

| | |
|---------------------|---|
| 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: | 81 (1990) |
| Heft: | 10 |
| Artikel: | Operationelle Überwachung von Schneeschmelzvorgängen : Möglichkeiten zur Prognose von Wasserabflussmengen |
| Autor: | Seidel, K. / Wiedemeier, J. / Martinec, J. |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-903116 |

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: 26.01.2026

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

Operationelle Überwachung von Schneeschmelzvorgängen: Möglichkeiten zur Prognose von Wasserabflussmengen

K. Seidel, J. Wiedemeier und J. Martinec

Die Fortschritte in der Fernerkundung der Schneedecke und in der Auswertung von Satellitenbilddaten eröffnen neue Möglichkeiten für Abflussvorhersagen in Gebirgsgebieten. Der Beitrag stellt die Methodik vor und beschreibt konkrete Anwendungsmöglichkeiten.

Les progrès concernant l'évaluation à distance du manteau neigeux et l'évaluation des informations reçues par image satellite ouvrent de nouvelles possibilités pour la prévision des eaux de ruissellement dans les régions montagneuses. L'article présente la méthodologie et décrit des possibilités d'application concrètes.

Adressen der Autoren:

Dr. Klaus Seidel, Dipl. Phys. ETH, Institut für Kommunikationstechnik ETH, Fachgruppe Bildwissenschaft, CH-8092 Zürich

Dr. Jürg Wiedemeier, Dipl. El.-Ing. ETH, Nordostschweizerische Kraftwerke AG (NOK), Parkstrasse 23, CH-5401 Baden

Dr. Jaroslav Martinec, Dipl. Bauing., Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, CH-7260 Weissfluhjoch/Davos

Einleitung und Problemstellung

In der Schweiz werden rund 60% der Elektrizität aus Wasserkraft gewonnen. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Schnee, der während der Wintermonate in den Bergen abgelagert wird. Aus diesem Schnee wird während der Schmelze (jeweils von April bis September) jenes Wasser freigesetzt, das dann durch die Kraftwerke zur Gewinnung elektrischer Energie genutzt wird.

In diesem Beitrag geht es um die optimierte, operationelle Nutzung dieser Energiequelle. Ziel ist die Entwicklung einer Methode, mit der es gelingt, möglichst früh in einer Saisonprognose abzuschätzen, mit wieviel Schmelzwasser im kommenden Sommer gerechnet werden kann. Dadurch gewinnt der für den Kraftwerkeinsatz Verantwortliche bessere Kenntnisse über die zu erwartende Aufstaugeschwindigkeit in den Stauseen. Je früher die bevorstehende wasserwirtschaftliche Situation erkannt wird, desto früher können die notwendigen Dispositionen am Strommarkt eingeleitet werden.

Ferner geht es um Tagesprognosen, um die für die Stromerzeugung verfügbaren Wassermengen täglich vorherzusagen. Es liesse sich damit der Einsatz mehrstufiger Kraftwerksgruppen mit mehreren Einzugsgebieten besser planen bzw. der Einsatz der Kraftwerksstufen liesse sich besser aufeinander abstimmen.

Am Institut für Kommunikationstechnik der ETHZ (IKT), Fachgruppe Bildwissenschaft, werden in Zusammenarbeit mit dem Geographischen Institut der Universität Zürich und dem Eidgenössischen Institut für

Schnee- und Lawinenforschung (Weissfluhjoch/Davos) und mit Unterstützung des schweizerischen Nationalfonds Methoden entwickelt, welche die Verbesserung der täglichen Bewirtschaftung von Wasserkraftwerken zum Ziel haben. Die Nordostschweizerischen Kraftwerke AG (NOK) begleiten dieses Projekt mit dem Ziel, Vorhersagen für die Kraftwerke Vorderrhein (KVR) in Form von Tages- und Saisonprognosen für die Zuflüsse aus den beiden Einzugsgebieten der Zentralen Sedrun und Tavanasa zu erstellen.

Überwachung der Schneedecke mit Satellitenbildern

Schnee in alpinen Regionen ist eine ganz besonders wertvolle Energiequelle. Die während der Schneeschmelze in den Monaten April bis September in Form von Schmelzwasser freigesetzte potentielle Energie wird von den Kraftwerken in Elektrizität umgesetzt. Die Menge des Schnees in den Bergen ist ein direktes Mass für die jeweils noch zur Verfügung stehende Energie. Mit Hilfe von Satellitenbildern lässt sich nun die jeweils noch vorhandene Schneemenge und deren Verteilung messen. Es kommt hier die Erdfernerkundung zum Einsatz, die sich in den letzten Jahren als sehr nützliche Technik zur grossräumigen Überwachung der Erdoberfläche und unserer Umwelt erwiesen hat.

Es befinden sich eine ganze Reihe von Erdbeobachtungssatelliten in Umlaufbahnen, die mit unterschiedlicher räumlicher, zeitlicher und spektraler Auflösung Bilder von allen Teilen der Erde liefern (siehe Tab. I).

Prognose von Wasserabflussmengen mit Satellitenbildern

| Satellit | Sensor/Anzahl Kanäle | Auflösung | Repetierzyklus | Ursprungsland |
|----------------|----------------------|-----------|----------------|-----------------|
| Landsat-4, -5: | MSS (4 Kanäle) | 59m×79m | 16 Tage | USA |
| Landsat-4, -5: | TM (7 Kanäle) | 30m×30m | 16 Tage | USA |
| Meteosat-2: | VIS/IR | 5km×5km | 30 min | Europa (ESA) |
| NOAA-10, -11: | AVHRR (5 Kanäle) | 1km×1km | 12...24 h | USA |
| SPOT-1: | XS (3 Kanäle) | 20m×20m | 26 Tage | Frankreich |
| SPOT-1, -2: | PAN(1 Kanal) | 10m×10m | 26 Tage | Frankreich |
| MOS-1, -2: | MESSR (4 Kanäle) | 50m×50m | 17 Tage | Japan |

NPOC Schweiz - Kontaktadressen:

| | |
|--|--|
| Bundesamt für Landestopographie Seftigenstr. 264 CH-3084 Wabern Tel: 031/54 93 11 – Fax: 032/54 94 59 | Institut für Kommunikationstechnik ETHZ – Gloriast. 35 CH-8092 Zürich Tel: 01/256 52 84 – Fax: 01/251 21 72 |
|--|--|

Tabelle I Erderkundungssatelliten

Der vorliegende Beitrag bezieht sich auf das Einzugsgebiet *Rhein-Felsberg*, das im Kanton Graubünden liegt und eine Grösse von 3500 km² aufweist. In

Bild 1 ist eine Satellitenbilddaufnahme der Region Graubünden reproduziert, wie sie vom Satelliten Landsat-5 (mit dem Sensorsystem Thematic Mapper)

am 2. September 1984 gewonnen wurde. Es handelt sich hier um eine Aufnahme am Ende der Schneeschmelzperiode. Es wurden jene Spektralbereiche aus dem hochdimensionalen Multispektral-Datensatz ausgewählt, die eine möglichst naturgetreue Farbwiedergabe ermöglichen. An einem interaktiven Bildverarbeitungssystem wurde darüber hinaus eine digitale Farbmaskierung durchgeführt, mit der sich eine erhebliche Verbesserung der Farbwiedergabe erreichen liess.

