um schliesslich die Regionen zu bilden, wurden die Klassierungen mit Hilfe der Methode des nächsten Nachbarn auf die Fläche der Schweiz interpoliert.

2.2.3 Kombinierte Klassierung

Als Basis für die Übertragung der relativen Änderungssignale für die Periode 2021–2050 wurden die technisch-physiographische und klimatische Klassierung miteinander vereint. Dabei wurden die (klassierten) Einzugsgebiete der Kraftwerksanlagen mit den Klimaänderungssignal-Regionen verschnitten. Als Resultat entstanden kombinierte Klassen, welche in Bezug auf technisch-physiographische Eigenschaften und zu erwartende Klimaänderungssignale einzigartig sind (nachfolgend Kraftwerk-Klima-Klassen genannt). Bei Kraftwerken, deren Einzugsgebiet über mehrere Klimaregionen hinweg reicht, wurde diejenige Klimaregion zugeordnet, welche flächenmässig den grössten Anteil aufwies. Die Codierung der kombinierten Klassierung besteht aus einer zweistelligen Zahl, wobei die erste Ziffer die Klasse der technischen Klassierung angibt, die zweite diejenige der Klimaänderungssignal-Region.

2.3 Hochrechnung auf die Schweiz

Im Projekt Klimaänderung und Wasserkraftnutzung wurden an verschiedenen Fallstudien die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Stromproduktion aus Wasserkraft untersucht. Des Weiteren wurden für verschiedene Gewässer der Schweiz

	Referenz-periode	A [km²]	mH [m ü.M.]	Vgl [%]	rel. Änderung Produktion dSo [%]	dWi [%]	dJa [%]	Referenz
Fallstudien (Produktion)								
Wasserkraftwerke Prättigau	1976-2005	281	2171	2.9	0.4	26.5	9.3	Hänggi et al. 2011b
Kraftwerk Löntsch	1998-2009	83	1721	2.8	-3.3	9.3	2.2	Hänggi et al. 2011c
Kraftwerk Mattmark	1980-2009	160	2962	39.3	-10.1	3.2	-0.6	Pralong et al. 2011
Kraftwerke Oberhasli	2009	350	2410	28.6	-25.2	0.8	-11.4	Stähli et al. 2011
					rel. Änderung nat. Abfluss			
Grosse Einzugsgebiete (nat. Abfluss)								
Rhein-Rheinfelden	1979-2008	34526	1039	1.3	-4.0	10.0	3.0	Bosshard et al. 2011b
Aare-Brugg	1979-2008	11726	1010	2.0	-7.0	9.0	1.0	Bosshard et al. 2011b
Mittlere Einzugsgebiete (nat. Abfluss)								
Rhein-Diepoldsau	1979-2008	6119	1800	1.4	-6.6	12.1	0.7	Bernhard et al. 2011
Rhein-Domat/Ems	1979-2008	3229	2020	2.3	-5.8	10.9	0.3	Bernhard et al. 2011
Vorderrhein-Ilanz	1979-2008	776	2020	3.8	-8.8	12.5	-1.5	Bernhard et al. 2011
Kleine Einzugsgebiete (nat. Abfluss)								
Landwasser-Frauenkirch	1980-2009	183	2227	1.2	-5.5	26.0	0.9	Bernhard et al. 2011
Rhone-Gletsch (a-glaciaire)	1980-2009	39	2719	52.2	14.4	28.0	16.0	Hänggi et al. 2011a
Simme-Oberried (b-glaciaire)	1980-2009	36	2370	34.6	1.7	22.1	4.9	Hänggi et al. 2011a
Hinterrhein-Hinterrhein (a-glacio-nival)	1980-2009	54	2360	17.2	-2.1	33.3	4.6	Hänggi et al. 2011a
Landquart-Klosters (b-glacio-nival)	1980-2009	112	2332	8.0	-4.4	22.4	0.6	Hänggi et al. 2011a
Plessur-Chur (nival alpin)	1980-2009	263	1850	0.0	-9.4	15.0	-1.4	Hänggi et al. 2011a
Minster-Euthal (nival de transition)	1980-2009	59	1351	0.0	-15.0	13.1	-2.6	Hänggi et al. 2011a
Simme-Oberwil (nival de transition)	1980-2009	344	1640	3.7	-4.6	16.6	4.0	Hänggi et al. 2011a
Sitter-Appenzell (nival de transition)	1980-2009	74	1252	0.1	-8.8	6.5	-1.4	Hänggi et al. 2011a
Sense-Thörishaus (nivo-pluvial préalpin)	1980-2009	352	1068	0.0	-11.7	6.3	-1.7	Hänggi et al. 2011a
Glatt-Herisau (pluvial supérieur)	1980-2009	16	840	0.0	-2.4	2.9	0.6	Hänggi et al. 2011a
Broye-Payerne (pluvial inférieur)	1980-2009	392	710	0.0	-7.6	4.6	1.2	Hänggi et al. 2011a
Töss-Neftenbach (pluvial inférieur)	1980-2009	342	650	0.0	-2.3	3.0	1.1	Hänggi et al. 2011a
Birse-Moutier (nivo-pluvial jurassien)	1980-2009	183	930	0.0	-3.0	2.9	0.1	Hänggi et al. 2011a
Ergolz-Liestal (pluvial jurassien)	1980-2009	261	590	0.0	-4.3	2.2	1.1	Hänggi et al. 2011a
Riale Di Calneggia-Cavergno (nival méridional)	1980-2009	24	1996	0.0	-11.0	16.0	-3.7	Hänggi et al. 2011a
Cassarate-Pregassona (pluvio-nival méridional)	1980-2009	74	990	0.0	-7.9	-5.0	-6.3	Hänggi et al. 2011a

Tabelle 1. Relative Änderung für die Periode 2021–2050 (jeweils Mittel aus verschiedenen Modellrechnungen) der mittleren Produktionserwartung verschiedener Wasserkraftwerke (aktueller Ausbaustand) und der natürlichen Abflussmenge ausgewählter Fliessgewässer in der Schweiz. A: Einzugsgebietsfläche; mH: mittlere Höhe; Vgl: Vergletscherungsgrad; dSo: relative Änderung für Sommer (Mai–September); dWi: relative Änderung für Winter (Oktober–April); dJa: relative Änderung für das Jahr (Oktober–September).

