Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 84 (1993)

Heft: 16

Artikel: 40 Jahre Zuflussprognosen für die Elektrizitätswirtschaft : Stand der Forschung und Ausblick

Autor: Lang, H. / Jensen, H. / Rohrer, M. B.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902706

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: 02.01.2026

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

Der Neubau von Wasserkraftanlagen ist in der Schweiz nahezu unmöglich geworden. Um so grössere Bedeutung kommt deshalb der optimalen Nutzung der bestehenden Wasserkraftwerke zu (Hartmann, 1990). Die Abteilung Hydrologie am Geographischen Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in Zürich stellt der Elektrizitätswirtschaft seit über 40 Jahren hydrologische Grundlagen zur Optimierung des Betriebes und Einsatzes von Wasserkraftanlagen zur Verfügung. Diese Grundlagen umfassten von Beginn an echte Zuflussvorhersagen, deren Wert und Brauchbarkeit in der Vorhersageperiode jederzeit überprüft werden kann. An deren Verbesserung wurde ständig gearbeitet, so auch während der letzten zwei Jahre im Rahmen einer Forschungskooperation zwischen der ETH und der Nordostschweizerischen Kraftwerke AG (NOK). Dabei wurden unter anderem folgende Resultate erzielt: Je nach Einzugsgebiet ist bereits ab dem Termin 1. März eine erste Abschätzung des zu erwartenden Sommerzuflusses möglich. Im Kurzfrist-Prognosebereich bringt der Einbezug von Stundendaten des automatischen Netzes der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) eine Verbesserung der Prognosen.

40 Jahre Zuflussprognosen für die Elektrizitätswirtschaft: Stand der Forschung und Ausblick

■ H. Lang, H. Jensen, M. B. Rohrer, U. Steinegger, J. G. Vit

Einführung

In der Schweiz erreicht der Bedarf an elektrischer Energie im Winter die höchsten Werte. Um dieser Nachfrage gerecht zu werden, wird in hochgelegenen Speicherseen möglichst viel Wasser der sommerlichen Zuflüsse zurückgehalten. Reichen die natürlichen Zuflüsse nicht aus, um den gewünschten Füllstand der Seen zu erreichen, so kann bei Umwälzwerken Wasser aus tiefer gelegenen Becken in die Seen gepumpt werden. Insgesamt kann auf diese Weise etwa ein Drittel

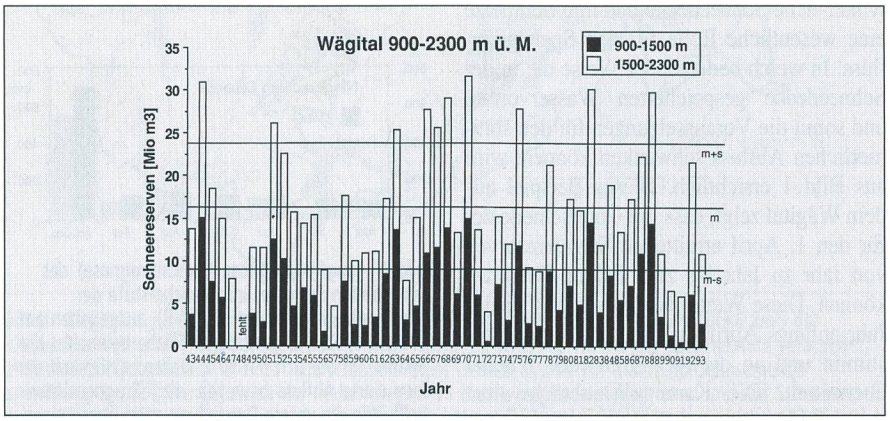


Bild 1 Langjährige in der Schneedecke gespeicherte Wasserreserven im Wägital am 1. April, getrennt nach unterem und oberem Teil des Einzugsgebietes. Der Mittelwert (m) beträgt 16,3 Mio m³ und die Standardabweichung (s) 7,5 Mio m³. Man beachte die grossen Jahr-zu-Jahr-Schwankungen der in der Schneedecke gespeicherten Wasservorräte, die bis zum Faktor 8 reichen können! (nach Lepori, 1992; leicht verändert)

Adresse der Autoren:
Prof. Dr. *H. Lang*, *H. Jensen*, Dr. *M. B. Rohrer*, *U. Steinegger*, Geographisches Institut ETH, Winterthurerstrasse 190, CH–8057 Zürich,
J. G. Vit, Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Parkstrasse 23, CH–5401 Baden.

der in der Schweiz produzierten Elektrizität auf Abruf zur Verfügung gestellt werden (VSE, 1987). Die von den Speicherkraftwerken im Winter erzeugbare Energiemenge ist vom Speichervolumen und dem aktuellen Speicherinhalt abhängig. Hingegen spielt die momentane natürliche Zuflussmenge im allgemeinen keine wesentliche Rolle. Dank der hohen Einsatzflexibilität dieser Werke wird fast ausschliesslich Energie produziert, die zur Deckung der Bedarfsspitzen benötigt wird (sogenannte «Spitzenenergie»). Bei Laufkraftwerken hingegen muss das anfallende Wasser sofort zur Energieproduktion genutzt oder ungenutzt abgeleitet werden. Die momentanen natürlichen Abflussmengen und die installierte Leistung der Turbinen bestimmen die erzeugbare Energiemenge, hier spricht man, wie bei Kernkraftwerken, von «Bandenergie».

Strommangel oder -überschuss in einem Versorgungsgebiet wird auf dem nationalen oder internationalen Strommarkt bei nach Angebot und Nachfrage schwankenden Preisen ausgeglichen. Je früher bevorstehende hydrologische Situationen erkannt werden, desto vorteilhafter können die notwendigen Dispositionen getroffen werden. Abflussprognosemodelle stellen dabei ein Werkzeug dar, welches die Planung der Wassernutzung und -bewirtschaftung verbessern hilft. In diesem Beitrag werden die Anwendungen und Resultate von zwei Modellen für unterschiedliche Zeitskalen behandelt: Kurzfristige Abflussvorhersagen betreffen die hydrologischen Bedingungen der nächsten ein bis fünf Tage. Als Inputgrössen werden mindestens Niederschlags- und Temperaturprognosen verwendet. Bei Prognosen mit grösseren Zeitschritten, die auf Erwartungswerten basieren, spricht man von Langfrist-Vorhersagen. Für beide Vorhersagearten ist es notwendig, die Ausgangslage in einem Untersuchungsgebiet bei der Prognoseausgabe möglichst optimal in die Prognose einzubeziehen. Da die meisten Speicher in voralpinen oder alpinen Gebieten liegen, spielen die winter-liche Schneedecke und ihre Schmelze eine wesentliche Rolle für den Speicherzufluss. In welch bedeutender Weise die in der Schneedecke gespeicherten Wasservorräte und somit die Voraussetzungen für den sommerlichen Abfluss schwanken können, wird aus Bild 1 ersichtlich. Dieses Beispiel aus dem Wägital zeigt, dass die Unterschiede der für den 1. April ermittelten Schneereserven von Jahr zu Jahr bis zum Faktor 8 reichen können. Diese Werte werden seit 1943 jedes Jahr anfangs April aus Punktmessungen bestimmt und an die AG Kraftwerk Wägital übermittelt. Die Karte «Wasseräquivalent der Schneedecke des Hydrologischen Atlas der Schweiz» (HADES, 1992) liefert einen Überblick über die entsprechenden Verhältnisse für den schweizerischen Alpenraum.