Zur Schneekartierung werden am IKT die Multispektralaufnahmen der amerikanischen Erderkundungssatelliten Landsat, der französischen Satelliten SPOT und der amerikanischen Wettersatelliten NOAA/AVHRR digital aufbereitet und ausgewertet. Zur Verfügung steht – wie schon erwähnt – ein interaktives Bildverarbeitungssystem mit einem umfangreichen Software-Paket zur Bildanalyse. In einer ganzen Reihe von Vorverarbeitungsschritten werden die Bilder geometrisch entzerrt, radiometrisch aufberei-



Bild 1 Satellitenbilddaufnahme des Kantons Graubünden

Landsat-5 TM vom 2. September 1984, 9.30 Uhr

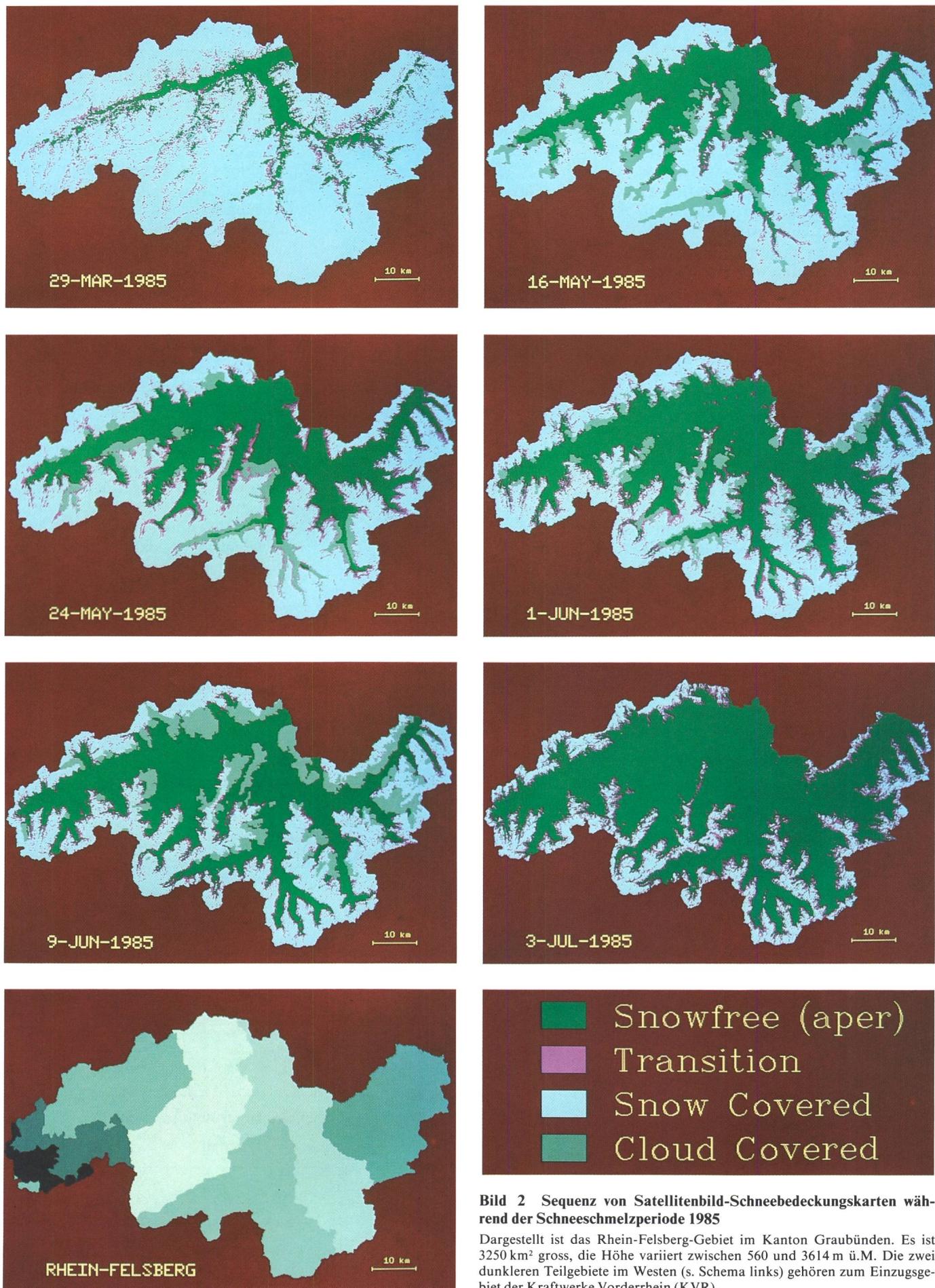


Bild 2 Sequenz von Satellitenbild-Schneebedeckungskarten während der Schneesmelzperiode 1985

Dargestellt ist das Rhein-Felsberg-Gebiet im Kanton Graubünden. Es ist 3250 km² gross, die Höhe variiert zwischen 560 und 3614 m ü.M. Die zwei dunkleren Teilgebiete im Westen (s. Schema links) gehören zum Einzugsgebiet der Kraftwerke Vorderrhein (KVR).

Prognose von Wasserabflussmengen mit Satellitenbildern

tet und in ein *geographisches Informationssystem* (GIS) integriert. Nach einem digitalen Interpretationsverfahren entsteht aus jedem Satellitenbild eine Schneedeckungskarte, wie die Beispiele in Bild 2 zeigen. Jedes Bild repräsentiert die Schneeverteilung zum angegebenen Zeitpunkt im Einzugsgebiet. Mit Hilfe eines digitalen Geländemodells lassen sich aus diesen Bildern die Schneedeckungen in verschiedenen Höhenstufen berechnen. Der Einbezug des digitalen Geländemodells ist eine wesentliche Voraussetzung, um die Beiträge aus den verschiedenen Höhenstufen aufgrund der Temperaturunterschiede in der folgenden Modellierung richtig bewerten zu können. Es erlaubt dies dann das Zeichnen der *Schneeabnahmekurven* (depletion curves) für die verschiedenen Höhenstufen.

Eine Übersicht über die Verfahrensschritte ist im Schema (Bild 3) enthalten. Im nächsten Kapitel wird beschrieben, wie man aus diesen Schneedeckungswerten mit Hilfe eines Modells zu Schmelzwasser-Abfluss-Simulationen kommt.

Das Schneeschmelz-Abfluss-Modell SRM

Um Abflussimulationen und Abflussprognosen erstellen zu können, braucht man ein Schneeschmelz-Abfluss-Modell, welchem damit eine zentrale Bedeutung zukommt.

Charakteristik des Modells

Das hier verwendete Schneeschmelz-Abfluss-Modell (Snowmelt Runoff Model, SRM) ist vor allem für Gebirgsgebiete geeignet, in welchen der Schneanteil am Abfluss gross ist. Der Tagesabfluss Q am Tag $n+1$ lässt sich gemäss diesem Modell wie folgt schreiben:

$$Q_{n+1} = [c_s a_n (T_n + \Delta T_n) S_n + c_R n P_n] \cdot A \frac{0,01}{86400} (1 - k_{n+1}) + Q_n k_{n+1} \quad (1)$$

wobei

- Q = Tagesabfluss [$m^3 s^{-1}$]
- c = Abflusskoeffizient
(Abfluss/Niederschlag) c_s für Schnee und c_R für Regen
- a = Gradtagfaktor [$cm^0 C^{-1} d^{-1}$], d.h. Schmelzhöhe pro 1 Grad-Tag
- T = Anzahl Grad-Tage [$^0 C d$]
- ΔT = Differenz der Grad-Tage

- S = zwischen der Messstation und der mittleren Meereshöhe des Einzugsgebiets oder einer Höhenzone [$^0 C d$] (berechnet mit dem Temperaturgradienten γ)
- P = Verhältnis der schneedeckten Fläche zur Gesamtfläche
- A = Niederschlag [cm]; eine vorgewählte kritische Temperatur T_{crit} bestimmt, ob der Niederschlag als Regen (unmittelbarer Abflussbeitrag) oder als Schnee (verzögter Abflussbeitrag) behandelt wird
- $0,01 = \frac{86400}{}$ Umrechnung von $cm \cdot m^2 \cdot d^{-1}$ auf $m^3 s^{-1}$
- k = Rezessionskoeffizient = $\frac{Q_{m+1}}{Q_m}$ ($m, m+1$ ist die Sequenz der Tage in einer Rezessionsperiode des Abflusses)
- n = Sequenz der Tage in der Berechnungsperiode

In den meisten Gebirgseinzugsgebieten übersteigt der Höhenunterschied 500 m. Dann ist eine Unterteilung in einige Höhenzonen empfehlenswert.

