

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Band:** 89 (1997)  
**Heft:** 11-12

**Artikel:** Eine Verdunstungskarte für das Schweizer Mittelland  
**Autor:** Menzel, Lucas / Rohmann, Martin / Lang, Herbert  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-940223>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 15.10.2024

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

# Eine Verdunstungskarte für das Schweizer Mittelland

Lucas Menzel, Martin Rohmann und Herbert Lang

## Zusammenfassung

Auf der Grundlage von Wasserbilanzstudien an Flusseinzugsgebieten des Schweizer Mittellandes wird die Verdunstung in Abhängigkeit des mittleren Jahresniederschlages, der mittleren jahreszeitlichen Niederschlagsverteilung sowie der Jahresmitteltemperatur ausgedrückt. Die räumliche Interpolation dieser Einflussgrößen ermöglicht eine flächenhafte Darstellung der Verdunstung. Für den Zeitraum 1973–1992 wird eine Karte der mittleren Jahresverdunstung in Isolinienform für das Schweizer Mittelland und angrenzende Regionen präsentiert. Anhand der Karte werden die räumliche Verteilung der Verdunstung im Auswertebereich diskutiert und Hinweise für die praxisorientierte Anwendung gegeben.

## 1. Einleitung

Etwa ein Drittel des auf die Landesfläche der Schweiz treffenden Niederschlages wird über die Verdunstung wieder an die Atmosphäre abgegeben (Schädler, 1985). Verglichen mit der Weltwasserbilanz oder den hydrologischen Gegebenheiten in den europäischen Nachbarländern ist dieses Verhältnis zwar als günstig anzusehen, in einzelnen Regionen der Schweiz kann dieser Wert aber durchaus 60% übersteigen. Dabei darf zunächst nicht übersehen

werden, dass dem Ausgabenposten in der Wasserbilanz auch positive und als produktiv zu bezeichnende Eigenschaften der Verdunstung gegenüberstehen (pflanzliche Transpiration, Begünstigung ausgeglichener Klimaverhältnisse usw.). Probleme bei der Wasserversorgung entstehen erst dort, wo ein allgemein hoher Wasserverbrauch sowie natürlicher Verdunstungsreichtum mit ungünstigen Witterungsbedingungen – namentlich längeren Trockenphasen während der Vegetationsperiode – zusammentreffen. In der Schweiz ist davon vor allem das Mittelland betroffen. Die Wasserwirtschaft benötigt insbesondere für diese Region verlässliche Angaben zur Gebietsverdunstung, die bislang jedoch fehlten oder nur für Teilgebiete zur Verfügung standen.

Im Zusammenhang mit der Realisierung des Hydrologischen Atlas der Schweiz ist vorgesehen, die Verdunstung nicht nur als Mittelwert grosser Flusseinzugsgebiete anzugeben, sondern diese auch flächendetailliert als Isolinienform für die gesamte Schweiz kartographisch zu erfassen. Ein entsprechendes Kartenblatt ist am Geographischen Institut der ETH Zürich in Bearbeitung. Anfragen aus der wasserwirtschaftlichen Praxis haben die Autoren veranlasst, im Vorgriff auf die endgültige Publikation dieser Karte die bisherigen Resultate einem grösseren Personenkreis zugänglich zu machen.

## 2. Methodik

Neben dem Einsatz komplexer Verfahren der Verdunstungsmodellierung (siehe Kap. 6) wurde für das Schweizer Mittelland die Anwendung weniger datenintensiver Ansätze



Bild 1. Karte der mittleren jährlichen Verdunstung des Schweizer Mittellandes und angrenzender Gebiete. Der Auswertzeitraum umfasst die Jahre 1973 bis 1992. Alle Angaben in [mm].