Langfristprognosen

Die Sommerabflüsse aus alpinen Einzugsgebieten werden in bedeutendem Ausmass durch die Schneeschmelze und somit von den festen Niederschlägen des vorangehenden Winters beeinflusst. Dieser Sachverhalt und weitere Informationen über den Zustand eines Einzugsgebietes werden genutzt, um im Frühjahr mit linearen Regressionsmodellen Vorhersagen der Sommerabflüsse – sogenannte Langfrist- oder Saisonprognosen – zu erstellen (Jensen, 1974 und 1979). Seit 40 Jahren werden von der Abteilung Hydrologie des Geographischen Institutes der ETH Zürich, vormals an der Versuchsanstalt für Wasserbau (VAW), Prognosen für unterschiedliche Gebiete ausgegeben. Im Rahmen der Forschungszusammenarbeit mit der NOK wurden u.a. für die Speicher- und Laufstufe der Kraftwerke Vorderrhein AG (KVR) die Grundlagen für Langfristprognosen erarbeitet (Bild 4). Die ersten Vorhersagen in diesem Gebiet konnten für den Sommerzufluss 1992 (April – September) ausgegeben werden. Die Prognosen werden als *Wahrscheinlichkeitsintervall* angegeben, wobei im Beispiel (Bild 2) die Prognosewerte dargestellt sind, die mit 90%, 50% und 10% Wahrscheinlichkeit überschritten werden.

Die Prognose fiel in der zweiten Vorhersagehälfte etwas zu hoch aus, bedingt durch die deutlich unter dem Erwartungswert liegenden Sommerniederschläge 1992 (vgl. Niederschlag Disentis, Bild 2). Dennoch liegt der gemessene Abfluss in diesem Jahr wie prognostiziert über dem langjährigen Mittelwert (m = 160,9 Mio m³, n = 24). Bei wesentlichen Abweichungen des Niederschlages von den Erwartungswerten kann die Genauigkeit der Prognose im Laufe des Sommers durch Nachführen erhöht werden. Die nicht prognostizierbaren Sommerniederschläge und das Verhältnis zwischen Winter- und Sommerniederschlag bestimmen im wesentlichen die erreichbare Genauigkeit der Prognosen. Eine Schweizer Karte mit den Verhältnissen zwischen Winter- und Sommerniederschlag und den Standardabweichungen der Sommerniederschläge ist in Rohrer (1992) publiziert.

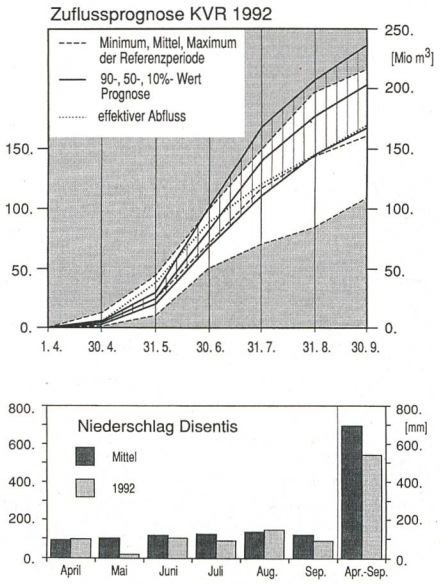


Bild 2 Langfristprognose (Saisonprognose) des kumulierten Zuflusses zur Speicherstufe der Kraftwerke Vorderrhein AG (KVR), ausgegeben am 3. April 1992. Die gestrichelte Fläche beinhaltet die Spanne, in der sich mit 80% Wahrscheinlichkeit der kumulierte Abfluss bewegen wird (Prognoseintervall). Wie die untere Darstellung zeigt, war wegen eines im Vergleich zum klimatologischen Wert zu trockenen Sommers 1992 der kumulierte Zufluss Ende September am unteren Rand des Prognoseintervalls

Zur frühzeitigen Abschätzung der minimal produzierbaren Energiemenge im Langfristbereich dienen **Niederwasser-Abflussprognosen**. In Bild 2 stellt die tiefste Prognosekurve die Abflussmengen dar, welche mit nur 10% Wahrscheinlichkeit unterschritten wird. Diese Abflusskurve setzt sich zusammen aus dem relativ sicheren Abfluss aus der Entleerung der Wasserinhalte der Speicherräume des Einzugsgebietes, in diesem Fall hauptsächlich Schnee, und aus einer minimalen Abflussbildung aus Niederschlägen, mit der unter unseren klimatischen Bedingungen auch in trockenen Sommern gerechnet werden kann. In einer neueren Untersuchung zeigt Rohrer (1992), dass sinnvolle Abschätzungen der zu erwartenden Sommerabflüsse, wie sie hier beschrieben sind, bereits ab Anfang März möglich sind.

Neben der erwähnten Abschätzung der zu erwartenden Sommerabflüsse werden von der Abteilung Hydrologie auch Vorhersagen des **Mindestabflusses** im Sinne von Trockenwetterkurven erstellt (Bild 3).

Dabei wird davon ausgegangen, dass in der Prognoseperiode keine abflussbildenden Prozesse auftreten. Bei dieser Prognose handelt es sich also um eine reine Abfluss-Rezessionslinie. Der Einfluss der Vorperiode beschränkt sich dabei auf die zum Zeitpunkt der Ausgabe der Vorhersage im Einzugsgebiet vorhandenen flüssigen Wasservorkommen. Unter unseren klimatischen Bedingungen ist die Dauer von reinem Trockenwetterabfluss im allgemeinen auf wenige Tage bis Wochen beschränkt. Lediglich im Hochgebirge treten im Winter bei unter dem Gefrierpunkt liegenden Temperaturen längere «Trockenwetterperioden» auf (Jensen und Lang, 1989).