In diesem Fall werden die nach Gl. (1) berechneten Input-Mengen (I) für jede Höhenzone separat berechnet (Anzahl Höhenzonen N):

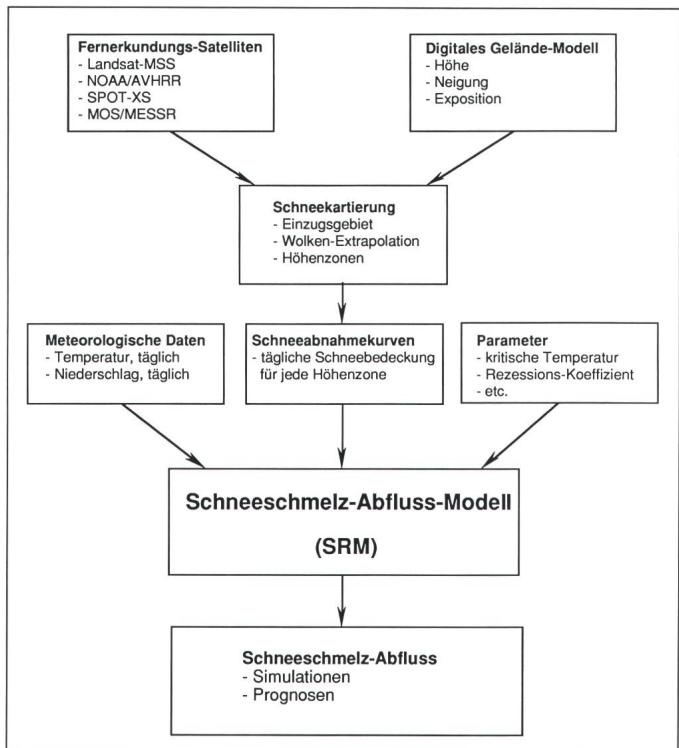
$$Q_{n+1} = \sum_{i=1}^N I_i \cdot (1 - k_{n+1}) + Q_n \cdot k_{n+1} \quad (2)$$

Das Modell benötigt also 3 gemessene Variablen (T, S, P) und enthält 7 Parameter ($a, \gamma, T_{crit}, c_s, c_R, k, \Delta t$). Die Verzögerung kann für verschiedene Einzugsgebiete verschieden sein. Dies ist bei der numerischen Auswertung der Formel zu berücksichtigen (Martinec et al., 1983). Die Parameter werden nicht etwa optimiert oder kalibriert, sondern nach hydrologischer Beurteilung bestimmt und – wenn nötig – nur in den physikalisch und hydrologisch vertretbaren Grenzen angepasst. Der deterministische Charakter des Modells ermöglicht Abflussberechnungen in neuen Einzugsgebieten, ohne dass langjährige historische Daten zur Kalibrierung notwendig wären. Näheres kann man dem SRM-Handbuch entnehmen (Martinec et al., 1983).

Verfügbar ist darüber hinaus ein PC-Programm sowie ein Expertensystem (Engman et al., 1989), welches für weniger erfahrene Benutzer eine bessere Unterstützung anbietet soll.

Das Modell wurde bis jetzt in Einzugsgebieten von 1 km^2 bis 15 000 km^2 Fläche in etwa 10 Ländern angewendet. Eine Verbesserung der Wasser-

Bild 3
Verfahrensschritte
zur Schneeschmelz-
Abflusssimulation



kraftwerknutzung hat man damit in Japan erzielt (Kawata and Kusaka, 1988).

Abflussimulation

Das Modell erlaubt zeitlich unbefristete Berechnungen der täglichen Durchflüsse (10 Jahre wurden probeweise durchgerechnet), ohne sich auf die laufenden Durchflussmessungen stützen zu müssen. Beispiele einer solchen Durchflussimulierung sind in Bild 4 dargestellt. Die gemessenen Abflüsse können zur Auswertung der Genauigkeit verschiedener Modelle verwendet werden. Ein solcher Test wurde kürzlich durch die Weltorganisation für Meteorologie (WMO, 1986)

organisiert, und zwar für 11 Modelle aus Dänemark, England, Japan, Kanada (2), Schweden, Schweiz, USA (3) und Tschechoslowakei, die in sechs ausgewählten Einzugsgebieten mit zehnjährigen Datensätzen getestet wurden.

Das SRM hat als einziges die durch Fernerkundung periodisch ermittelte Schneedecke eingesetzt. Dies erwies sich als Vorteil nicht nur im Vergleich der durchschnittlichen Fehler, sondern auch – noch deutlicher – in Testjahren mit aussergewöhnlichen Schneeverhältnissen (Martinec and Rango, 1989). Gerade in solchen Jahren ist eine durch Abflussvorhersagen unterstützte Bewirtschaftung der Stauseen wichtig.

Kurzfrist-Prognose

Das Modell benötigt – wie erwähnt – drei Variablen: Temperaturen, Niederschläge und Schneedeckungen. Abflussvorhersagen benötigen folglich Temperatur- und Niederschlagsprognosen, durch welche auch die Entwicklung der Schneedecke vorausbestimmt werden kann. Die Vorhersage-Angaben sind natürlich im allgemeinen weniger genau als die für Simulationen verwendeten Messdaten. Allerdings können allfällige Abweichungen durch die inzwischen bekannten Messwerte tagweise oder in bestimmten Intervallen korrigiert werden. Dieses Verfahren wird für die Wasserkraftwerke Sedrun und Tavanasa in Bild 5 illustriert.

Kurzfristvorhersagen der Abflussmengen in Echtzeit für die beiden Wasserkraftwerke sind für die nächsten Jahre vorgesehen. Dazu wird es nötig sein, die Satellitendaten in Echtzeit zur Verfügung zu haben, d.h. deren Übermittlung und Auswertung muss innert kürzester Zeit durchgeführt werden können.

Saison-Prognose

Das Flächenausmass der Saisonschneedecke nimmt von April bis September allmählich ab. Die periodische Schneekartierung unter gleichzeitiger Berechnung der täglichen Schneeschmelzhöhen ermöglicht, den Wasservorrat im Schnee vom Ausape rungsdatum rückwärts bis zum Datum des winterlichen Maximums (z.B. 1. April) zu bestimmen. Die Schneea kumulation aus dem gesamten Winter halbjahr ist also erst nach dem Ablauf der Schneeschmelze bekannt.

Saisonprognosen für die Einzugsgebiete der Zentralen Sedrun und Tavanasa werden erst möglich sein, wenn Schneekartierungsergebnisse aus einer Reihe von Jahren als Erfahrungsbasis vorhanden sind. Das Verfahren wird dann wie folgt sein: In einem schneearmen Jahr z.B. verursacht eine gewisse Summe der täglichen Schneeschmelzhöhen eine stärkere Reduktion der schneedeckten Fläche als in einem schneereichen Jahr. In einem Untersuchungsjahr (für das die Prognose erstellt werden soll) verrät die periodische Schneekartierung durch den Vergleich der Erfahrungsbasis mit den laufend aufsummierten, täglich berechneten Schneeschmelzhöhen einige Wochen nach dem 1. April, welche Wasservorräte am 1. April in der Schneedecke gespeichert waren. Für

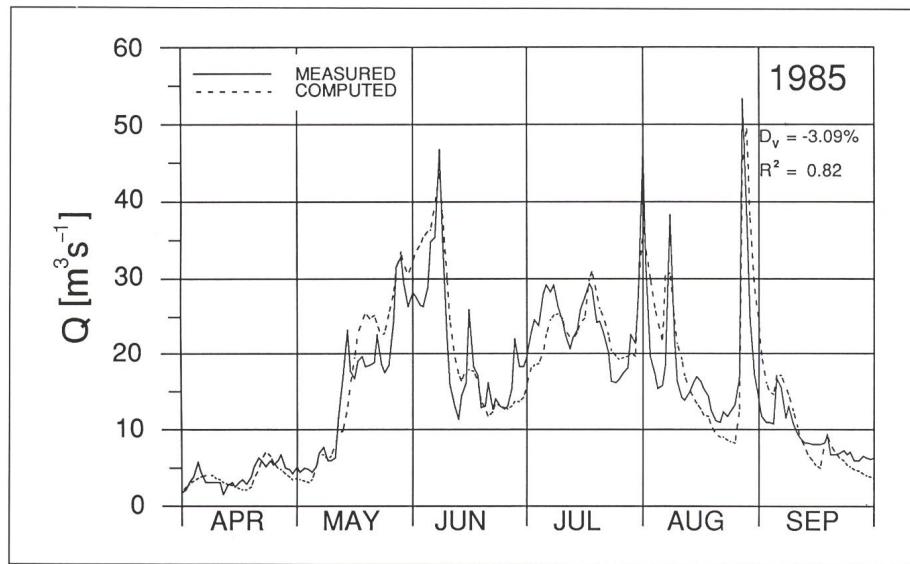
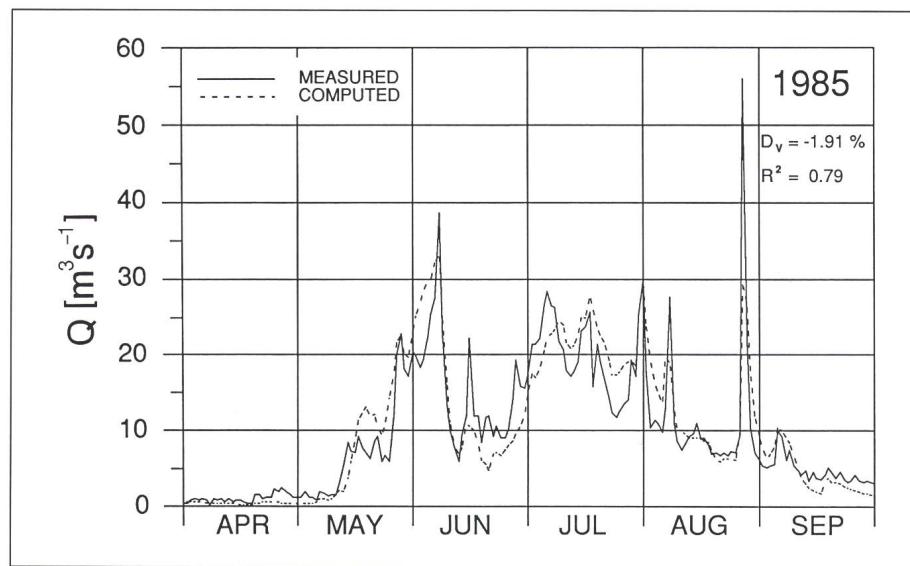