geprüft. Aus zahlreichen Studien ist bekannt, dass über langjährige Zeiträume gesehen das Niederschlags- und Energieangebot die wichtigsten Bestimmungsfaktoren für die Verdunstung darstellen. Abgesehen von der absoluten Niederschlagsmenge hat dabei auch die jahreszeitliche Verteilung des Niederschlages einen wesentlichen Einfluss auf die Verdunstungshöhe. Weil nur wenige Messungen zum Energieumsatz an der Erdoberfläche vorliegen, wird bei dem hier angewandten Verfahren stellvertretend für die Strahlungsbilanz die Lufttemperatur als die der Bearbeitung zugänglichere Grösse verwendet. Die Grundlage zur Bestimmung der mittleren jährlichen Verdunstungshöhen im Schweizer Mittelland bilden die Wasserbilanzen und Temperaturverhältnisse hydrologischer Untersuchungsgebiete mit ähnlichen klimatischen Eigenschaften (siehe hierzu auch Lang, 1978). Durch multiple Regression zwischen den mittleren Gebietsabflusshöhen als abhängigen Variablen und den Gebietswerten des Niederschlages und der Temperatur sowie der zeitlichen Niederschlagsverteilung wird eine Abflussbeziehung hergeleitet. Die räumliche Interpolation der genannten Einflussgrössen auf ein Gitter beliebiger Grösse ermöglicht somit, zunächst die Abflusshöhen an den Gitterpunkten zu berechnen. Aus der Differenz zwischen interpolierten Niederschlagshöhen und den berechneten Abflüssen ergibt sich schliesslich ein Gitter mit berechneten Verdunstungswerten, das als Vorlage für die Konstruktion der Isolinienkarte dient.

### 3. Gebietsbezogene Auswertungen

Zur Ableitung einer Abflussbeziehung mussten die Wasserbilanzen der für die Untersuchung ausgewählten Gebiete über einen möglichst langen Auswertungszeitraum bestimmt werden. Nach den zur Verfügung stehenden Abflussdaten erwies sich die Zeitspanne von Oktober 1972 bis September 1992 als geeignet, womit die Bearbeitung 20 hydrologische Jahre umfasst. Die insgesamt 23 Untersuchungsgebiete weisen Flächenausdehnungen zwischen etwa 10 und 350 km<sup>2</sup> auf und sind über das Schweizer Mittelland und angrenzende Regionen (Voralpen, deutscher Bodensee-raum) verteilt.

Die Bestimmung mittlerer Gebietsabflüsse beruht auf den an ausgewählten Pegelstationen erhobenen Abflussdaten. Die Mehrzahl dieser Stationen gehört dem Messnetz der Landeshydrologie an. In sieben Untersuchungsgebieten werden die Abflussmessstellen durch den Kanton Zürich betrieben. Die Abflussdaten von vier auf deutschem Gebiet befindlichen Stationen wurden durch die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt.

Die Bestimmung der Gebietsniederschläge stützt sich auf die an 178 schweizerischen und 23 deutschen Niederschlagsstationen gemessenen Werte, die ohne Korrektur übernommen wurden. Zur Frage einer Niederschlagskorrektur sei angemerkt, dass sich bei einer Zunahme des Niederschlages in der betrachteten Klimaregion die Verdunstung zunächst wenig ändert und schliesslich sogar leicht abnimmt (Menzel, 1997). Dabei spielt auch die jahreszeitliche Verteilung des Niederschlages eine Rolle, entsprechende Korrekturwerte liegen jedoch noch nicht vor. Für die räumliche Interpolation der Niederschläge fiel die Wahl auf das Verfahren der inversen Distanzgewichtung.

Grundlage für die Berechnung von langjährigen Gebietsmitteln der Temperatur bildeten die Temperaturmessungen an insgesamt 40 Klimastationen des Schweizer Mittel-landes und der angrenzenden Voralpen. Damit konnten zunächst höhenbezogene Temperaturgradienten bestimmt werden. Dabei erwies sich eine regionale Untergliederung

in westliches Mittelland mit Voralpenraum und Seelagen sowie östliches Mittelland inklusive deutscher Bodensee-raum als praktikabel. Die Jahresmitteltemperaturen an den Gitterpunkten des digitalen Höhenmodells der Schweiz berechneten sich dann unter Anwendung der regionalen Temperaturgradienten. Gebietsmittel der Temperatur resultierten schliesslich durch einfache arithmetische Mittelung der von den jeweiligen Gebietsgrenzen umschlossenen Gitterwerte.

Mit den zur Verfügung stehenden, gebietsbezogenen 20-Jahres-Mitteln des Niederschlages, der Lufttemperatur und des Abflusses wurde dann in Anlehnung an Keller (1979) eine Abflussbeziehung der folgenden Form abgeleitet (A und N in [mm]):

$$A_{\text{Jahr}} = -955,315 + 2,356 \cdot N_{\text{wi}} + 532,798 \cdot (N_{\text{so}}/N_{\text{wi}}) - 45,541 \cdot T_{\text{Jahr}}$$

