Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 91 (1999)
Heft: 7-8

Artikel: Einfluss der Klimaänderung auf die Wasserkraft
Autor: Vischer, Daniel / Bader, Stephan
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940061

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

Franken standen schliesslich 52,48 Mio Franken endgültige Kosten gegenüber, was einer Kostenüberschreitung von 111,5 % entspricht. Die spezifischen Kosten erhöhten sich entsprechend von vorgesehenen 4640 Franken auf 9803 Franken pro Meter Tunnel.

Von den 27,67 Mio Franken zusätzlicher Kosten entfallen:

20,8 % auf Mengenüberschreitungen von Positionen im ursprünglichen Leistungsverzeichnis. Im Zusammenhang mit den angetroffenen geologischen Verhältnissen konzentrieren sich diese Überschreitungen vor allem auf Positionen für Felssicherung und Wasserhaltung;

45,9 % auf Positionen, die neu im Leistungsverzeichnis eingeführt werden mussten, um vor allem den ungünstigen geologischen Verhältnissen Rechnung zu tragen, wie Vorpfändspiesse, «Swellex»-Felsanker, Armierung usw.;

17,1 % auf Nachforderungen des Bauunternehmers im Zusammenhang mit der in den Jahren 1987 bis 1989 vorherrschenden politischen Situation im Lande, die zu zahlreichen Arbeitsunterbrüchen führte, und

16,2 % auf Beschleunigungsmassnahmen wie die Einführung von zusätzlichen Arbeitsschichten, Einsatz der Teleskopschalung mit kontinuierlichem Betoneinbau bei der Stollenauskleidung usw.

7. Baufortschritt

Mit der beschriebenen Betoniermethode gelang es tatsächlich, die notwendigen 8,5 bis 12,5 Monate während der für die Auskleidung und Injektionen vorgesehenen Zeit einzusparen und den Druckstollen zum ursprünglich vorgesehenen Zeitpunkt fertigzustellen.

Um dies zu erreichen, wurde jeweils von montags 0.00 Uhr bis samstags 14.00 Uhr ununterbrochen betoniert. Die Wochenenden standen für die notwendigen Wartungsarbeiten zur Verfügung. Die beiden vorhandenen Betonpumpen wurden im Wochenrhythmus alternierend ausgewechselt und überholt.

Verzögerungen bei der Erstmontage der Teleskopschalung führten dazu, dass erst am 18. Juli 1990 ab Station 0+398 mit dem kontinuierlichen Einbringen begonnen werden konnte. Dieses Verfahren konnte schliesslich bis Station 5+054, wo es am 28. November 1990 endete, ohne wesentliche Unterbrechungen weitergeführt werden. In diesem Zeitraum wurden während 2264 Arbeitsstunden 52 338 m^3 Beton eingebracht. Ca. 12 % dieser Zeit fielen als Störungszeit an.

Die durchschnittlichen Tagesleistungen bei 24 Arbeitsstunden pro Tag betrugen in unbewehrten Abschnitten 51,6 m oder 608 m^3 Beton und in bewehrten Strecken 45,5 m oder 454 m^3 Beton. Die Tageshöchstleistung in einem unbewehrten Stollenabschnitt betrug 79,3 m bzw. 870 m^3 Beton.

Literatur

[1] Wasserkraftanlage Samanalawewa, Sri Lanka. Erfahrungen beim Ausbruch des Druckstollens. «wasser, energie, luft», Heft 3/4, 1994.

Adressen der Verfasser: *Hans-Erwin Minor,* Prof. Dr.-Ing., VAW, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich; *Peter Molinari,* Direktor, Engadiner Kraftwerke AG, CH-7530 Zernez; *Volker Öhmichen,* Realisierungsmanager für VDE 1, Büro für Planung und Ingenieurtechnik GmbH, Wismarsche Strasse 323b, D-19055 Schwerin.

Zur Zeit der Bauarbeiten von Samanalawewa waren die Verfasser bei der Electrowatt Engineering AG in Zürich tätig.