Veränderungen in den natürlichen Abflussmengen projiziert. So kann die relative Änderung für den Zeitraum 2021–2050 in der Produktion (für die Fallstudien) bzw. den natürlichen Abflussmengen gegenüber der Referenzperiode berechnet werden *(Tabelle 1)*.

Für die Hochrechnung der Auswirkungen der Klimaänderung auf die gesamte Schweiz wurden die relativen Änderungen für Winter (Oktober–April; sieben Monate) und Sommer (Mai-September; fünf Monate) nach dem Schema in *Bild 2* auf die mittlere Produktionserwartung der einzelnen Kraftwerke übertragen (aktueller Ausbaustand). Folgende Kriterien wurden bei der Zuordnung berücksichtigt (siehe Rhomben in *Bild 2*):

- Zugehörigkeit des Kraftwerks zu einer Kraftwerk-Klima-Klasse, für welche eine repräsentative Fallstudie vorhanden ist. Die in den Fallstudien untersuchten Wasserkraftwerke wurden im vorgehenden Arbeitsschritt ebenfalls einer Kraftwerk-Klima-Klasse zugeteilt, womit die jeweilige Fallstudie repräsentativ für alle Angehörigen der Gruppe steht. Die in den Fallstudien berechneten relativen Produktionsänderungen wurden somit direkt auf die jeweiligen Kraftwerke übertragen.
- Unterscheidung zwischen Speicher- und Laufkraftwerk, um den verbliebenen Speicherkraftwerken entweder die relativen Änderungen der Fallstudie Löntsch oder Mattmark zuzuordnen. Die Unterscheidung zwischen Speicher- und Laufkraftwerk erfolgte mit Hilfe des Speicherausbaugrades β, welcher das Verhältnis zwischen dem Nutzvolumen bzw. dem Speicherinhalt S [m^3] im Einzugsgebiet eines Kraftwerks und dem mittleren Zufluss MQ [m^3/a] darstellt (Maniak, 2005), also

$$\beta = S / MQ. \qquad (2)$$

MQ wurde hier mit Hilfe des mittleren jährlichen Gebietsniederschlags und der Einzugsgebietsfläche für jede Kraftwerksanlage berechnet, wobei ein Drittel der berechneten Wassermenge als Verdunstungsverlust beziffert wurde. Im Mittel der Schweiz trifft diese Annahme zu, im Alpenraum wird MQ aber eher unterschätzt und β damit überschätzt. Nach Maniak (2005) haben Gebiete mit hohem Ausbaugrad $\beta > 0.1$, wobei auch das mittlere innerjährliche Abflussverhalten stark beeinflusst wird. Somit kann der Speicherausbaugrad auch zur Unterscheidung zwischen Speicher- ($\beta > 0.1$) und Laufkraftwerken ($\beta \leq 0.1$) dienen. Letzteren wurden die relativen Änderungen – mit gewissen Anpassungen ersichtlich in *Bild 2* – der natürlichen Fliessgewässer aufgetragen.