Mit Hilfe dieser Beziehung ist es also möglich, aus dem mittleren Winterniederschlag  $N_{\text{wi}}$ , dem Faktor Sommer- zu Winterniederschlag ( $N_{\text{so}}/N_{\text{wi}}$ ) und der mittleren Jahrestemperatur  $T_{\text{Jahr}}$  den mittleren Gebietsabfluss  $A_{\text{Jahr}}$  bzw. die mittlere Jahresverdunstungshöhe für beliebige Punkte zu berechnen. Das hohe Bestimmtheitsmass  $r^2 = 0,986$  weist darauf hin, dass die aus der Anwendung der Gleichung berechneten Jahresmittel der Abflüsse für die 23 Testgebiete sehr gut mit den aus Messungen abgeleiteten Werten übereinstimmen. Im übrigen zeigt sich der grosse Informationsgehalt der mittleren Jahrestemperatur, die für diese Klimaregion vor allem die Abhängigkeit der Verdunstung und damit des Abflusses von der Meereshöhe wiedergibt. Der Quotient aus Sommer- und Winterniederschlag gibt Auskunft über das von der Verdunstung in der wärmeren Jahreszeit nutzbare Wasserdargebot und ist somit auch für den Sommer- und Jahresabfluss eine wichtige Grösse.

### 4. Regionalisierung

Die im vorhergehenden Kapitel beschriebene Abflussbeziehung sollte nun auf die Gitterpunkte eines über das Mittelland gelegten Rasters angewandt werden. Damit mussten auf dieses Raster interpolierte Werte des mittleren Winterniederschlages, des Faktors Sommer- zu Winterniederschlag und der Jahresmitteltemperatur vorliegen. Um schliesslich aus der Wasserbilanzgleichung auch mittlere Verdunstungshöhen für die Gitterpunkte zu berechnen, war zudem die räumliche Interpolation mittlerer Jahresniederschläge erforderlich. Aus praktischen Erwägungen wurde entschieden, die Interpolation der genannten Einflussgrössen für die gesamte Schweiz vorzunehmen. Als weitere Ergebnisse unserer Arbeiten entstanden somit auch Niederschlags- und Temperaturkarten der Schweiz sowie eine Abflusskarte des Schweizer Mittel-landes.

#### 4.1 Niederschlag

Die Darstellung der mittleren Jahresniederschläge 1973–1992 in der Schweiz beruht auf den Messwerten von insgesamt 425 Niederschlagsstationen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA). Für die Bestimmung regionaler Niederschlagsgradienten wurden zusätzlich die Jahressummen von 69 Totalisatoren des Hochgebirges berücksichtigt.

In einem topographisch stark gegliederten Land wie der Schweiz muss der Einfluss der Orographie auf das Niederschlagsgeschehen berücksichtigt werden. Dieser zeigt sich im allgemeinen in einer Zunahme der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge mit der Höhe. Wie beim Niederschlag sind auch bei der räumlichen Verteilung des Niederschlagsgradienten regionale Charakteristika zu erwarten.

Aus diesem Grund wurde die Schweiz unter Berücksichtigung lokal-klimatischer Gesichtspunkte in 48 Regionen unterteilt. Die regionalen Gradienten ergaben sich durch lineare Regression jährlicher Niederschlagssummen mit den entsprechenden Stationshöhen. Diese Werte wurden dann mittels Kriging (Streit, 1981; Jensen, 1989) auf ein Gitternetz von 2 km Maschenweite interpoliert. Um vor einer Regionalisierung des Niederschlages den Einfluss der Orographie zunächst zu eliminieren, mussten die Jahresmittelwerte der 425 Niederschlagsstationen mit Hilfe der interpolierten Werte der Höhengradienten auf das einheitliche Bezugsniveau von 1000 m ü. M. umgerechnet werden. Nach der Interpolation auf diese Bezugsfläche wurden die Gitterwerte des Jahresniederschlages dann unter erneuter Zuhilfenahme der regionalisierten Niederschlagsgradienten sowie des digitalen Höhenmodells auf die wahre Topographie umgerechnet, womit die Grundlage für die Niederschlagskarte geschaffen war.

Regionalisierte Werte der Winter- und Sommerniederschläge erhielten wir schliesslich mit Hilfe der auf das Gitter von 2 km Maschenweite interpolierten Verhältnisse von Sommer- zu Winterniederschlag und den für die entsprechenden Gitterpunkte vorliegenden Jahresmitteln des Niederschlages.

