

# **Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN**

**Lucas Menzel**

**Juli 1999**

Korrespondierender Autor:  
Dr. Lucas Menzel  
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.  
PF 60 12 03, D-14412 Potsdam  
Tel.: +49-331-288-2673  
Fax: +49-331-288-2600  
E-mail: [Lucas.Menzel@pik-potsdam.de](mailto:Lucas.Menzel@pik-potsdam.de)

## Summary

The present publication gives an overview of the evapotranspiration model TRAIN. This model includes information from comprehensive field studies of evapotranspiration and associated sub-processes and has been designed to simulate the spatial pattern of actual evapotranspiration. The overall structure and goals of the model are presented in an example application, the modelling of areal evapotranspiration for the territory of Switzerland (ca. 41.000 km<sup>2</sup>). For the individual squares of a grid covering Switzerland in 1 × 1km resolution daily evapotranspiration rates are calculated over a 20 year period.

As a preliminary study, Switzerland is subdivided into nine climate zones. For each of these zones the spatial interpolation of the meteorological data is carried out by a combination of altitude dependent regression and inverse distance weighting interpolation (Schulla, 1997). As a result, daily interpolated data of precipitation, temperature, relative humidity, wind speed and sunshine duration are available. Another model input are gridded data of topography (digital elevation model, slope, aspect), soil properties and land-use, including bare rock and glaciated areas.

TRAIN is based on a modular structure. This facilitates the individual simulations of processes at the soil-vegetation-atmosphere interface which are relevant for evapotranspiration. At the beginning of a model run radiation is calculated with meteorological data and slope geometry as principal inputs (Oke, 1987). Next, radiation is modified due to topographic shade effects. Another module simulates snow accumulation, snow melt and variations of snow albedo. Interception and interception evaporation are modelled according to Menzel (1997), where the non-uniform distribution of intercepted precipitation inside a canopy is considered. A more simplified version is applied for bare surfaces. The modelling of transpiration is based on the Penman-Monteith equation (Monteith, 1965), which is combined by a submodel to deliver canopy resistances (Menzel, 1996). Canopy resistances are modified by meteorological conditions, phenology and soil moisture, which is again an output of the soil moisture module. Finally, the various evaporation components are combined with actual evapotranspiration.

A thorough discussion of the model results is included in this report. An isoline and a pixel map of mean actual evapotranspiration are presented for the investigated area. The temporal and spatial characteristics of evapotranspiration in Switzerland are described by example profiles across the Alps and an elevation dependent representation of evapotranspiration. For different types of land cover and forested areas mean daily values of evapotranspiration are presented.



## **Zusammenfassung**

Schematischer Aufbau und Anwendungsmöglichkeiten des Verdunstungsmodells TRAIN werden anhand der Arbeiten zur Verdunstungskarte der Schweiz vorgestellt. Zunächst wird eine Übersicht zu den notwendigen Eingangsdaten und zur Untergliederung des Untersuchungsgebietes gegeben. Die räumliche Interpolation der meteorologischen Größen sowie die Bereitstellung zeitlich variabler Datensätze zur Landnutzung sind weitere Schritte bei der Vorbereitung eines Modelleinsatzes und werden hier kurz umrissen. Es folgt anschließend eine Beschreibung der einzelnen Modellkomponenten von TRAIN. In einer ausführlichen Ergebnisdarstellung werden zunächst die beiden Hauptprodukte für die Schweizer Studie, eine Isolinien- und eine Pixelkarte der mittleren jährlichen Verdunstung, besprochen. Aufgrund der räumlich differenzierten Modellierung des Untersuchungsgebietes in geringer zeitlicher Schrittweite sind ausführliche Analysen zur Verdunstung, ihren Teilkomponenten und den entsprechenden Einflußgrößen möglich. In diesem Rahmen werden vor allem Höhenabhängigkeiten und regionale Unterschiede der Verdunstung bei gleicher und unterschiedlicher Landnutzung aufgezeigt. Eine abschließende Diskussion behandelt die Möglichkeiten und Grenzen des vorgestellten Verfahrens.



## **Vorwort**

Zweck des vorliegenden Berichtes ist, Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten des Verdunstungsmodells TRAIN näher zu erläutern. Als Beispiel werden die Arbeiten zur Regionalisierung der Evapotranspiration in der Schweiz vorgestellt. Damit stellt der Bericht auch eine ausführlichere Version des Text- und Grafikteils zur Tafel 4.1 (Verdunstung) im Hydrologischen Atlas der Schweiz dar (Menzel et al., 1999).

Um der methodischen Vorgehensweise breiteren Raum einzuräumen sowie zugunsten einer umfassenden Ergebnisdarstellung wurde hier auf die Formulierung der den Modellkomponenten zugrundeliegenden Algorithmen verzichtet. Hier sei auf die zitierte, weiterführende Literatur sowie weitere Publikationen zu Teilaspekten der Verdunstungsmodellierung verwiesen.

