Auswirkungen der Klimaänderung auf die Geschiebefracht in Einzugsgebieten von Kraftwerksanlagen im Kanton Wallis

Autor(en): **Raymond Pralong, Mélanie / Turowski, Jens Martin / Rickenmann, Dieter**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **103 (2011)**

Heft 4

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-941821

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Entwicklung des Klimas. Weitere Unsicherheiten, die aufgrund des gewählten Modellansatzes entstehen (z.B. die erwähnten Modellparameter oder das Evaporationsmodul), wurden in der vorliegenden Studie nicht untersucht.

Danksagung

Diese Studie wurde vom Projekt «Wallis Wasserkraft Klimawandel» finanziert und wäre ohne die bereits vorhandene detaillierte Datengrundlage nicht möglich gewesen. Letztere konnte dank verschiedener Schweizer Nationalfond Projekte und Aufträge der Kraftwerke Mattmark AG sowie Grande Dixence SA erarbeitet werden.

Literatur

Becker, A. (2005). Runoff processes in mountain headwater catchments: Recent understanding and research challenges. Advances in Global Change Research, 23 (III): 283–295.

Begert, M., Schlegel, T., and *Kirchhofer, W.* (2005). Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. International Journal of Climatology, 25 (1): 65–80.

Bernath, A. (1991). Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Rhone bis Gletsch. Untersuchungen zu Niederschlag, Verdunstung und Abfluss in einem teilweise vergletscherten Einzugsgebiet. Zürcher Geographische Schriften, 43.

Bosshard, T., Kotlarsky, S., Ewen, T., and *Schär, C.* (2011). Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. Hydrology and Earth System Sciences, 15 :2777–2788.

Farinotti, D., Usselmann, S., Huss, M., Bauder, A., and *Funk, M.* (2011). Runoff evolution in the Swiss Alps: Projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. Hydrological Processes. DOI: 10.1002/hyp.8276

Hamon, W. R. (1961). Estimating potential evapotranspiration. Journal of the Hydraulics Division, 87 (HY3): 107–120.

Hock, R. (1999). A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. Journal of Glaciology, 45 (149): 101–111.

Huss, M., Bauder, A., and *Funk, M.* (2009). Homogenization of long-term mass balance time series. Annals of Glaciology, 50 (50):198–206.

Huss, M., Bauder, A., Funk, M., and *Hock, R.* (2008a). Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. Journal of Geophysical Research, 113: F01015.

Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A., and *Funk, M.* (2008b). Modelling runoff from highly glacierized alpine catchment basins in a changing climate. Hydrological Processes, 22(19): 3888–3902.

Huss, M., Jouvet, G., Farinotti, D., and *Bauder, A.* (2010a). Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat. Hydrology and Earth System Sciences, 14: 815–829.

Huss, M., Usselmann, S., Farinotti, D., and *Bauder, A.* (2010b). Glacier mass balance in the south-eastern swiss alps since 1900 and perspectives for the future. Erdkunde, 64 (2): 119–140.

Jouvet, G., Picasso, M., Rappaz, J., and *Blatter, H.* (2008). A new algorithm to simulate the dynamics of a glacier: theory and applications. Journal of Glaciology, 54 (188): 801–811.

Schwarb, M., Daly, C., Frei, C., and *Schär, C.* (2001). Mean annual and seasonal precipitation throughout the European Alps 1971–1990. Technical report, Hydrological Atlas of Switzerland. Plates 2.6, 2.7.

Van der Linden, P. and *Mitchell, J. F. B.* (2009). ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, UK. 160 pp.

Verbunt, M., Gurtz, J., Jasper, K., Lang, H., Warmerdam, P., and *Zappa, M.* (2003). The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling. Journal of Hydrology, 282 (1–4): 36–55.

Anschrift der Verfasser

Daniel Farinotti, Andreas Bauder, Martin Funk

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich

CH-8092 Zürich, farinotti@vaw.baug.ethz.ch

Auswirkungen der Klimaänderung auf die Geschiebefracht in Einzugsgebieten von Kraftwerksanlagen im Kanton Wallis

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

Zusammenfassung

Für die Einzugsgebiete der vier Walliser Kraftwerke Grande Dixence SA, Gougra SA, Mattmark AG und Mauvoisin SA wurde der Einfluss der Klimaänderung auf den Geschiebetransport basierend auf den aktuellsten Klima-, Gletscher- und Abflussszenarien untersucht. Der zukünftige Geschiebetransport wurde mittels einer abflussbasierten Transportformel bestimmt, welche den Einfluss der Sedimentverfügbarkeit nicht explizit berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der durch die Klimaänderung bedingten geringeren Abflüsse die ausgetragenen Sedimentmengen bei ca. der Hälfte (38 von 64) der untersuchten Einzugsgebiete abnehmen werden. Die grössten Geschiebemengen werden künftig früher im Jahr transportiert, es findet eine Verschiebung vom Sommer in den Frühling statt.

1. Einleitung

Die prognostizierte Klimaänderung wird das Abflussregime und den damit verbundenen Sedimenttransport alpiner Einzugsgebiete nachhaltig verändern. Der Feststofftransport aus den Einzugsgebieten der Wasserkraftanlagen kann zu Verlandungen von Stauseen, zur Abnutzung von Turbinen, zu vermehrten Spülungen sowie während Extremereignissen zur Beschädigung von Wasserfassungen führen (*Bild 1* und *Bild 2*). Häufigere Spülungen verbrauchen Wasser, das nicht mehr für die Pro-

Bild 1. Turtmanngletscher mit Moränen sowie Sedimentablagerungsbecken der Gougra SA vom Staudamm aus gesehen (Foto: A. Beer, WSL).

duktion zur Verfügung steht und verursachen somit direkt Kosten. Diese Prozesse können erhebliche Auswirkungen auf die Betriebs- und Unterhaltskosten bei Kraftwerkanlagen haben. Aus diesen Gründen wurde im Rahmen des Projekts «Wallis, Klimaänderung und Wasserkraftnutzung» der Einfluss der Klimaänderung auf den Geschiebetransport bzw. den gesamten Sedimenttransport untersucht, mit dem Ziel, diesbezügliche Änderungen zu quantifizieren. Dabei wurde der zukünftige Geschiebetransport der Perioden 2021–2050 (nahe Zukunft) und 2070–2099 (ferne Zukunft) für die Einzugsgebiete der vier Walliser Kraftwerksgesellschaften Grande Dixence SA, Gougra SA, Mattmark AG und Mauvoisin SA bestimmt.