- Einteilung der Laufkraftwerke nach Einzugsgebietsgrösse (A > 2500 km^2),

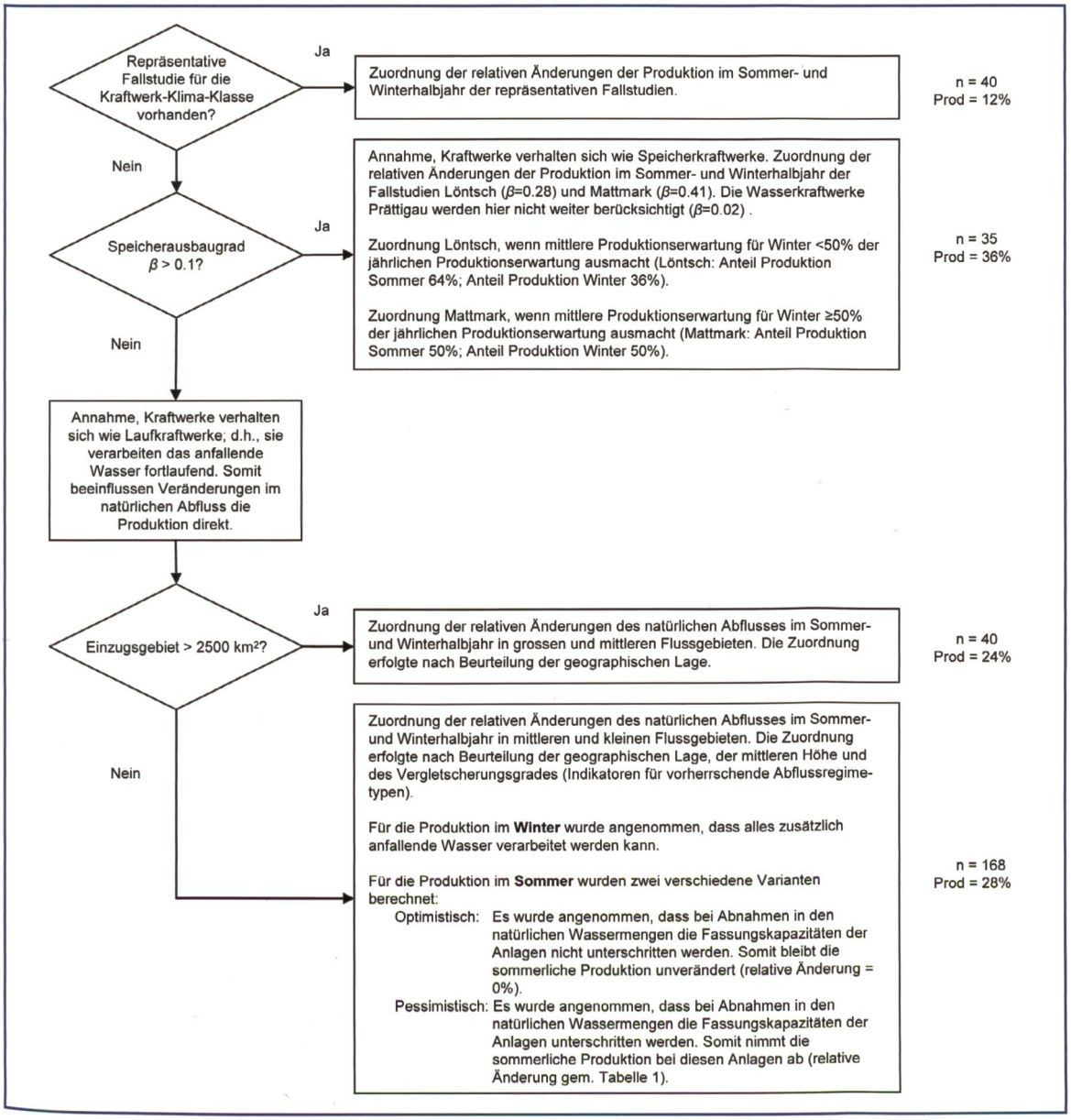

Bild 2. Entscheidungsbaum zur Zuordnung der relativen Änderungen für die Periode 2021–2050 gegenüber der Referenzperiode (gem. Tabelle 1) auf die mittlere Produktionserwartung der einzelnen Wasserkraftwerke (aktueller Ausbaustand). Daneben ist angegeben, wie viele Kraftwerke den einzelnen Gruppen zugeordnet wurden (n) inkl. deren Anteil an der schweizerischen Produktionserwartung (Prod, %).

um die relativen Änderungen der natürlichen Abflussmengen aus «grossen und mittleren» oder «mittleren und kleinen» Einzugsgebieten vorzunehmen (vgl. *Tabelle 1*).

3. Resultate

3.1 Kombinierte Klassierung der Wasserkraftwerke und Klimaänderungssignale

Als Basis für die Hochrechnung diente die kombinierte Klassierung der Wasserkraftwerke und Klimaänderungssignal-Regionen. Insgesamt wurden acht technische Kraftwerks-Klassen und acht Klimaänderungssignal-Regionen ausgeschieden *(Bild 3)*. Es zeigt sich, dass das Klimaänderungssignal auf der Alpennordseite sehr homogen ist (Klassen 1 und 5), hingegen im Alpenraum eine deutliche Heterogenität gegeben ist. Die unterschiedlichen Klassen decken folgende Regionen ab: Klasse 1 Jurabogen und nördliches Mittelland, 2 inneralpine Täler, 3 Alpennordkamm, 4 Südwallis, Gotthardgebiet und Engadin, 5 Voralpen, 6, 7 und 8 Tessin.

Durch die Verschneidung der beiden Klassierungen entstanden schliesslich 24 verschiedenen Kraftwerk-Klima-Klassen *(Tabelle 2)*. Diese unterscheiden sich in Bezug auf technisch-physiographische Eigenschaften und zu erwartende Klimaänderungssignale.

Die generelle Beschreibung in *Tabelle 2* gibt grob an, welche Kraftwerke durch die jeweilige Kraftwerk-Klima-Klasse repräsentiert werden. Es ist ersichtlich, dass insbesondere grössere Kraftwerke eigene Gruppen bilden (z.B. Klasse 55, 62, 64, 67, 72 und 84). Betrachtet man die Schweiz als Ganzes, so ergibt die Summe der genutzten Fläche aller Wasserkraftwerke rund 530 000 km^2. Dies belegt eindrücklich die Mehrfachnutzung des Abflusses durch die Wasserkraft in der Schweiz.

