

## Tafel 4.1 Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973–1992

### Einleitung

Unter Verdunstung (Evapotranspiration) wird der Übergang des Wassers vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand verstanden. Dieser Phasenübergang vollzieht sich sowohl an belebten (Vegetationsdecke) wie auch an unbelebten Oberflächen (Wasser, Fels, Boden) und wird von den aktuellen Wetterbedingungen und der Vegetation angetrieben. Der Transfer von Wasserdampf in die Atmosphäre begrenzt das nutzbare Wasserdargebot auf der Erde und stellt somit einen «Ausgabenposten» bei der hydrologischen Wasserbilanz dar. Bei der Verdunstung werden aber auch beträchtliche Energiemengen umgesetzt, die unser Klima entscheidend beeinflussen und zur thermischen Ausgeglichenheit auf der Erde beitragen. Angesichts dieser Bedeutung ist die Verdunstung bei land- und forstwirtschaftlichen Ertragsstudien, bei der Ermittlung regionaler Wasserressourcen, bei der Niedrigwasseranalyse sowie im Bereich der Klimaforschung eine massgebende Grösse.

Weil beim Verdunstungsvorgang neben rein physikalischen auch biologische Prozesse beteiligt sind, ist eine verlässliche Bestimmung der Verdunstungshöhe erschwert. Zudem kann die Verdunstung räumlich und zeitlich stark variieren, was vor allem auf die häufig wechselnden Standorteigenschaften wie Topographie, Meereshöhe, Landnutzung, Bodenbeschaffenheit und die klimatische Variabilität zurückzuführen ist. Bei der Bestimmung der aktuellen Verdunstung müssen diese Randbedingungen berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu bezieht sich die potentielle Verdunstung auf idealisierte Oberflächen mit unbegrenztem Wasserangebot.

Während einige zeitlich begrenzte Punktstudien zur Verdunstung in der Schweiz verfügbar sind, bestand bislang noch weitgehende Unklarheit über die räumliche Verteilung der Verdunstung (Gebietsverdunstung); dies gilt in besonderem Masse für den Alpenraum. Zur Schliessung dieser Lücken setzt man in neuerer Zeit vermehrt Simulationsmodelle zur Bestimmung der Wasserhaushaltskomponenten und damit auch der Verdunstung ein.

### Modellierung der Verdunstung

Zur räumlich differenzierten Simulation der aktuellen Verdunstung entstand das Verdunstungsmodell TRAIN, das Erkenntnisse ausgedehnter Feldstudien zur Verdunstung und ihren Teilprozessen beinhaltet [1,2]. Zunächst werden in TRAIN die verschiedenen Einzelkomponenten der Verdunstung getrennt berechnet und in einem zweiten Schritt zur aktuellen Verdunstung kombiniert. Bei der Regionalisierung der Verdunstung gehen gebietsspezifische Merkmale (Topographie, Landnutzung, Böden) und wechselnde meteorologische Bedingungen in das skalenunabhängige Berechnungsschema ein. Folgende Komponenten werden berücksichtigt:

- Zur Verfügung stehende Energie unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einstrahlungs- und Abschattungsbedingungen
- Angaben zu unterschiedlichen Landnutzungen, wie z.B. Wuchshöhe, Blattflächenentwicklung, Albedo
- Schneedeckenzuwachs, Schneeschmelze sowie Verdunstung von Schnee- und Eisflächen (Sublimation)
- Interzeption und Interzeptionsverdunstung
- Verdunstung der Pflanzen (Transpiration) in Abhängigkeit des aktuellen Entwicklungszustandes der Vegetation, der Bodenfeuchte und der Witterungsbedingungen, berechnet nach Penman-Monteith
- Verdunstung der offenen Wasserflächen (Evaporation)
- Aktuelle Wasserverfügbarkeit im Boden

Die zur Berechnung notwendigen meteorologischen Daten entstammen dem Klima- und Niederschlagsmessnetz der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (vgl. Tafel 2.1). Für die flächenhafte Interpolation der Klimadaten wird eine Kombination aus höhenabhängiger Regression und Abstandsgewichtung verwendet [3]. Weitere von TRAIN benötigte Datensätze sind die Arealstatistik mit Angaben zur Landnutzung, ein digitales Höhenmodell und davon abgeleitete Informationen zu Hangneigungen und Expositionen sowie die digitale Bodeneignungskarte der Schweiz mit den Gründigkeiten und den Wasserspeichervermögen der Böden.