Die Berechnungen des zukünftigen Geschiebetransportes basieren auf der Modellkette Klima-, Gletscher- und Abflussprognose, welche im Artikel von Schädler et al. (dieses Heft) ausführlich erläutert sind und hier nicht weiter beschrieben werden. Die zu erwartenden Veränderungen hängen jedoch auch von der Geomorphologie und Sedimentverfügbarkeit der einzelnen Einzugsgebiete ab; dieser Aspekt wurde nur am Beispiel des Turtmanntals untersucht. Der vorliegende Bericht fasst die wichtigsten Ergebnisse zusammen. Weiterführende Ergebnisse können im Bericht von Raymond Pralong et al. (2011) nachgelesen werden.

2. Grundlagen zum Sedimenttransport

2.1 Der Geschiebetrieb

Unter dem Begriff Geschiebetransport ist die Verlagerung von Gesteinkörnern grösser als etwa Feinsand durch Gerinneabfluss zu verstehen, wobei die Körner vorwiegend in Sohlennähe transportiert werden. Im Begriff Sedimenttransport werden auch die feineren Korngrössen eingeschlossen, welche vorwiegend als Schwebstoff transportiert werden und sich auch in den Stauseen ablagern. Die Materialmenge, welche durch Wasser mobilisiert und transportiert werden kann, hängt von der Transportkapazität des Gerinnes und von der Sedimentverfügbarbeit ab. Die Transportkapazität ist einerseits vom geringsten Gefälle innerhalb des Flussverlaufes abhängig, da dort die Schubspannungen an der Sohle am kleinsten sind. Andererseits bestimmt die Abflussmenge die Transportkapazität mit. Damit Material tatsächlich ausgetragen werden kann, ist ein kritischer Abfluss nötig, welcher als untere Grenze für den Stofftransport gilt. Unterhalb dieser Abflussmenge findet kein Sedimenttransport statt.

2.2 Berechnung der Geschiebetransportrate

In dieser Studie wurden die zukünftigen Geschiebefrachten mittels einer abflussbasierten Geschiebetransportgleichung bestimmt. Die Geschiebetransportrate wird mit folgender kompakten Gleichung berechnet:

$$q_b = 1.5(q - q_c)S^{1.5} \qquad (1)$$

Dabei ist q_b die volumetrische Geschiebetransportrate pro Einheitsbreite, q der

Bild 2. Beschädigte Wasserfassung Riedbach in Grächen (Mattertal, Mattmark AG) als Folge eines Wasserausbruches im Riedgletscher am 08. August 1989 (Fotos: Kraftwerke Mattmark AG).

Abfluss pro Einheitsbreite q_c, der kritische Abfluss pro Einheitsbreite bei Beginn des Geschiebetransportes und S das Gerinnegefälle. Für eine ausführliche Herleitung dieser Gleichung wird auf Badoux & Rickenmann (2008) oder Nitsche et al. (2011) verwiesen.

Der kritische Abfluss q_c in Gleichung (1) wird mit folgender empirischer Gleichung abgeschätzt

$$q_{c,\min} = 0.065(s-1)^{1.67} g^{0.5} d_{50}^{1.5} S^{-1.12} \qquad (2)$$

Dabei ist $s = \rho_s / \rho$ das Verhältnis von Feststoffdichte ρ_s zur Fluiddichte ρ, g die Gravitationsbeschleunigung und d_x die charakteristische Korngrösse des Bachmaterials, für welche x% des Materials feiner sind. Für das Dichteverhältnis von Quarzsediment zu Wasser wird $s = 2.68$ gesetzt. Gl. (2) wurde von Bathurst et al. (1987) vorgeschlagen und von Rickenmann (1990) leicht modifiziert. Sie basiert auf Laborversuchen mit relativ einheitlichen Korngrössen und Gerinnegefällen von 0.0025 bis 0.2 und entspricht Bedingungen in einem Bachbett ohne Deckschicht und ohne ausgeprägte Sohlstrukturen.

2.3 Berücksichtigung des hohen Fliesswiderstandes in steilen und rauen Gerinnen

Zur Bestimmung des Geschiebetransportes unter Berücksichtigung von Energieverlusten durch grobe Rauigkeitselemente kann Gl. (1) in Kombination mit einem Ansatz für die Aufteilung des Fliesswiderstandes verwendet werden. Das reduzierte Energieliniengefälle S_{red} bezieht sich dabei auf ein Basisniveau des Fliesswiderstandes (für eine Grundrauigkeit des Sohlenmaterials) und bestimmt die verbleibende Energie, welche für den Geschiebetransport zur Verfügung steht (Rickenmann & Recking, 2011):

$$S_{red} = S\left(\sqrt{\frac{f_o}{f_{tot}}}\right)^e = S\left(\frac{n_o}{n_{tot}}\right)^e \qquad (3)$$

Dabei bezieht sich der Darcy-Weisbach Reibungskoeffizient f_{tot} auf die Gesamtreibung und f_o auf die Basisreibung bzw. der Manning-Strickler Reibungsbeiwert n_{tot} auf die Gesamtreibung und n_o auf die Basisreibung. Meyer-Peter und Müller (1948) schlugen aufgrund ihrer Experimente einen empirisch bestimmten Wert $e = 1.5$ vor. Rickenmann et al. (2006) gehen davon aus, dass plausible Werte für den Exponenten e im Bereich von $1 \leq e \leq 2$ liegen, was durch Untersuchungen zum Geschiebetransport in steilen Gerinnen in der Schweiz und Österreich bestätigt wird (Badoux & Rickenmann, 2008; Chiari & Rickenmann, 2011; Nitsche et al., 2011). Hier wurde e = 1.5 verwendet.