3.2 Hochrechnung auf die Schweiz

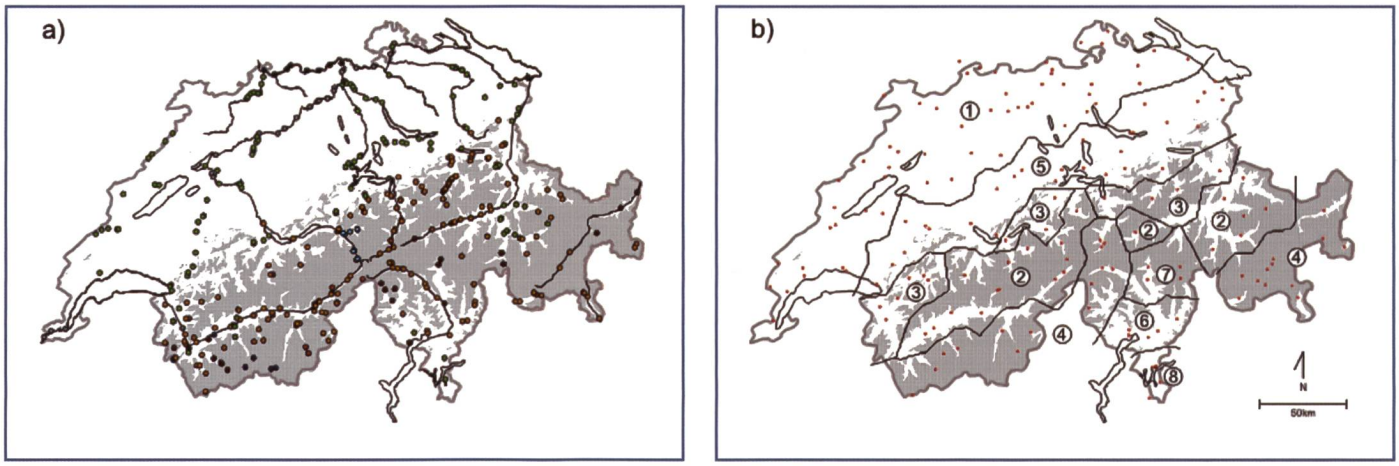

Bild 3. Klassierung der (a) 283 Kraftwerke und (b) 158 Stationsstandorte (Punkte) in je acht Klassen. Klimaänderungssignal-Regionen in (b): 1 Jurabogen und nördliches Mittelland, 2 inneralpine Täler, 3 Alpennordkamm, 4 Südwallis, Gotthardgebiet und Engadin, 5 Voralpen, 6, 7 und 8 Tessin.

Klasse	n	mH [m ü.M.]	A [km2]	Vgl [%]	N [mm]	QA [m3/s]	NV [Mio m3]	TP [MW]	TQ [m3/s]	ProdSo [GWh]	ProdWi [GWh]	PP [MW]	PK [GWh]	Generelle Beschreibung
11	20	951	470	0	1542	11	2	7	16	11	14	0	0	Jurassische Wasserkraftwerke
12	19	1829	1125	2	1743	25	0	15	39	42	22	0	0	Laufkraftwerke im Berner Oberland und am Alpenrhein
13	14	1559	324	1	2003	28	20	33	24	31	29	18	0	Laufkraftwerke in der Zentralschweiz und den Fribourger Alpen
14	4	1906	185	2	1739	8	0	14	9	36	20	0	0	Höher gelegene Laufkraftwerke im Tessin und westlichen Wallis
15	52	1102	1244	1	1874	25	4	10	42	14	12	1	0	Mittelgrosse Laufkraftwerke Alpennordhang
18	2	1094	24	0	2371	1	0	3	1	7	6	0	0	Kraftwerke im Südtessin
22	28	2230	328	10	2186	13	3	30	21	75	33	0	0	Kraftwerke ähnlich der Fallstudie Wasserkraftwerke Prättigau
23	43	1992	87	4	2463	9	5	30	9	34	20	5	1	Kraftwerke im Glarnerland
24	39	2360	108	7	2245	14	10	41	12	71	51	1	2	Kleinere Kraftwerke Südwallis, Gotthardgebiet und Engadin
25	8	1692	68	1	2532	8	5	17	9	27	11	0	0	Kraftwerke ähnlich der Fallstudie Kraftwerk Löntsch
26	6	1691	76	0	2645	16	15	41	13	60	33	0	0	Mittelgrosse Kraftwerke im Tessin
27	3	2153	102	3	2479	24	36	119	31	166	119	2	2	Kraftwerke im nordöstlichen Tessin
32	4	2934	116	64	2916	21	7	113	20	175	21	0	0	Kraftwerke im Aletschgebiet
34	3	2859	96	40	2468	34	58	134	23	152	142	15	3	Kraftwerke ähnlich der Fallstudie Kraftwerk Mattmark
41	9	1130	25217	2	1644	121	0	70	1090	240	186	0	0	Kraftwerke am Rhein (Birsfelden-Rekingen)
51	11	1052	10708	2	1562	278	0	26	405	89	72	0	0	Kraftwerke an der Aare
52	4	1528	6938	1	1695	101	0	36	466	126	101	1	0	Kraftwerke am Rhein (Rekingen-Schaffhausen)
54	4	1873	6774	12	1775	109	0	61	436	156	113	0	0	Kraftwerke an der Rhone
55	1	1376	4988	5	1789	215	0	23	215	85	53	0	0	Kraftwerk Kallnach-Niederried (Aare)
62	2	2263	426	6	2158	208	185	505	142	635	492	41	37	Kraftwerke Vorder- und Hinterrhein
64	4	2398	667	19	2255	125	188	486	129	442	624	75	61	Emosson, Maggia, Engadiner Kraftwerke und Mauvoisin
67	1	2079	287	2	2498	130	111	438	82	411	485	0	0	Officine Idroelettriche di Blenio
72	1	2410	350	29	2831	451	196	1078	261	910	677	435	33	Kraftwerke Oberhasli
84	1	3081	360	55	2470	132	401	719	90	245	580	168	309	Grande Dixence
	283	1737	1870	5	2075	39	12	47	87	70	54	6	3	Schweiz Mittel
	283	-	529101	-	-	11001	3496	13335	24751	19849	15376	1647	828	Schweiz Summe

Tabelle 2. Statistik der Kraftwerk-Klima-Klassen. Angegeben sind die Mittelwerte der einzelnen Variablen, welche für die technische Klassierung der Wasserkraftwerke verwendet wurden (siehe Kap. 2.2.1 für Erklärung der Abkürzungen). Wo als sinnvoll erachtet wurden für die Schweiz die Summen angegeben.

An jedem der 283 Kraftwerke aus der Datenbank HYDROGIS wurde der Entscheidungsbaum, dargestellt in *Bild 2*, angewandt um die relativen Änderungen 2021–2050 auf dessen mittlere Produktionserwartung aufzutragen. In *Tabelle 3* sind die aufsummierten Produktionserwartungen für 1980–2009 und 2021–2050 pro Kraftwerk-Klima-Klasse dargestellt, inkl. den relativen Änderungen.

