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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 103 (2011)

Heft: 4

Artikel: Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit und Stromproduktion an den Beispielen Oberhasli und Mattmark

Autor: Stähli, Manfred / Raymond-Pralong, Mélanie / Zappa, Massimiliano

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941822

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: 10.12.2025

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

Literatur

Badoux, A., D. Rickenmann (2008). Berechnungen zum Geschiebetransport während der Hochwasser 1993 und 2000 im Wallis, «Wasser Energie Luft», 100, 217–226.

Bathurst, J. C., W.H. Graf, H.H. Cao (1987). Bed load discharge equations for steep mountain rivers, in Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers, edited by C. R. Thorne, J. C. Bathurst, and R. D. Hey, pp. 453–477, John Wiley, New York.

Beer, A. (2009). Einfluss des Klimawandels auf den Sedimenttransport in Einzugsgebieten alpiner Stauhaltungen – Konzeptionelles Modell und Feldstudie im Turtmanntal. Diplomarbeit an der WSL Birmensdorf und der Universität Karlsruhe (KIT).

Chiari, M., Rickenmann, D. (2011). Back-calculation of bedload transport in steep channels with a numerical model. Earth Surface Processes and Landforms, 36, 805–815. DOI: 10.1002/esp.2108.

Chiari, M., D. Rickenmann (2011). Back-calculation of bedload transport in steep channels with a numerical model, Earth Surface Processes and Landforms, 36, 805–815.

Meyer-Peter, E., R. Mueller (1948). Formulas for bedload transport. In Proceedings of the 2nd meeting of the International Association of Hydraulic Structures Research, Stockholm, Sweden; 39–64.

Nitsche, M., D. Rickenmann, J.M. Turowski, A. Badoux, J.W. Kirchner (2011). Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for macro-roughness in steep mountain streams, Water Resour. Res., 47, W08513, doi:1 0.1029/2011WR010645

Raymond Pralong, M., J.M. Turowski, A. Beer, D. Rickenmann, V. Métraux, T. Glassey (2011). Wallis, Wasserkraft, Klimawandel: Auswirkung der Klimaänderung auf die Geschiebefracht – Sektorielle Studie Wallis, Modul D. Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL) und Hydrologische Kommission (CHy) (Hrsg.) 2011. Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung – Synthesebericht. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 38, 28 S., Bern. http://www.hydrologie.unibe.ch/projekte/ccwasserkraft.html

Rickenmann, D. (1990). Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Mitteilung Nr. 103 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie, Glaziologie, ETH Zürich.

Rickenmann, D., A. Recking (2011). Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field dataset. Water Resources Research.

Rickenmann, D., M. Chiari, K. Friedl (2006). SETRAC – A sediment routing model for steep torrent channels. In R. Ferreira, E. Alves, J. Leal & A. Cardoso (eds), River Flow 2006, Taylor & Francis, London, pp. 843–852.

Anschrift der Verfasser

Mélanie Raymond Pralong, Jens Martin Turowski, Dieter Rickenmann, Alexander Beer, Valentin Métraux, Thierry Glassey

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)

Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

Tel. +41 44 739 24 24, jens.turowski@wsl.ch

Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit und Stromproduktion an den Beispielen Oberhasli und Mattmark

Manfred Stähli, Mélanie Raymond-Pralong, Massimiliano Zappa, Andreas Ludwig, Frank Paul, Thomas Bosshard, Christian Dupraz

Zusammenfassung

Im Rahmen der SwissElectric Research Studie «Klimaänderung und Wasserkraft» wurde für den Stausee Mattmark und das gesamte Einzugsgebiet des Kraftwerks Oberhasli (KWO) berechnet, wie sich die natürlichen Wasserzuflüsse zu den Reservoiren mit den prognostizierten Klimaänderungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verändern werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Mächtigkeit der Schneedecke in beiden Gebieten in diesem Zeitraum mehr als halbieren wird. Infolge der saisonalen Vorverschiebung der Schneeschmelze um fünf bis acht Wochen wird die wasserarme Zeit länger. Die mittlere jährliche Abflussmenge dürfte im KWO-Gebiet um 3%±3% (Zeitraum 2021–50), resp. um 7%±6% (Zeitraum 2070–99) abnehmen; im Einzugsgebiet Mattmark um 6%±5% (2021–50), resp. um 12%±6% (Zeitraum 2070–99).

Berechnungen mit einer Kraftwerksoptimierungs-Software ergeben, dass die durch die Klimamodellketten bedingte Unsicherheit grösser ist als die Änderung der jährlichen Produktion, resp. des jährlichen Umsatzes. Übereinstimmend wird jedoch vorausgesagt, dass als Folge des sich ändernden Abflussregimes die Produktion im Winter leicht zunehmen wird, im Sommer jedoch deutlich abnehmen wird. Ebenso haben diese hydrologischen Änderungen Auswirkungen auf die Revisionsplanung.

1. Einleitung

Die prognostizierte Klimaänderung wird die Schneedecke und Gletscher in alpinen Einzugsgebieten nachhaltig verändern. Dies wird Auswirkungen auf die natürlichen Zuflüsse zu den Speicherseen und Wasserfassungen der Kraftwerkanlagen haben. Wie gross sind diese und was bedeuten sie konkret für die Stromproduktion und den Umsatz?

Vier Fallstudien im Rahmen des swisselectric research/BfE-Projekts «Klimaänderung und Wasserkraftnutzung» sind dieser Frage nachgegangen. Dabei wurde eine einheitliche Methodik verwendet, welche in Abschnitt 2 erläutert wird.

Der vorliegende Bericht fasst die wichtigsten Ergebnisse der Fallstudien Oberhasli und Mattmark zusammen. Für die Resultate der beiden anderen Fallstudien – Göscheneralp und Gougra – wird auf die Internetseiten http://www.hydrologie.unibe.ch/projekte/ccwasserkraft.html verwiesen.

2. Modellierungsmethodik

Die Ergebnisse dieser Fallstudie basieren auf regionalen Klimamodelldaten des europäischen Projektes ENSEMBLES, welche alle vom Emissionsszenario A1B (moderate Erwärmung) ausgehen. Diese umfassen zehn verschiedene Modellketten von Globalen Zirkulationsmodellen (GCM) und Regionalen Klimamodellen (RCM) und widerspiegeln die Unsicherheits-Bandbreite der Klimamodelle.

Um die erwarteten lokalen Klimaänderungen in den Fallstudiengebieten abzubilden, wurden für alle relevanten MeteoSchweiz-Messstellen Jahresgänge der Temperatur- und Niederschlagsänderung für die Zeiträume 2021–2050 (nahe Zukunft) und 2070–2099 (ferne Zukunft) relativ zur Kontrollperiode 1980–2009 berechnet. Diese statistische Downscaling-Methode wird auch Delta-change-Ansatz genannt (Bosshard et al., 2011).