Das Verhältnis zwischen Basiswiderstand und gesamtem Fliesswiderstand ergibt sich zu:

$$\sqrt{\frac{f_o}{f_{tot}}} = \left(\frac{v(q)}{v_o(q)}\right)^{1.5} \qquad (4)$$

Dabei ist v die mittlere Fliessgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Gesamtreibung und f_{tot} und v_o bezeichnet eine virtuelle Fliessgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Basisreibung f_o. Das Resultat der Aufteilung des Fliesswiderstandes nach Gl. (4) wird in Gl. (3) für die Berechnung von S_{red} eingesetzt. Die hier vorgeschlagene Aufteilung ist im Grunde eine Funktion der relativen Abflusstiefe. Es handelt sich dabei um einen pauschalen, empirischen Ansatz, welcher aber implizit Informationen über eine durchschnittliche Rauigkeitserhöhung in steilen und rauen Gerinnen enthält.

3. Die Untersuchungsgebiete

Grande Dixence

Das Einzugsgebiet der Grande Dixence SA liegt südlich des Rhonetals, jeweils in den hinteren Teilen des Mattertals und des Val d'Hérens (rote Fläche in *Bild 3*) und umfasst eine Fläche von 357 km^2. Insgesamt werden 36 verschiedene Teileinzugsgebiete gefasst. Das Gesamteinzugsgebiet ist zu zwei Dritteln und gewisse Teileinzugsgebiete bis zu 80% vergletschert. Das gesammelte Wasser wird über einen Hauptstollen in den Grande Dixence Stausee im Nachbartal Val des Dix geleitet. Alle Wasserfassungen liegen oberhalb 2000 m ü.M. Die Standorte der Wasserfassungen sind mit einem Punkt dargestellt. Die grössten Gletscher im Gebiet sind Gorner-, Findelen-, Zmuttgletscher, Glacier de Ferpècle und Haut Glacier d'Arolla. Die Teileinzugsgebietsflächen liegen zwischen 1.5 km^2 (Douves Blanches) und 80 km^2 (Gornera), wobei die Mehrheit Flächen unter 5 km^2 liegen (21 Teileinzugsgebiete).

Gougra

Das Einzugsgebiet der Gougra SA liegt im hinteren Val d'Anniviers und im Nachbartal Turtmann und umfasst eine Fläche von 252 km^2 (hellblaue Einzugsgebiete in *Bild 3*). Neben dem natürlichen Einzugsgebiet wird dem Stausee Moiry (2250 m ü.M) Wasser der Navisence von Mottec sowie das Wasser aus dem Turtmannstausee zugeleitet. Das Teileinzugsgebiet der Turtmänna umfasst eine Fläche von 36.6 km^2

mit einer Vergletscherung von 56% (Zuber, 2005) und erreicht eine maximale Höhe von 4151 m ü.M (Bishorn). Neben dem natürlichen Einzugsgebiet wird dem Turtmannstausee Wasser aus den Bächen Brändji, Bluomatt und Frilli zugeleitet.

Mattmark

Das Einzugsgebiet des Stausees Mattmark AG liegt im hinteren Saastal und umfasst eine Fläche von 85.9 km^2 (dunkelblaue Einzugsgebiete in *Bild 3*). Der Stausee liegt auf 2197 m ü.M. Das natürliche Einzugsgebiet von 37.1 km^2 erreicht eine maximale Höhe von 3795 m ü.M. (Fluchthorn). Neben dem natürlichen Einzugsgebiet werden dem Stausee Mattmark die links- und rechtsufrigen Seitenbäche der Saaser Vispa (Triftbach, Almagellerbach, Furgbach, Allalinbach, Hohlaubbach) mit einem Gesamteinzugsgebiet von 51.1 km^2 zugeleitet. Gletscher wie der Schwarzberg-, Allalin- und Feegletscher prägen das alpine Landschaftsbild. Im Jahr 1985 betrug die vergletscherte Fläche im Gesamteinzugsgebiet 30.3 km^2, was einem Anteil von 35.4% entspricht.

Mauvoisin

Das Einzugsgebiet des Stausees Mauvoisin liegt im hinteren Teil des Val de Bagnes (in *Bild 3* gelb markiert). Dem Stausee werden neben den natürlichen Zuflüssen mit einem Einzugsgebiet von 114 km^2 auch die links- und rechtsufrigen Bäche des mittleren Val de Bagnes mit einem Einzugsgebiet von 53 km^2 zugeleitet. Das Einzugsgebiet ist zu 43 Prozent vergletschert. Der Grand Combin mit einer Höhe von 4314 m ü.M. bildet den höchsten Gipfel.

4. Modellierung des künftigen Sedimenttransportes

Für die Berechnung des künftigen Sediment- bzw. Geschiebetransportes sollten Voraussagen über (i) die Abflussentwicklung und (ii) die Entwicklung der Sedimentverfügbarkeit in den einzelnen Einzugsgebieten gemacht werden können. In den hier vorgestellten Resultaten wurde hauptsächlich der Einfluss der Abflussentwicklung auf den Geschiebetransport untersucht (Einflussfaktor i). Die Beurteilung der Entwicklung der Sedimentverfügbarkeit ist schwieriger zu quantifizieren und basiert u.a. auf detaillierteren Felduntersuchungen. Im Rahmen dieses Projektes wurde dieser Aspekt nur für das Einzugsgebiet des Turtmanntals (Gougra SA) untersucht. Dort übersteigt die verfügbare Sedimentmenge die Transportkapazität des Baches um mehrere Grössenordnungen. Der Bach zeigt also transport-limitiertes Verhalten. Die Ergebnisse sind im Detail von Beer (2009) und Raymond Pralong et al. (2011) beschrieben.