Bild 3 zeigt eine Mindestabfluss-Vorhersage für den Rhein bei Rheinfelden, berechnet aus den Mindestabflüssen der Teileinzugsgebiete Rhein bis Bodensee, Aare bis Bielersee, Limmat bis Baden, Reuss bis Luzern und des Restgebiets bis Rheinfelden. Die Prognose wurde am 7. Dezember 1992

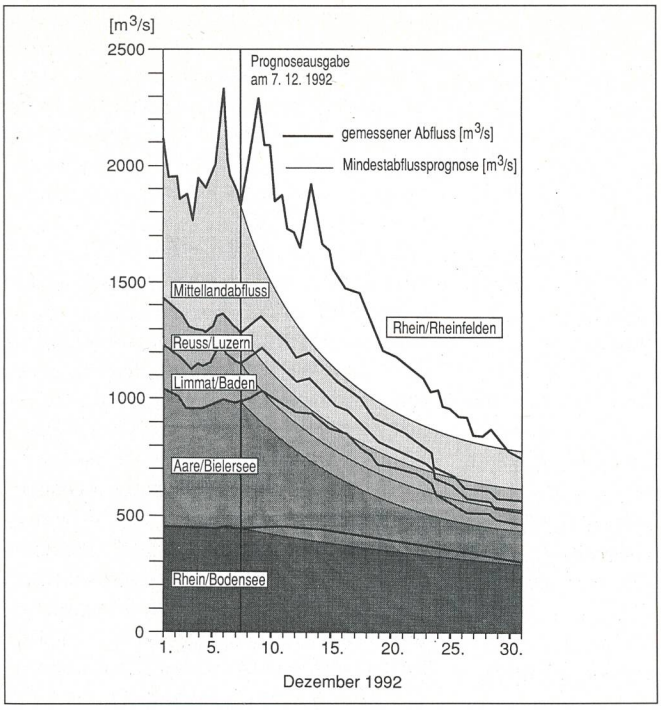


Bild 3 Darstellung einer Mindestabflussprognose für den Rhein bei Rheinfelden, die am 7. Dezember 1992 für die Interessenten ausgegeben wurde. Die Prognose setzt sich aus den berechneten Mindestabflüssen der Teileinzugsgebiete zusammen. Die dünnen Linien bezeichnen die Kurven, die, Trockenwetter vorausgesetzt, mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht unterschritten werden. Die dicken Linien stellen den eingetretenen Abfluss dar (nachträglich verifiziert). Speziell um die Weihnachtszeit wird der Einfluss der Regulierung des Bieler-, Vierwaldstätter- und Zürichsees auf den Abflussverlauf sichtbar

ausgegeben und orientierte die Interessenten über die mit grosser Wahrscheinlichkeit minimal verfügbaren Wassermengen für den Rest des Monats. Die nachträglich eingetragenen, gemessenen Abflüsse widerspiegeln den Witterungsverlauf und die entsprechende Reaktion der Teileinzugsgebiete: Das feuchte Wetter der ersten Dezemberhälfte wurde durch trockene und kalte Tage abgelöst. Der Rückgang des Abflusses wurde zudem beschleunigt durch Regulierungen an den Wehren des Bieler-, Vierwaldstätter- und Zürichsees speziell um die Weihnachtszeit. Diese schwer prognostizierbaren Eingriffe bewirkten das Absinken des Abflussverlaufs der Limmat und der Reuss unter die Prognosekurven. Die eigentliche Zielgrösse, der Mindestabfluss des Rheins bei Rheinfelden, wurde dennoch gut vorhergesagt.

Kurzfristprognosen

Das Prognosemodell

Im Rahmen der zweijährigen Forschungskooperation mit der NOK wurden Grundlagen für Kurzfristprognosen erarbeitet. Dabei wurde ein Abflussmodell entwickelt, das allein aufgrund operationell verfügbarer Daten der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) den Abfluss berechnet. Dieses Modell setzt sich zusammen aus einer für alpine Gebiete unerlässlichen Schnee-/Gletscherschmelz-Routine und einer Abflussroutine. Der Schnee- und Gletscherschmelzteil wurde vom HBV-ETH-Modell (Braun and Lang, 1986) übernommen und ist bereits für verschiedene Einzugsgebiete erfolgreich angewendet worden (Braun and Renner, 1992; Lorenzi, 1992). Dem Abflussteil liegt ein einfacher autoregressiver Ansatz zugrunde, das heisst in die Berechnung des Abflusses zu einem bestimmten Zeitpunkt t wird unter anderem der bekannte Abfluss des vorhergehenden Zeitpunktes t-1 einbezogen.

Die Abfluss- respektive Zuflussprognosen bestehen nicht in der Angabe eines einzelnen Abflusswertes, sondern eines *Wahrscheinlichkeitsintervalls*. Letzteres besagt, dass der tatsächliche Abfluss mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit innerhalb der prognostizierten Grenzen liegen wird. Die Güte einer Prognose ist stark abhängig von der Qualität der Eingangsdaten, das heisst hauptsächlich von der Zuverlässigkeit der Niederschlags- und Temperaturprognosen. Diese beeinflussen wiederum die Prognose der Höhe der Schneefallgrenze. Diesbezüglich befindet sich unser ETH-Institut in der vorteilhaften Lage, auf jahrzehntelange Erfahrung in der Erstellung und Interpretation von Niederschlags- und Schneegrenzprognosen abstützen zu können (Grebner, 1978; Lang et al., 1987; Jensen, 1989, Rohrer, 1989).

Das Prognosemodell wurde auf die beiden in Bild 4 dargestellten Einzugsgebiete der KVR angewendet. Als Eingangsdaten für das Modell werden mindestens Niederschlag und Lufttemperatur verwendet. Zur Eichung und Verifikation der berechneten Abflüsse dienen die Zuflüsse zu den Stauseen der Speicherstufe respektive der Abfluss der Laufstufe. Um die zeitliche Auflösung von Niederschlagsprognosen ausnützen zu können, wird in Halbtagesschritten gerechnet, obwohl die Abflussdaten nur im Tagesschritt verfügbar sind. Die beiden Einzugsgebiete werden in Höhenzonen von 200 m vertikaler Ausdehnung unterteilt, wobei der Abfluss jeweils für