#### 4.2 Temperatur

Für die räumliche Darstellung mittlerer Jahrestemperaturen standen uns die Messwerte von insgesamt 92 Klimastationen der SMA zur Verfügung. Ähnlich wie beim Niederschlag mussten aufgrund unterschiedlicher klimatischer Gegebenheiten regionale Differenzierungen vorgenommen werden. Für die Berechnung regionaler Temperaturgradienten wurde die Schweiz schliesslich in neun Teilgebiete untergliedert. Die gitterbezogene Berechnung mittlerer Jahrestemperaturen erfolgte dann in analoger Weise wie bei der Niederschlagsinterpolation. Als Ergebnis liegt eine Karte mittlerer Jahrestemperaturen 1973–1992 mit 2×2-km-Auflösung für die gesamte Schweiz vor. Zur besseren Darstellung räumlicher Temperaturvariationen wurde ebenfalls eine Isothermenkarte angefertigt.

#### 4.3 Abfluss und Verdunstung

Mit Hilfe der für das Schweizer Mittelland gültigen Abflussbeziehung (siehe Kap. 3) liess sich nun gitterpunktweise die mittlere jährliche Abflusshöhe berechnen. Durch Differenzbildung zwischen den Gitterwerten des mittleren Jahresniederschlages und des mittleren Jahresabflusses ergab sich sodann ein Gitter mit Mittelwerten der Jahresverdunstung. Dieses bildet die Grundlage für die Darstellung der räumlichen Verdunstung im Schweizer Mittelland.

### 5. Ergebnisse und Diskussion

In Bild 1 ist die Verteilung der mittleren Jahresverdunstungshöhen 1973–1992 in Form von Isolinien dargestellt. Linien gleicher Verdunstungshöhen sind in der Regel in einem Abstand von 100 mm wiedergegeben. Eine Ausnahme bildet die 650-mm-Linie, die aus Informationsgründen zusätzlich eingetragen und gestrichelt hervorgehoben ist. Die 400-mm- und 600-mm-Isolinien sind zur besseren Übersicht etwas stärker ausgezogen.

Grundlage für die Konstruktion der Isolinien bildeten die auf einem 2-km-Gitter vorliegenden, berechneten Verdunstungshöhen (Kap. 4). Die zunächst maschinengezeichnete Karte wurde an einigen Stellen von Hand überarbeitet. So wurden kleinräumig abgeschlossene Linienzüge eng benachbarten, durchlaufenden Isolinien gleicher Verdunstungshöhe angegliedert, wenn dies die regionalen Gegebenheiten zuliesse.

Im Rahmen der Zielstellung unserer Studie ist eine Generalisierung in der Linienführung erwünscht und ebenso unvermeidlich. Kleinräumige Variationen in der Verteilung der Verdunstung, wie sie sich etwa durch expositionsbedingte Einflüsse oder Landnutzungsunterschiede ergeben (siehe hierzu Menzel, 1997), sind durch die ausgleichenden Eigenschaften eines möglichst gross gewählten Auswertzeitraumes und die räumliche Auflösung der Karte (das Original liegt im Massstab 1:500 000 vor) nicht darstellbar.

Vor einer näheren Betrachtung der in Bild 1 wiedergegebenen Karte sind folgende Grundzüge in der Verteilung der Verdunstung festzuhalten: Durch den Niederschlagsreichtum des Auswertgebietes unterliegt die Verdunstung über längere Zeiträume gesehen praktisch keiner Begrenzung durch das Niederschlagsangebot (siehe auch Baumgartner, Reichel, Weber, 1983). Die jahreszeitliche Verteilung des Niederschlages spielt in diesem Sinne nur dort eine Rolle, wo ein deutliches Überwiegen der Winterniederschläge zu einer Verknappung des für die sommerliche Verdunstung nutzbaren Wasserangebotes führen kann. Regional und grossräumig wechselnden Niederschlagsverhältnissen folgt daher das Verteilungsbild der Verdunstung nur wenig. Demgegenüber steht die überragende Bedeutung der Orographie mit entsprechenden, höhenbedingten Variationen der Jahresmitteltemperatur, welche den Einfluss des Energieangebotes aus der Wärmebilanz einbringt. Eine erste Grobgliederung in der Verteilung der Verdunstung lehnt sich somit dem orographischen Aufbau bzw. den Temperaturverhältnissen des Auswertgebietes weitgehend an. So sind Alpen- und Juraandgebiete mit einer Drängung der Isolinien vom eigentlichen Mittelland zu unterscheiden, womit sich grossräumig gesehen ein südwestlich-nordöstlicher Verlauf der Linien gleicher Verdunstungshöhe ergibt. Die nur geringe Variation der Verdunstung im Mittelland spiegelt die über weite Gebiete auftretende Isothermie im langjährigen Jahresdurchschnitt wider. Diese Feststellungen beziehen sich zunächst auf das ausgewertete Gebiet. In von uns noch zu bearbeitenden Regionen ist eine Umgewichtung der an der Verdunstung beteiligten Prozesse aber durchaus denkbar.