Einfluss der Klimaänderung auf die Wasserkraft

■ *Daniel Vischer und Stephan Bader*

1. Fragestellung und Untersuchungsgebiet

Die Klimaänderung ist Tatsache. Allerdings manifestiert sie sich nicht überall gleich. Die meisten Gebiete der Erde erfahren eine Erwärmung, doch gibt es auch Gebiete mit einer Abkühlung. Für die Schweiz ist folgendes festzustellen: Die mittlere Jahrestemperatur hat sich seit 1850 um rund 1 °C erhöht. Dabei haben sich auch die Niederschläge verändert, und zwar durch eine Zunahme im Winterhalbjahr. Aufgrund von Analysen ist damit zu rechnen, dass sich dieser Trend in Zukunft fortsetzt. Entsprechende Szenarien finden sich in Abschnitt 2.

Wie beeinflusst diese Klimaänderung die Produktion der schweizerischen Wasserkraftwerke? Was ist in den nächsten Jahrzehnten zu erwarten? Um diesen Fragen nachzugehen, wurde ein diesbezüglich sensitives Untersuchungsgebiet gewählt. Es handelt sich um das im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms «Klimaänderungen und Naturkatastrophen» von Ehrler (1998) bearbeitete Einzugsgebiet des Alpenrheins bei Felsberg. Ehrler beschreibt dieses Einzugsgebiet wie folgt: Es umfasst eine Fläche von 3241 km^2 ohne das Val Cadlimo, dessen Abflüsse von durchschnittlich 0,4 m^3/s seit 1920 in den Tessin abgeleitet werden. Die Vergletscherung erreicht rund 2 %. Der Höhenbereich erstreckt sich von 575 bis 3241 m ü. M., mit einem Mittelwert von 1997, das heisst praktisch 2000 m ü. M.

Tabelle 1. Vergleich der «realistischen Variante» der Klimaszenarien mit den jüngsten Abschätzungen auf Basis globaler Klimamodelle (Bader, Kunz, 1998). Zeithorizont 2050.

	Szenario: realistische Variante		*Jüngste Abschätzungen auf der Basis globaler Klimamodelle*	
	Sommer	*Winter*	*Sommer*	*Winter*
Temperaturänderung	+ 2 °C	+ 2°C	(keine wesentliche Änderung)	+ 1,5 °C
Niederschlagsänderung	± 0 %	+ 10 %		Zunahme

Die Bestimmung der Vergletscherung erfolgte für den Stand von 1973. Die Rheinabflüsse liessen sich aus den Hydrologischen Jahrbüchern der Landeshydrologie und -geologie entnehmen. Diese betreibt in Felsberg eine Abflussmessstation, die sie im Februar 1989 nach Domat/Ems verlegte. Da beide Stationen nur wenig weit auseinanderliegen, passen die Messreihen zusammen.

Der mittlere Rheinabfluss in Felsberg beläuft sich für die 29jährige Messreihe von 1962 bis 1990 auf 115 m^3/s. Das sind auf das ganze Einzugsgebiet verteilt rund 1120 mm/a. Den Vergleich mit früheren Perioden zeigt Tabelle 2. Der Kraftwerkbau hat diese jährlichen Werte – abgesehen von der erwähnten Ableitung des Val-Cadlimo-Wassers – nicht beeinflusst. Hingegen hat er mit seiner Speicherbewirtschaftung die saisonale Verteilung der Abflüsse geändert. Der Nutzinhalt der 10 Stauseen macht mit 548 Mio m^3 immerhin 15 % des Jahresabflusses aus. Um den Einfluss der Stauseen auszuschalten, hat Ehrler (1998) für die Periode 1962–1990 ein Normjahr generiert. Dessen mittlerer Abfluss liegt mit 123 m^3/s allerdings um ein paar Prozente höher als der tatsächliche Wert von 115 m^3/s. Das spielt aber weder für die von Ehrler noch von den Autoren gezogenen Vergleiche eine Rolle. Wichtig ist bloss, dass die generierte Abflussreihe des Normjahrs in etwa einem mittleren natürlichen Jahr zum heutigen Zeitpunkt entspricht.