Betrachtet man die projizierten Veränderungen in den mittleren jährlichen Produktionserwartungen für den Zeitraum 2021–2050 gegenüber den Verhältnissen 1980–2009, wird in den meisten Fällen von einer leichten Zunahme der Stromproduktion durch die Wasserkraft ausgegangen (optimistischer Fall). Bei den Kraftwerken

Optimistisch

			Prod 1980-2009 [GWh]			Prod 2021-2050 [GWh]			rel. Änderung [%]			Anteil an Prod CH [%]	
Klasse	Generelle Beschreibung	n	So	Wi	Ja	So	Wi	Ja	So	Wi	Ja	1980-2009	2021-2050
11	Jurassische Wasserkraftwerke	20	224	276	500	223	282	505	-0.4	2.3	1.1	1.4	1.4
12	Laufkraftwerke im Berner Oberland und am Alpenrhein	19	796	413	1210	780	481	1261	-2.0	16.3	4.2	3.4	3.5
13	Laufkraftwerke in der Zentralschweiz und den Fribourger Alpen	14	428	402	830	418	435	853	-2.3	8.3	2.8	2.4	2.4
14	Höher gelegene Laufkraftwerke im Tessin und westlichen Wallis	4	144	79	224	144	96	241	0.0	21.9	7.8	0.6	0.7
15	Mittelgrosse Laufkraftwerke Alpennordhang	52	739	634	1373	713	668	1380	-3.6	5.3	0.5	3.9	3.8
18	Kraftwerke im Südtessin	2	14	12	25	14	11	25	0.0	-5.0	-2.3	0.1	0.1
22	Kraftwerke ähnlich der Fallstudie Wasserkraftwerke Prättigau	28	2101	928	3030	2109	1175	3284	0.4	26.5	8.4	8.6	9.1
23	Kraftwerke im Glarnerland	43	1457	871	2328	1424	984	2407	-2.3	12.9	3.4	6.6	6.7
24	Kleinere Kraftwerke Südwallis, Gotthardgebiet und Engadin	39	2763	2008	4771	2708	2290	4999	-2.0	14.1	4.8	13.5	13.9
25	Kraftwerke ähnlich der Fallstudie Kraftwerk Löntsch	8	215	91	306	208	100	308	-3.3	9.3	0.5	0.9	0.9
26	Mittelgrosse Kraftwerke im Tessin	6	361	197	558	357	221	578	-1.1	12.4	3.7	1.6	1.6
27	Kraftwerke im nordöstlichen Tessin	3	499	358	857	476	377	853	-4.7	5.4	-0.5	2.4	2.4
32	Kraftwerke im Aletschgebiet	4	701	85	786	701	105	806	0.0	23.7	2.5	2.2	2.2
34	Kraftwerke ähnlich der Fallstudie Kraftwerk Mattmark	3	455	426	881	409	439	848	-10.1	3.2	-3.7	2.5	2.4
41	Kraftwerke am Rhein (Birsfelden-Rekingen)	9	2157	1670	3827	2071	1837	3907	-4.0	10.0	2.1	10.9	10.9
51	Kraftwerke an der Aare	11	980	795	1774	911	866	1777	-7.0	9.0	0.2	5.0	5.0
52	Kraftwerke am Rhein (Rekingen-Schaffhausen)	4	504	405	909	471	454	924	-6.6	12.1	1.7	2.6	2.6
54	Kraftwerke an der Rhone	4	622	452	1074	581	507	1088	-6.6	12.1	1.3	3.0	3.0
55	Kraftwerk Kallnach-Niederried (Aare)	1	85	53	138	79	58	137	-7.0	9.0	-0.9	0.4	0.4
62	Kraftwerke Vorder- und Hinterrhein	2	1270	985	2255	1228	1076	2305	-3.3	9.3	2.2	6.4	6.4
64	Emosson, Maggia, Engadiner Kraftwerke und Mauvoisin	4	1768	2495	4263	1673	2681	4354	-5.4	7.4	2.1	12.1	12.1
67	Officine Idroelettriche di Blenio	1	411	485	896	370	500	870	-10.1	3.2	-2.9	2.5	2.4
72	Kraftwerke Oberhasli	1	910	677	1587	681	683	1363	-25.2	0.8	-14.1	4.5	3.8
84	Grande Dixence	1	245	580	825	220	599	819	-10.1	3.2	-0.7	2.3	2.3
	Schweiz	283	19849	15376	35225	18967	16925	35892	-4.4	10.1	1.9	100.0	100.0