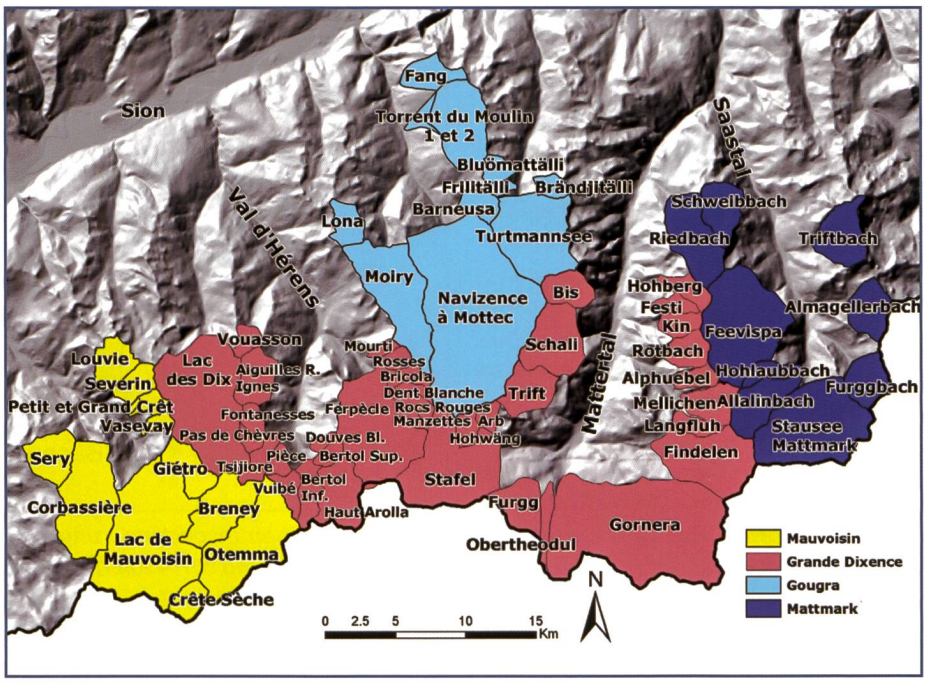


Bild 3. Einzugsgebiete der Kraftwerksbetriebe Grande Dixence SA (rot), Gougra SA (hellblau), Mattmark AG (blau) und Mauvoisin SA (gelb).

4.1 Geschiebefrachtprognosen

Der künftige Geschiebetransport wird anhand des prognostizierten Abflusses berechnet. Dazu wird die abflussbasierte Transportformel (Gleichung [1]) an den beobachteten Geschiebefrachten (falls vorhanden abgeschätzt aus Anzahl Spülungen der Entsander und Entkieser) geeicht und auf die prognostizierten Abflusswerte angewandt. Die Geschiebefrachten wurden für je zehn Klima-Abfluss-Szenarien für die Perioden 2021–2050 und 2070–2099 berechnet und im Verhältnis zu den Referenzwerten der Periode 1980–2009 gesetzt.

5. Resultate

Der künftige Geschiebetransport wurde für insgesamt 65 Bäche untersucht: 36 im Gebiet der Grande Dixence, 10 in jenem der Kraftwerke Gougra, neun im Einzugsgebiet der Kraftwerke Mattmark und 10 für das Gebiet von Mauvoisin. Die Berechnungen geben die Änderung der Transportkapazität wieder; die Geschiebeverfügbarkeit wurde nicht explizit berücksichtigt. Zur besseren Übersicht wurden für jede Messstelle die mittlere jährliche Geschiebefracht über alle zehn Szenarien ermittelt, und mit dem Wert der Referenzperiode normalisiert.

Bei einem Bach (Pas de Chèvres; Grande Dixence) lag der berechnete Geschiebetransport in der Referenzperiode und in den meisten Szenarien bei Null, das heisst, dass der mittels Gleichung (2) abgeschätzte Abflussgrenzwert für den Transportbeginn nicht überschritten wurde. Bei diesem Bach dominieren jetzt und in Zukunft Extremereignisse den Geschiebetransport. Dieser Bach wird im Folgenden nicht berücksichtigt.

5.1 Auswirkungen auf die Geschiebemengen und die saisonale Verteilung des Geschiebetransportes

Im Durchschnitt gibt es in den restlichen 64 Bächen im Vergleich zu den Beobachtungen der Referenzperiode in der Periode 2021–2050 einen Geschiebeanstieg um den Faktor 2.15 (Median 1.39), in der Periode 2070–2099, um einen Faktor 4.69 (Median 3.79). Diese Werte sind jedoch stark beeinflusst von zwei Ausreissern (Rocs Rouges, Grande Dixence: Mittelwert 40.67 in 2050 und 75.40 in 2099; und Crête Sèche, Mauvoisin: Mittelwert 41.18 in 2050 und 173.28 in 2099). Werden diese Bäche in dem Vergleich weggelassen, verringert sich der Mittelwert für 2021–2050 auf 0.90 (Median 0.88) und für 2070–2099 auf 0.84 (Median 0.83). Im Allgemeinen kann also bei den untersuchten Bächen von einem Geschieberückgang ausgegangen werden, vor allem für die Periode 2070 bis 2099 *(Bild 4)*. Die durch die Klimaänderung bedingten geringeren mittleren Abflüsse rufen diesen Rückgang hervor. Bis 2050 zeigen nur neun Bäche gesteigerte Geschiebelieferungen um mehr als 20%, während 13 Bäche weniger als 80% der Geschiebefrachten in der Referenzperiode

bringen. Die restlichen 42 Bäche liefern zwischen 80% und 120% der Referenzfrachten. Bis 2099 liefern zehn Bäche mehr Geschiebe, aber nur noch 16 Bäche liefern ähnliche Frachten wie in der Referenzperiode. Die restlichen 38 Bäche liefern weniger als 80% der Geschiebefrachten der Referenzperiode.