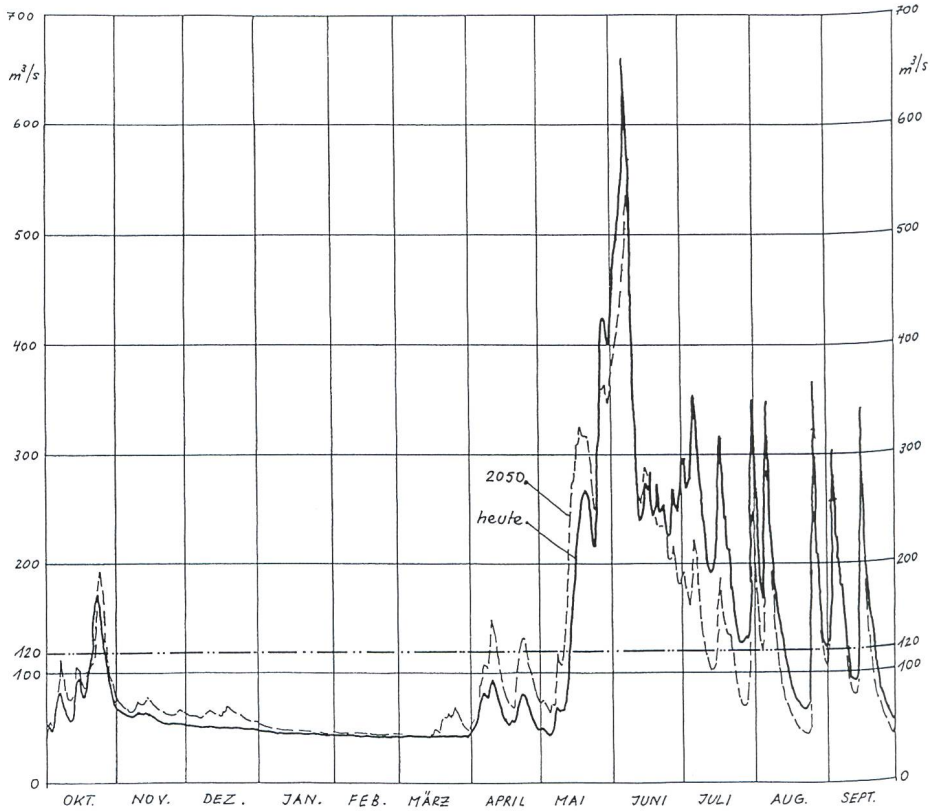

Bild 1. Ganglinie der Abflüsse (Tagesmittel) des Rheins in Felsberg im heutigen Normjahr (ausgezogene Linie) sowie gemäss eines als «realistische Variante» bezeichneten Szenarios für das Jahr 2050 (strichlierte Linie). Die Schwelle von 120 m^3/s entspricht dem Schluckvermögen des angenommenen Laufwerks.

2. Szenarien der Klimaerwärmung bis 2050

Nach den jüngsten globalen Abschätzungen scheint im Bereich des Alpenraums vor allem das Winterhalbjahr sensibel auf eine allgemeine Erwärmung zu reagieren. Bis 2050, das heisst in den nächsten rund 50 Jahren, wird eine weitere winterliche Temperaturzunahme von etwa 1,5 °C erwartet. Damit eng verbunden ist eine Zunahme der Winterniederschläge. Demgegenüber zeigen die Modellrechnungen für das Sommerhalbjahr nur sehr geringe Änderungen beider Parameter (vgl. dazu die zusammenfassende Darstellung bei Bader, Kunz, 1998). Noch zu Beginn der 1990er Jahre folgerte man aufgrund der damaligen Kenntnisse, dass vor allem das Sommerhalbjahr in seiner Charakteristik verändert würde. Eingedenk dieser nach wie vor grossen Unsicherheit in den Abschätzungen der zukünftigen regionalen Klimaverhältnisse hat Ehrler (1998) seine Abflussmodellierungen im Rheineinzugsgebiet mit 15 verschiedenen Klimaszenarien durchgespielt. Durch die Kombination von zwei dieser Szenarien (von Ehrler TP2 und PU2 genannt) kann der heutige Kenntnisstand zur möglichen zukünftigen saisonalen Klimaentwicklung im Alpenraum recht gut abgebildet werden (Tabelle 1). Deshalb wird diese Kombination hier als «realistische Variante» bezeichnet. Einzig die angenommene sommerliche Temperaturzunahme von +2 °C liegt deutlich über den heutigen Abschätzungen. Ehrler erhält dadurch eine verstärkte sommerliche Verdunstung.