Bild 4 Berechneter und gemessener Speicherzufluss für zwei Kraftwerkssstufen

Die obere Darstellung gilt für das Einzugsgebiet der Zentrale Sedrun, die untere für das der Zentrale Tavanasa der KVR. D_v ist die Abweichung des Abflussvolumens, R^2 ein Koeffizient, der die Genauigkeit der berechneten täglichen Durchflüsse kennzeichnet (1,0 für vollständige Übereinstimmung).

Prognose von Wasserabflussmengen mit Satellitenbildern

die Auswertung des zu erwartenden Abflussvolumens sind die Verluste aus den SRM-Simulationen (c_s , c_R in Gl. 1) bekannt. Dazu kommen noch laufende Niederschläge, die man zunächst durch die langjährigen Erfahrungswerte ersetzen und später schrittweise durch aktuelle Messwerte korrigieren kann.

Eine genauere Erläuterung dieses Verfahrens übersteigt den Rahmen dieses Beitrags und wurde an anderer Stelle mit graphischen Beispielen publiziert (Hall and Martinec, 1985).

Energiewirtschaftlicher Nutzen von Abflussprognosen

Die Kraftwerksanlagen in den Alpen sind meistens zwei- oder mehrstufig, wobei jede Stufe ihr eigenes Wassereinzugsgebiet hat. Ziel der Prognose – ob Saison- oder Tagesprognose – muss es sein, den natürlichen Abfluss für jedes Einzugsgebiet getrennt vorzusagen. Da die Einzugsgebiete verschieden gross sind, auf verschiedenen Höhenlagen und somit auch in verschiedenen Temperaturbereichen liegen, unterscheiden sich die Wasserabflüsse der gleichen Kraftwerksanlage beträchtlich in Menge und zeitlichem Eintreffen. Ebenso ist die «Qualität» der von jeder Kraftwerksstufe produzierten Energie verschieden. Sie reicht von der reinen Spitzenenergie über Mischformen bis zur reinen Laufenergie.

Sommersaisonprognose

Die Speicherseen in den Schweizer Alpen erreichen bei der üblichen saisonalen Speicherbewirtschaftung im Laufe der Monate April und Mai ihren Tiefstand. Mit den steigenden Temperaturen setzt dann die Schneeschmelze ein, welche zusammen mit den aktuellen (flüssigen) Niederschlägen den gesamten Abfluss aus dem genutzten Einzugsgebiet ergibt. In tieferen Lagen sind die aktuellen Niederschläge abflussbestimmend. Im Oktober verschwinden die Schmelzprozesse, die Speicherseen erreichen ihren Höchststand, und die gespeicherte Energie steht für den Einsatz während der Absenkperiode bis Mai zur Verfügung.

Für den Betreiber eines hydraulischen Speicherkraftwerkes wäre es von Nutzen, wenn bereits anfangs Mai eine Prognose des potentiellen Abflusses während der Sommerperiode Mai bis September erstellt werden könnte.

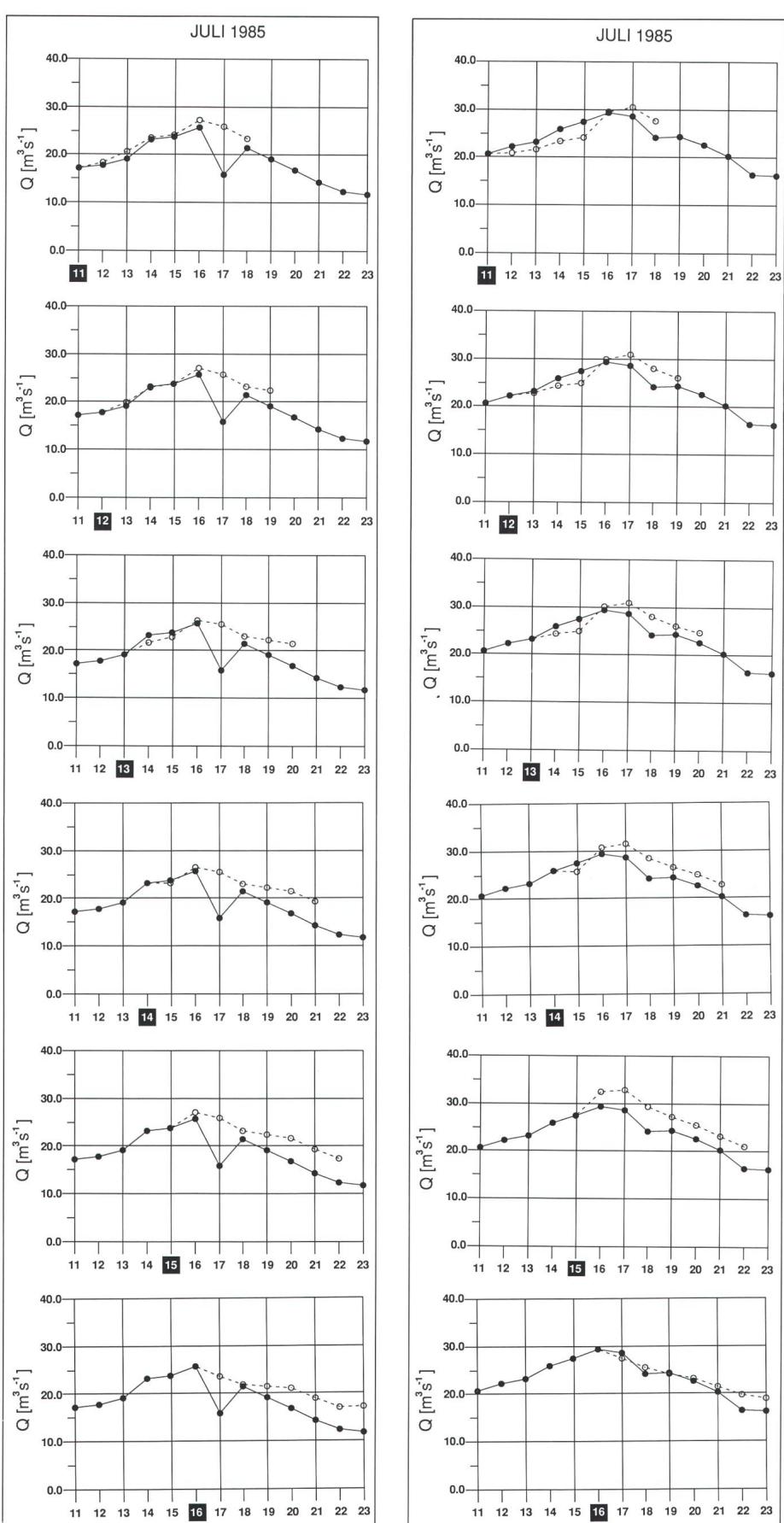


Bild 5 Kurzfristige Abflussvorhersagen

Die gestrichelt eingezeichneten Prognosewerte wurden jeweils für 7 Tage berechnet, beginnend am markierten Starttag. Zum Vergleich sind auch die gemessenen Werte (durchgezogene Linien) eingetragen. Links: Zentrale Sedrun, rechts: Zentrale Tavanasa der KVR.

Der Zeitpunkt des Eintretens der Schneeschmelze kann nur in Verbindung mit einer Temperaturprognose, welche sich in der Regel nur über drei Tage erstrecken kann, kurzfristig vorausgesagt werden (siehe dazu Unterkapitel «Tagesprognosen»). Immerhin liegt der Nutzen eines frühzeitig prognostizierten, potentiellen Abflusswertes für die Sommersaison darin, dass die Unsicherheit über die zu erwartenden Sommerzuflüsse verringert wird: sie verringert sich auf die fehlende Information über die zu erwartenden Sommertemperaturen und -niederschläge. Das prognostizierte Abflussvolumen würde genau dann anfallen, wenn die sich einstellenden Sommertemperaturen im betrachteten Einzugsgebiet gerade dem langjährigen Mittel entsprechen würden.