Die Veränderungen in den jahreszeitlichen Verteilungen der Geschiebelieferung sind in *Bild 5* dargestellt. Bis 2099 betreffen sie fast alle Einzugsgebiete. Die maximalen jährlichen Geschiebemengen fallen heute für die meisten Bäche in den für ein glaziales Abflussregime abflussreichsten Sommermonaten Juli und August an. Aufgrund der veränderten Abflussregimes verschiebt sich ihr Auftreten in Zukunft in den Frühsommer. Bis 2050 zeigen 50% der Bäche eine veränderte Geschiebelieferung vom Sommer in den Frühling (glaziales zu nivales Abflussregime), bis 2099 gar 67%. Eine Verschiebung der jährlichen Geschiebelieferung vom Frühling in den Winter wird erst ab 2070–2099 beobachtet und betrifft acht Bäche. Bis 2050 zeigen 28 Bäche keine Verschiebung, bis 2099 nur noch neun Bäche. Fünf Bäche sind stark von Extremereignissen beeinflusst.

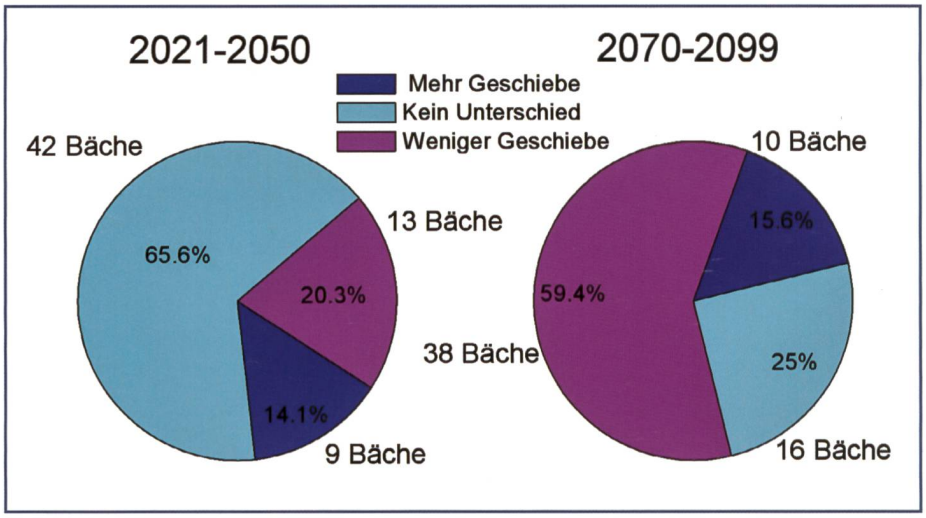


Bild 4. Geschiebetransportänderungen in 64 untersuchten Bächen für die Perioden 2021–2050 (links) und 2070–2099 (rechts) im Vergleich zu den Referenzwerte der Periode 1980–2009. Mehr Geschiebetransport entspricht einem Wert von >120 Prozent der Geschiebemengen der Referenzperiode, weniger Geschiebetransport einem Wert <80 Prozent der Referenzperiode. Ein gleicher Geschiebetransport gilt für Geschiebemengen zwischen 80 und 120 Prozent der Werte der Referenzperiode.

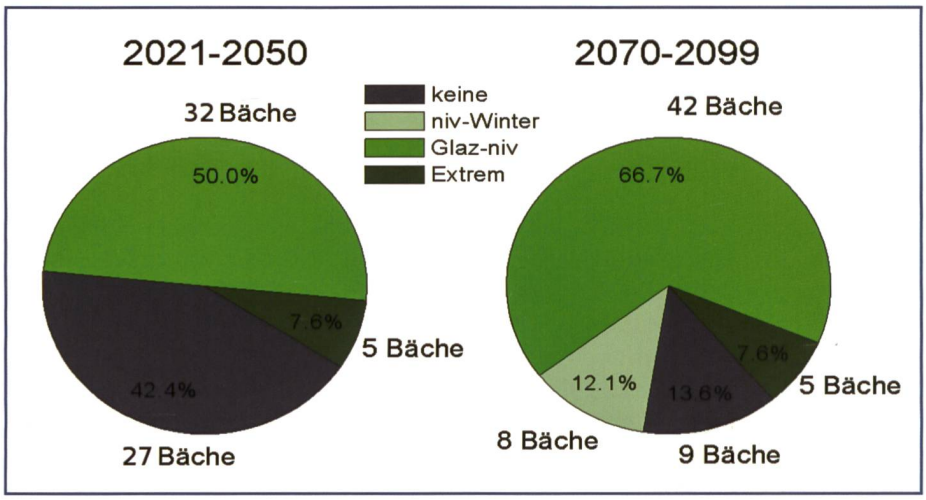


Bild 5. Veränderung der jahreszeitlichen Verteilungen der Geschiebelieferung in 64 untersuchten Bächen für die Perioden 2021–2050 (links) und 2070–2099 (rechts).

5.2 Jährliche Geschiebeganglinien, Fallbeispiele zu verschiedenem Bachverhalten

Die Einzugsgebiete reagieren je nach Höhenlage und Vergletscherungsgrad, Schneebedeckung, Ausdehnung des Permafrostes, Vegetationsbedeckung und Sedimentverfügbarkeit unterschiedlich auf die Klimaänderung. Die Sedimentverfügbarkeit spielt dabei eine wesentliche Rolle, konnte aber wie bereits erwähnt im Rahmen dieser Studie nur für das Einzugsgebiet des Turtmanntals berücksichtigt werden. Im Folgenden werden Jahresgeschiebeganglinien gezeigt, die verschiedene Reaktionen der Einzugsgebiete auf die Klimaänderung darstellen. Bei gewissen Einzugsgebieten wird nur eine Zunahme der Geschiebefrachten, jedoch keine saisonale Verschiebung in der Zukunft erwartet. Für Tsijiore Nouve (Grande Dixence SA) wurde z.B. eine Zunahme der Geschiebelieferung von im Mittel 177% der Geschiebemengen der Referenzperiode bis 2050 und 393% bis 2099 berechnet *(Bild 6)*. Bei dem Einzugsgebiet Langfluh (Grande Dixence SA) dagegen wird eine Abnahme der Geschiebefrachten auf 80% der Geschiebemengen der Referenzperiode für 2021–2050 und auf 40% für 2070–2099 erwartet *(Bild 7)*. Eine saisonale Verschiebung der maximalen Geschiebemengen von den Sommermonaten zum Frühling ist ab 2021–2050 klar erkennbar.