Pessimistisch

			Prod 1980-2009 [GWh]			Prod 2021-2050 [GWh]			rel. Änderung [%]			Anteil an Prod CH [%]	
Klasse	Generelle Beschreibung	n	So	Wi	Ja	So	Wi	Ja	So	Wi	Ja	1980-2009	2021-2050
11	Jurassische Wasserkraftwerke	20	224	276	500	214	282	496	-4.5	2.3	-0.8	1.4	1.4
12	Laufkraftwerke im Berner Oberland und am Alpenrhein	19	796	413	1210	747	481	1228	-6.2	16.3	1.5	3.4	3.5
13	Laufkraftwerke in der Zentralschweiz und den Fribourger Alpen	14	428	402	830	406	435	842	-5.0	8.3	1.5	2.4	2.4
14	Höher gelegene Laufkraftwerke im Tessin und westlichen Wallis	4	144	79	224	137	96	234	-4.8	21.9	4.6	0.6	0.7
15	Mittelgrosse Laufkraftwerke Alpennordhang	52	739	634	1373	679	668	1347	-8.1	5.3	-1.9	3.9	3.8
18	Kraftwerke im Südtessin	2	14	12	25	13	11	24	-7.9	-5.0	-6.6	0.1	0.1
22	Kraftwerke ähnlich der Fallstudie Wasserkraftwerke Prättigau	28	2101	928	3030	2109	1175	3284	0.4	26.5	8.4	8.6	9.2
23	Kraftwerke im Glarnerland	43	1457	871	2328	1356	984	2340	-6.9	12.9	0.5	6.6	6.6
24	Kleinere Kraftwerke Südwallis, Gotthardgebiet und Engadin	39	2763	2008	4771	2599	2290	4890	-5.9	14.1	2.5	13.5	13.8
25	Kraftwerke ähnlich der Fallstudie Kraftwerk Löntsch	8	215	91	306	208	100	308	-3.3	9.3	0.5	0.9	0.9
26	Mittelgrosse Kraftwerke im Tessin	6	361	197	558	331	221	552	-8.4	12.4	-1.0	1.6	1.6
27	Kraftwerke im nordöstlichen Tessin	3	499	358	857	446	377	824	-10.6	5.4	-3.9	2.4	2.3
32	Kraftwerke im Aletschgebiet	4	701	85	786	701	105	806	0.0	23.7	2.5	2.2	2.3
34	Kraftwerke ähnlich der Fallstudie Kraftwerk Mattmark	3	455	426	881	409	439	848	-10.1	3.2	-3.7	2.5	2.4
41	Kraftwerke am Rhein (Birsfelden-Rekingen)	9	2157	1670	3827	2071	1837	3907	-4.0	10.0	2.1	10.9	11.0
51	Kraftwerke an der Aare	11	980	795	1774	911	866	1777	-7.0	9.0	0.2	5.0	5.0
52	Kraftwerke am Rhein (Rekingen-Schaffhausen)	4	504	405	909	471	454	924	-6.6	12.1	1.7	2.6	2.6
54	Kraftwerke an der Rhone	4	622	452	1074	581	507	1088	-6.6	12.1	1.3	3.0	3.1
55	Kraftwerk Kallnach-Niederried (Aare)	1	85	53	138	79	58	137	-7.0	9.0	-0.9	0.4	0.4
62	Kraftwerke Vorder- und Hinterrhein	2	1270	985	2255	1228	1076	2305	-3.3	9.3	2.2	6.4	6.5
64	Emosson, Maggia, Engadiner Kraftwerke und Mauvoisin	4	1768	2495	4263	1636	2681	4317	-7.4	7.4	1.3	12.1	12.2
67	Officine Idroelettriche di Blenio	1	411	485	896	370	500	870	-10.1	3.2	-2.9	2.5	2.4
72	Kraftwerke Oberhasli	1	910	677	1587	681	683	1363	-25.2	0.8	-14.1	4.5	3.8
84	Grande Dixence	1	245	580	825	220	599	819	-10.1	3.2	-0.7	2.3	2.3
	Schweiz	283	19849	15376	35225	18604	16925	35529	-6.3	10.1	0.9	100.0	100.0

Tabelle 3. Veränderung der mittleren Produktionserwartung für die Periode 2021–2050 nach Kraftwerk-Klima-Klasse (aufsummiert). Erklärung für «Optimistisch» und «Pessimistisch» siehe Bild 2.

im Tessin wird mehrheitlich mit einer leichten Abnahme der Produktion gerechnet (18, 27, 67). Auf die Schweiz hochgerechnet ergibt sich eine leicht positive mittlere Produktionserwartung für die Periode 2021–2050 zwischen 0.9% (pessimistisch) und 1.9% (optimistisch). Die Anteile der jeweiligen Kraftwerk-Klima-Klassen an der gesamtschweizerischen Stromproduktion ändern sich nicht massgeblich.

Interessant sind die Veränderungen im Sommer- und Winterhalbjahr: Die sommerlichen Produktionserwartungen nehmen bei den meisten Klassen ab (mehrheitlich zwischen –3 und –10%). Abnahmen betreffen Kraftwerke ähnlich der Fallstudie Mattmark (Klasse 34), Laufkraftwerke an grösseren Flussgebieten (41, 51, 52, 54, 55), das Kraftwerk Officine Idroelettriche di Blenio (67), sowie die Kraftwerke Oberhasli (72) und Grande Dixence (84). Im pessimistischen Fall sind die sommerlichen Abnahmen bei den meisten Kraftwerk-Klima-Klassen deutlicher. Auf die Schweiz hochgerechnet beträgt die Abnahme in der mittleren Produktionserwartung im Sommer zwischen 4.4% (optimistisch) und 6.3% (pessimistisch) gegenüber dem aktuellen Ausbaustand.

Für Winter wird bei den meisten Kraftwerken eine Zunahme der mittleren Produktionserwartung für die Periode 2021–2050 erwartet. Die Zunahmen bewegen sich zwischen 2 und 26%. Einzig bei zwei Kraftwerken im Südtessin (Klasse 18) muss mit Abnahmen um 5% gerechnet werden. Auf die Schweiz hochgerechnet ergibt sich eine projizierte Zunahme der Energieproduktion im Winter um 10.1%.

4. Diskussion

Die Projektionen für 2021–2050 zeigen, dass die mittleren jährlichen Produktionserwartungen nicht wesentlich verschieden sein werden im Vergleich zu den Verhältnissen 1980–2009. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass es zu einer saisonalen Verschiebung des Wasserangebots vom Sommer- ins Winterhalbjahr kommt. Betrachtet man lediglich die projizierten Veränderungen bei den natürlichen Abflüssen, kann die saisonale Verschiebung vor allem bei (hoch-)alpinen Gewässern festgestellt werden. Nach Hänggi et al. (2011a) sind jene Gewässer besonders von der Klimaänderung betroffen, deren Abflussmengen massgeblich durch die Gletscher- und/oder Schneeschmelze beeinflusst sind. Gewässern in tieferen Lagen im Mittelland, in denen der Niederschlag das Abflussgeschehen dominiert, sind weniger anfällig auf die Klimaänderung. In diesen Regionen bleiben, selbst bei einem starken Anstieg der Verdunstungsraten, auch in der Periode 2021–2050 die Niederschlagsmengen von grösserer Bedeutung. Über einen längeren Zeitraum hinaus, z.B. bis zur Periode 2070–2099, gelten die oben beschriebenen Aussagen nicht. Modellrechnungen zeigen, dass aus vergletscherten Gebieten die Abflussmengen signifikant abnehmen werden, einhergehend mit dem Rückzug der Gletscher bis Ende des Jahrhunderts (Paul et al., 2011; Bauder und Farinotti, 2011) und einer Abnahme der sommerlichen Niederschlagsmengen (Bosshard et al., 2011a). Zudem wird davon ausgegangen, dass durch die ansteigenden Temperaturen die Verdunstungsraten noch stärker zunehmen werden, und somit das Wasserangebot weiter vermindert wird, insbesondere in den Sommermonaten.