In der Regel fallen bei den Schweizer Elektrizitätsgesellschaften grosse Sommerüberschüsse an, welche ein wertvolles Handelsgut auf dem internationalen Strommarkt darstellen. Das frühzeitige Wissen (ein bis drei Monate zum voraus) ermöglicht ein effizienteres Disponieren am Strommarkt. Je früher die bevorstehende, wasserwirtschaftliche Situation erkannt wird, desto früher können die notwendigen Dispositionen am Strommarkt eingeleitet werden. Die Engagements (Kauf, Verkauf, Tausch) könnten nicht nur früher, sondern auch auf längere Zeitdauer, für grössere Energiemengen und mit grösserer Leistung eingegangen werden. Und dies bedeutet immer: Das betreffende Überschussverwertungsgeschäft kann zu besseren finanziellen Bedingungen abgeschlossen werden. Man stelle sich beispielsweise vor, dass ein Verkauf von nur 50 Millionen kWh Sommerüberschussenergie (als Grössenvergleich: Nur schon die als Testobjekt verwendeten Kraftwerke Vorderrhein, KVR, produzieren im Sommer rund 300 Millionen kWh) zu einem um 1 Rp/kWh höheren Preis abgesetzt werden könnte – es ergäbe sich daraus bereits ein zusätzlicher Deckungsbeitrag von Fr. 500 000.–.

Saisonale Abflussprognosen können auch eine Hilfe bei der Planung von Kraftwerksrevisionen sein. Diese Revisionen dauern in der Regel einige Wochen bis Monate. Sie können nur eine Maschinengruppe oder auch ein ganzes Kraftwerk umfassen und haben meistens empfindliche Produktions-einbussen zur Folge. Wenn es gelingt, die Revisionen möglichst in Perioden mit geringerem Abfluss zu legen, las-

sen sich die Produktionseinbussen vermindern. Kündigen sich in der Saisonprognose hohe Abflüsse an, so wird der Betreiber versuchen, die Revision ein Jahr hinauszögern, um allenfalls von der günstigen wasserwirtschaftlichen Situation profitieren zu können.

Tagesprognosen

Ein Nutzen täglicher Zuflussprognosen dürfte sich besonders für mehrstufige Kraftwerksgruppen mit mehreren Einzugsgebieten und unterschiedlichem Abflussregime ergeben (s. Bild 6). Der Prognosezeitraum sollte mindestens drei bis fünf Tage betragen. Damit umfasst am Tag i eine Prognose $Q_{i,k}$ drei bis fünf täglich zu erwartende Abflüsse aus jeden Einzugsgebiet k :

$$Q_{i,k} = [Q_{i+1,k}; Q_{i+2,k}; \dots; Q_{i+5,k}]$$

Nach Ablauf des Tages i wird eine neue Prognose erstellt, welche aus vier verbesserten Prognosewerten und einem fünften, neuen Wert besteht. Neu gewonnene Informationen über Temperaturen, Niederschläge und Abflüsse werden laufend in die Prognose miteinbezogen.

Der Nutzen täglicher Zuflussprognosen muss differenziert nach der Energiequalität der einzelnen Kraftwerksstufe beurteilt werden: *Laufwasserzuflüsse* müssen bei praktisch fehlendem Speicherraum zwingend verarbeitet werden, während die *Speicherzuflüsse* je nach Füllstand der Speicher teilweise oder vollständig aufgefangen und erst zu einem späteren Zeitpunkt auf Abruf verarbeitet werden können.

Laufwasserzuflüsse

Ein Laufwasserzufluss wird in der Regel über ein Ausgleichsbecken, einen Freileitungsstollen oder ein Druckrohr der Zentrale zugeführt, wo er direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Die erzeugte elektrische Leistung (MW) ist in erster Näherung dem Zufluss (m^3/s) proportional, solange die Schluckfähigkeit der Turbine nicht erreicht ist. Übersteigt der Zufluss diesen Maximalwert, so läuft der Rest als Verlust über das Wehr des Ausgleichsbeckens. Der Nutzen des prognostizierten Laufwasserzuflusses liegt demzufolge in erster Linie darin, dass die in den nächsten Tagen erzeugbare Energiemenge besser bekannt ist.

Ein weiterer Vorteil ist in der Bewirtschaftung von mehrstufigen Anlagen zu finden, indem einschränkende,

ungünstige Betriebssituationen frühzeitig erkannt werden können. Solche treten häufig bei Anlagen mit einer obenliegenden Speicherstufe und einer untenliegenden, in Serie geschalteten Laufstufe mit eigenem wasserreichem Einzugsgebiet auf. Bei grossem Wasseranfall aus dem unteren Einzugsgebiet kann im Frühjahr (April, Mai, Juni) die höherliegende Speicherstufe, in welcher oft Maschinengruppen mit hoher Leistung installiert sind, nicht mehr wirtschaftlich, d.h. nur unter Inkaufnahme von weiteren Überfallverlusten im unterliegenden Ausgleichsbecken eingesetzt werden. Faktisch ist damit die Speicherstufe blockiert und steht für die Spitzenlastdeckung nicht mehr oder nur eingeschränkt zur Verfügung (s. Bild 6, rechte Seite).

Die geschilderte Betriebssituation macht klar, dass vor allem der Prognose der täglichen Laufwasserzuflüsse bei mehrstufigen Kraftwerksanlagen eine wichtige Rolle zukommt. Liegen hohe Prognosewerte vor, so kann der Dispatcher rechtzeitig die notwendigen Dispositionen vornehmen, indem er zur Deckung des erwarteten Spitzenenergiebedarfs Speicherstufen anderer Kraftwerksgruppen verstärkt einplanen oder am Strommarkt einen kurzfristigen Kauf oder Austausch tätigen kann.

Speicherzuflüsse

Unter Speicherzufluss soll hier der Abfluss aus einem Einzugsgebiet verstanden werden, welcher in einen Stauraum mit saisonaler Bewirtschaftung fliesst. Der Nutzen von täglichen Zuflussprognosen eines Saisonspeichers ist weniger offensichtlich und muss differenziert nach den vier Betriebsphasen des Speichers diskutiert werden (s. Bild 7).

Der Nutzen von Zuflussprognosen ist vor allem in den beiden Extremphasen I und III des Speicherzyklus zu finden. In der Phase I (Oktober) geht es darum, einen möglichst hohen Füllstand so spät wie möglich zu erreichen. Dabei muss einerseits ein Überlaufen der Speicherseen vermieden werden, andererseits muss man darauf gefasst sein, dass der Winter mit stark abnehmenden Zuflüssen Einzug hält, ohne dass der höchste Füllstand erreicht werden konnte. Tägliche Zuflussprognosen können die bestehende Unsicherheit beim Anstreben des Stauziels verringern.

In der Phase III (April, Mai) wird der tiefste Füllstand erreicht. Das Ziel

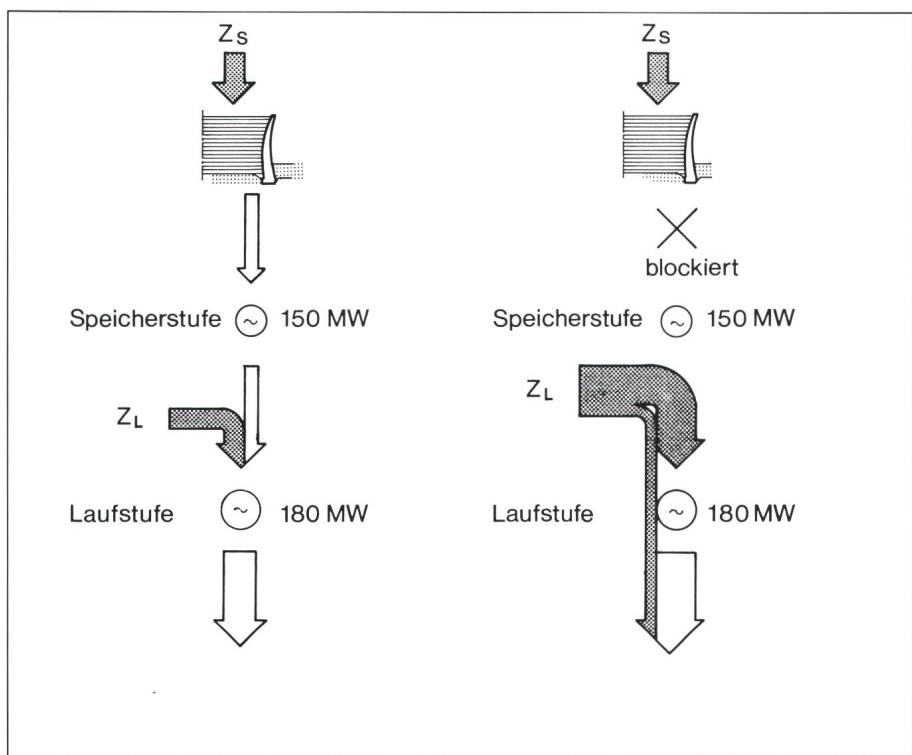


Bild 6 Schema einer zweistufigen Kraftwerksanlage (Beispiel: KVR)