Bezüglich Vergletscherung wurde für die beiden Zukunftsszenarien die Gletscherfläche von 1985 mit einem Modell von Paul et al. (2007) in Fünf-Jahres-Schritten kontinuierlich reduziert. Das Modell basiert auf der einfachen Annahme, dass die Gleichgewichtslinie entsprechend der Lufttemperaturerhöhung ansteigt, sich dadurch das Akkumulationsgebiet der Gletscher verkleinert und sich die Gletschergrösse nach 50 Jahren an die neuen Bedingungen angepasst hat.

Für die Abflussberechnung wurde die neue Gitterversion des hydrologischen Modells PREVAH (Viviroli et al., 2009 a) mit regionalisierten Parametern von Viviroli et al. (2009 b und c) aufgesetzt (Gittergrösse = 200 m). Anhand von gemessenen Zuflussdaten bei den Wasserfassungen wurden die Modellparameter optimiert. Danach wurden für die Kontrollperiode 1980–2009 in täglicher Auflösung folgende hydrologischen Grössen berechnet: Niederschlag, Verdunstung, Schneewasserwert, Eis- und Schneeschmelze, Bodenwasserspeicher und Abfluss. Dazu wurden die gemessenen meteorologischen Grössen der nahegelegenen MeteoSchweiz-Stationen über das Einzugsgebiet hinweg interpoliert.

Für die beiden Zukunftsszenarien wurden die Modellparameter unverändert wie bei der Kontrollsimulation beibehalten. Die Temperatur- und Niederschlagsmesswerte der Kontrollperiode wurden stationsweise mit den prognostizierten täglichen Änderungen (Delta change) korrigiert. Somit entstanden zwei neue 30-jährige Zeitreihen mit ähnlicher Variabilität, wie sie in der Kontrollperiode beobachtet worden war, aber mit den erwarteten saisonalen Veränderungen.

Abschliessend wurden die Ergebnisse des hydrologischen Modells PREVAH – insbesondere der simulierte natürliche Abfluss aus den Teileinzugsgebieten (Tageswerte) – als Input in eine Kraftwerkoptimierungssoftware eingegeben. Damit wurde für die Zukunftsszenarien die Änderung der Produktion, resp. des Umsatzes unter den heutigen Strommarkt-Randbedingungen berechnet.

3. Beschreibung der Einzugsgebiete und Kraftwerkanlagen

3.1 KWO

Das Einzugsgebiet der KWO *(Bild 1)* erstreckt sich von Innertkirchen (Kanton Bern; 630 m ü.M.) hinauf bis zum Finsteraarhorn (4274 m ü.M.) und umfasst eine Fläche von 450 km^2. Grosse Teile der Landschaft weisen alpinen Charakter auf, mit vergletscherten Gebieten in höheren Lagen (Unteraar-, Oberaar-, Triftgletschter usw.). Unterhalb der nivalen Höhenstufe sind vom Gletscher geschliffene Felsoberflächen und flachgründige Böden mit einfacher Vegetation verbreitet, welche zu einer insgesamt geringen Wasserspeicherkapazität führen. Der geologische Untergrund setzt sich im Wesentlichen aus den Graniten und Gneisen des Aarmassivs zusammen. Nördlich des Gadmentals sind zudem Sedimente der helvetischen Decken aufgeschlossen. Gemittelt über das Gebiet fallen pro Jahr im Durchschnitt 2170 mm Niederschlag (Periode 1980–2009). Diese Summe scheint relativ hoch, wenn man sie mit den Jahresniederschlägen an den Stationen Guttannen (1614 mm) oder Meiringen (1351 mm) vergleicht. Die Station Grimsel-Hospiz (2094 mm) bestätigt aber den starken Niederschlagsgradienten mit der Höhe (von ca. 5% pro 100 m). Dieser ist auch mit verschiedenen ausführlichen Studien in einem benachbarten Gebiet von Farinotti et al. (2010) und Magnusson et al. (2011) gut belegt. Somit ergibt sich für das gesamte Einzugsgebiet ein Jahresvolumen von knapp 1000 Mio. m^3 Wasser.

Für diese Studie wurde das gesamte KWO-Gebiet in elf Teileinzugsgebiete unterteilt. Vier davon sind nur zu einem geringen Anteil vergletschert: Haslital, Gadmen, Ürbach und Gental. Die Teileinzugsgebiete mit dem aktuell grössten Gletscheranteil sind Trift und Gauli.

Kraftwerkanlage: Seit der Inbetriebnahme des Kraftwerks Handeck 1 im Jahre 1932 wurden die Anlagen in mehreren Bauetappen ausgebaut und erneuert (www.grimselstrom.ch). Zur Zeit sind neun Kraftwerke in Betrieb. Die acht Speicherseen bieten gesamthaft Platz für 195 Mio m^3 Wasser, was 20 Prozent des jährlichen Gebietsniederschlags entspricht. Die auf die verschiedenen Kraftwerke verteilten 26 Turbinen produzieren eine jährliche Gesamtenergie von 2350 GWh bei einer durchschnittlichen Leistung von 1150 MW.

3.2 Mattmark

Das Einzugsgebiet des Stausees Mattmark *(Bild 1)* umfasst eine Fläche von 88.2 km^2. Neben dem natürlichen Einzugsgebiet von 37.1 km^2 werden dem Stausee Mattmark die links- und rechtsufrigen Seitenbäche der Saaser Vispa mit einem Einzugsgebiet von 51.1 km^2 zugeleitet (inkl. Almagellerbach [13.1 km^2] und Triftbach [13.0 km^2]). Der Stausee liegt auf 2197 m ü.M. Das untersuchte Einzugsgebiet erreicht eine maximale Höhe von 4143 m ü.M. (östlich des Strahlhorns). Gletscher wie der Schwarzberg-, Allalin- und Hohlaubgletscher prägen das alpine Landschaftsbild. Unterhalb der nivalen Höhenstufe sind vom Gletscher geschliffene Felsoberflächen und flachgründige Böden mit einfacher Vegetation verbreitet, welche zu einer insgesamt geringen Wasserspeicherkapazität führen. Im südlichen Teilgebiet setzt sich der geologische Untergrund vorwiegend aus Gneisen und untergeordnet aus basischen Gesteinen zusammen. Nördlich von Saas Almagell dominieren Glimmerschiefer.

Der jährliche Niederschlag beträgt im Mittel 1310 mm. Für das Einzugsgebiet des Stausees Mattmark ergibt dies ein Jahresvolumen von 115 Mio. m^3 Wasser.

Für die betrieblichen Berechnungen mit der Kraftwerkoptimierungssoftware wurden zudem diejenigen Einzugsgebiete hydrologisch modelliert, welche ins Ausgleichsbecken Zermeiggern entwässern. Diese liegen nordwestlich des Stausees und weisen insgesamt eine Fläche von 74 m^2 auf.