Um den Schwankungsbereich der anschliessend dargestellten Abflussberechnungen gesamthaft abzustecken, soll neben dieser «realistischen Variante» eine deutlich «übertriebene Variante» in die Diskussion miteinbezogen werden. Dabei bietet sich an, auf die Szenarien zurückzugreifen, welche Ehrler für den Zeithorizont 2100 durchgerechnet hat. Unter Beibehaltung der bisherigen Grundaussage – markante Änderungen im Winter, geringe Änderungen im Sommer – führt dies zu einer Temperaturzunahme von +3 °C in beiden Jahreszeiten sowie zu einer winterlichen Niederschlagszunahme von +20 %. Die sommerliche Niederschlagsänderung ist wiederum vernachlässigbar (Kombination der Szenarien Ehrler TP3 und PU3).

Tabelle 2. Gemessene mittlere Rheinabflüsse des Alpenrheins in Felsberg.

Messperiode	*Jahre*	*Mittlerer Abfluss m^3/s*
1899–1906	8	108
1913–1931	19	127
1932–1961	30	116
1962–1990	29	115

3. Einfluss auf das Abflussregime

In alpinen Einzugsgebieten wird das im Jahresgang dominierende sommerliche Abflussregime einerseits von der aktuellen Sommerwitterung bestimmt. Entscheidend sind andererseits aber auch die im Sommer schmelzenden Schneereserven des vergangenen Winters. Das verlangt neben der Abschätzung der zukünftigen Niederschlags- und Temperaturverhältnisse eine nähere Betrachtung der erwarteten winterlichen Schneeverhältnisse. Die kombinierte Wirkung einer Temperatur- und Niederschlagszunahme im Winter reduziert in den tiefer liegenden alpinen Regionen die Schneemächtigkeit. In den höheren Gebieten mit genügend tiefen Temperaturen wächst hingegen die Schneemächtigkeit mit zunehmenden Winterniederschlägen. Im Zusammenhang mit der Schneedecke stellt sich deshalb die Frage, wie stark die Niederschlagszunahme der Temperaturzunahme insgesamt entgegenwirkt. Nach den Simulationen von Ehrler (1998) vermag im Einzugsgebiet Rhein-Felsberg eine Niederschlagszunahme von 10 % eine Temperaturerhöhung um 2 °C insgesamt nicht zu kompensieren. Im Vergleich zu heute reduzieren sich also unter diesen Bedingungen die Schneereserven. Im Falle einer Temperaturzunahme um +3 °C und einer Niederschlagszunahme um 20 % ist gar eine deutliche Reduktion der Schneereserven zu erwarten. Die Ausaperung ist bei beiden Simulationen (2 °C und 3 °C erhöhte Wintertemperaturen) um zwei bis vier Wochen früher abgeschlossen.

Tabelle 3. Gerechnete Rheinabflüsse in Felsberg.

Szenario	Abfluss in Mio m^3			m^3/s
	Winter	Sommer	Jahr	Jahr
Normjahr heute	872	3010	3882	123
realistische Variante	984	2691	3639	115
übertriebene Variante	1099	2595	3694	117

Tabelle 4. Gerechnete Nutzwassermenge in Felsberg bei einem Schluckvermögen von 120 m^3/s.

Szenario	Nutzwassermenge in Mio m^3		
	Winter	Sommer	Jahr
Normjahr heute	860	1618	2478
realistische Variante	965	1634	2599
übertriebene Variante	1078	1631	2709

Tabelle 5. Einfluss der Klimaänderung bis 2050 auf die Stromproduktion des angenommenen Wasserkraftwerkes. Mehrproduktion (+), Minderproduktion (–) in % gegenüber dem heutigen Normjahr.

Szenario	Winter	Sommer	Jahr
realistische Variante	+12	+1	+5
übertriebene Variante	+25	+1	+9

Das hier betrachtete Abflussregime des Einzugsgebiets Rhein-Felsberg zeigt heute den alpinen eingipfligen Jahresgang mit der Abflussspitze im Juni (Bild 1). Der Sommerabfluss beträgt 78 %, der Winterabfluss 22 % des Norm-Jahresabflusses (Tabelle 3). Durch die Simulation einer winterlichen Erwärmung mit früherer Schneeschmelze und reduziertem Einfluss der ausgleichenden sommerlichen Gletscherschmelze verringert sich allgemein der anteilmässige Abfluss im Juli und August. Für das Szenario gemäss der «realistischen Variante» gilt: Der Anstieg der Wintertemperatur um +2 °C und des Winterniederschlags um +10 % lässt den winterlichen Abfluss auf 113 % des heutigen Norm-Winterabflusses steigen. Der Sommerabfluss geht grob abgeschätzt auf etwa 89 % des heutigen Norm-Sommerabflusses zurück. Und für das Szenario gemäss der «übertriebenen Variante» lässt sich folgern: Steigt die Wintertemperatur um +3 °C und nehmen die Winterniederschläge um 20 % zu, erhöht sich der Winterabfluss auf 126 %. Der Sommerabfluss bewegt sich dafür, und das vor allem infolge der deutlich reduzierten Schneereserven, im Bereich von etwa 86 % des heutigen Norm-Sommerabflusses.