Links: natürlicher Speicher- und Laufwasserzufluss (normaler Betriebszustand), rechts: hoher Laufwasserzufluss (blockierte Speicherstufe).

der Bewirtschaftung in dieser Phase ist es, bis zu einem (unbestimmten) Zeitpunkt eine notwendige Reserve (Leistungs- und Energiereserve) einzuhalten, bis die Schneeschmelze eintritt. Andererseits darf nicht zu hoch in die Aufstauphase IV gefahren werden. Die Bewirtschaftung zielt damit darauf ab, einerseits minimale Reservehaltungserfordernisse so lang wie nötig einzuhalten und andererseits durch frühzeitiges Absenken die hochwertige Energie möglichst noch in der Periode mit winterlichem Preisniveau zu werten. Dabei können tägliche Zuflussprognosen beim Durchfahren des Absenkziels eine nützliche Hilfe sein.

In der Absenkphase (II) und der Aufstauphase (IV) ist der Nutzen von täglichen Zuflussprognosen gering, da immer genügend Stauraum zur Aufnahme auch von hohen Zuflüssen vorhanden ist bzw. immer genügend Wasser eingelagert ist, um trockenere Perioden durch verstärkte Entnahmen zu überbrücken.

Kleinere Speicherseen mit reichlichen Zuflüssen erlauben in einem Sommer ein mehrmaliges Füllen und Entleeren des Stauraums, so dass die beiden Extremphasen mehrmals beherrscht werden müssen, was den Tagessprognosen eine hohe Bedeutung verleiht.

in zwei Stufen, der Speicherstufe Sedrun (Gefälle 600 m) und der Laufstufe Tavanasa (Gefälle 480 m) genutzt, wobei jährlich in Sedrun rund 200 und in Tavanasa rund 500 Millionen m^3 Wasser verarbeitet werden. Im kleineren Einzugsgebiet werden die Speicherzuflüsse drei Staubecken mit einem Gesamtinhalt von 152 Mio m^3 zugeführt, die wasserwirtschaftlich zu einem System vereinigt sind. Aus diesem Speicher kann nach Bedarf Wasser bezogen werden. Dieses «Betriebswasser» durchläuft vorerst die Zentrale Sedrun (150 MW installiert) und erreicht nach einer Laufzeit von etwa 2 Stunden über ein kleines Ausgleichsbecken (0,4 Mio m^3) die Zentrale Tavanasa (180 MW installiert). Im größeren Einzugsgebiet werden Zuflüsse über das Ausgleichsbecken direkt der Zentrale Tavanasa als Laufwasser zugeleitet, dies zusätzlich zum allfälligen Betriebswasser der Speicherstufe.

Gegenstand der Saison- und Tagesprognosen ist der resultierende, natürliche Speicherzufluss Q_s des Einzugsgebietes der Zentrale Sedrun und der resultierende, natürliche Laufzufluss Q_L des Einzugsgebietes der Zentrale Tavanasa (s. Bild 6).

Abflussimulation und -prognose für die Kraftwerke Vorderrhein

Im folgenden werden Abflussimulationen für zwei schweizerische Einzugsgebiete anhand historischer Daten aus dem Jahre 1985 vorgestellt. Ferner werden an zwei Beispielen SRM-Tagesprognosen demonstriert.

Die Kraftwerksanlage

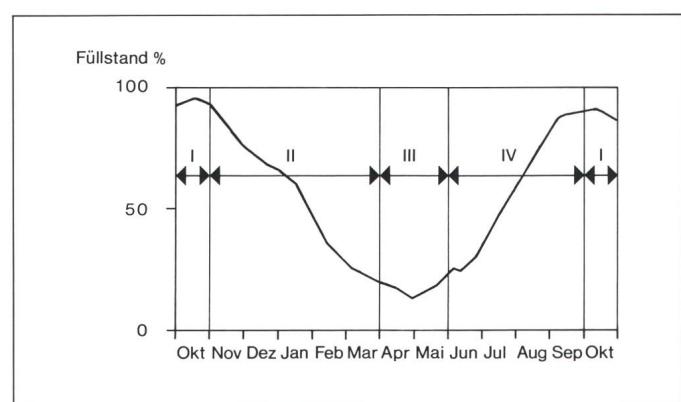
Die Kraftwerke Vorderrhein (KVR) nutzen die Wasserkraft aus zwei Einzugsgebieten Sedrun (108 km^2 , 1840–3210 m ü.M.) und Tavanasa (215 km^2 , 1277–3210 m ü.M.). Das Wasser wird

Beispiel einer Abflussimulation und -prognose auf der Basis von Satellitendaten

Für die genannten Speicher- und Laufzuflussgebiete der Zentralen Sedrun und Tavanasa wurden saisonale Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse für das Jahr 1985 sind in Bild 4 wiedergegeben.

Der graphische Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung in den Kurvenverläufen, die auch zahlenmäßig durch die relativen Volumenabweichungen D_v und die R^2 -Werte ausgewiesen ist.

Bild 7
Die vier
Betriebsphasen eines
Saison speichers.



Was leistet das Verfahren?

Das beschriebene Verfahren kann zur Bestimmung des Schmelzwasserabflusses für sehr verschiedene Einzugsgebiete herangezogen werden. Für das Modell sind lediglich 3 Inputvariablen nötig: Schneedeckung, Temperatur und Niederschlag. Satellitenbilder eignen sich besonders gut zur Bestimmung der Schneedeckung in alpinen Einzugsgebieten.

Für die Abflussberechnungen steht ein Computerprogramm für PCs zur Verfügung. Auch für neue Einzugsgebiete ist das vorgestellte Verfahren vergleichsweise leicht anwendbar.

SRM in Indien

Die im Beitrag skizzierte Methode eignet sich besonders gut für Regionen, die nur schwer zugänglich sind und für die dann naturgemäß nur spärliche Bodenmessungen zur Verfügung stehen. So wird derzeit in Zusammenarbeit mit dem Bakra Beas Management Board (BBMS) in Chandigarh und mit Unterstützung der National Remote Sensing Agency, Hyderabad/India, das Verfahren zur operationellen Schmelzwasser-Abfluss-Vorhersage für die BEAS-Region eingesetzt. Es handelt sich dabei um ein über 5000 km² grosses Einzugsgebiet im indischen Himalaya.

Einmal soll die Energieproduktion am Bakra Damm (Sutlej River) unterstützt werden. Zum anderen wird ein Stausee am Parbati River geplant, und das Verfahren soll zur besseren Abschätzung der zu erwartenden Schmelzwassermengen herangezogen werden.

Die Möglichkeiten von Tagesprognosen zeigt die Reihe der Diagramme in Bild 5. Es handelt sich um die Prognose von Tagesabflüssen für jeweils sieben Tage. Man beginnt immer mit dem aktuellen Wert, und die Abweichungen der gestrichelten Werte von den ausgezogenen Kurven sind ein Mass für die Güte der Vorhersagen. In diesen Beispielen wurden für die Temperaturen und Niederschläge die wirklich gemessenen Werte eingesetzt.

Der steile Abflussrückgang in dem Sedrun-Hydrograph am 17. Juli ist weder bei der Abflussberechnung noch beim gemessenen Abfluss für Tavanasa vorhanden. Bei dem für Sedrun verwendeten Rezessions-Koeffizienten wäre ein solcher Rückgang nur durch vollständige Abschaltung der Schneeschmelze möglich. Angesichts der Lufttemperaturen an diesem Tag war

das nicht der Fall. Es ist eher möglich, dass der Abfluss an diesem Tag künstlich beeinflusst wurde.