Kraftwerkanlage: Der seit 1969 betriebene Stausee Mattmark fasst ein Volumen von 100 Mio m^3 Wasser. Hinunter zum Kraftwerk Zermeiggern bei Saas Almagell legt das Wasser eine Höhendifferenz von maximal 459 m zurück. Die Leistung dieses Kraftwerks liegt bei 74 MW. Die angegliederte Pumpstation Zermeiggern ermöglicht die Rückführung des Wassers in den Stausee Mattmark, bzw. die Einlagerung aus dem Zwischeneinzugsgebiet. Das übrige Wasser wird zum Kraftwerk Stalden auf rund 700 m ü.M. geleitet. Die Leistung des Kraftwerks Stalden beträgt 185 MW. Zusammen mit dem kleinen Kraftwerk Saas Fee führt dies zu einem Total von 260.5 MW.

4. Prognostizierte Änderung der Schneedecke und Gletscher in den beiden Gebieten

Die erwartete Temperaturerhöhung wird in beiden Einzugsgebieten zu einer bedeutenden Veränderung der Schneedecke führen *(Bild 2)*. Das jährliche Schneewasserspeicher-Maximum wird sich zwar zeitlich nur geringfügig nach vorne verschieben (~2 Wochen für den Zeitraum 2070–2099). Mengenmässig wird aber eine durchschnittliche Reduktion des jährlichen Schneewassermaximums (je nach Klimamodellkette) von 20 bis 50% für den Zeitraum 2021–50, resp. von 50 bis 70% für den Zeitraum 2070–99 erwartet. Die Streuung der jährlichen maximalen Schneewassermenge zwischen schneearmen und schneereichen Wintern bleibt für den Zeitraum 2021–50 ähnlich gross wie bisher, nimmt dann aber für den Zeitraum 2070–99 markant ab. Das heisst, dass dann auch in eher seltenen, schneereichen Wintern keine grössere Schneewassermenge als 1000 mm zu erwarten sein wird.

Zur Zeit sind beide Einzugsgebiete in den meisten Jahren den ganzen Sommer hindurch teilweise schneebedeckt. Für die Zukunft nimmt die Wahrscheinlichkeit für ein komplettes Abschmelzen der Schneedecke im ganzen Einzugsgebiet stark zu. In einem durchschnittlichen Jahr wird für den Zeitraum 2070–99 (je nach Klimamodellkette) eine komplette Ausaperung von Juli bis Oktober vorausgesagt. Nach besonders schneearmen Wintern muss bereits im Zeitraum 2021–50 mit einem komplett schneefreien Einzugsgebiet von Juni bis November gerechnet werden. Die für die Erhaltung der Gletscher wichtige Bildung von «ewigem» Schnee ist nicht mehr gewährleistet. Winter ganz ohne Schnee wird es in beiden Gebieten – gemäss den vorliegenden Simulationen – auch für den Zeitraum 2070–99 keine geben.

Für den Zeitraum 2021–50 verringert sich der Beitrag der Schneeschmelze im Einzugsgebiet Mattmark durchschnittlich um knapp 130 mm (±40 mm) pro Jahr gegenüber der Referenzperiode und um rund 300 mm (±60 mm) pro Jahr für den Zeitraum 2070–99. Im Einzugsgebiet der KWO ist die entsprechende Abnahme etwas grösser, d.h. rund 180 mm (±65 mm) pro Jahr für den Zeitraum 2021–50, und rund 425 mm (±85 mm) pro Jahr für den Zeitraum 2070–99. Anteilmässig macht das für die höher gelegenen KWO-Teileinzugsgebiete ~20% (2020–50), resp. ~45% (2070–99) aus, und für die tiefer gelegenen Gebiete ~32% (2020–50), resp. ~80% (2070–99).

Auch die Vergletscherung wird sich in beiden Einzugsgebieten spürbar verringern. Für das Einzugsgebiet der KWO wurde 1985 eine Gletscherfläche von 103.2 km^2 berechnet, was einem Flächenanteil von knapp 23% entspricht *(Tabelle 1)*. Zu diesem Zeitpunkt wiesen die Teileinzugsgebieten Grimsel (41.7%), Oberaar (35.5%), Gauli (49.5%), Stein (32.5%) und Trift (54.2%) die grösste Vergletscherung auf. Nur wenig vergletschert waren bereits damals die Teileinzugsgebiete Haslital, Gadmen und Gental.

Im Einzugsgebiet Mattmark wurde 1985 eine Gletscherfläche von 30.3 km^2 beobachtet, was einem Flächenanteil von 35.4% entspricht. Das damit verbundene Eisvolumen wurde von der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich (VAW) auf 1.1 km^3 geschätzt (Stand: 2008). In der Zeit von 1982 bis 2008 haben die Gletscher im Einzugsgebiet Mattmark einen Massenverlust von ca. 0.38 km^3 erfahren.

Mit der prognostizierten Temperaturerhöhung wird ein weiterer Rückgang der Gletscher erwartet. Unter Annahme des Emissionsszenarios A1B dürfte sich bis 2040 der Anteil der vergletscherten Fläche an der Gesamtfläche des KWO-Einzugsgebiets auf knapp 15% reduzieren (65.6 km^2). Für den Zeithorizont 2085 berechnet das Modell der Uni Zürich eine Reduktion auf 8% (36 km^2). Bis dann dürften die Teilgebiete Trift (–37.6%) und Gauli (–33.4%) die grösste Veränderung in der Vergletscherung (relativ zu 1985) erfahren. Zu diesem Zeitpunkt werden die Teileinzugsgebiete Grimsel, Gauli, Trift, Stein und Oberaar noch zu etwa 15–20% vergletschert sein.

Im Einzugsgebiet Mattmark dürfte sich bis zur Mitte des Zeitraums 2021–50 der Anteil der vergletscherten Fläche an der Gesamtfläche auf knapp 19% reduzieren (16.3 km^2). Für den Zeithorizont 2085