Der überwiegende Teil der Arbeiten zu der Schweizer Studie wurde am Geographischen Institut der ETH Zürich ausgeführt. Den Herren Prof. Dr. Herbert Lang und Martin Rohmann sei für ihre Unterstützung und Mitarbeit an dieser Stelle herzlich gedankt. Im Rahmen des Projektes „Hydrologischer Atlas der Schweiz“ erfuhren die Arbeiten finanzielle Unterstützung durch das Eidgenössische Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft sowie die Landeshydrologie und -geologie in Bern.

In der Zwischenzeit wurden Weiterentwicklungen und Verbesserungen an einzelnen Prozeßbeschreibungen in TRAIN vorgenommen oder sind in Planung. Entsprechend der Aufgabenstellung am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung wird einer der zukünftigen Schwerpunkte in der weitergehenden Parametrisierung der Landnutzung liegen. Es ist dabei auch an eine erfolgreiche Anwendung des Modells im Rahmen von Klima- und Landnutzungs-szenarien gedacht.

Abschließend sei angemerkt, daß die Begriffe Verdunstung und Evapotranspiration hier gleichbedeutend verwendet werden und sich jeweils auf die „aktuelle“ Verdunstung bzw. Evapotranspiration beziehen.

Lucas Menzel, im Juni 1999



## **Inhaltsverzeichnis**

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| Summary.....                         | 3  |
| Zusammenfassung.....                 | 5  |
| Vorwort .....                        | 7  |
| Inhaltsverzeichnis.....              | 9  |
| 1 Einleitung .....                   | 11 |
| 2 Modellierung der Verdunstung ..... | 12 |
| 3 Ergebnisse .....                   | 19 |
| 4 Diskussion.....                    | 28 |
| 5 Literatur .....                    | 30 |



## 1 Einleitung

Im Alpenraum lag der Schwerpunkt hydrologischer Untersuchungen lange Zeit in der gesicherten Erfassung von Niederschlag und Abfluß sowie der Bestimmung von Massenänderungen in Gletschern und Schneeflächen. Dabei spielte vor allem eine Verbesserung der Zu- und Abflußprognosen, u.a. für die Elektrizitätswirtschaft, eine der Hauptrollen. Der meist relativ geringe Anteil der Verdunstung an der alpinen Wasserbilanz wurde häufig über die Wasserhaushaltsgleichung abgeschätzt.

Auch im Schweizer Mittelland beruhen Gebietswerte der Verdunstung überwiegend auf der Bilanzierung des Wasserhaushaltes, in dem die Verdunstung als Restgröße ermittelt wird und daher mit allen Unsicherheiten aus der Niederschlagsmessung und -regionalisierung behaftet ist. Daneben liegen eine Reihe von Verdunstungsuntersuchungen an einzelnen Punkten oder an Versuchsflächen vor. Neben Direktmessungen der Verdunstung an Lysimetern werden häufig schwer regionalisierbare, empirische Formeln zur indirekten Verdunstungsbestimmung aus klimatologischen Daten angewandt. Eine erste Kartierung der Verdunstung über die gesamte Landesfläche der Schweiz unternahmen Baumgartner et al. (1983) im Rahmen einer alpenweiten Wasserhaushaltsstudie. Menzel et al. (1997) legten eine Verdunstungskarte für das Schweizer Mittelland vor. Beide Untersuchungen berücksichtigen jedoch keine spezifischen Einflüsse der Landoberfläche und der Vegetation auf die Verdunstung, womit sich wenig flächendetaillierte und verfahrensbedingt zeitlich gering aufgelöste Ergebnisse erzielen lassen.

Ableitungen der Verdunstung aus dem Energiehaushalt oder dem Wasserdampftransport sind infolge des hohen Meßaufwandes zwar meist auf kurze Zeiträume beschränkt, ebenso wie Lysimetermessungen bieten sie aber den Vorteil der präzisen und zeitlich hoch aufgelösten Verdunstungsbestimmung. Zusammen mit Messungen zum Bodenwasserhaushalt und zur Phänologie ist es damit möglich, physikalisch fundierte Verdunstungsmodelle zu entwickeln, die das gesamte Kontinuum aus Boden, Vegetation und Atmosphäre und dessen Einfluß auf die Verdunstung beschreiben. In der Schweiz wurde dieses Konzept im Rahmen des Nationalen Forschungsprojektes 31 „Klimaänderungen und Naturkatastrophen“ mit dem Verdunstungsmodell TRAIN (Menzel, 1997) an der ETH Zürich entwickelt. Die erfolgreiche Anwendung von TRAIN beruht auf intensiven Studien zur Verdunstung und deren Einflußgrößen im voralpinen Gebiet Rietholzbach. Daneben führte das Geographische Institut der ETH auch mehrjährige Meßkampagnen im alpinen Tal des Dischmabaches durch (Konzelmann et al., 1997), in dem sämtliche Aspekte verdunstungsrelevanter Prozesse im Höhenbereich von 1600 bis 2300 m ü. M. untersucht wurden (Hofmann et al., 1998; Schlegel et al., 1998). Damit konnte TRAIN in einigen Aspekten für die Anwendung im alpinen Bereich erweitert werden. Die Forderung nach einer Verdunstungskarte für die gesamte Schweiz führte schließlich zu einer regionalisierbaren Version von TRAIN, die nachfolgend beschrieben werden soll.