Für die Schweiz wurden die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung vom Bundesamt für Energie für die Studie Energieperspektiven 2035 (BFE, 2007) abgeschätzt. Diese Abschätzungen wurden ebenfalls in einer Untersuchung der beiden Bundesämter für Umwelt und Energie zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf die schweizerische Volkswirtschaft aufgenommen (BAFU/BFE, 2007). Über das Jahr gesehen gehen die Studien davon aus, dass die schweizerische Wasserkraft bis 2035 klimabedingt im Mittel mit Produktionseinbussen um rund 7% rechnen muss. Der projizierte Verlust basiert dabei auf einer Untersuchung, in welcher die natürlichen Abflussmengen aus elf alpinen Einzugsgebieten für die Periode 2020–2049 abgeschätzt wurden (Horton et al., 2005). Als Antrieb für das hydrologische Modell dienten Klimaprojektionen aus dem EU-Projekt PRUDENCE (Christensen et al., 2002), welche geltend für den Zeitraum 2070–2099 auf den Zeitraum 2020–2049 zurückskaliert wurden. Die Resultate zeigen einerseits signifikante Abnahmen in den Jahresabflussmengen, andererseits erwartet man höhere Abflussmengen im Winter und tiefere im Sommer, resultierend in ausgeglichenen Abflussregimes. Die Resultate der Fallstudien des Projektes Klimaänderung und Wasserkraftnutzung (SGHL und CHy, 2011) zeigen aber, dass eine Hochrechnung auf die Schweiz basierend allein auf Projektionen natürlicher Abflussmengen problematisch ist, da die natürlich anfallende Wassermenge nicht zwingend der für die Wasserkraft nutzbaren Menge entspricht. So muss auch zu den beiden oben genannten Studien BFE (2007) und BAFU/BFE (2007) erwähnt werden, dass rund 65% aller Einzugsgebiete der schweizerischen Wasserkraftwerke einen alpinen oder gar hochalpinen Charakter aufweisen (BFE, 2011).

Die hier dargestellte Hochrechnung einzelner Studienresultate auf die Schweiz berücksichtigt neben den Veränderungen in den natürlichen Abflussmengen auch die technische Auslegung der Wasserkraftanlagen, die Unterscheidung zwischen Lauf- und Speicherkraftwerken und die Grösse der Einzugsgebiete der einzelnen Anlagen. Die Hochrechnung ist somit robuster in Bezug auf die projizierten Veränderungen. Eine detailliertere Hochrechnung wäre möglich, wenn zusätzlich der Fokus auf diejenigen Kraftwerk-Klima-Klassen gelegt würde, welche überdurchschnittlich zur schweizerischen Stromproduktion aus Wasserkraft beitragen. Dies wären die Klassen 23 (Kraftwerke im Glarnerland, 6.6%), 24 (Kraftwerke Südwallis, Gotthardgebiet und Engadin, 13.5%), 41 (Kraftwerke am Rhein von Birsfelden bis Rekingen, 10.9%), 51 (Kraftwerke an der Aare, 5.0%), 62 (Kraftwerke Vorder- und Hinterrhein, 6.4%), 64 (Emosson, Maggia, Engadiner Kraftwerke und Mauvoisin, 12.1%) und 72 (Kraftwerke Oberhasli, 4.5%). Die sieben genannten Kraftwerk-Klima-Klassen decken rund 60% der gesamtschweizerischen Stromproduktion ab. Des Weiteren würden detaillierte Studien bei Kraftwerken im Tessin einen Mehrwert erbringen, da für diesen Teil der Schweiz keine Fallstudie durchgeführt wurde. Die bestehenden Abschätzungen der Veränderungen für die Alpensüdseite basieren mehrheitlich auf den projizierten Veränderungen in den natürlichen Abflussmengen, wobei eine leichte Abnahme der Stromproduktion erwartet wird.

Eine österreichisch Studie kommt zu ähnlichen Ergebnissen wie hier vorgestellt (Schöner et al., 2011). Demnach ändert sich das jährliche theoretische Wasserkraftpotenzial 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2006 im Nachbarland nicht wesentlich. Für Winter wird eine Zunahme um rund 20% projiziert, für Sommer eine Abnahme zwischen 10 und 20%. Für ausgewählte Donaukraftwerke wird eine leichte Zunahme in der Jahresproduktion zwischen 0.5 und 2.5% erwartet (2021–2050 im Vergleich zu 1976–2006).