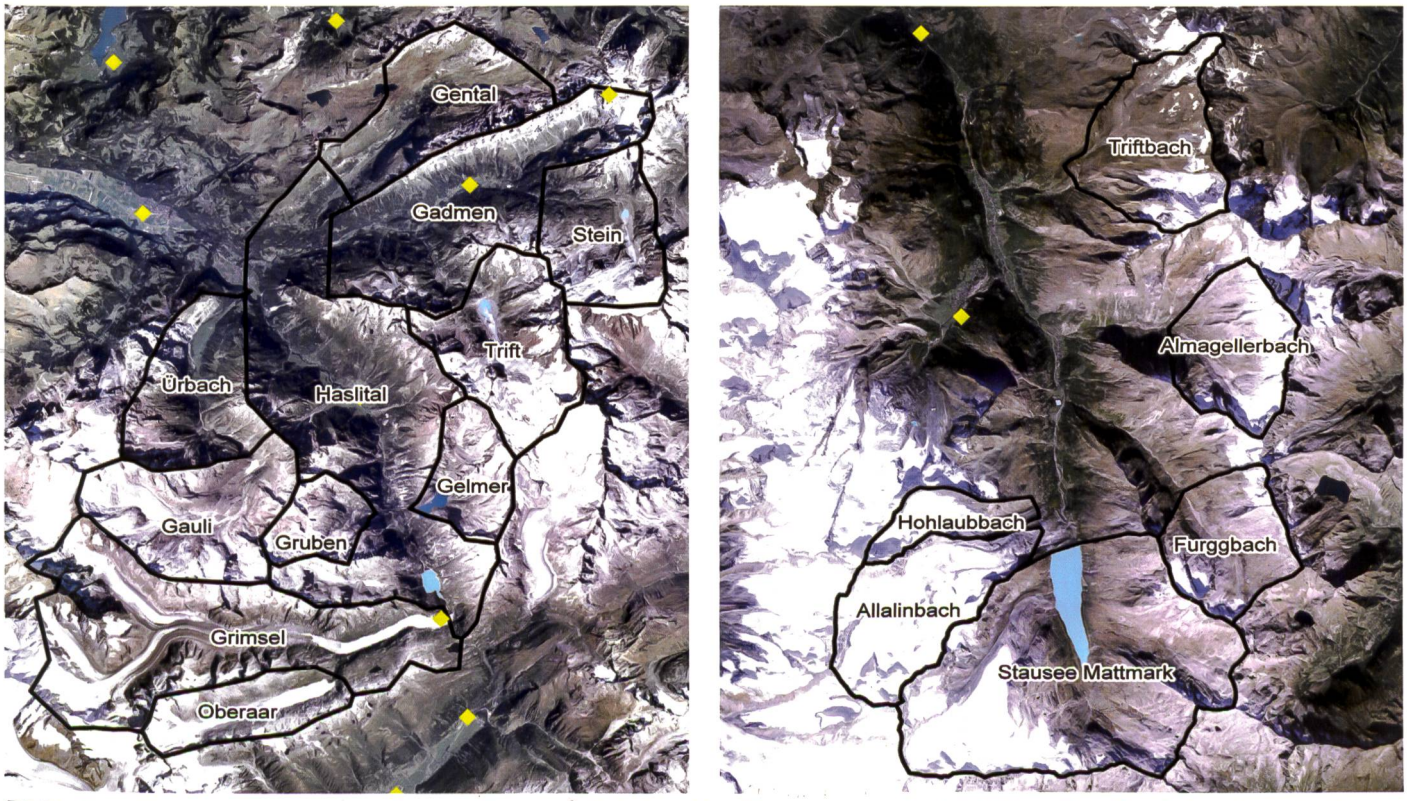

Bild 1. (Teil-)Einzugsgebiete des Kraftwerks Oberhasli (links) und des Mattmarksees (rechts). Die gelben Symbole zeigen die Standorte von verwendeten meteorologischen Daten.

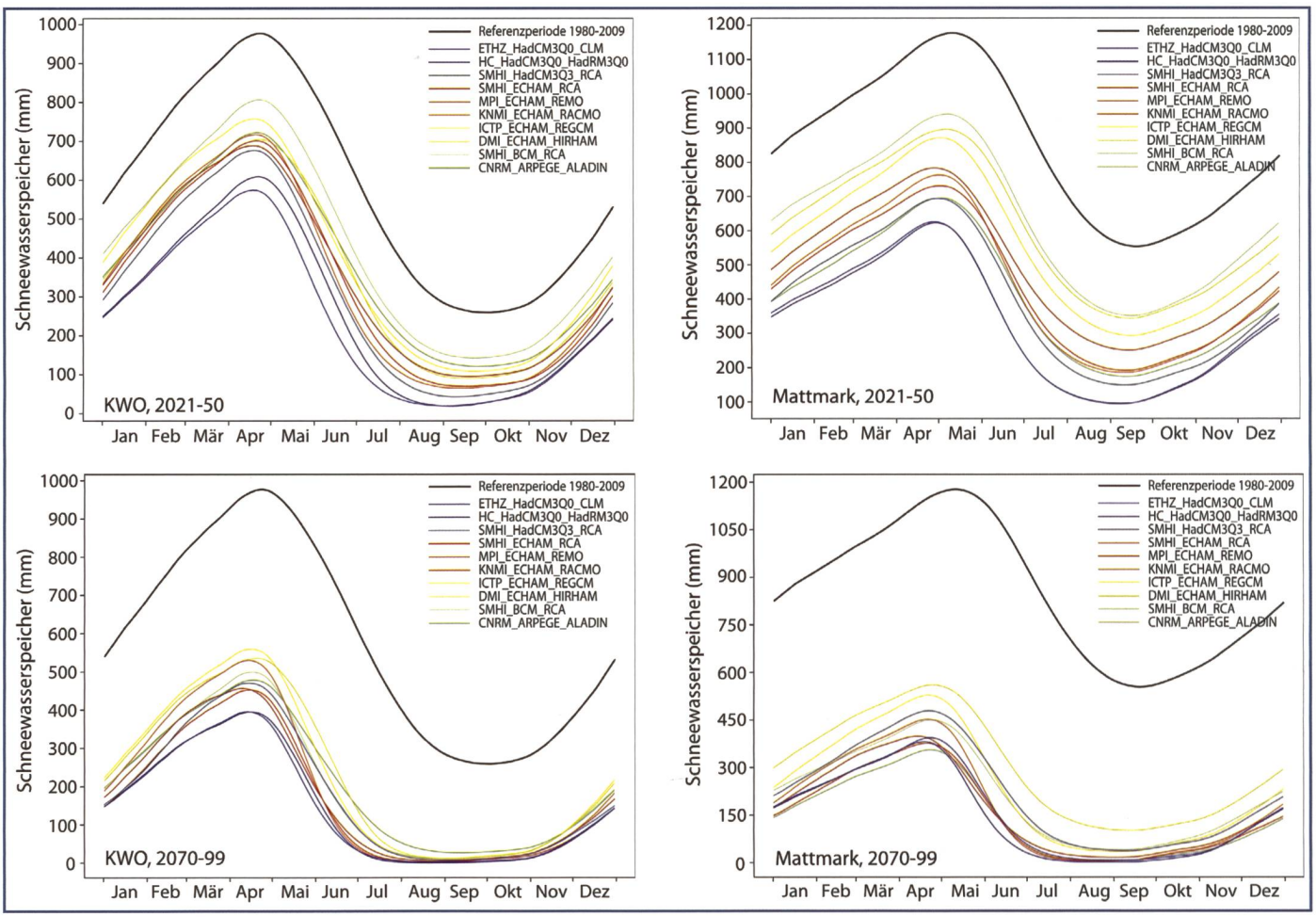

Bild 2. Berechnete Änderung der Klimatologie der mittleren Schneewassermenge in den Einzugsgebieten KWO (links) und Mattmark (rechts) für die Zeiträume 2021–50 (oben) und 2070–99 (unten) gegenüber der Referenzperiode 1980–2009 (schwarze Linie). Die verschiedenen farbigen Linien entsprechen zehn verschiedenen Klimamodellketten.

berechnet das Modell der Uni Zürich eine Reduktion auf 8.6% (7.4 km^2). Das Teileinzugsgebiet Almagellerbach wird (gemäss diesen Vorhersagen) bis Ende 21. Jahrhundert vollständig eisfrei sein.