Im Einzugsgebiet Mellichen (Grande Dixence SA) ist für die Periode 2021–2050 eine Zunahme des Geschiebeaufkommens auf 143% und dann für die Periode 2070–2099 eine Abnahme auf 60% prognostiziert. Hier findet ebenfalls eine saisonale Verschiebung der maximalen Geschiebemengen vom Sommer in den Frühling statt, jedoch erst ab 2070–2099 *(Bild 8)*.

5.3 Sedimentverfügbarkeit am Beispiel des Turtmanntals

Zur Bestimmung des vorhandenen Sedimentvolumens im Einzugsbereich des Turtmannstausees (Gougra SA, siehe auch *Bild 3*), welches für Erosion und Transportprozesse zur Verfügung steht, wurden Felderhebungen mit ArcGIS basierten Berechnungen kombiniert. Die massgeblichen Sedimentmengen im Gebiet bilden sich aus Moränenmaterial des Turtmann- und Bruneggletschers heraus, sowie aus Moränenschutt eines seitlich ins Haupttal einmündenden Seitentals, dem Innern Wängertälli *(Bild 9a)*. Gesamthaft befinden sich 32±13 Millionen Kubikmeter potenziell erodierbare Sedimente im Gebiet des oberen Turtmanntals inklusive des Innern Wängertällis. Zur Abschätzung des Anteils potenziell erodierbaren Sediments, welches in das Turtmann-Sedimentationsbecken und den Stausee eingetragen werden könnten, sind die lokalgeographischen Gegebenheiten massgebend. Limitierende und fördernde Eigenschaften der verschiedenen Standorte für den Austrag von Geschiebematerial werden unterschieden (Beer, 2009). Das potenzielle

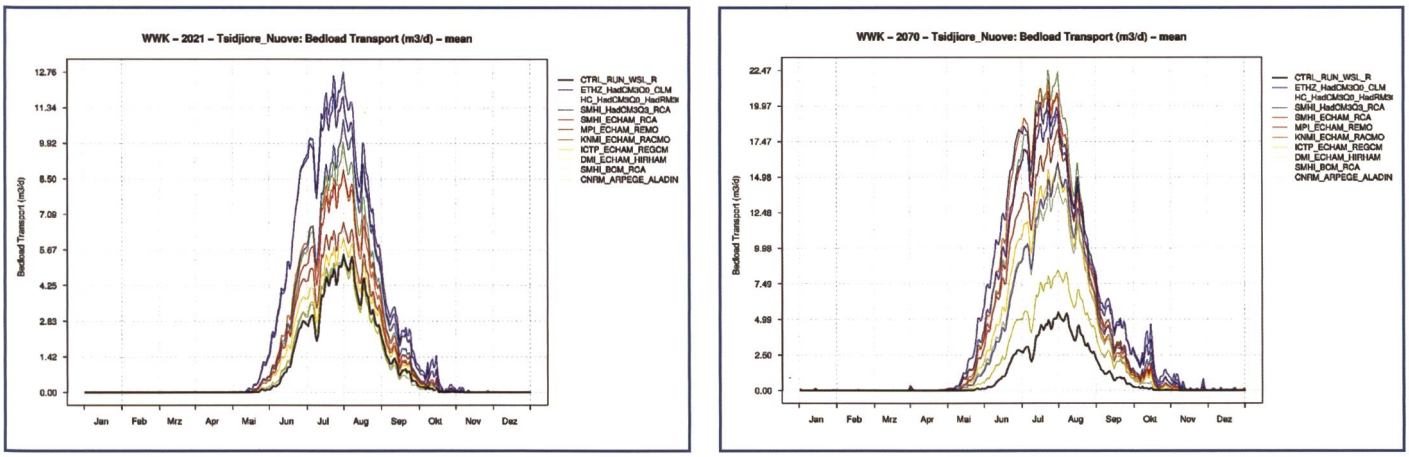


Bild 6. Jährliche Geschiebeganglinien (m^3/Tag) für je zehn Szenarien der Perioden 2021 bis 2050 (links) und 2070 bis 2099 (rechts) im Vergleich zur die Referenzperiode 1980–2009 (schwarz) für das Einzugsgebiet Tsijiore Nouve (Grande Dixence SA). In diesem Beispiel erhöhen sich die Geschiebefrachten stark, ohne dass eine saisonale Verschiebung sichtbar ist.

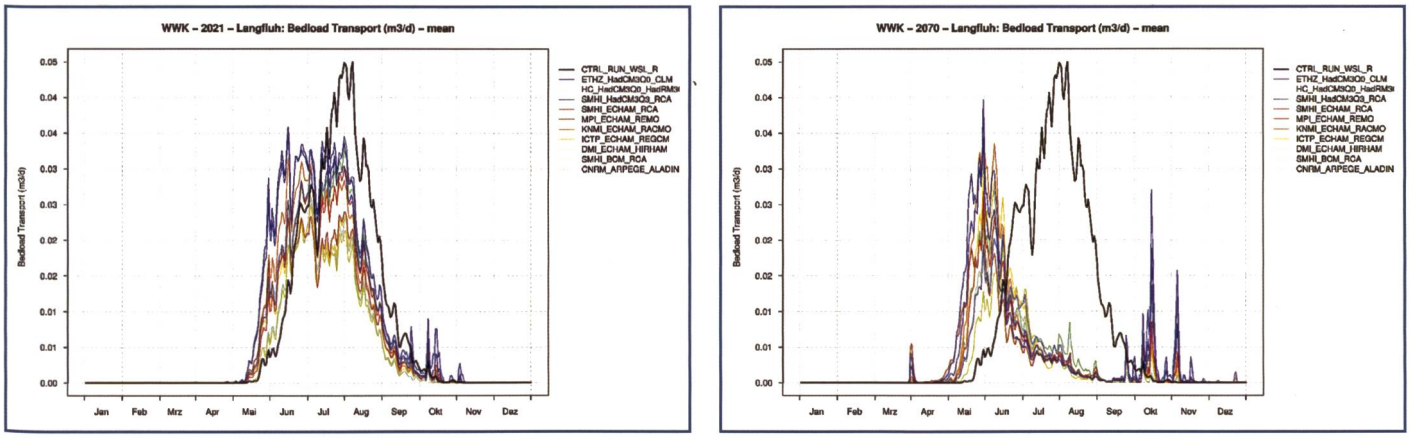


Bild 7. Jährliche Geschiebeganglinien (m^3/Tag) für je zehn Szenarien der Perioden 2021 bis 2050 (links) und 2070 bis 2099 (rechts) im Vergleich zur Referenzperiode 1980–2009 (schwarz) für das Einzugsgebiet Langfluh (Grande Dixence). Klar erkennbar ist die saisonale Verschiebung der Geschiebelieferung von den Sommermonaten (glazial) zum Frühling (niveal).