Die verdunstungsärmsten Regionen der Voralpen und des Mittellandes treten auf der Karte vor allem im Südwesten des Schweizer Juras in Erscheinung. Gebiete mit einer mittleren Jahresverdunstung von unter 300 mm sind die winterkalte Region des Vallée de Joux mit den angrenzenden Höhenzügen, ausserdem die Gegend um Chasseron und La Brévine. Die Karte verzeichnet weitere, hochgelegene und isolierte Flächen mit jährlichen Verdunstungswerten von unter 300 mm. Dazu zählen z. B. auch die Gipfelregionen des Alpsteinmassivs. Absolutwerte der langjährigen Verdunstung können für diese Gebiete aber noch nicht angegeben werden, da die vorliegende Auswertung zunächst auf Höhenzonen bis maximal 1700 m ü. M. begrenzt ist.

Die 400-mm- und 500-mm-Isolinien lehnen sich in den alpinen Randlagen vorwiegend den Isohypsen an, womit sich ein recht unruhiger Verlauf der Verdunstungsgleichen ergibt. Ähnliches gilt für den Jura, wo die Verhältnisse auf den ersten Blick sehr unübersichtlich erscheinen. Die Vielzahl kleinräumig abgeschlossener Linienzüge markiert die Hochlagen mit jährlichen Verdunstungsmitteln von unter 400 mm (Chasseral, Weissenstein usw.). Eine 500er-Linie folgt dem Jurasüdfuss von Südwesten über Neuenburger- und Bielersee bis nordöstlich Solothurn, schwenkt dann zunächst auf westliche Richtung ab, umschliesst die Franches Montagnes und verläuft dann parallel zum Tal des Doubs. Vom eigentlichen Alpenrand abgelöst, fasst eine weitere 500-mm-Isolinie das Napfgebiet weiträumig ein.

Die Linien mit 600 mm Verdunstung weisen ein vergleichsweise ausgeglichenes Verteilungsbild auf. Dazu tragen die morphologisch weniger gegliederten Bedingungen und die geringen Temperaturoegensätze des Mittellandes bei. Vom unteren Rhönental kommend, schwingt eine 600er-Linie weit in das Mittelland vor, durchzieht dieses bis zum Bodensee, schliesst dabei die Gebiete um Vierwaldstätter- und Zürichsee ein und umfasst die verdunstungsärmeren Regionen des Zürcher Oberlandes und die voralpine Ostschweiz. Im Verlaufe einiger Flusstäler greifen Gebiete mit mittleren Verdunstungshöhen von mehr als 600 mm pro Jahr weit in Richtung Alpenregion vor. Grössere Einbuchtungen der 600er-Linie sind vor allem am Flusslauf der Broje südwestlich Payerne, oberhalb des Zusammenflusses von Aare und Gürbe nahe Bern sowie entlang der Thur im Toggenburg zu erkennen. Hinzuweisen ist auch auf das relativ verdunstungsreiche Gebiet um den Thuner- und Brienzensee mit mittleren Verdunstungshöhen von über 600 mm pro Jahr. Eine weitere 600-mm-Isolinie grenzt den verdunstungsärmeren Jura vom Mittelland ab und läuft über weite Strecken parallel zur bereits beschriebenen Linie mit 500 mm Jahresverdunstung. Damit ist ein Gebiet etwa nördlich der Linie Brugg-Delémont mit jährlichen Verdunstungshöhen von über 600 mm an das Mittelland angegliedert.

Eingeschlossen in das grosse, zusammenhängende Gebiet mit Verdunstungshöhen über 600 mm finden sich zahlreiche, flächenmässig zum Teil ausgedehnte Zellen mit Verdunstungsbeträgen zwischen 500 und 600 mm. Sie umschliessen isolierte Höhenzüge bzw. kleinere Erhebungen, die im übrigen auch auf der von uns erstellten Isothermenkarte als vergleichsweise kühlere Regionen auffallen. Beispielhaft erwähnt seien hier Gebiete nördlich von Bern (Bucheggberg), die von mehreren Flussläufen zertalten, nordwestlich streichenden Höhenzüge in der näheren Umgebung des Sempacher-, Hallwiler- und Zürichsees (Lindenberg, Albis, Pfannenstiel usw.), Imen- bzw. Ottenberg und Seerücken im Bodenseeraum sowie nordöstliche Juraausläufer (Lägern, Bözberg, Randen).