5. Prognostizierte Änderung im natürlichen Zufluss zu den Reservoiren

Eine Änderung des Klimas wird sich auf sämtliche Komponenten der Wasserbilanz auswirken, also auch auf die Verdunstung und die Wasserspeicherung im Boden. Jährlich verdunsten im KWO-Einzugsgebiet ca. 13% des gesamten Jahresniederschlags. Im Einzugsgebiet Mattmark sind es etwa 20%. Diese Berechnung des Modells PREVAH ist zwar mit grosser Unsicherheit behaftet, weil man immer noch relativ wenig weiss über die Verdunstung in alpinen Einzugsgebieten, insbesondere was die Schneesublimation betrifft. Die Grössenordnung stimmt aber recht gut mit Angaben des hydrologischen Atlas der Schweiz überein (Tafel 4.1). Im Vergleich zur Unsicherheit im Modell und zum Anteil an der jährlichen Wasserbilanz sind die erwarteten Veränderungen in der Verdunstung unbedeutend. Bis zum Ende des Jahrhunderts berechnet das Modell eine Zunahme der jährlichen Verdunstung um 10–25 mm, was weniger als 10% der aktuellen Verdunstung entspricht.

Auch bezüglich der im Boden gespeicherten Wassermenge gibt es noch relativ grosse Unsicherheit. Doch angesichts der wenig entwickelten Böden in diesem alpinen Einzugsgebiet kann von einer allgemein geringen Bodenwasserspeicherung ausgegangen werden. Gemäss unseren Ergebnissen dürfte die Bodenwasserspeicherung in Zukunft nur unwesentlich zunehmen. Diese Zunahme wird eine Folge des Gletscherrückgangs und der damit verbundenen Freilegung des Gletschervorfelds sein. Solche Böden sind nach wie vor sehr speicherarm. Diese vorerst fels-dominierten Flächen entwickeln sich nur über sehr lange Zeit zu feinkörnigen, speicherfähigen Böden.

Als Gesamtergebnis der sich verändernden Teilkomponenten der Wasserbilanz (Gletscher, Schnee, Bodenwasserspeicher und Verdunstung) resultieren die in *Bild 3* dargestellten Jahresabflussganglinien für das gesamte KWO-Einzugsgebiet (links) und das gesamte Einzugsgebiet Mattmark (rechts). Für den Zeitraum 2021–50 werden sich in einem durchschnittlichen Jahr die höchsten Abflüsse mengenmässig

	KWO			Mattmark		
	1985	2040	2085	1985	2040	2085
Gletscherfläche (km^2)	103.2	65.6	36.0	30.3	16.3	7.4
Eisfreie Fläche (km^2)	346.9	384.5	414.1	55.6	69.6	78.5
Gletscherfläche (%)	22.9	14.6	8.0	35.4	18.9	8.6
Eisfreie Fläche (%)	77.1	85.4	92.0	64.6	81.1	91.4

Tabelle 1. Berechnete Änderung der Gletscherfläche in den Einzugsgebieten KWO und Mattmark.

kaum verändern. Sie werden aber ca. einen Monat früher eintreffen; d.h. anfangs Juni anstatt anfangs Juli. Diese zeitliche Vorverschiebung der höchsten Jahresabflusswerte wird sich für den Zeitraum 2070–99 noch weiter verstärken.

Im KWO-Einzugsgebiet wird der natürliche Jahresabfluss in einem Normaljahr (je nach Klimamodellkette) gegenüber der Referenzperiode um 3% (±3%, 2021–50), resp. um 7% (±6%, 2070–99) abnehmen. Im Einzugsgebiet Mattmark dürfte diese Abnahme noch etwas grösser ausfallen: um 6% (±5%) für den Zeitraum 2021–50, und um 12% (±6%) für den Zeitraum 2070–99. Die hohe Spannweite zeigt die Unsicherheit, welche durch die Fortpflanzung der zehn Klimaszenarien im hydrologischen System entsteht.

In extrem wasserreichen Jahren werden die hohen Abflüsse im Sommer für den Zeitraum 2021–50 wahrscheinlich leicht (bis zu 15%) zunehmen. Für den Zeitraum 2070–99 sind die verschiedenen Modellketten diesbezüglich widersprüchlich. In Jahren mit besonderer Wasserknappheit dürften sich die niedrigsten Abflüsse gegenüber der heutigen Situation nur geringfügig verändern. Unsere Simulationen sagen eine leichte Erhöhung im Frühling, sowie eine leichte Reduktion im Spätsommer voraus. Der niedrigste Abfluss wird aber auch in Zukunft im Winter eintreffen.

Eine grosse Unsicherheit besteht bei den Abflussberechnungen für die Herbst- und Wintermonate. Hier weichen die verschiedenen Modellketten stark von einander ab. Eindeutig ist aber der Trend zu höheren Abflüssen in diesen Jahreszeiten, wo künftig die Akkumulation der Schneedecke später beginnen und vermehrt Niederschlag in flüssiger Form vorkommen dürfte.

Unsere Berechnungen zeigen auch ganz klar, dass sich die Klimaänderung in den verschiedenen Teileinzugsgebieten sehr unterschiedlich stark auswirken wird. Im Gebiet der KWO zum Beispiel werden die heute kaum vergletscherten Gebiete, wie das Haslital oder das Gental, vor allem auf eine Änderung im Niederschlag reagieren. Andere Teileinzugsgebiete, wie z.B. Gelmer und Grueben, dürften bis zum Ende des 21. Jahrhunderts einen Grossteil der heutigen Gletscherfläche verlieren. Hier wird sich der natürliche Abfluss über die ganze Periode am deutlichsten verändern (–5 bis –13%). Ebenfalls eine bedeutende Abnahme des natürlichen Abflusses wird für die heute relativ stark vergletscherten Teileinzugsgebiete Trift und Grimsel vorausgesagt, wo der Gletscherrückgang flächenmässig beträchtlich ausfallen dürfte. Hier gehen unsere Berechnungen bis zum Ende des Jahrhunderts von einer Abnahme um 7% aus. Die stark vergletscherten Einzugsgebiete Stein und Oberaar hingegen werden – gemäss unseren Simulationen – in diesem Zeitraum kaum eine Reduktion des natürlichen Abfluss erfahren. Es lohnt sich also, den Einfluss der Klimaänderung auf die natürlichen Zuflüsse zu den KWO-Fassungen im Einzelfall anzuschauen.