Zur flächendifferenzierten Modellierung der Verdunstung wurde die Schweiz in ein regelmässiges Gitter mit 1 km Maschenweite unterteilt. Sämtliche meteorologischen Daten standen als Tagessätze, interpoliert auf das Gitternetz, zur Verfügung. Für jede Gitterzelle konnte die aktuelle Verdunstung somit in täglicher Auflösung für den Zeitraum 1973–1992 berechnet werden.

## Ergebnisse

Die Isolinienkarte 1:500 000 gibt die Jahresmittel der aktuellen Verdunstung der 20jährigen Referenzperiode wieder. Auf den ersten Blick fällt die Höhenabhängigkeit der Verdunstung auf mit hohen Werten im Mittelland, in den alpinen Tallagen und im Tessin sowie mit tiefen Werten in den Alpen, Voralpen und im Jura. Die deutliche Abnahme der Verdunstung mit der Höhe ist vor allem auf die längere Dauer der Schneebedeckung sowie die allgemein tieferen Temperaturen zurückzuführen, welche die verdunstungsfördernde Zunahme der kurzwelligen Strahlung mit der Höhe mehr als ausgleichen. Hinzu kommen die im Gebirge häufig flachgründigen Böden mit ihrem geringen Wasserspeichervermögen sowie die spärliche Vegetationsbedeckung mit kürzeren Wachstumsphasen. Weite Gebiete der Alpen sind vegetationsfrei und die Verdunstung ist somit vergleichsweise niedrig (Fig. 4). Vergletscherte Gebiete grösserer Ausdehnung sind auf der Isolinienkarte gut als äusserst verdunstungsarme Flächen zu erkennen. Die von Siedlungen, Industrie oder Verkehr beanspruchten Flächen heben sich ebenfalls durch vergleichsweise niedrige Verdunstungswerte heraus. Dagegen fallen einige Höhenzüge im Mittelland als verdunstungsreiche Gebiete auf. Hier macht sich die hohe Verdunstung waldbestandener Flächen bemerkbar. Mit Abstand die höchsten Beträge erreicht aber die Seenverdunstung.

Durch die Kombination der Einflüsse von Klima, Höhenlage und Exposition, der Landnutzung sowie der Bodenbeschaffenheit ergibt sich ein äusserst flächendifferenziertes Bild der Verdunstung. Dies wird vor allem in der Pixelkarte 1:1 100 000 augenfällig. Solche kleinräumigen Variationen der Verdunstung sind in der Isolinienkarte 1:500 000, die auf der Pixelkarte beruht, aufgrund der Generalisierung nicht wiedergegeben.

Aus der Zusammenfassung sämtlicher Gitterzellen mit gleicher Landnutzung in der Schweiz kann die mittlere flächenspezifische Verdunstung ermittelt werden. Sie beträgt für Gewässer 901 mm, für Wald 616 mm, für Land- und Alpwirtschaft 436 mm, für Siedlung und Industrie 434 mm, für Felsflächen 234 mm, für Verkehrsflächen 199 mm und für Eis- sowie Firnflächen 156 mm; somit ergibt sich ein schweizerischer Mittelwert von 484 mm.

Die in Figur 2 aufgetragene Höhenabhängigkeit der Gesamtverdunstung zeigt für den unteren Höhenbereich bis ca. 700 m ü. M. maximale Werte der mittleren Jahresverdunstung von etwa 560 mm. Werden die Seen mit ihrer allgemein hohen Verdunstung hinzugenommen, so resultiert eine mittlere Jahresverdunstung von über 700 mm in diesen untersten Höhenbereichen. Aufgrund des mit zunehmender Höhe geringer werdenden Flächenanteils der Seen ist ihr Einfluss auf die Gesamtverdunstung oberhalb etwa 700 m ü. M. klein. Bis etwa 3000 m ü. M. nimmt die Verdunstung stetig bis auf einen mittleren Jahreswert von ca. 230 mm ab. Darüber ist keine eindeutige Höhenabhängigkeit mehr zu erkennen, was u.a. mit der geringen Zahl von Stützwerten in diesen Höhenklassen zu erklären ist. Die in Figur 2 für die beiden Hauptnutzungsklassen Wald sowie Land- und Alpwirtschaft wiedergegebenen Höhenabhängigkeiten entsprechen in ihrem allgemeinen Verlauf jenem der mittleren Gesamtverdunstung, die absoluten Beträge sind jedoch wesentlich verschieden. Bemerkenswert ist die hohe Verdunstung des Waldes, welche auf den wichtigen Beitrag der Interzeptionsverdunstung in Wäldern hinweist.