Die absolut verdunstungsreichsten Flächen des Auswertgebietes mit Jahresmitteln von über 650 mm erreichen vor allem in der Genfer- und Neuenburgerseeregion nennenswerte Ausdehnung. Im südwestlichen Bereich des Genfersees übersteigt die mittlere Jahresverdunstung der Landflächen sogar den Wert 700 mm. Eine Isolinie mit 650 mm Verdunstung umschliesst ausserdem die Zürichseeregion und die vorgelagerte Linthebene. Weiterhin gehören der Juranordfuss (Ajoie, Basel), die Gegenden am Unterlauf von Aare und Reuss, das untere Thurtal sowie der Bereich um Schaffhausen den Gunstregionen der Verdunstung an, wo mittlere Jahreswerte von 650 mm überschritten werden.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich unsere Angaben auf die Verdunstung der nicht von Gewässern eingenommenen Landoberflächen beziehen. Hinweise zu der in unserer Arbeit nicht berücksichtigten Seeverdunstung sind in Baumgartner, Reichel, Weber (1983) für einige der Voralpenseen zu finden. Für die Auswertperiode 1931–1960 wird dort die Verdunstung aus dem Genfer- bzw. Neuenburgersee mit 770 bzw. 750 mm angegeben. Die Werte für Vierwaldstätter-, Zuger- und Zürichsee belaufen sich auf 730 mm jährlich, Thuner- und Brienzensee liegen bei 710 bzw. 680 mm. Im Vergleich zu unseren Auswertungen für Landflächen können die von den Autoren mitgeteilten Resultate als durchaus realistisch angesehen werden.

Die in der Verdunstungskarte in Form von Isolinien dargestellten Jahresmittel der Verdunstung lassen sich auf

einzelne Monatsmittel aufschlüsseln, wenn langjährige Verdunstungsmessungen, z. B. an Lysimetern, herangezogen werden. Es zeigt sich nämlich, dass die über längere Jahresreihen an Messstationen erhobenen, mittleren prozentualen Anteile der Einzelmonate an der jährlichen Verdunstungshöhe innerhalb geographisch weitgezogener Grenzen nur wenig voneinander abweichen, womit ein Hinweis auf den vergleichsweise konservativen Charakter der Verdunstung gegeben wäre. Wir beziehen uns hier auf die von Menzel (1991) für das Lysimeter des hydrologischen Forschungsgebietes Rietholzbach (SG) genannten Relativzahlen der Verdunstung. Die in der Tabelle 1 aufgeführten Angaben beruhen auf der 10jährigen Auswertperiode 1976–1985, eine wesentliche Änderung der Werte für darüber hinausreichende Zeiträume ist aber nicht zu erwarten. Für weitere Vergleiche sei auf Angaben in Keller (1979), Menzel (1991) und DVWK (1996) verwiesen.

Tabelle 1: Mittlere monatliche Anteile an der langjährigen Verdunstung in Prozent. Ergebnisse aus Lysimeterstudien im hydrologischen Forschungsgebiet Rietholzbach, Auswertzeitraum 1976–1985.

Jan.	Feb.	Mär.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
0,2	1,2	3,5	7,3	14,6	16,7	19,9	16,3	12,4	5,7	1,5	0,7

Für einen abschliessenden Vergleich unserer Ergebnisse mit Resultaten anderer Arbeiten bietet sich vor allem die von Baumgartner, Reichel, Weber (1983) für den gesamten Alpenraum erstellte Verdunstungskarte an. Wenngleich Unterschiede in den Auswertperioden (1931–1960 bzw. 1973–1992) sowie im Detailliertheitsgrad berücksichtigt werden müssen, überwiegen die Gemeinsamkeiten beider Karten. Hingewiesen sei besonders auf das Verteilungsbild der Verdunstung zwischen Bern, Thuner- und Brienzensee im Südwesten sowie Bodensee im Nordosten, wo beide Studien erfreuliche Übereinstimmungen verzeichnen. Bedeutendere Unterschiede ergeben sich lediglich im Bereich des unteren Thurtales sowie in der Region um Schaffhausen, wo wir mittlere Jahresverdunstungshöhen von zum Teil über 650 mm angeben, während in der von Baumgartner, Reichel, Weber (1983) vorgelegten Karte diese Gegend eine 600-mm-Isolinie durchquert. Nennenswerte Differenzen bestehen ferner im Verlauf der Linie mit 600 mm Verdunstung nördlich des Genfersees. Die Berücksichtigung grossflächiger Gebiete um Neuenburger- und Bielersee in eine Zone, die mittlere Jahresverdunstungshöhen von 650 mm übersteigt, unterbleibt bei der älteren Studie, die zudem keine 700-mm-Isolinie in der Region Genf ausweist.