6. Auswirkungen auf die Produktion unter Annahme des heutigen Strommarktes

Mit den in dieser Studie berechneten täglichen natürlichen Zuflüssen wurde abschliessend die Auswirkungen auf die Produktion und den Umsatz unter den heutigen Strommarkt-Randbedingungen berechnet. Dafür wurde ein Betriebsmodell der BKW verwendet, welches die Produktion so steuert, dass der Ertrag optimiert wird. Dabei

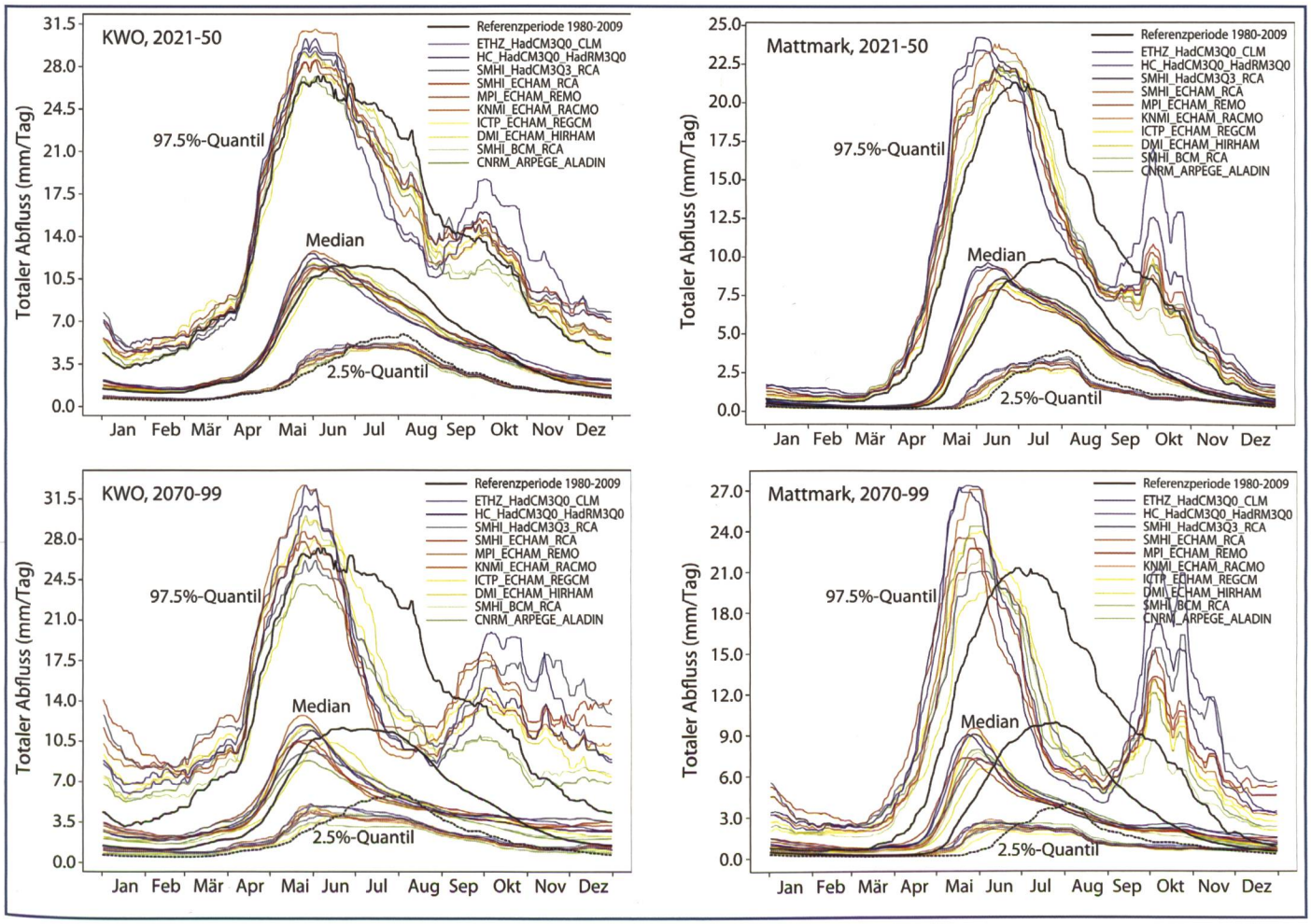

Bild 3. Berechnete Veränderung in der Klimatologie des natürlichen Abflusses (mm/Tag) für den Zeitraum 2021–50 (oben) und den Zeitraum 2070–99 (unten), dargestellt für den Median, das 97.5%-Quantil und das 2.5%-Quantil der Einzugsgebiete KWO (links) und Mattmark (rechts). Die schwarze Linie entspricht der Referenz-Simulation für den Zeitraum 1980–2009.

werden die Gestehungskosten (Zinsen, Amortisation, Personalkosten, Betrieb und Unterhalt, Wasserzins und Steuern, Erneuerungsinvestitionen usw.) nicht berücksichtigt, obschon diese nicht unerheblich sind und manchmal über den Marktpreisen liegen können.

Berechnet wurden die Referenzperiode, sowie die zukünftigen Zeiträume 2021–50, resp. 2070–99 mit folgenden Klimamodellketten:

- SMHI_HadCM3Q3_RCA = mittleres Abflussszenario
- KWM_ECHAM_HIRHAM = pessimistisches Abflussszenario
- ETHZ_HadCM3Q0_CLM = optimistisches Abflussszenario

Für die Berechnung des Umsatzes und für die stundenscharfe Optimierung wurden Swissix-Preise von 2009 verwendet.

Im Fall der KW Mattmark AG werden bei einem mittlerem Abflussszenario für die Jahresproduktion und den Umsatz nur geringfügige Änderungen gegenüber der Referenzperiode berechnet *(Bild 4, Tabelle 2)*. Ganz anders sieht es aber bei den anderen berechneten Klimamodellketten aus. Falls das optimistische Abflussszenario eintreffen würde, könnten die Betreiber mit einer Umsatzsteigerung von ca. 5% bis zum Ende des Jahrhunderts rechnen. Für den Fall des pessimistischen Abflussszenarios müsste mit einer Umsatzeinbusse von über 10% gerechnet werden. Die Produktionserwartung wäre sogar um 20% reduziert. Durch den Speicher ist es aber möglich, weiterhin die höherpreisigen Stunden abzufahren. Zudem sorgen erhöhte Laufwasserzuflüsse im Winter für einen höheren Umsatz. Die Spannweite der möglichen Produktions- und Umsatzentwicklung infolge des Klimawandels ist für das KW Mattmark also noch sehr gross.

Die verschiedenen Modellketten sind aber übereinstimmend, dass die Produktion im Winter, wenn die Marktpreise hoch sind, leicht zunehmen wird, und dass sie im Sommer, wenn die Marktpreise niedrig sind, deutlich abnehmen wird. Für den Zeitraum 2070–99 dürfte die Netto-Produktion von April bis Juli sehr gering sein. Damit verbunden ist ein starker Anstieg des Zubringerpumpeneinsatzes, welcher die Pumpkosten in diesem Zeitraum um über 50% ansteigen lässt. Nicht berücksichtigt in dieser Berechnung ist, dass sich die Marktpreise infolge der Klimaänderung saisonal verändern könnten.