5. Schlussfolgerungen

Um die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung abzuschätzen, müssen neben den Veränderungen in den natürlichen Abflussmengen auch die

technischen Kenngrössen der Kraftwerke berücksichtigt werden. Mit Hilfe der Datenbank HYDROGIS (Balmer, 2011) wurden hier die Resultate aus dem Projekt Klimaänderung und Wasserkraftnutzung (SGHL und CHy, 2011) auf die Schweiz hochgerechnet. Im Vergleich zu früheren Studien projizieren die Resultate der robusteren Hochrechnung für die gesamte Schweiz folgende Veränderungen in den mittleren Produktionserwartungen 2021–2050 gegenüber den Verhältnissen 1980–2009:

- Winterproduktion (Oktober–April): +10.1%
- Sommerproduktion (Mai–September): –4.4 bis –6.3%
- Jahresproduktion (Oktober–September): +0.9 bis +1.9%

Aus regionaler Sicht muss im Tessin mit leichten Produktionseinbussen bei den Wasserkraftwerken gerechnet werden. Weitere detaillierte Untersuchungen zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung sind vor allem bei denjenigen Anlagen wichtig, welche überdurchschnittlich zur Gesamtproduktion beitragen.

Danksagung

Die Studie ist Teil des Projektes Klimaänderung und Wasserkraftnutzung in der Schweiz des Netzwerks Wasser im Berggebiet, finanziert von Swisselectric Research und dem Bundesamt für Energie (SGHL und CHy, 2011).

Literatur

BAFU/BFE 2007: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse). Bundesamt für Umwelt BAFU und Bundesamt für Energie BFE. Bern.

Bahrenberg, G., Giese, E. und *Nipper, J.* 2003: Multivariate Statistik. Stuttgart: Borntraeger Studienbücher der Geographie, Bd. 2, Ed. 2, Nachdr.

Balmer, M. 2011 (Fertigstellung Dez. 2011): Nachhaltigkeitsbezogene Typologisierung der schweizerischen Wasserkraftanlagen – GIS-basierte Clusteranalyse und Anwendung in einem Erfahrungskurvenmodell. Dissertation der ETH Zürich.

Bauder, A. und *Farinotti, D.* 2011: Veränderungen der Gletscher und ihrer Abflüsse – Fallstudien Gorner und Mattmark. Fachbericht für die Synthese des Projektes Klimaänderung und Wasserkraftnutzung. Bern.

Begert, M. 2008: Die Repräsentativität der Stationen im Swiss National Basic Climatological Network (Swiss NBCN). Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 217. Zürich.

Bernhard, L. et al. 2011: Klimaänderung und natürlicher Wasserhaushalt des Alpenrheins und der Engadin. Technical report zum Adapt Alp WP4 Water Regime.

BFE 2007: Die Energieperspektiven 2035 – Band 1: Synthese. Bundesamt für Energie BFE. Bern.

BFE 2011: Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2010. Bundesamt für Energie BFE, Bern.

BFE 2011b: Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz. Bundesamt für Energie BFE, Bern.

BFS 1997: Arealstatistik der Schweiz 1992/97. Bundesamt für Statistik BFS, Bern.

Bosshard, T. et al. 2011a: Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 8, 1161–1192, doi:10.5194/hessd-8-1161-2011

Bosshard, T. 2011b: Hydrological climate-impact modelling in the Rhine catchment down to Cologne. Dissertation ETH Zürich.

Christensen, J. H., Carter, T. R. und *Giorgi, F.* 2002: PRUDENCE employs new methods to assess European Climate Change. In: EOS Transactions American Geophysical Union 82.13, S. 147. doi: 10.1029/2002EO000094.

Hänggi, P. et al. 2011b: Einfluss der Klimaänderung auf die Stromproduktion der Wasserkraftwerke im Prättigau 2021–2050. Fachbericht für die Synthese des Projektes Klimaänderung und Wasserkraftnutzung.

Hänggi, P. et al. 2011c: Einfluss der Klimaänderung auf die Stromproduktion des Wasserkraftwerks Löntsch 2021–2050. Fachbericht für die Synthese des Projektes Klimaänderung und Wasserkraftnutzung.

Hänggi, P., Bosshard, T. und *Weingartner, R.* 2011a: Swiss discharge regimes in a changing climate. In: Auswirkungen der hydroklimatischen Variabilität auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz. Dissertation von P. Hänggi. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.

Horton, P. et al. 2005: Prediction of climate change impacts on Alpine discharge regimes under A2 and B2 SRES emission scenarios for two future time periods. Bern: Bundesamt für Energie BFE.

Linden v. d., P. und *Mitchell, J. F. B.* 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Fitzroy Road, Exeter EX1 3PB, UK.

Maniak, U. 2005: Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. 5., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Paul, F., Linsbauer, A. und *Haeberli, W.* 2011: Grossräumige Modellierung von Schwundszenarien für alle Schweizer Gletscher. Fachbericht für die Synthese des Projektes Klimaänderung und Wasserkraftnutzung. Bern.

Pralong, M. et al. 2011: Klimaänderung und Wasserkraft-Fallstudie Mattmark AG. Fachbericht für die Synthese des Projektes Klimaänderung und Wasserkraftnutzung.

Schöner, W. et al. 2011: Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Hrsg. vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien.

Sevruk, B. und *Kirchhofer, W.* 1992: Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen 1951–1980. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.2. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.

SGHL und *CHy* 2011: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung-Sythesebericht. Hrsg. von Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL) und Schweizerische Hydrologische Kommission (CHy). In: Beiträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 38. Bern.

Stähli, M. et al. 2011: Klimaänderung und Wasserkraft – Fallstudie Kraftwerke Oberhasli AG. Fachbericht für die Synthese des Projektes Klimaänderung und Wasserkraftnutzung.

Swisstopo 2011: Digitales Höhenmodell 25 m DHM25. Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Bern.

Wilks, D. S. 2006: Statistical methods in the atmospheric sciences. 2nd ed. Elsevier, Amsterdam.

Anschrift der Verfasser

Pascal Hänggi[1], *Rolf Weingartner*[1], *Markus Balmer*[2]

[1] Geographisches Institut und Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern, CH-3000 Bern

[2] BKW FMB Energie AG, Viktoriaplatz 2 CH-3000 Bern