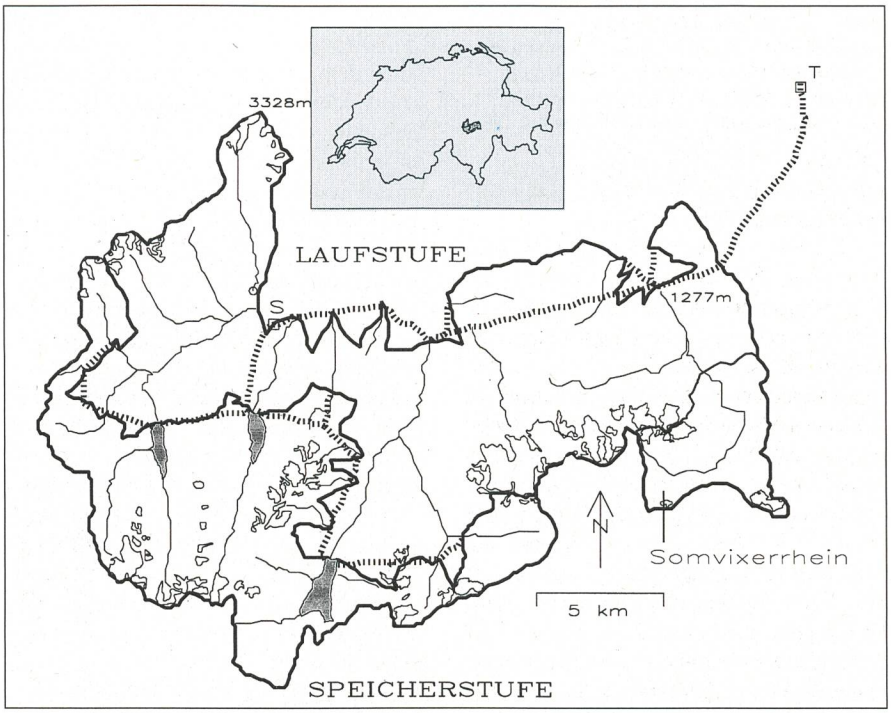


Bild 4 Darstellung der Speicherstufe (Seeneinzugsgebiet: 107 km²) und der Laufstufe (213,6 km²) der Kraftwerke Vorderrhein AG (KVR). In der Zentrale Sedrun (S) wird das Wasser der Speicherstufe verarbeitet, in Tavanasa (T) zusätzlich jenes der Laufstufe. Für diese Gebiete wurde ein Kurzfristprognosemodell entwickelt, das auf Stundendaten der meteorologischen Netze, auf Vorhersagegrössen und auf Schneemessungen beruht. Die Vergletscherung der Speicherstufe beträgt 7,67 km² (7,2%) jene der Laufstufe 12,85 km² (6%). Trotz des geringen Flächenanteils kann die Gletscherschmelze einen wesentlichen Einfluss auf das Abflussgeschehen haben, deshalb wurde ein besonderes Gewicht auf die richtige Modellierung der Gletscherabflüsse gelegt. Das Einzugsgebiet des Somvixerrheins bis Encardens (21,8 km²) ist ein Teil der Laufstufe

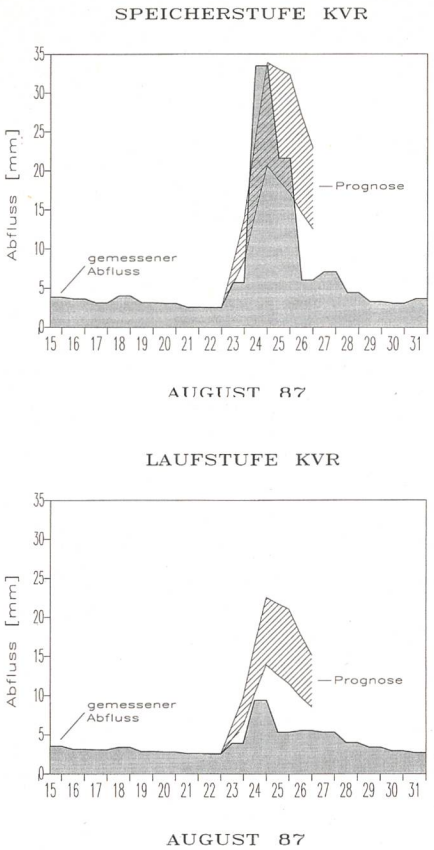


Bild 5 Kurzfrist-Abfluss-Prognose in Halbtagesschritten für das Hochwasser-Ereignis vom 24. bis 26. August 1987 (nachträglich erstellt) für die Speicher- und Laufstufe der Kraftwerke Vorderrhein AG (KVR) ausgehend vom 23. August 0 Uhr 00. Als Grundlagen wurden nur die Daten und Prognosewerte verwendet, die zu diesem Zeitpunkt bekannt waren (Prognosestart ®). In der Laufstufe treten durch Fassungsverluste grosse Unterschiede zwischen prognostizierten und gefassten Abflüssen auf. Die Daten benachbarter Abflussmessstationen bestätigen die prognostizierten Abflussmengen (Somvixerrhein 20.8 mm/12 h, Hinterrhein 33,2 mm/12 h am 24. Aug. 1987)

jede einzelne Höhenstufe berechnet wird. Diese Teilabflüsse werden schliesslich zum Gebietsabfluss aufsummiert.

Ein Beispiel einer Kurzfristprognose für die beiden Einzugsgebiete der KVR, in diesem Fall nachträglich berechnet, ist in Bild 5 zu sehen. Sie wurde für das Starkniederschlagsereignis vom 24. bis 26. August 1987 erstellt, ausgehend vom 23. August um 0.00 Uhr. Der gemessene Zufluss zu den Stauseen (Speicherstufe) liegt im berechneten Prognoseband, welches mit Hilfe von am 23. August verfügbaren maximalen bzw. minimalen Prognosewerten für den Niederschlag bestimmt wurde. Es wurden nur Unterlagen verwendet, die auch bei einer operationellen Vorhersage verfügbar gewesen wären. In der Laufstufe hingegen fielen die gemessenen Abflüsse viel geringer aus als die prognostizierten. Der Hauptgrund dafür liegt in grossen Fassungsverlusten, die während der heftigen Niederschläge und den entsprechend hohen Abflüssen aufgetreten sind sowie in Ausleitungen die zum Schutze der Anlagen vorgenommen wurden. Die prognostizierten Werte werden durch den Vergleich mit an benachbarten Messstationen gemessenen natürlichen Abflüssen bestätigt. So weisen zum Beispiel der Somvixerrhein bei Encardens mit einem mittleren Tagesabfluss von 41,6 mm am 24. August 1987 und 20,2 mm am 25. August 1987 oder der Hinterrhein bei Hinterrhein mit 66,4 bzw. 29,1 mm mehr als doppelt so grosse Abflussmengen auf wie die Laufstufe der KVR (19,0 bzw. 10,7 mm).

Es ist vorgesehen, in der nächsten interessanten Zuflussperiode die erarbeiteten Grundlagen in einer Echtzeitvorhersage zu testen. Die Resultate sollen als Informationserweiterung die Betriebsführung und das Energiemanagement unterstützen.