Als eine Erklärung für die flächenmässig stärker ins Gewicht fallenden, verdunstungsreichen Flächen ist der allgemein angestiegene Wasserverbrauch und im besonderen die verdunstungsfördernde Intensivierung der Landwirtschaft zu nennen. Einen Anstieg der mittleren Jahresverdunstung von über 10 % hat Kern (1975) in der Auswertperiode 1931–1960 gegenüber dem Zeitraum 1901–1951 für das Bundesland Bayern festgestellt. Er führt dies ebenfalls auf anthropogene Ursachen zurück. Auch Schädler (1985) erwähnt in vergleichenden Auswertungen des Wasserhaushaltes grosser Flussgebiete der Schweiz eine Zunahme der Verdunstung im Zeitraum 1941–1980 gegenüber 1901–1940.

Schliesslich erhalten wir für die Hochlagen des Juras wesentlich niedrigere Verdunstungshöhen als dies bei Baumgartner, Reichel, Weber (1983) der Fall ist. Verzeichnet die Karte der genannten Autoren dort minimale Jahreswerte, die 450 mm unterschreiten, weist die vorliegende Arbeit Verdunstungsminima von unter 300 mm jährlich auf. Baumgartner, Reichel, Weber (1983) erstellten ihre Vertei-

lungskarte der Verdunstung anhand von Bezugslinien zwischen mittlerer Verdunstung und Meereshöhe bzw. Jahresmitteltemperatur. Diese Beziehungen wurden auf ausgedehnte Klimaeinheiten der Alpen jeweils unverändert angewandt. Eigene Untersuchungen ergaben aber, dass die Abnahme der mittleren Jahresverdunstung mit der Höhe im Schweizer Jura mit einem ausgeprägteren Gradienten erfolgt als dies z.B. im östlichen Mittelland der Fall ist. Das im Jura weiträumig bestehende, sich insgesamt verdunstungsmindernd auswirkende Übergewicht der Winter- gegenüber den Sommerniederschlägen ist hier als einer der Hauptgründe zu nennen.

## 6. Ausblick

Die Arbeiten am Kartenblatt Verdunstung sind mittlerweile auf die alpinen Teile der Schweiz und weitere, bisher noch nicht bearbeitete Gebiete ausgedehnt worden. Insbesondere für die Hochlagen der Alpen müssen dabei neue Methoden erprobt und zum Teil in Kombination miteinander angewandt werden. Da unsere Kenntnisse über Energiebilanz und Verdunstung hochalpiner Regionen bislang noch ungenügend waren, wurde hierzu im Jahre 1995 ein spezielles Forschungsprojekt ins Leben gerufen. In Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Anstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) werden im Einzugsgebiet des Dischmabaches nahe Davos mehrere Teilaspekte des Verdunstungsprozesses über bewachsenen und vegetationslosen Flächen untersucht (Konzelmann et al., 1997). Die Studien dienen der Weiterentwicklung hydrologischer Modelle zur standortbezogenen Bestimmung der Verdunstung bzw. des Wasserhaushaltes von Flusseinzugsgebieten und der Fortführung unserer Arbeiten an der Verdunstungskarte.

### Literatur

- Baumgartner, A.; Reichel, E., und Weber, G. (1983): Der Wasserhaushalt der Alpen. München, Wien. 343 S.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblätter Nr. 238, Bonn. 135 S.
- Jensen, H. (1989): Räumliche Interpolation der Stundenwerte von Niederschlag, Temperatur und Schneehöhe. Zürcher Geographische Schriften Nr. 35, Geographisches Institut ETH, Zürich. 70 S.