4. Fiktives Laufwerk: das Rheinkraftwerk Felsberg

Die in Tabelle 3 festgehaltenen Abflüsse sind identisch mit den Szenarien des Wasserdargebots für ein in Felsberg stehendes und als Laufwerk ausgebildetes Rheinkraftwerk. Dabei kann ein solches Laufwerk selbstverständlich nicht das gesamte Dargebot nutzen, sondern nur jene Menge, die es zu schlucken vermag.

Zur Konkretisierung wird hier ein fiktives Laufwerk angenommen, das als Flusskraftwerk ausgebildet ist. Das heisst, es steht mit seinem Maschinenhaus und Wehr im Alpenrhein bei Felsberg und verarbeitet das anfallende Wasser ohne Wasserausleitung. Für sein Schluckvermögen wird ein Wert von 120 m^3/s angenommen. Diese 120 m^3/s werden sowohl im Normjahr wie beim tatsächlichen Durchschnittsjahr der Periode 1962–1990 an 120 Tagen pro Jahr erreicht beziehungsweise überschritten. Auf einen solchen Wert sind in der Schweiz mehrere ältere Laufwerke ausgelegt. Das gilt beispielsweise auch für das benachbarte, 1962 in Betrieb genommene Kraftwerk Reichenau-Ems (Lem, 1966).

Um das Beispiel nicht zu strapazieren, wird bezüglich Stauhöhe keine Annahme getroffen. Das bedeutet, dass der Einfluss der Stauhöhe ausser acht gelassen wird. In Wirklichkeit halten die meisten Flusskraftwerke zwar ihren Oberwasserspiegel konstant, unterliegen aber zwangsläufig den abflussbedingten Schwankungen des Unterwasserspiegels. In andern Worten: Hier wird nur untersucht, welchen Anteil des Wasserdargebots das fiktive Laufwerk schlucken und verarbeiten könnte. Es geht hier also nur um Vergleiche auf der Basis der sogenannten Nutzwassermenge.

Zur Berechnung der Nutzwassermenge dienen die Tagesmittel der von Ehrler ermittelten und hier weiter bearbeiteten Abflüsse. Auf die Berücksichtigung von stündlichen Abflussschwankungen musste dabei nicht eingegangen werden. Denn einerseits setzt die Arbeit von Ehrler ja einen Zustand ohne Kraftwerksspeicher im Einzugsgebiet und damit ohne Schwallbetrieb voraus. Andererseits ist die Vergletscherung zu klein, um in Felsberg markante tägliche Schmelzwasserspitzen zu erzeugen. Ein Fehler kann sich bei dieser Berechnungsart einzig zufolge rasch anschwellender Hochwasser einschleichen, doch ist er vernachlässigbar. Das Ergebnis zeigt Tabelle 4.

5. Folgerungen

Infolge der vorausgesagten Klimaänderung wird der Jahresabfluss im Rhein bei Felsberg kleiner. Gemäss Tabelle 3 macht das sowohl beim «realistischen» wie beim «übertriebenen» Szenario etwa 5 % aus. Dabei findet, wie schon in Abschnitt 3 angedeutet, eine markante Verlagerung vom Sommer- zum Winterabfluss statt. Ja, es ergibt sich, dass die Verringerung des Jahresabflusses allein auf die Abnahme des Sommerabflusses zurückzuführen ist. Denn der Winterabfluss nimmt ja eindeutig zu.

Um den Einfluss dieses veränderten Wasserdargebots auf die Produktion des angenommenen Laufwerkes zu beurteilen, muss dessen Schluckfähigkeit berücksichtigt werden. Diese beträgt nach Voraussetzung 120 m^3/s. Schon ein Blick auf Bild 1 zeigt, dass das Kraftwerk vom höheren Wasseranfall im Winter weit mehr profitiert, als es vom geringeren im Sommer betroffen wird. Die zugehörigen Zahlen gibt Tabelle 4 wieder: Die Nutzwassermenge steigt im Winter beim «realistischen» Szenario um 12 % und beim «übertriebenen» um 25 %. Demgegenüber wiegt die Zunahme der Nutzwassermenge im Sommer von 1 % bei beiden Szenarien leicht. Auf das ganze Jahr bezogen, wächst die Nutzwassermenge entsprechend um 5 % beziehungsweise um 9 %.