Aggregatzustand des Niederschlags

Die richtige Vorhersage der Niederschlagsform ist für die Güte der Abflussprognosen von entscheidender Bedeutung, denn aus denjenigen Gebieten eines Einzugsgebietes, in denen der Niederschlag als Schnee fällt, ist kein unmittelbarer Abfluss zu erwarten. Der feste Niederschlag wird in Form einer temporären Schneedecke oder als Firn gespeichert und erst später während der Schnee- bzw. Eisschmelze abflusswirksam. Dies wird beim Betrachten von Bild 6 deutlich, in dem die Lufttemperatur und die beobachtete Niederschlagsform der SMA-Stationen Gütsch und Disentis (Bild 6a) sowie der Abflussverlauf des Somvixerrheins bei Encardens und die mittlere Niederschlagsmenge der SMA-Stationen Disentis und Piotta (Bild 6b) dargestellt sind. Daraus wird ersichtlich, dass im Verlaufe des 5. Septembers 1984 starke Niederschläge eingesetzt haben, die den Abfluss des Somvixerrheins sprunghaft ansteigen liessen. Der starke Temperaturabfall und das damit verbundene sehr schnelle Absinken der Schneefallgrenze führte jedoch trotz anhaltender intensiver Niederschläge bald darauf zu einem drastischen Rückgang des Abflusses. Hinsichtlich des Absinkens der Schneefallgrenze sei hier noch angemerkt, dass an diesem 5. September an der Station Gütsch (2282 m ü. M.) um 15.00 Uhr noch ein Gemisch aus Schnee und Regen beobachtet wurde. Zwei Stunden später schneite es bereits in Disentis (1190 m ü. M.) und um 24.00 Uhr auch an der Station Chur-Ems (555 m ü. M.). Am Morgen des 6. September wurden folgende Neuschneehöhen gemessen: Chur 4 cm, Disentis 24 cm und Gütsch 54 cm. Dabei handelt es sich nach Angaben der SMA (Annalen, 1984) um das früheste Schneefalldatum für die Niederungen der Alpennordseite seit mindestens 120 Jahren. Im Gegensatz zum 5. September nahm der Abfluss während des Niederschlagsereignisses vom 14. bis 16. September 1984 aufgrund der geringeren Abkühlung wesentlich langsamer ab. Die Niederschläge fielen in diesem Fall bis auf 2000 m ü. M. als Regen und waren somit für den Somvixerrhein direkt abflusswirksam.

Im Hochsommer und Herbst ist flüssiger Niederschlag auf Gletscherflächen zu einem hohen Anteil abflusswirksam, und die Reaktionszeit des Abflusses ist kurz wegen des zu dieser Jahreszeit gut entwickelten Gletscherentwässerungssystems (Lang et al., 1979). Schneefall hingegen wirkt stark verzögernd. Wird eine Neuschneedecke aufgebaut, so werden zusätzlich die Schmelzraten von Altschnee und Gletschereis bei nachfolgendem Strahlungswetter stark reduziert. Besonders ausgeprägt ist die dadurch verursachte Reduktion der Abflussmenge bei zuvor aperen Gletschern. Auf der einen Seite verhindert die Neuschneedecke bis zu ihrem Abschmelzen die Eisschmelze, anderseits sind die Schmelzraten des Neuschnees wegen der hohen Reflektivität der Sonneneinstrahlung wesentlich geringer als bei Gletschereis. Ein Neuschneefall im Hochsommer kann die Gletscherabflüsse somit während Tagen stark reduzieren (Röthlisberger and Lang, 1989). Es hat sich gezeigt, dass die Vergletscherung im Vorderrheingebiet trotz des geringen Flächenanteils von 7,2 bzw. 6% einen wesentlichen Einfluss auf das Abflussgeschehen der Monate Juli bis Oktober haben kann.

Aus dem vorhergehenden Abschnitt geht hervor, dass Abflussprognosen durch Fehlklassifikationen des Aggregatzustandes des Niederschlags völlig fehlschlagen können. Diesbezüglich hat sich gezeigt, dass für Abfluss-Kurzfristprognosen durch den Einbezug von zeitlich hochaufgelösten Daten des automatischen Netzes der SMA eine wesentliche Verbesserung erzielt werden kann. So wird bei der Verwendung von Stundendaten anstelle von Halbtageswerten der Fehler bei der Bestimmung der Niederschlagsform stark reduziert. Der Übergang von Stunden- zu Zehnminutendaten hingegen bringt nur noch eine geringe Verbesserung und erhöht zudem die Rechenzeit um das Sechsfache. Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass die Zehnminutendaten der SMA für Aussenstehende nicht in Echtzeit verfügbar sind.

Zuflussprognosen und Kraftwerkeinsatz

Obschon die Wasserkraft im Verlaufe der letzten 25 Jahre ihre Exklusivität in der Produktion elektrischer Energie stetig eingebüsst hat, bleibt sie – bei einem Anteil von rund 60% im Jahresdurchschnitt – wichtig

genug, um Versuche zu wagen, die Stochastik ihrer Verfügbarkeit auch weiterhin zu untersuchen, mit dem Ziel, die vorhandenen Ressourcen möglichst optimal einzusetzen.

Etwa 60% der hydraulischen Produktion erbringen die sogenannten **Speicher**. Die Bedeutung der Speicherkraftwerke ist jedoch wesentlich grösser als ihr Produktionsanteil, sei es wegen der Vorteile einer Wasserturbine bei der Bedarfsanpassung und Produktion von Spitzenenergie oder wegen der immer noch einzigen wirksamen Art, elektrische Energie zu speichern. Die Speicherzuflüsse der füllungsrelevanten Sommerperiode (Mai – September) sind in der Regel grösser als das Speichervermögen selber. Sie schwankten – im Falle der NOK – in den letzten 25 Jahren zwischen 76% (1976) und 144% des Speichervermögens (1987; Bild 7). Diese Schwankungsbreite bedeutet fast 980 GWh (NOK) beziehungsweise 5700 GWh (CH). Es ist also von einer Energiemenge die Rede, die «ungesichert» innerhalb der fünf Sommermonate anfällt, mit einer möglichen Schwankungbreite von mehr als 10% der jährlichen Gesamtproduktion von Elektrizität in der Schweiz. Der energiewirtschaftliche Nutzen von Abflussprognosen wurde in Seidel et al. (1990) beschrieben. Gleichzeitig wurden Kriterien für sowohl saisonale als auch Kurzfristprognosen aufgelistet. In Ergänzung soll hier auf zwei konkrete Probleme hingewiesen werden, welche mit Kurzfristprognosen gemindert werden sollen:

1. Ende September anfangs Oktober sollen die Speicher den maximal möglichen Füllstand erreichen, sei es durch natürliche Zuflüsse oder bei Bedarf und Möglichkeit durch das Hochpumpen von Wasser. Dabei darf die Gefahr von Hochwasserereignissen nicht ausser acht gelassen werden, dass heisst, es muss ein angemessenes Speichervolumen als Sicherheitsgarantie freigelassen werden.
2. Am Ende des Winterhalbjahres muss eine ausreichende Wassermenge in den Staubecken zurückbehalten werden, um den stark schwankenden Bedarf bis zum Eintritt der Schneeschmelze sicher decken zu können. Obwohl eine grössere Seeabsenkung während des Winters wünschenswert wäre, lässt sie sich im Normalfall nicht verantworten.