- Keller, R. (1979) (Hrsg.): Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland, Textteil, Boppard. 364 S.
- Kern, H. (1975): Mittlere jährliche Verdunstungshöhen 1931–1960. Karte von Bayern im Massstab 1:500 000 mit Erläuterungen. Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 2, München. 12 S.
- Konzelmann, T.; Calanca, P.; Müller, G.; Menzel, L., und Lang, H. (1997): Energy Balance and Evapotranspiration in a High Mountain Area During Summer. Journal of Applied Meteorology. Journal of Applied Meteorology, Vol. 36, S. 966–973.
- Lang, H. (1978): Zusammenfassender Bericht. In: Die Verdunstung in der Schweiz, S. 11–31. Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie, Heft 25, Bern.
- Menzel, L. (1991): Wasserhaushaltsstudien im Einzugsgebiet der Thur (Ostschweiz). Analyse hydrologischer Feldmessungen 1976–1985. Berichte und Skripten Nr. 46, Geographisches Institut ETH, Zürich. 206 S.
- Menzel, L. (1997): Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Zürcher Geographische Schriften Nr. 67, Geographisches Institut ETH, Zürich. 128 S.
- Schädler, B. (1985): Der Wasserhaushalt der Schweiz. Mitteilung Nr. 6 der Landeshydrologie, Bern. 83 S.
- Streit, U. (1981): Kriging, eine geostatistische Methode zur räumlichen Interpolation hydrologischer Informationen. Wasserwirtschaft 71, Nr. 7+8, S. 219–223.

### Dank

Am Geographischen Institut der ETH Zürich erhielten wir wertvolle Unterstützung von: *Thomas Roesch* und *Manfred Schwarb* (Isoliendarstellung und statistische Aufbereitung meteorologischer Grössen), *Holger Jensen* (Kriging-Software zur räumlichen Interpolation meteorologischer Daten), *Jörg Schulla* (Programme zur Bestimmung von Gebietsmitteln des Niederschlages und der Temperatur), *Ludwig Zraggen* (Beratung bei der Herleitung regionaler Temperaturgradienten).

Für die Unterstützung bei der Datenbereitstellung sind wir ferner folgenden Organisationen zu grossem Dank verpflichtet: Landeshydrologie und -geologie (LHG), Bern; Schweizerische Meteorologische Anstalt, Zürich; Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich (Lang und Nosari), Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe (Henning, Luft und Straub). Finanzielle Unterstützung des Projektes verdanken wir dem nationalen Projekt «Hydrologischer Atlas der Schweiz» (Buwal/LHG).

Anschrift der Autoren: Dr. *Lucas Menzel*, Dipl.-Natw. *Martin Rohmann*, Prof. Dr. *Herbert Lang*, Geographisches Institut ETH – Abteilung Hydrologie, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich.

Unter dieser Adresse kann ein ausführlicher Bericht zu Grundlagen und Herstellung der Verdunstungskarte bezogen werden.

## Lebensdauer von Turbinen verlängern

### Sulzer-Technologie für China

Sulzer Hydro hat mit einem chinesischen Partner ein Joint-venture zur Beschichtung verschleissgefährdeter Teile von Wasserturbinen abgeschlossen. Mit diesem Schritt will sich Sulzer einen Vorsprung in der Erschliessung dieses grossen Marktpotentials in China sichern.

Die «China North West Electric Power Group Company» in Xian, mit der Sulzer den Joint-venture-Vertrag unterzeichnet hat, betreibt zehn Wasserkraftwerke am Gelben Fluss und seinen Zuflüssen. Das Geschäftsfeld des Joint-venture umfasst das Beschichten von Komponenten bestehender Wasserkraftanlagen. Dabei wird auch Know-how von Sulzer Metco eingesetzt. Dem Vertragsabschluss waren gemeinsame Forschungsvorhaben vorangegangen, die die hohe Effektivität der gewählten Technologie zeigten.

Der hohe Geschiebeanteil des Gelben Flusses – während der Regenzeit bis über eine halbe Tonne Sand pro Kubikmeter – führt an den Laufrädern von Wasserkraftwerken zu beträchtlichen Abrasionsschäden. Entsprechend hoch sind die Unterhaltskosten und die Einbussen wegen des geringeren Wirkungsgrads beschädigter Turbinen. Durch das Aufbringen keramischer Schutzschichten kann die Lebensdauer von verschleissgefährdeten Teilen massiv erhöht werden.

### Beherrschung von Abrasiv-Verschleiss

Durch systematische Arbeiten im Labor und in Feldversuchen wurden die Keramiksichten auf die Anforderungen hydraulischer Maschinen optimiert. Die Auswahl des geeigneten Beschichtungstyps basiert auf einer genauen Analyse des Verschleissproblems der betroffenen Anlagen. Die hohe Härte der Keramikbeschichtung in Verbindung mit einer optimierten Gefügestruktur verlängert die Lebensdauer von Turbinenschaufeln auf das Zwei- bis Dreifache.