Die Änderung des Zuflussregimes und der Stromproduktion wird sich auch auf den Füllgrad der Reservoire auswirken. Infolge der zeitlichen Verschiebung der Schneeschmelze füllt sich der Stausee früher auf, und bis Ende Sommer ist die volle Speicherkapazität für den folgenden Winter wieder erreicht.

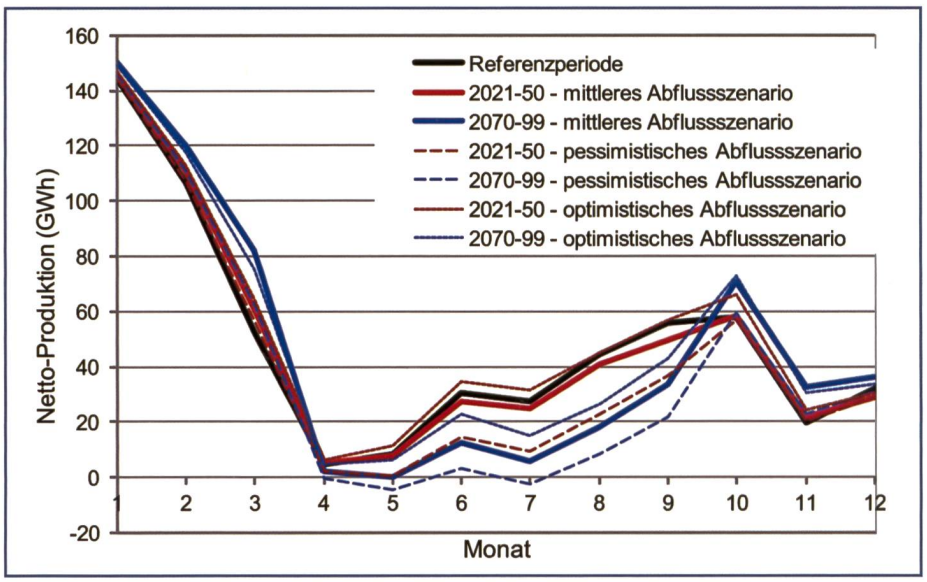

Bild 4. Berechnete monatliche Nettoproduktion des Kraftwerks Mattmark (gemittelt für die drei Berechnungszeiträume).

	Mittleres Abflussszenario SMHI_HadCM3Q3_RCA		Pessimistisches Abflussszenario KWM_ECHAM_HIRHAM		Optimistisches Abflussszenario ETHZ_HadCM3Q0_CLM	
Periode	*2021-50*	*2070-99*	*2021-50*	*2070-99*	*2021-50*	*2070-99*
Netto-Produktion	-0.6%	-3.6%	-14.5%	-21.7%	+7.8	+2.0
Netto-Umsatz	+0.1%	+1.0%	-9.2%	-13.3%	+6.1	+4.0

Tabelle 2. Berechnete mittlere jährliche Veränderungen in der Produktion und im Umsatz für KW Mattmark gegenüber Referenzperiode 1980–2009.

7. Diskussion

7.1 Natürliche Variabilität versus prognostizierte Veränderung

Das Abflussgeschehen in den untersuchten Kraftwerk-Einzugsgebieten unterliegt einer grossen natürlichen Variabilität. Mit unserer Betrachtung von 30-jährigen Zeiträumen können wir dieser natürlichen hydrologischen Bandbreite grösstenteils Rechnung tragen, indem wir z.B. die relative Standardabweichung (= Standardabweichung/Mittelwert) der Schlüsselgrössen (jährliche Schnee- und Eisschmelze, jährliche Verdunstungs- und Abflussmenge) betrachten. Für den Jahresabfluss im KWO-Gebiet zum Beispiel beträgt die relative Standardabweichung 13%. Im Einzugsgebiet des Mattmark-Stausees ist sie etwas grösser (16%).

Eine Grundannahme unserer Studie ist, dass die Variabilität in den täglichen meteorologischen Inputgrössen für alle drei Zeiträume (Referenz, nahe Zukunft, ferne Zukunft) gleich bleibt. Unsere Modellierung ergibt, dass sich auch die resultierende Variabilität im Jahresabfluss für die nahe und ferne Zukunft kaum verändern wird. Sie nimmt geringfügig zu. Im Vergleich dazu sind die prognostizierten relativen Änderungen ziemlich klein. Die simulierten Abfluss-Jahresganglinien in einem zukünftig durchschnittlichen Jahr liegen innerhalb des aktuellen Variabilitätsbereichs. Das heisst nicht, dass die Änderungen nicht signifikant oder unbedeutend wären. Aber es bedeutet, dass die durchschnittlichen Verhältnisse Ende des Jahrhunderts bereits heute in extremen Jahren beobachtet werden können.

7.2 Wie plausibel, resp. unsicher sind die Abfluss-Prognosen?

Die berechneten Veränderungen im natürlichen Abfluss des KWO-Einzugsgebiets sind mit verschiedenen Unsicherheiten entlang der ganzen Modellkette verbunden:
Eine erste beträchtliche Unsicherheit liegt in der Wahl des Emissionsszenarios. Diese Unsicherheit ist in dieser Arbeit nicht quantifiziert worden, ist aber insbesondere für die Periode 2070–2099 beträchtlich, wie der aktuelle Klimabericht 2011 der ETH Zürich zeigt (http://www.ch2011.ch/).
Eine zweite Unsicherheit entsteht durch die globale und regionale Klimamodellierung. Diese können wir abschätzen, indem wir für unsere Zielgrössen (z.B. den Schneewasserwert oder den natürlichen Abfluss) die Standardabweichung der 10 verschiedenen Modellketten berechnen. Für den mittleren Jahresabfluss in den beiden Einzugsgebieten ist die Standardabweichung 66 mm,

resp. 80 mm. Das heisst, die Klimamodellkettenbedingte Unsicherheit ist 2.5 bis 4 mal kleiner als die natürliche Variabilität.
Eine weitere Unsicherheit liegt im Modell zur Berechnung der zukünftigen Gletscherentwicklung. Das hier verwendete Modell der Uni Zürich ist grundsätzlich für eine grosse Skala (z.B. ganze Schweiz) und längere Zeithorizonte geeignet. Für den Zeitraum 2021–50 dürfte mit diesem Modell der Gletscherrückgang etwas zu rasch simuliert werden. Es wurde überprüft, wie stark sich eine leichte Änderung der Gletscherfläche auf den simulierten Abfluss auswirkt. Dabei erwies sich der simulierte Gesamtabfluss nicht sehr sensitiv auf kleine Änderungen der Gletscherfläche.