Im langjährigen Mittel können neben den natürlichen (Winter-) Zuflüssen somit lediglich 73% des Speichervermögens während des Winterhalbjahres (1. Oktober bis 31. März) zur Bedarfsdeckung eingesetzt werden (VSE, 1987). Prognosen der Schneeschmelze und der flüssigen abflusswirksamen Niederschläge erleichtern die Planung des Kraftwerkeinsatzes.

Die **Laufkraftwerke** produzieren etwa 40% der hydraulischen Energie. Der Hauptteil dieser Bandenergie fällt im Sommer bei tiefem Strombedarf an. Neben der Optimierung des Kraftwerkeinsatzes dienen Prognosen hier auch der Warnung vor Hochwassern oder der Planung von Revisionen.

Eine spezielle Situation ergibt sich zum Beispiel um die Weihnachtszeit, wenn der Energiebedarf wegen der Feiertage einen für die Jahreszeit minimalen Wert annimmt. Durch das Auftreten der meteorologischen Singularität des «Weihnachts-Tauwetters» kann, verursacht durch die hochgehenden Flüsse, ein Überangebot an elektrischer Energie entstehen. Das frühzeitige Erkennen und Quantifizieren solcher Taufluten erleichtert dem Stromhändler das Disponieren auf dem Strommarkt. Die Grundlagen zur Abgabe von Echtzeit-Abflussprognosen wurden während unserer Forschungszusammenarbeit zwischen dem Geographischen Institut der ETH und der NOK erarbeitet und stehen für den operationellen Einsatz zur Verfügung.

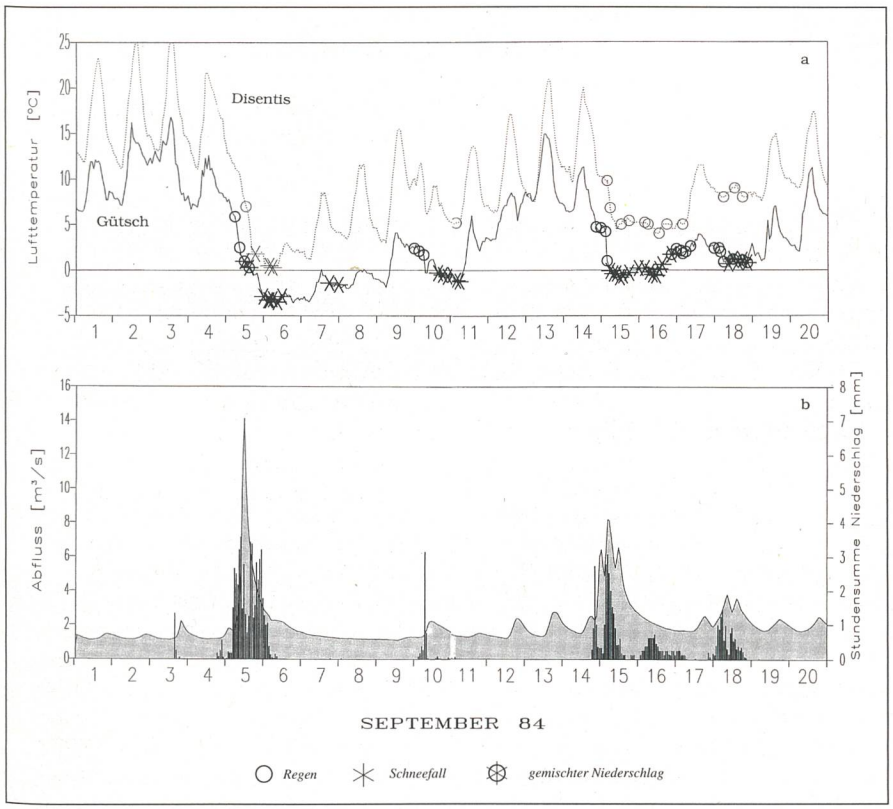


Bild 6 Lufttemperatur (a) der automatischen SMA-Stationen Gütsch (2282 m ü. M) und Disentis (1190 m ü. M.) mit den Symbolen der beobachteten Niederschlagsaggregate sowie Niederschlagsmenge (b) (Mittel der automatischen SMA-Stationen Disentis und Piotta, 1007 m ü. M.) und Abfluss des Somvixerrheins bei Encardens für den 1.–20. September 1984 (nach Angaben der Landeshydrologie und -Geologie). Die Graphik zeigt auf, wie wichtig die richtige Erfassung und Prognose der Niederschlagsform ist

Schlussfolgerungen und Ausblick

Hydrologische Prognosen erleichtern den Kraftwerkbetreibern die Optimierung des Kraftwerkeinsatzes sowie die Sicherstellung der Stromversorgung. In Zukunft wird der schonende Umgang mit den natürlichen Ressourcen immer wichtiger werden. So werden im Aktionsprogramm «Energie 2000» (EVED, 1991) neben energiepolitischen auch quantitative Ziele angegeben. Es wird festgelegt, dass die mittlere Erzeugung von Strom durch Wasserkraft zwischen 1990 und 2000 um 5% erhöht werden soll (3% der heutigen gesamten Stromerzeugung). Ausdrücklich wird darauf hingewiesen: «Im Vordergrund stehen Sanierungs- und Optimierungsprogramme für bestehende Werke». Im vorliegenden Beitrag wurde unter anderem versucht, darzulegen, dass ein solches Ziel nicht nur durch Turbinen und Pumpen mit höherem Wirkungsgrad erreicht werden kann, sondern auch mit besseren Grundlagen für die Planung und den Einsatz dieser Anlagen.

Verdankungen

Frau D. Lorenzi vom Geographischen Institut der ETH danken die Autoren für deren fachliche und tatkräftige Mitarbeit. Die Datengrundlagen zu dieser Arbeit lieferten, soweit sie nicht durch Mitarbeiter des Geo-