## 2 Modellierung der Verdunstung

Zur flächendifferenzierten Modellierung der Verdunstung wird die Schweiz in ein regelmäßiges Gitter mit 1 km Maschenweite unterteilt. Für jede Gitterzelle wird die Verdunstung anschließend in Tagesschrittweite über den 20-jährigen Zeitraum 1973–1992 berechnet. Für den Modellantrieb dienen die meteorologische Daten aus dem Klima- und Niederschlagsmeßnetz der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA). Das Verdunstungsmodell benötigt tägliche Werte des Niederschlages, der Sonnenscheindauer, der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte sowie der Windgeschwindigkeit. Anstelle der Sonnenscheindauer kann auch die Globalstrahlung verwendet werden. Zur räumlichen Interpolation der Klimadaten können verschiedene Verfahren, z.B. Kriging (Rohmann und Menzel, 1999) angewandt werden. Für die Schweizer Studie werden die Daten nach dem in Schulla (1997) beschriebenen Kombinationsverfahren der Abstandsgewichtung und höhenabhängigen Regression gleichmäßig auf die Fläche interpoliert. Die Schweiz wird hierbei in neun Regionen unterteilt (Tabelle 1) in denen unterschiedliche Höhenabhängigkeiten der meteorologischen Größen erwartet werden. Mit den an den Klimastationen der jeweiligen Region erhobenen Daten werden für jede Meßgröße täglich wechselnde Höhengradienten bestimmt. Für die Interpolation stehen die Meßwerte von insgesamt etwa 160 Klimastationen zur Verfügung, wobei die Sonnenscheindauer an nur etwa 100 Stationen gemessen wird. Die Verteilung der Stationen auf die einzelnen Regionen ist in Tabelle 1 aufgeführt. Zu berücksichtigen ist, daß durch Veränderungen im Stationsnetz während des Auswertezitraumes nicht immer die maximale Stationszahl zur Verfügung stand. In der Abbildung 1 ist die interpolierte Jahresmitteltemperatur 1973–1992 für die gesamte Schweiz dargestellt. Die Auswertung beruht auf in Tagesabständen angefertigten Interpolationsfeldern, wie sie von TRAIN weiterverwendet werden.

TABELLE 1: Einteilung der Schweiz in verschiedene Regionen zur Ableitung regionaler Höhengradienten. Für jede Region ist zudem die Anzahl berücksichtigter Klimastationen zur Interpolation von Niederschlag bzw. Lufttemperatur ( $N/T$ ), relativer Luftfeuchte ( $rH$ ), Windgeschwindigkeit ( $u$ ) und Sonnenscheindauer ( $SSD$ ) angegeben.

| Nr. | Region                                       | $N/T$ | $rH$ | $u$ | $SSD$ |
|-----|--|-------|------|-----|-------|
| 1   | Wallis                                       | 23    | 18   | 22  | 17    |
| 2   | Tessin                                       | 15    | 10   | 15  | 12    |
| 3   | Graubünden ohne Engadin                      | 12    | 12   | 12  | 9     |
| 4   | Engadin und Puschlav                         | 12    | 10   | 12  | 6     |
| 5   | Berner Oberland/Waadtland                    | 16    | 14   | 15  | 8     |
| 6   | Innerschweiz mit Churfürsten<br>und Alpstein | 19    | 17   | 19  | 8     |
| 7   | Jura   | 13    | 12   | 13  | 9     |
| 8   | Mittelland Ost                               | 40    | 38   | 39  | 23    |
| 9   | Mittelland West                              | 15    | 15   | 15  | 11    |