Obwohl das Einzugsgebiet der Zentrale Sedrun nur halb so gross ist wie das Einzugsgebiet der Zentrale Tavanasa, sind die berechneten (und auch die gemessenen) Abflussmengen nur unwesentlich kleiner als diejenigen für Tavanasa. Dafür ist die grössere relative Schneedeckung in dem höher gelegenen Einzugsgebiet der Zentrale Sedrun verantwortlich.

Schlussfolgerungen

Der Fortschritt in der Fernerkundung der Schneedecke und in der Auswertung der Satellitenbilddaten eröffnet neue Möglichkeiten für Abflussvorhersagen in Gebirgsgebieten. Die

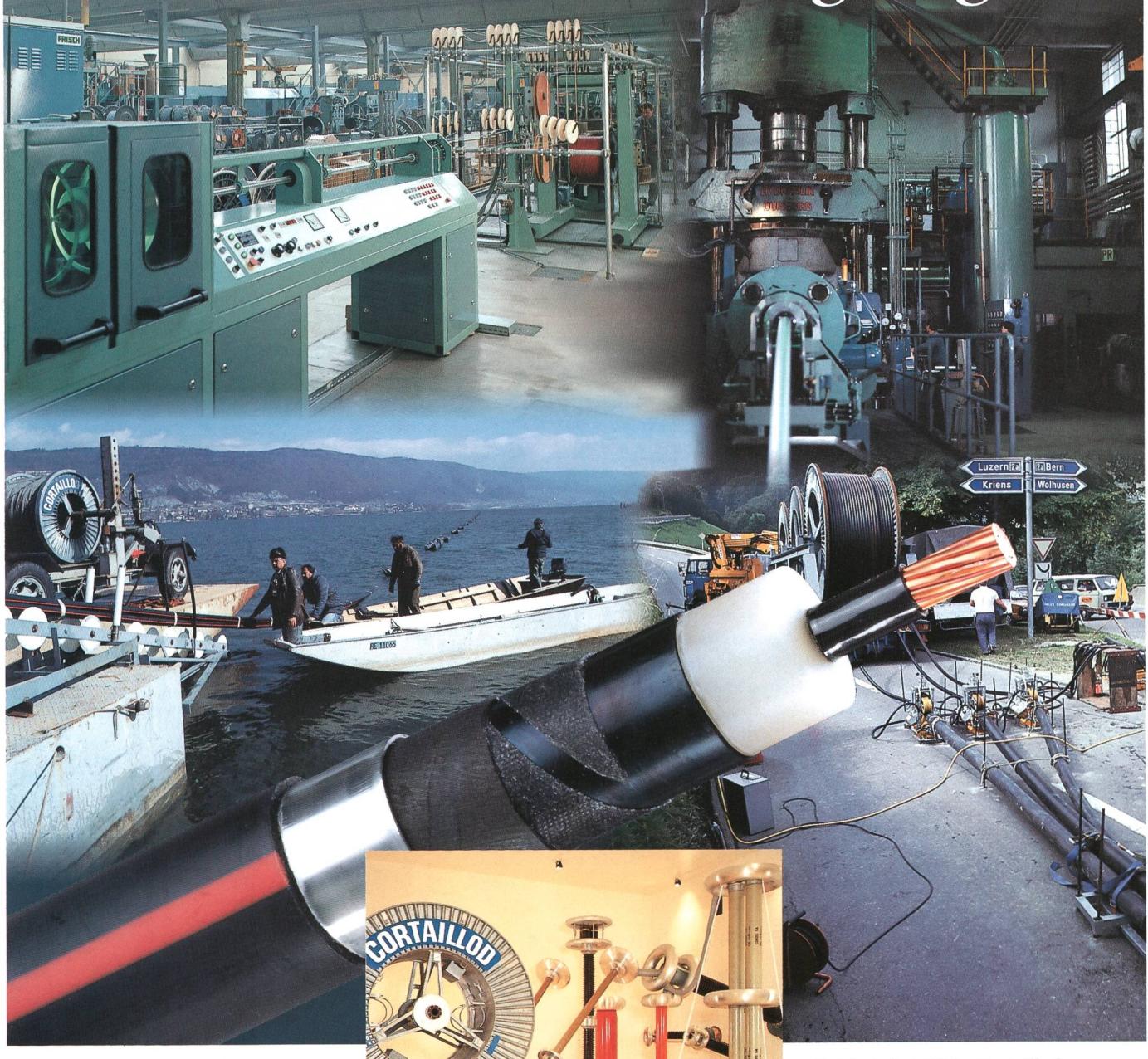
aufwendigen Kalibrationsprozesse sind nicht nötig, so dass man jedes neue Einzugsgebiet auch ohne lange Vorbereitungen und Bearbeitung von historischen Datensätzen aufgreifen kann.

Für eine bessere Bewirtschaftung der Wasserenergie sind Kurzfrist-Vorhersagen der Tageszuflüsse sowie Saisonvorhersagen für längere Zeitschnitte oder für die ganze Schmelzperiode möglich. Durch Berücksichtigung der wirklichen Schneedeckung können die sonst kaum vorhersehbaren Mangel- und Überschusssituationen bei abnormalen Schneeverhältnissen verminder werden, was für die optimale Ausnutzung der ausgebauten Wasserkraft und der noch verbleibenden Wasserkraftreserven wichtig ist.

Literatur:

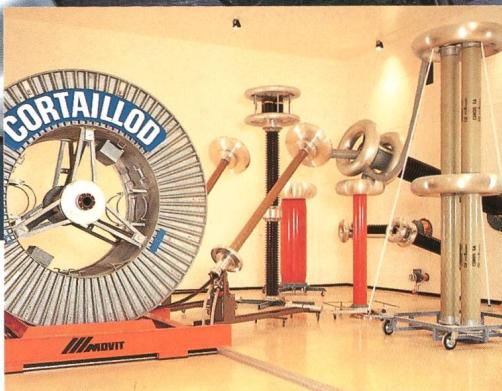
- [1] D.K. Hall and J. Martinec (1985): Remote Sensing of Ice and Snow, Chapman and Hall Ltd., London-New York
- [2] J. Martinec, A. Rango and E. Major (1983): Snowmelt Runoff Model (SRM) User's Manual, NASA Reference Publ. 1100, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD
- [3] E.T. Engman, A. Rango and J. Martinec (1989): EXSRM - An Expert System for Snowmelt Runoff Model (SRM), IAHS Scientific Assembly Baltimore, IAHS Publ. No. 181, p. 417-426.
- [4] Y. Kawata and T. Kusaka (1988): Snowmelt Runoff Estimation using Snow-Cover Extent Data and its Application to Optimum Control of Dam Water Level, IGARSS '88 Symposium in Edinburgh, Scotland, ESA SP-284 (Paris), Vol. 1, p. 439-440.
- [5] J. Martinec and A. Rango (1989): Merits of Statistical Criteria for the Performance of Hydrological Models, Water Resources Bulletin, AWRA, Vol. 25, April 1989, p. 421-432

Das Innere dieses Kabels birgt das Geheimnis seiner Langlebigkeit



Besonders angepasstes Kabel an schwierige Verlegebedingungen in nasser Umgebung oder unter Wasserdruck (Verlegung im Wasser oder Druckstollen).

Der Unterschied zwischen zwei HS-Kabeln lässt sich weder an ihrem Äusseren noch in einem Schnitt erkennen. Dazu muss man schon das Kabelinnere ins kleinste Detail und vor allem auf seiner ganzen Länge untersuchen. Câbles Cortaillod verlässt sich nicht allein auf äussere Schutzmassnahmen bei der Konzeption



Exklusiv bei Câbles Cortaillod:
Prüflabor für die Teilentladungsmessung
an Kabeln bis 480 kV

und Fabrikation seiner Kabel.
Sie investieren verstärkt in
Messungen, Versuche und Kontrollen. Mit leistungs-
starken Ausrüstungen dotierte Labors und Prüffelder
bestimmen die Eigenschaften und Qualität, die für
das Betriebsverhalten und die Lebensdauer der Kabel
ausschlaggebend sind.