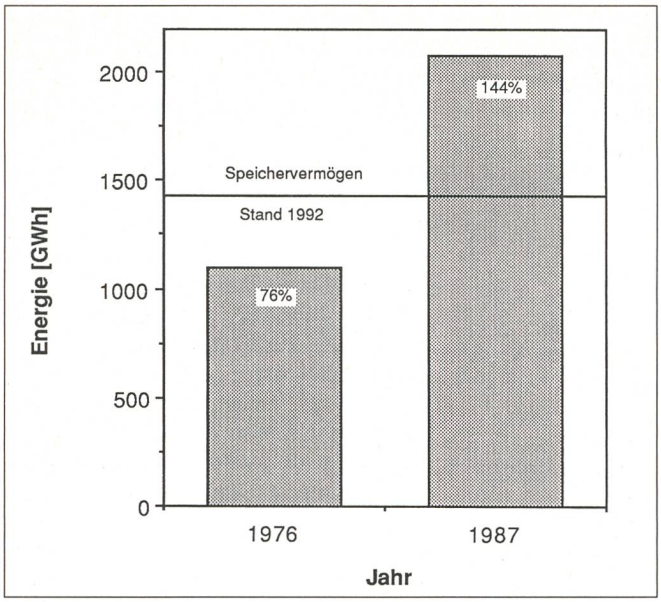


Bild 7 Zufluss zu NOK Speicherseen in produzierbarer Energie bzw. in Anteilen am Speichervermögen. Die mittleren Zuflussmengen der Monate Mai bis September von 1967 bis 1992 überstiegen das Speichervolumen um 14%

graphischen Institutes der ETH selbst erhoben wurden, die Schweizerische Meteorologische Anstalt und die Landeshydrologie und -Geologie. Folgende Werke der NOK ermöglichten durch ihre Kooperation diese Arbeit: Kraftwerke Vorderrhein AG, Kraftwerke Linth-Limmern AG, Kraftwerke Sarganserland AG und die AG Kraftwerk Wägital. Allen übrigen Kraftwerkgesellschaften sowie allen nicht speziell erwähnten Personen, die in den letzten 40 Jahren zur Weiterentwicklung der Abflussprognosen beigetragen haben, sei an dieser Stelle gedankt.

Literatur

ANNALEN (1984). Jahrbuch der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA), Zürich.

L. N. Braun and *H.Lang*: Simulation of snowmelt runoff in lowland and lower Alpine Regions of Switzerland. In: Modelling Snowmelt-Induced Processes (Proc. of the Budapest Symposium, July 1986), IAHS Publ. no. 155, pp. 125-140.

L. N. Braun and *C.B.Renner*: Application of a conceptual runoff model in different physiographic regions of Switzerland. In: Hydrological Sciences Journal, 37 (1992), 3, pp. 217-231.

EVED (Eidgenösisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement), 1991. Aktionsprogramm «Energie 2000». Bern, 29p.

D. Grebner: Zur Berechnung der Höhenlage des Übergangs vom festen in den flüssigen Zustand. Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, Heft 31 (1978), no. 22, pp. 1-6.

O. Hartmann: Die Modernisierung bestehender Wasserkraftanlagen. Bulletin SEV. 81(1990)10, 19. Mai, pp. 19-54.

HADES (HYDROLOGISCHER ATLAS DER SCHWEIZ), 1992. Karte 3.3: Wasseräquivalente der Schneedecke. Autoren: M. Rohrer und H. Lang; Redaktion: Universität Bern – Hydrologie; Herausgeber: Landeshydrologie und -geologie, Eidg. Dep. des Inneren, Buwal, Bern.

H. Jensen: Anwendung der Regressionsanalyse. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich (VAW-Mitteilungen) No. 12 (1974), pp. 137-164.

H. Jensen: Statistische Untersuchung der Beziehungen zwischen den Schneereserven und dem Sommerabfluss alpiner Gebiete. Festschrift für Peter Kasser, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich (VAW-Mitteilungen) No. 41 (1979), pp. 123-144.

H. Jensen: Räumliche Interpolation der Stundenwerte von Niederschlag, Temperatur und Schneehöhe. Zürcher Geographische Schriften, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Heft 35 (1989), 70p.

H. Jensen und *H.Lang*: Über die Vorhersage von Niederwasserabflüssen. In: Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie, No. 34 (1989), pp. 59-74.

Lang, H.: Forecasting meltwater runoff from snow-covered areas and from glacier basins. In: River Flow Modelling and Forecasting, Ed. by D. A. Kraijenhoff and J.R. Moll, D. Reidel Publishing Comp., Dordrecht, pp. 99-127 (1986).

H. Lang, H. Jensen and *D. Grebner*: Short range forecasting for the river Rhine at Rheinfelden. experiences and present problems. In: Hydrological Sciences Journal, 32 (1987),3, pp. 385-397.

M. Lepori: Langjährige Halbjahres-Wasserbilanzen im Einzugsgebiet des Wägitalersees. Diplomarbeit am Geographischen Institut der ETH Zürich (1992), 91p.

D. Lorenzi: Zur Modellierung des täglichen Zuflusses in ein Alpines Staubecken. Diplomarbeit am Geogr. Institut der ETH Zürich (1992), 131p., (n.p.).

M. B. Rohrer: Determination of the transition air temperature from snow to rain and intensity of precipitation. IAHS/WMO/ETH International Workshop on Precipitation Measurement, St. Moritz, Switzerland 1989, pp. 475–482.

M. B. Rohrer: Die Schneedecke im Schweizer Alpenraum und ihre Modellierung. Zürcher Geographische Schriften, Heft 49 (1992), 178p.

H. Röthlisberger and *H.Lang*: Glacial Hydrology. In: Glacio- fluvial Sediment Transfer, Ed. by A.M. Gurnell and M.J. Clark. John Wiley and Sons Ldt. (1989), pp. 207–284.

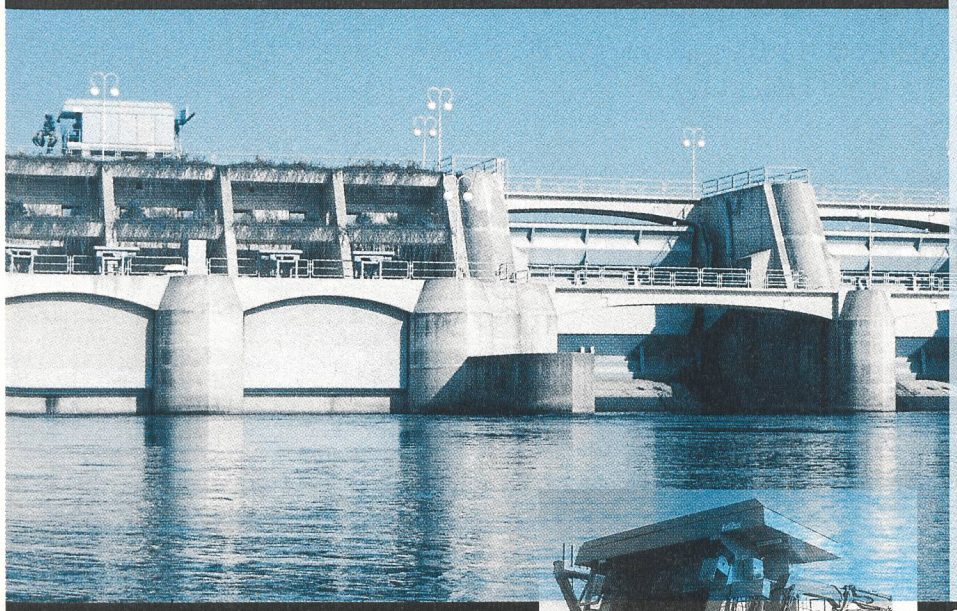
K. Seidel, J. Wiedemeier und *J. Martinec*: Operationelle Überwachung von Schneeschmelzvorgängen: Möglichkeiten zur Prognose von Wasserabflussmengen, Bulletin SEV, 10, 1990, pp. 9–17.