Dieser Sachverhalt lässt sich auch anders ausdrücken: Die vorausgesagte Klimaänderung bewirkt einerseits eine Verminderung des Jahresabflusses und führt andererseits zu einer besseren Verteilung des Wasserdargebots über das Jahr. Aus der

Sicht der Wasserkraftnutzung sind das zwei gegenläufige Effekte, die sich in ihrer Wirkung hier aber nicht aufheben. Das heisst, dass aufgrund der angenommenen Szenarien der Einfluss der besseren Verteilung überwiegt und damit sowohl die jährliche wie insbesondere die wertvolle winterliche Nutzwassermenge erhöht.

Setzt man die Nutzwassermenge zur Stromproduktion proportional, ergibt sich die Tabelle 5. Die vorausgesagte Klimaänderung wirkt sich auf die Produktion des angenommenen Laufwerks bei Felsberg also gesamthaft positiv aus: Die Produktion vergrössert sich! An dieser Aussage würde auch die Mitberücksichtigung der variablen Nutzfallhöhe nichts ändern.

Im Sinne einer Sensibilitätsstudie wurde die gleiche Berechnung noch für ein Laufwerk mit einem höheren Schluckvermögen von 160 m^3/s durchgeführt. Das entspricht einem Rheinabfluss, der heute im Durchschnitt an 80 Tagen pro Jahr erreicht oder überschritten wird. Auf diesen Wert würde in etwa ein heutiger Neubau in Felsberg ausgerichtet. Das Ergebnis fällt ähnlich aus wie bei einem Schluckvermögen von 120 m^3/s. Das heisst, die Winterproduktion steigt je nach Szenario um 12 oder 26 %, die Sommerproduktion sinkt um 2 oder 3 %, und die Jahresproduktion nimmt um 2 oder 6 % zu. Die berechneten Änderungen beziehen sich, wie gesagt, auf das Normjahr und damit annähernd auf ein heutiges Durchschnittsjahr. Für die Beurteilung von Tabelle 5 sind deshalb noch die Schwankungen der Jahresabflüsse von Interesse. Sie liegen für die Messperiode 1962–1990 innerhalb eines Streubands von rund ± 27 %. Entsprechend schwanken auch die jährlichen Nutzwassermengen für das angenommene Kraftwerk innerhalb eines Streubands von etwa ± 13 %. Dieser Wert dürfte auch für die gewählten Szenarien gelten. Das bedeutet, dass der Einfluss der Klimaänderung in den nächsten ein bis zwei Jahrzehnten sicher noch durch die jährlichen Produktionsschwankungen überprägt werden wird. Später macht er sich dann aber vor allem durch die erwähnte Steigerung der Winterproduktion bemerkbar.

6. Möglicher Einfluss auf ein Speicherwerk

Das hier betrachtete fiktive Wasserkraftwerk am Rhein bei Felsberg ist ein Laufwerk. Daher gelten die vorgestellten Ergebnisse für vergleichbare Anlagen an schweizerischen Alpenflüssen, das heisst praktisch für alle schweizerischen Laufwerke. Sie lassen sich aber nicht ohne weiteres auf Speicherwerke übertragen. Doch kann man für diese immerhin folgende Überlegungen anstellen:

Falls es möglich wäre (was nicht der Fall ist), in Felsberg einen Speicher zu bauen, könnte das Schluckvermögen des Kraftwerkes gesteigert werden. Bei einem grossen Speicher liesse sich dann das gesamte Wasserdargebot verarbeiten. Damit würde sich die Klimaänderung durch eine Verminderung der jährlichen Stromproduktion bis zum Jahr 2050 von rund 5 % bei beiden Szenarien bemerkbar machen (Tabelle 3). Nun liegen die Speicher der schweizerischen Speicherwerke aber meist wesentlich höher als Felsberg, so dass sie einem andern Zuflussregime unterliegen. Auch werden sie häufig nicht nur von direkten Zuflüssen gespeist, sondern auch von Zuleitungen aus Nebentälern. Das bedeutet, dass sich dort die Beschränkung der Nutzwassermenge durch die Schluckfähigkeit der Fassungen ebenfalls selektierend auswirkt. Die erwähnte Energieeinbusse von 5 % ist daher wohl als obere Grenze und bloss als Grössenordnung zu verstehen. Eine Berechnung ist mangels entsprechender Untersuchungen von hochalpinen Gewässern nicht möglich.