In der Figur 1 ist die räumliche Variation der Jahresmittel der Verdunstung entlang dem Profil Ajoie–Wallis wiedergegeben. Neben der eindeutig vorhandenen Abhängigkeit von der Meereshöhe werden die Variationen der Verdunstung auch durch den Einfluss der verschiedenen Landbedeckungen sowie durch unterschiedliche Expositionen und Bodeneigenschaften bestimmt. So ist der Rückgang der Verdunstung im Jura nicht nur höhenbedingt, zumal dieses Gebiet überwiegend von Wald mit seiner üblicherweise hohen Verdunstung bedeckt ist. Im Jura machen sich aber die vergleichsweise ungünstigen Bodeneigenschaften (geringe Bodentiefen, schlechtes Wasserspeichervermögen) bemerkbar, welche die Transpiration einschränken. Die waldbestandenen Flächen der Ajoie erreichen hingegen hohe Verdunstungswerte, da die Böden sowie die klimatischen Bedingungen der Transpiration optimale Voraussetzungen bieten. Am augenfälligsten wird die räumliche Variation der Verdunstung aber an der nordwestlichen Flanke der Alpen, wo die hohe Verdunstung aus dem Thuner See im Kontrast zu Werten von unter 200 mm steht, wie sie im südlich anschliessenden, stark vergletscherten Gebiet der Berner Alpen auftreten.

Für die Darstellung der zeitlichen Variabilität der Verdunstung in der Figur 4 wurden im Bereich des Profils Ajoie–Wallis drei Flächen unterschiedlicher Landbedeckung herausgegriffen und deren Tagesmittel aufgetragen. Dabei zeigt die landwirtschaftlich genutzte Fläche im Mittelland während der Wintermonate praktisch keine Verdunstung. Dagegen steigen die Tageswerte während der Hauptwachstumsphase in den Monaten April/Mai stark an. Die in der Ajoie gelegene Waldfläche verdunstet zum Teil erheblich mehr als die landwirtschaftlich genutzte Vergleichsfläche im Mittelland. Dazu tragen auch die hohen Werte der Interzeptionsverdunstung während der Winterzeit bei. Wie anhand der in den Walliser Alpen gelegenen Felsfläche zu sehen ist, kann auch die Verdunstung von vegetationslosen Oberflächen nicht unerhebliche Beträge annehmen. Zum einen ist dies auf die Schneeverdunstung im Winter und während der Schneeschmelze zurückzuführen, zum anderen spielen Benetzungsverluste durch Interzeptionsverdunstung eine wichtige Rolle. Die hohen Werte der Interzeptionsverdunstung während des kurzen Sommers deuten häufige Wechsel zwischen Befeuchtungsphasen (Regen) und nachfolgender Abtrocknung an.

Die in Figur 4 gezeigten Beispiele beziehen sich auf Einzelflächen von je 1 km<sup>2</sup> Grösse, können also nicht als Charakteristikum für ganze Regionen verstanden werden. Für eine regionale Betrachtung der Verdunstung von Gebieten mit einheitlicher Landnutzung wurden die in allen Landesteilen grossflächig vorhandenen Waldgebiete exemplarisch untersucht. Um Vergleichsmöglichkeiten zwischen den einzelnen Regionen zu schaffen, bezog sich die Untersuchung einheitlich auf die Höhenzone von 800–1000 m ü. M. In der Figur 3 sind die Ergebnisse in Form mittlerer Jahrgänge täglicher Verdunstungshöhen dargestellt. Es sind deutliche regionale Unterschiede der Waldverdunstung zu erkennen. So fallen hohe sommerliche Werte im östlichen Mittelland sowie in der Region Berner Oberland/Waadtl auf. Dagegen ist die Transpiration der Waldflächen im Jura und im Tessin während des Sommers eingeschränkt, was wiederum einen Hinweis auf die vergleichsweise ungünstigen Bodenverhältnisse gibt. Im Winterhalbjahr ist die Waldverdunstung im Tessin relativ hoch; hier spielen offensichtlich die günstigeren Klimabedingungen die Hauptrolle.

## Literatur

- [1] **Menzel, L. (1997):** Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Zürcher Geographische Schriften, Nr. 67, Zürich.
- [2] **Schlegel, T. et al. (1998):** Interzeptionsverdunstung im hochalpinen Raum. Berichte und Skripten, Nr. 62, Geographisches Institut ETH, Zürich.
- [3] **Schulla, J. (1997):** Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Zürcher Geographische Schriften, Nr. 69, Zürich.