VSE (Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke), 1987: Vorschau auf die Elektrizitätsversorgung der Schweiz bis 2005. Siebenter Zehn-Werke-Bericht, Hauptbericht, 130p.

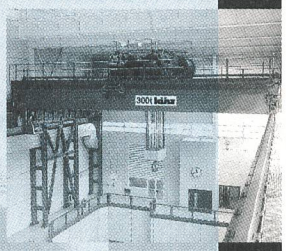
Quarante années de prévisions sur les apports naturels pour l'économie électrique: état de la recherche et perspectives

Il est quasiment impossible de construire de nouvelles installations hydrauliques en Suisse. Il apparaît donc d'autant plus important d'exploiter de manière optimale les centrales hydrauliques existantes (Hartmann, 1990). Le département «hydrologie» à l'Institut de géographie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich met depuis 40 ans à disposition de l'économie électrique des données hydrologiques visant à une optimisation de l'exploitation et de l'utilisation d'installations hydrauliques. Ces données contiennent depuis toujours des prévisions sur les débits dont on peut vérifier la valeur et l'utilité durant la période analysée. Elles ont été continuellement améliorées, entre autres au cours des deux dernières années dans le cadre d'une coopération entre l'EPFZ et les Forces motrices du nord-est de la Suisse (NOK). Il a ainsi été possible d'obtenir comme résultat une première estimation du débit escompté en été à partir du 1er mars, et ce par bassin versant. A court terme, la prise en compte de données horaires du réseau automatique de l'Institut suisse de météorologie (ISM) permet d'améliorer les prévisions.

Künz für Wasserkraftwerke



Sie erhalten von uns Ihren Bedürfnissen und Gegebenheiten angepaßte Problemlösungen. Ob Neu- oder Umbauten, unsere Konzepte und deren Umsetzung gewährleisten die notwendige Sicherheit und Zuverlässigkeit.



Wir bieten Ihnen:

- Stauklappen und Segmentverschlüsse
- Dammbalken, Rechen
- multifunktionale Rechenreinigungsmaschinen
- sonstige Produkte des Stahlwasserbaus
- Krananlagen für Kraftwerke

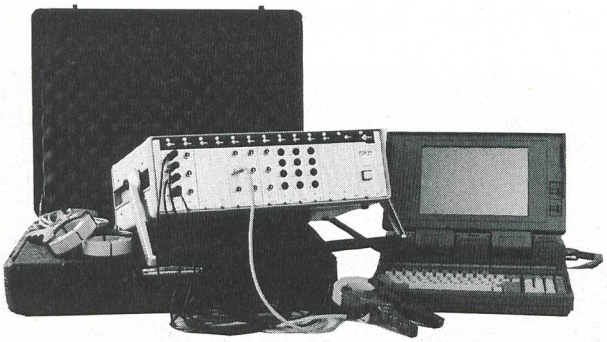
Für KW Pradella-Martina lieferten wir:
1 Maschinenhaus-Kran 100 / 10 t x 17 m

künz

SPEZIALKRANE • STAHLWASSERBAU

Hans Künz GesmbH., A-6971 Hard
Tel. 00 43 / 55 74 / 38 683-0, Fax 38 683-19
(ab Herbst 1993: Tel. 6883, Fax 6883-19)

Leistungsmessgerät mit 33 Kanälen



Das computer-unterstützte Mess-System EDA-33 eröffnet neue Perspektiven für die Erstellung von Stromsparanalysen. Dank seinen 33 Messkanälen und seiner Flexibilität können auch komplexe Verteilstrukturen aufgenommen und ausgewertet werden, wobei die Messwerte online am Bildschirm verfolgt werden können.

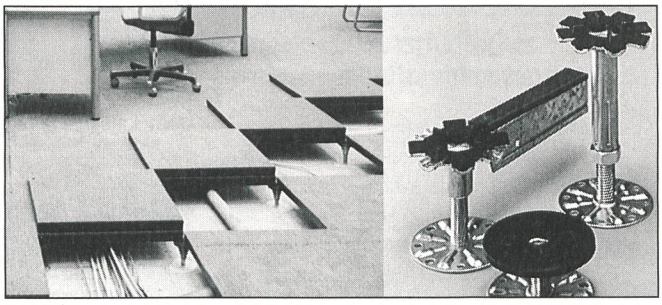
Das modular aufgebaute Messgerät arbeitet mit einem Personal Computer zusammen, der den Messvorgang steuert und die Messgrössen verarbeitet.

Ein komfortables, menugesteuertes Programm erlaubt eine einfache Konfigurierung des Systems. Die gemessenen und berechneten Daten können direkt in handelsübliche Tabellenkalkulations-Programme eingelesen und dort ausgewertet oder weiterverarbeitet werden.

Eine breite Palette an Messmodulen (Spannung, Strom, Temperatur, Druck ...) sowie die softwaremässige Steuerung ermöglicht die Anpassung des Systems an verschiedenartigste Aufgaben.

IROKA-ENGINEERING AG

Oberwilerstrasse 2
4102 Binningen
Tel. 061 / 421 35 55
Fax 061 / 421 99 89



LANZ Doppelbodensysteme

vom führenden Hersteller, mit den vielen Vorteilen:

- **Für Gesamthöhe ab 10 cm und 300 bis 5000 kg/m²**
- **mit neuer, terminverkürzender Verlegetechnik**
- **mit neuen, stabilen LANZ Stahlstützen**
- **mit Platten aus Hartspan, Anhydrit, Leichtbeton, Alu**
- **belegbar mit losen Teppichfliesen, textilen oder Kunststoffbelägen, Parkett, Kunst- oder Naturstein**
- **komplett mit Gitterbahnen für die geordnete Kabelführung, mit el. Anschlussdosen, Luftauslässen etc.**

Wenn Sie moderne Büro- und Verwaltungsbauten, EDV-Zentren, Schalt- und Kommandoräume planen und bauen — rufen Sie an. LANZ Doppelbodensysteme werden von uns und vielen regionalen Fachfirmen preisgünstig offeriert und sauber montiert.

lanz oensingen 062/78 21 21 Fax 062/76 31 79

☐ **Die LANZ Doppelbodensysteme** interessieren mich! Bitte senden Sie Unterlagen.

☐ Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!

Name/Adresse/Tel.: _____

31

lanz oensingen ag
CH-4702 Oensingen · Telefon 062 78 21 21