CH-2016 CORTAILLOD/SUISSE
TÉLÉPHONE 038 / 44 11 22
TÉLÉFAX 038 / 42 54 43
TÉLEX 952 899 CABC CH



CABLES CORTAILLOD
ÉNERGIE ET TÉLÉCOMMUNICATIONS

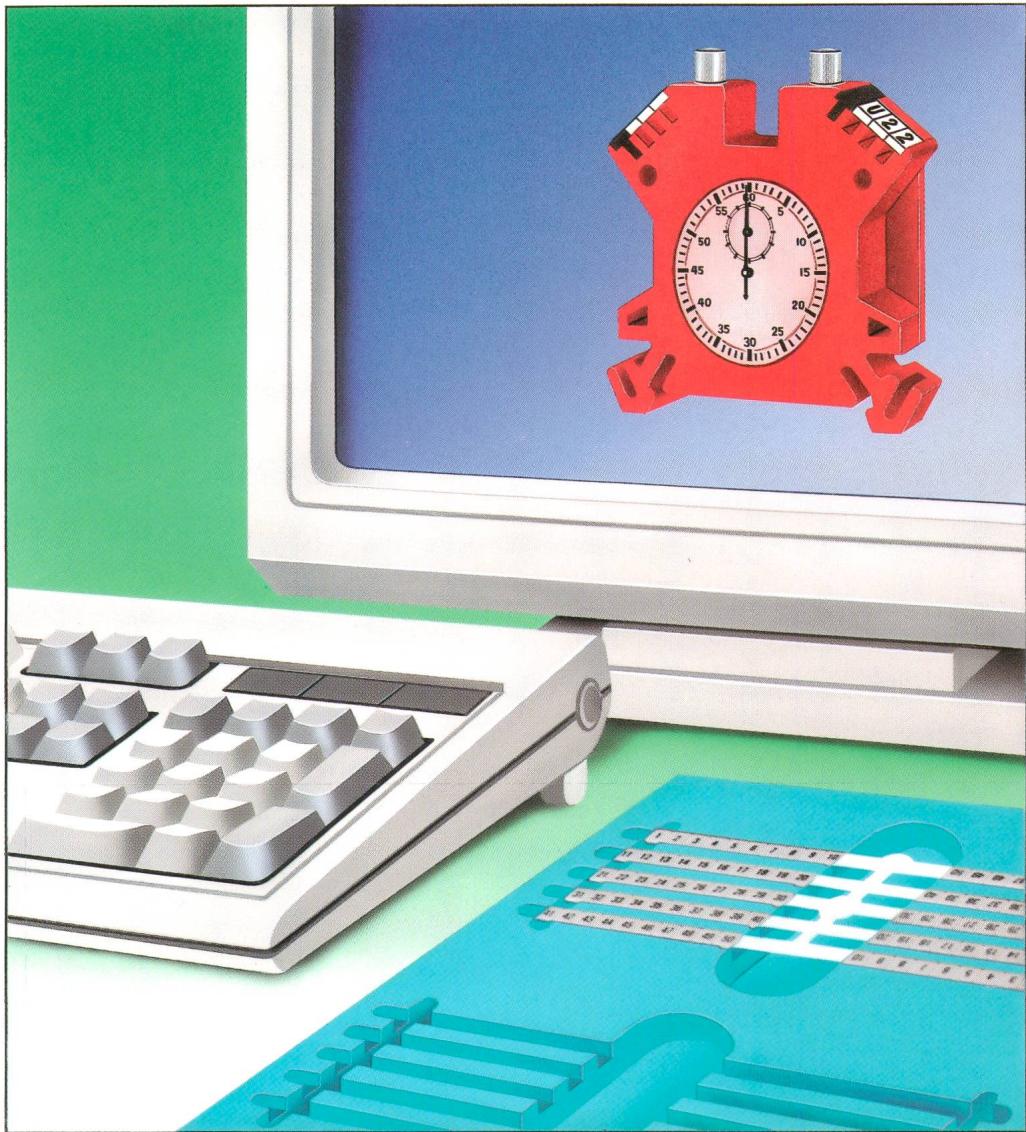
Fortschrittliche Technologie, Dienstleistungen und Sicherheit.

woertz 

Klemmenbeschriftungs – Service

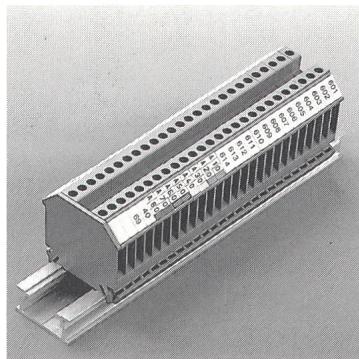
System

AB - Script



Service stark!

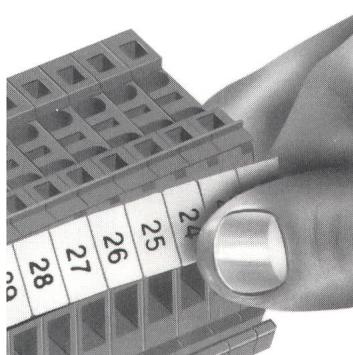
Woertz-Klemmen können nun mit dem neuen Computer-Beschriftungssystem RB-Script individuell nach Kundenwunsch markiert werden. Die eigens dafür entwickelte Software ermöglicht es, die gewünschte Karte Typ RB5 oder RB6 für Reihenbeschriftung auf dem Bildschirm darzustellen und die Buchstaben mit dem Cursor einfach einzusetzen. Die Markierung erfolgt dann mittels eines Flachbettplotters mit Grundplatte zur Halterung von vier (RB6) bis sechs (RB5) unbeschrifteten Karten. Somit können Sie Ihre Beschriftung immer genau an die jeweilige Installation anpassen. Unser **Schnellservice** garantiert Ihnen außerdem die Lieferung



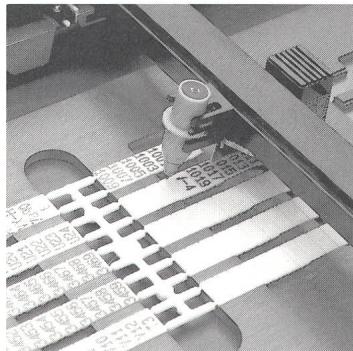
Ihrer fertig beschrifteten Karten **innert 48 Stunden** nach Eingang Ihrer Bestellung, die Sie auf einem speziell vorbereiteten Formular einreichen können. So sparen Sie noch mehr Zeit bei Ihren elektrischen Installationen mit Woertz-Klemmen!

System RB-Script auch bei Ihnen!

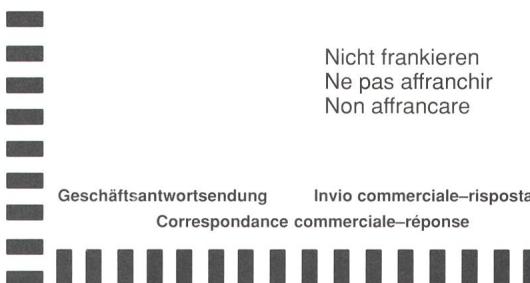
Bei häufiger Verwendung nicht-standardbeschrifteter Karten ist auch ein Kauf der gesamten MS-DOS-unterstützten Software inklusive Plotter und Grundplatten möglich. Das Programm ist äußerst anwenderfreundlich und gewährleistet eine hohe Produktivität. Eine Demonstration wird Sie überzeugen!



Schnell und rationell!
Die Produktephilosophie der Woertz-Klemmen: verdrahten und vergessen - selbst unter den schwierigsten Bedingungen! Geschätzte Eigenschaften der Klemmen sind die gute Halterung an der Schiene, der grosse Leiteraufnahmeraum sowie die von jeher ausgezeichneten Beschriftungsmöglichkeiten, die nun nochmals verbessert werden konnten. Montagefreundliche und zuverlässige Installationen werden mit Woertz-Material zum Standard.



- Ich möchte fertig beschriftete Karten beziehen und bin deshalb an Ihrem Beschriftungsservice interessiert. Senden Sie mir Unterlagen.
- Ich möchte das komplette System RB-Script kaufen. Senden Sie mir Unterlagen.
- Ich bin an einer Vorführung Ihres Beschriftungssystems interessiert. Nehmen Sie mit mir Kontakt auf.
- Senden Sie mir Unterlagen über Woertz-Klemmen.



Nicht frankieren
Ne pas affranchir
Non affrancare

Geschäftsantwortsendung Invio commerciale-risposta
Correspondance commerciale-réponse

woertz

Elektrotechnische Artikel
Installationssysteme

Hofackerstrasse 47
Postfach
4132 MUTTENZ 1

Telefon 061 / 61 36 36
Telex 963 179 owmu ch
Telefax 061 / 61 96 06

Firma: _____

Name: _____

Adresse: _____

PLZ/Ort: _____

Telefon: _____

woertz
Abt. Marketing
Hofackerstrasse 47
4132 MUTTENZ 1

Service stark