Zusammenfassung

«Klimaänderung und alpine Schneedecke; Auswirkungen auf das Abflussregime am Beispiel des Einzugsgebiets Rhein-Felsberg» lautet der Titel eines der Schlussberichte des Nationalen Forschungsprogramms «Klimaänderungen und Naturkatastrophen (NFP31)». Der entsprechende Verfasser ist Cornel Ehrler (1998). Seine Ergebnisse ermöglichen es, den Einfluss der Klimaänderung auf ein fiktiv am Rhein in Felsberg stehendes Laufwerk zu berechnen. Dies geschieht hier für ein Klimaszenario, das auf das Jahr 2050 zielt und aus heutiger Sicht als wahrscheinlich erscheint. Deshalb wird es hier auch als «realistische Variante» bezeichnet. Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse wird überdies noch eine «übertriebene Variante» betrachtet.

Als Vergleichsbasis dient das von Ehrler aus den 1962–1990 durchgeführten Abflussmessungen konstruierte Normjahr. Dabei handelt es sich praktisch um ein heutiges Durchschnittsjahr, das den Einfluss der Speicher im Einzugsgebiet ausser acht lässt. Das Fazit der Berechnungen für die «realistische Variante» der Klimaentwicklung lässt sich wie folgt zusammenfassen: Der Abfluss des Rheins bei Felsberg nimmt infolge der Klimaänderung zwar ab, doch nimmt die Nutzwassermenge des dort gedachten Laufwerkes zu. Bei einem Schluckvermögen, das etwa jenem einer um 1960 gebauten Anlage entspricht, macht diese Zunahme jährlich 5% aus. Sie rührt daher, dass die Winterabflüsse zu Lasten der Sommerabflüsse grösser werden und fast vollständig verarbeitet werden können. Der jährliche Produktionsgewinn von entsprechend 5% geht mit einem Gewinn an Winterenergie von 12% einher. Das Fazit für die «übertriebene Variante» wären rund doppelt so grosse Prozentwerte. In andern Worten: Die zu erwartende Klimaänderung macht sich für das fiktive Rheinkraftwerk Felsenau günstig bemerkbar.

Diese Aussage lässt sich weitgehend verallgemeinern. Sie gilt zunächst fast uneingeschränkt für alle schweizerischen Laufwerke, die nicht oder nur wenig von Speichern im Einzugsgebiet beeinflusst werden. Sie gilt in ihrer Tendenz aber auch für die andern Laufwerke. Für Speicherwerke lassen sich mangels einer zu Ehrler (1998) vergleichbaren Grundlage keine genauen Aussagen machen.

Abschliessend danken die Verfasser noch den Herren Dr. Klaus Seidel und Johann Schaper vom ETH-Institut für Kommunikationstechnik für die Zurverfügungstellung der Tagesabflussreihen von Ehrler (1998).

Literatur

Bader, S., Kunz, P., 1998: Klimarisiken – Herausforderung für die Schweiz. Wissenschaftlicher Schlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms «Klimaänderungen und Naturkatastrophen» (NFP31). vdf, Hochschulverlag an der ETH Zürich.

Ehrler, C., 1998: Klimaänderung und alpine Schneedecke; Auswirkungen auf das Abflussregime am Beispiel des Einzugsgebiets Rhein Felsberg. Bericht des Nationalen Forschungsprogramms «Klimaänderungen und Naturkatastrophen» (NFP31). vdf, Hochschulverlag an der ETH Zürich

Lem, J., 1966: Das Kraftwerk Reichenau-Ems. Schweizerische Bauzeitung Jg. 84, H. 42, 20. Okt., Zürich.

Adressen der Verfasser: Prof. Dr. *Daniel Vischer,* Im Waldheim 4, CH-8304 Wallisellen, und Dr. *Stephan Bader,* SMA-Meteo Schweiz, Postfach 514, CH-8044 Zürich.