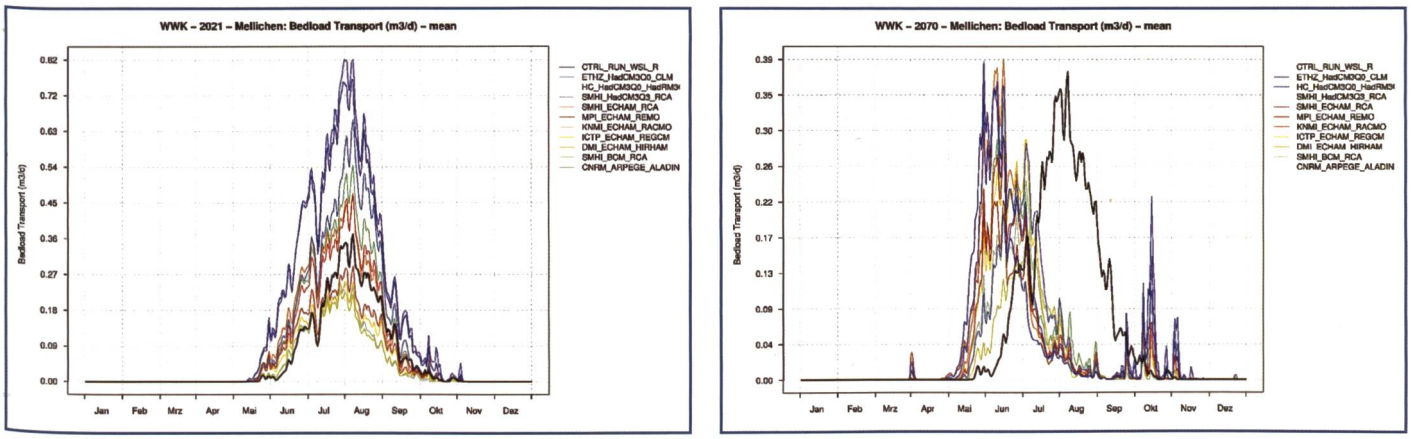


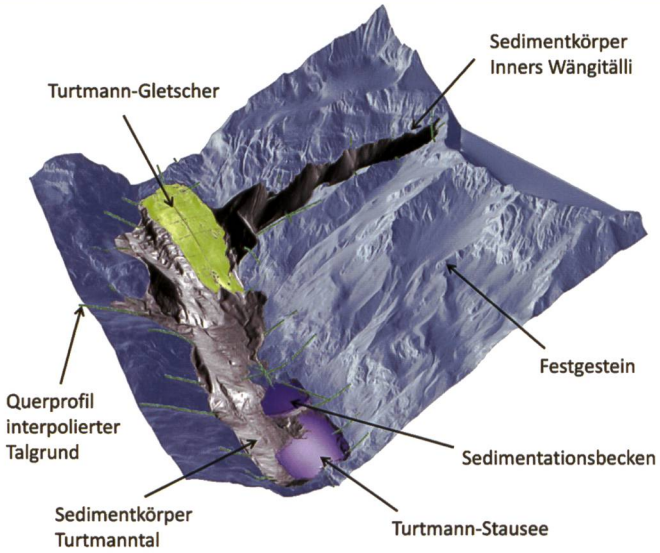
Bild 8. Jährliche Geschiebeganglinien (m^3/Tag) für je zehn Szenarien der Perioden 2021 bis 2050 (links) und 2070 bis 2099 (rechts), jeweils im Vergleich zur Referenzperiode 1980–2009 (schwarz) für das Einzugsgebiet Mellichen (Grande Dixence).

Austragvolumen wurde auf 27 Millionen Kubikmeter abgeschätzt *(Bild 9b)*.

6. Diskussion

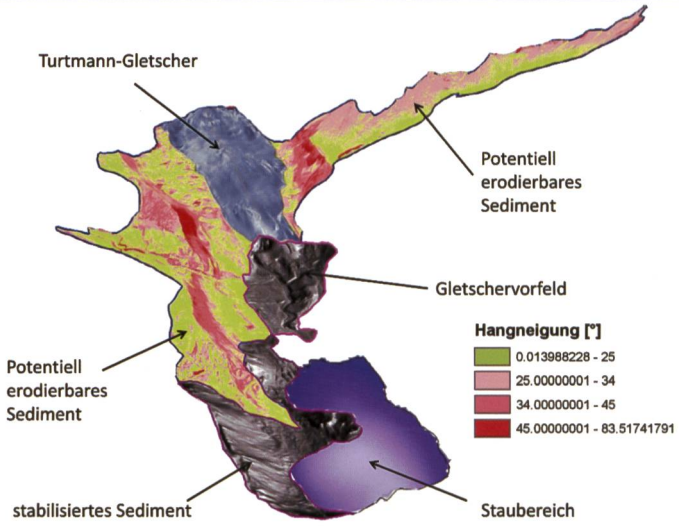
Die hier vorgestellten quantitativen Geschiebefrachtprognosen betrachten den Einfluss der Änderung des Abflusses auf den Geschiebetransport und gelten somit strenggenommen nur für sogenannte transport-limitierte Gebirgsbäche (Begrenzung des Geschiebeaufkommens durch das Transportvermögen des Baches). Der zukünftige Geschiebetransport kann aber auch stark von einer veränderten Sedimentverfügbarkeit im Einzugsgebiet beeinflusst werden, dies gilt vor allem für verfügbarkeits-limitierte Gebirgsbäche.