Und schliesslich entsteht auch durch das hydrologische Modell selbst eine gewisse Unsicherheit. Die Verifikation mit Zuflussdaten zu den Wasserfassungen in den Teileinzugsgebieten (1980–2009) attestiert dem Modell im grossen und ganzen eine gute Leistung. Ein direkter Vergleich mit einem detaillierteren, rechnerisch intensiveren hydrologischen Modell (Alpine3D; Lehning et al., 2008) in einem zentralschweizerischen Einzugsgebiet zeigt, dass es beim hydrologischen Modell eine Unsicherheit bezüglich Schnee- und Eisschmelzintensität gibt. Das konzeptuelle Modell PREVAH ist hier eher etwas konservativ und berücksichtigt (im Gegensatz zu Alpine3D) mögliche Änderungen in der Schnee-/Gletscheroberfläche nicht explizit. Somit liegen die prognostizierten durchschnittlichen Jahresabflüsse bei PREVAH unter denjenigen von Alpine3D. Wir können aufgrund des heutigen Wissensstands nicht sagen, welche der beiden Vorhersagen wahrscheinlicher ist. Anderseits scheinen die von PREVAH simulierten Gletscherschmelzraten in guter Übereinstimmung mit von der VAW berechneten Gletscherschmelzraten zu sein. Dies können wir aus einem direkten Vergleich am Beispiel Mattmark schliessen.

Die Aussagen des hydrologischen Modells im Bezug auf die jahreszeitlichen Veränderungen, vor allem im Frühling/Sommer und längerfristig auch im Sommer/Herbst können als robust angesehen werden.

7.3 Betriebliche Auswirkungen des veränderten Abflussregimes

Die geänderten Abflussregime führen nicht zu einem grundsätzlich geänderten Muster der saisonalen Bewirtschaftung. Am Jahresverlauf der zukünftigen mittleren Abflussganglinien ist jedoch zu erkennen, dass die Akkumulationsperiode kürzer und die abflussarme Zeit länger wird. Bei Speicherkraftwerken mit kleinem Saisonspeicher dürfte die Bewirtschaftung schwieriger werden. Die Berechnungen für KWO und Mattmark zeigen, dass die Seen in Zukunft früher gefüllt werden *(Bild 5)*. Die Absenkphase hängt aber grösstenteils von den Strompreisen ab und dürfte durch die zukünftig geänderten Abflussregime kaum verändert werden.

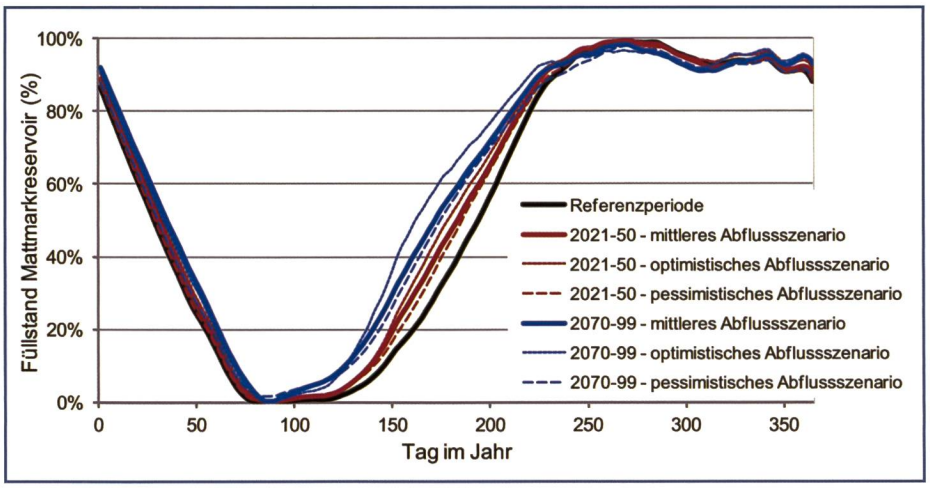

Bild 5. Berechnete Ausnützung der Speicherkapazität des Stausees Mattmark.

Ein verschobenes Abflussprofil hat im Betrieb und Unterhalt vor allem Auswirkungen auf die Revisionsplanungen, da sich das Kraftwerk u.a. an die Zeiten mit maximaler und minimaler Wasserführung halten muss. Für Arbeiten an den Wasserwegen wird üblicherweise der Zeitraum nach Entleerung der Seen, vor der Schneeschmelze gewählt. Hier wird eine Verschiebung nach Vorne stattfinden.

Verdankung
Wir bedanken uns für die Unterstützung der KW Göschenen AG/CKW (Herrn T. Reithofer), KW Mattmark AG (Herrn K. Sarbach), FM de la Gougra SA (Herrn G. Zuber) und KW Oberhasli AG (Herrn A. Fankhauser), insbesondere für die Bereitstellung von hydrologischen Daten.
Ebenfalls verdankt werden die in dieser Studie verwendeten Daten aus dem EU FP6 Projekt ENSEMBLES (Klimaszenarien), der MeteoSchweiz (meteorologische Daten) und des Bundesamts für Umwelt (Abflussdaten).
Wir bedanken uns bei swisselectric research, Bundesamt für Energie, Kanton Wallis und Forces Motrices Valaisannes für die Finanzierung dieser Arbeit.

Literatur

Bosshard, T., Kotlarski, S., Ewen, T., Schär, C. (2011). Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. Hydrol. Earth Syst. Sci., 15: 2777–2788.
Farinotti, D., Magnusson, J., Huss, M., Bauder, A. (2010). Snow accumulation distribution inferred from time-lapse photography and simple modeling. Hydrol. Process. 24: 2087–2097.
Lehning, M., Völksch, I., Gustafsson, D., Nguyen, T.A., Stähli, M., Zappa, M. (2006). ALPINE3D: a detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology. Hydrol. Process. 20: 2111–2128.
Magnusson, J., Farinotti, D., Jonas, T., Bavay, M. (2011). Quantitative evaluation of different hydrological modeling approaches in a partly glacierized Swiss watershed. Hydrol. Process. 25: 2071–2084.
Paul, F., Maisch, M., Rothenbühler, C., Hoelzle, M., Haeberli, W. (2007). Calculation and visualisation of future glacier extent in the Swiss Alps by means of hypsographic modelling. Global and Planetary Change 55 (4): 343–357.
Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., Weingartner, R. (2009 a). An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. Environmental Modelling & Software 24 (10): 1209–1222.
Viviroli, D., Zappa, M., Schwanbeck, J., Gurtz, J., Weingartner, R. (2009 b). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. Journal of Hydrology 377 (1–2): 191–207.
Viviroli D., Mittelbach, H., Gurtz, J., Weingartner, R. (2009 c). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. Journal of Hydrology 377 (1–2): 208–225.

Anschrift des Verfassers
Manfred Stähli
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)
Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf
Tel. +41 44 739 24 72, manfred.staehli@wsl.ch