Tendenziell ist anzunehmen, dass die Sedimentverfügbarkeit in einigen Gebieten durch den Rückzug der Gletscher und den Rückgang des Permafrostes zunehmen dürfte. Die Frage der Sedimentverfügbarkeit wurde beispielhaft im Einzugsgebiet des Turtmanntals untersucht. Dort übersteigen die vorhandenen Sedimentmengen die Transportkapazität bei Weitem. Deswegen kann angenommen werden, dass für die heute transport-limitierten Gletscherbäche auch in Zukunft genügend Sediment bzw. Geschiebe zur Verfügung steht. Umgekehrt ist es aber denkbar, dass für heute verfügbarkeits-limitierte Gletscherbäche in gewissen



Querschnittsform	Total [m³]	ohne Gletscher [m³]	ohne Gletscher und Stausee [m³]
V - Tal	24'000'000	19'000'000	17'000'000
Trog - Tal	43'000'000	35'000'000	32'000'000
Kasten - Tal	62'000'000	48'000'000	44'000'000

Bild 9a. Die Sedimentkörper im oberen Turtmanntal und im Innern Wängertälli.



Sedimentkörper	Total [m³]	ohne Gletscher [m³]
potentiell erodierbares Sediment	35'000'000	27'000'000
stabilisiertes Sediment	2'000'000	
Gletschervorfeld	3'000'000	

Bild 9b. Potenziell erodierbares Sedimentvolumen im Bereich der unbewachsenen Moränen.

Fällen in den nächsten Jahrzehnten mehr Sediment bzw. Geschiebe in das Gerinnesystem gelangen könnte und so der Geschiebetransport allenfalls auch bei abnehmenden Abflüssen zunehmen könnte. Eine genaue Unterscheidung der untersuchten Bäche in transport-limitierte bzw. verfügbarkeits-limitierte Systeme ist nicht einfach möglich, und würde insbesondere weitere Felduntersuchungen erfordern.

Ausser dem Beispiel Turtmanntal wurde die Sedimentverfügbarkeit in der Studie bei der Bestimmung der zukünftigen Geschiebefrachten nicht berücksichtigt. Dies könnte pro Einzugsgebiet je nach geomorphologischem Kontext zu einer Unter- oder Überschätzung der zukünftigen Frachten führen und sollte bei der Interpretation der Resultate berücksichtigt werden.

Durch das sich ändernde Abflussverhalten der Bäche führen unsere Berechnungen meist zu einem leichten bis mittleren Geschieberückgang, zumindest wenn die prognostizierten Abflussmengen als korrekt angenommen werden. Für die Interpretation der Ergebnisse sollte man sich jedoch bewusst machen, dass alle Unsicherheiten und Fehler der Modellkette (Emissionsmodelle, Klimaszenarien, Gletscherflächenänderung, Abflussvorhersage) sich direkt auf die Vorhersagen des Geschiebetriebs auswirken. Eine ausführliche Diskussion der verschiedenen Unsicherheiten kann in den entsprechenden Fachberichten gefunden werden.

Eine wichtige Änderung im Transportverhalten ergibt sich für den saisonalen Verlauf des Geschiebetransportes. Durch den Rückgang der Gletscher steht im Sommer weniger Wasser zur Verfügung, das stattdessen während der Schneeschmelze im Frühling abfliesst, oder sogar direkt während des Winters als Regen in die Bäche gelangt. Starkniederschlagsereignisse im Sommer und Herbst könnten in Zukunft vermutlich auch eine grössere Rolle spielen. Dies würde heissen, dass die Geschiebelieferung grösseren Schwankungen unterliegen und weniger vorhersagbar wird. Die Sedimentlieferung bei Extremereignissen könnte auch die Wahrscheinlichkeit für Schäden an wasserbaulichen Anlagen erhöhen. Die Veränderung des Feststofftransportes durch Starkniederschlagsereignisse wurde im Projekt «Wallis, Wasserkraft, Klimaänderung» nicht explizit berücksichtigt (weder in den Klimamodellen noch in den hydrologischen Modellen), und kann deshalb hier nur qualitativ diskutiert werden.

7. Schlussfolgerungen

Für die Einzugsgebiete der vier Walliser Kraftwerke Grande Dixence SA, Gougra SA, Mattmark AG und Mauvoisin SA wurde der zukünftige Geschiebetransport für die Perioden 2021–2050 und 2070–2099 bestimmt. Im Durchschnitt ist eine Abnahme der ausgetragenen Sedimentmengen zu erwarten, bedingt durch die sinkenden Abflussmengen. Im Einzelfall reagieren aber die verschiedenen Einzugsgebiete entsprechend ihren lokalen Verhältnissen (Höhenlage, Vergletscherungsgrad usw…) unterschiedlich auf die Klimaänderung. So wird bei einigen Einzugsgebieten zuerst eine Zunahme, später eine Abnahme der Geschiebemengen erwartet. Andere Einzugsgebiete verhalten sich gegensätzlich und bei weiteren Gebieten wird entweder nur eine Zunahme oder Abnahme des Sedimenttransports prognostiziert. Die Sedimentverfügbarkeit wurde nur in einem Fallbeispiel berücksichtigt. Der Einfluss Starkniederschlagsereignisse auf den zukünftigen Geschiebetransport wurde in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Verdankung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projektes «Sektorielle Studie zum Einfluss der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung im Kanton Wallis» durchgeführt. Wir danken den Autraggebern Forces Motrices Valaisannes und Dienststelle für Energie und Wasserkraft Kanton Wallis, und insbesondere J. Pralong, E. Caloz, P. Michellod, P. Amacker, M. Steiner, F. Zuber für die Unterstützung des Projektes. Für die freundliche Bereitstellung von Unterlagen danken wir den Kraftwerkgesellschaften Grande Dixence SA, Gougra SA, Mattmark AG und Mauvoisin SA.

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.