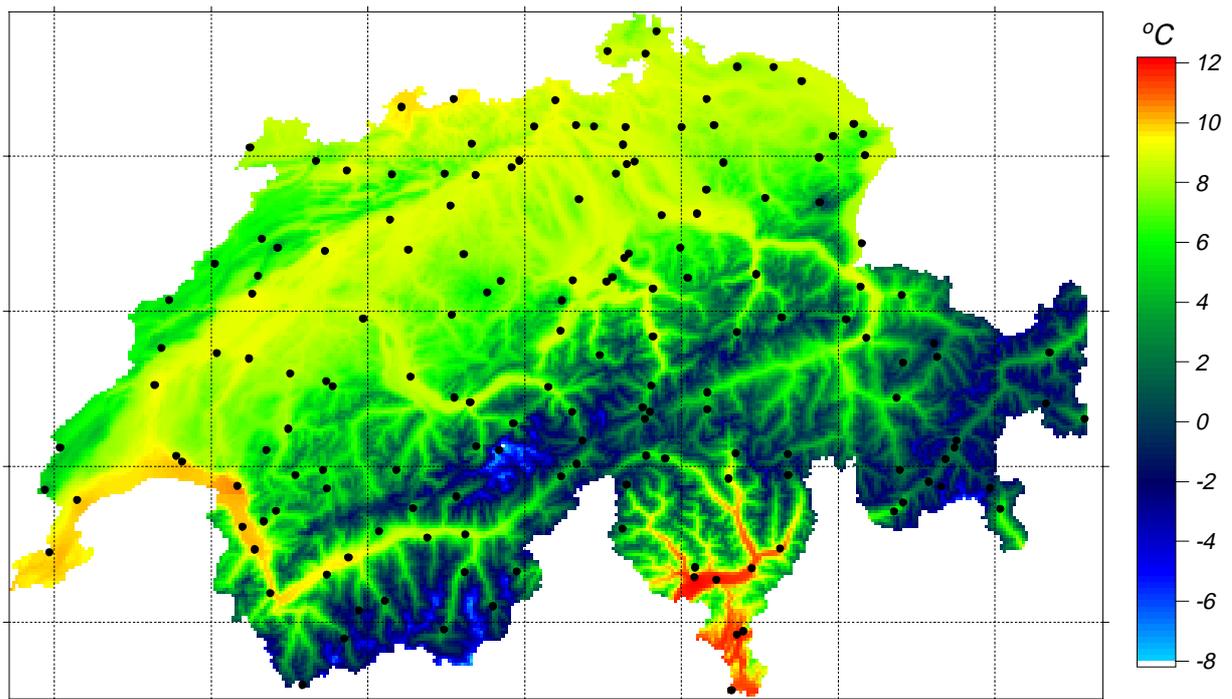


ABBILDUNG 1: Räumliche Verteilung der Jahresmitteltemperatur des Zeitraumes 1973–1992 in der Schweiz. Punkte geben die Lage der zur Interpolation verwendeten Klimastationen wieder. Die Karte entstand aus der Zusammenfassung täglicher Interpolationsfelder. Die Abstände der Gitternetzlinien betragen 50 km.

Die räumlich verteilten, zeitlich invarianten Datensätze des digitalen Höhenmodells (DHM) der Schweiz, der Arealstatistik (Landnutzung) sowie der digitalen Bodeneignungskarte werden in jeweils auf 1 km Maschenweite aggregierter Auflösung verwendet. Neben der Bereitstellung von höhenbezogenen Daten wird das DHM auch zur Berechnung von Hangneigung und Exposition genutzt. Durch die für Gebirgsregionen relativ grobe Auflösung von 1 km treten allerdings keine Gitterzellen mit mittleren Hangneigungen von über 45 Grad auf.

Die ursprünglich 69 Nutzungsklassen in der Arealstatistik werden für das Verdunstungsmodell in zehn Klassen zusammengefaßt. Unter Zuhilfenahme der geotechnischen Karte der Schweiz konnten die in der Arealstatistik als „vegetationslose Flächen“ ausgewiesenen, und nicht weiter untergliederten Fels- und Gletscherflächen in zwei eigenständige Klassen unterteilt werden (Zraggen, in Vorbereitung). Hiermit ist eine wesentlich realistischere Berechnung der Verdunstung im Hochgebirge möglich.

Um zu realitätsnahen Simulationsergebnissen bei der Verdunstungsmodellierung zu gelangen, müssen für jede Landnutzung spezifische, zeitlich variable Parametersätze bereitgestellt werden. Für vegetationsbedeckte Flächen sind dies u.a. Tageswerte der Bestandeshöhe, des Blattflächenindex (LAI), der Interzeptionsspeicherkapazität und der Albedo. Die zeitliche Entwicklung dieser Größen ist zudem höhenabhängig, um der kürzeren Vegetationszeit in höheren Lagen Rechnung zu tragen. In der Abbildung 2 ist ein Beispiel für die Nutzungsklasse „Land- und Alpwirtschaft“ gegeben, die in der Schweiz überwiegend aus Grünlandnutzung besteht. Die Jahresmaxima von Bestandeshöhe und LAI werden im Modell mit der Meereshöhe reduziert. Die Maximalwerte der Albedo sind nach der Meereshöhe zwar nicht

veränderlich, treten aber wie bei der Bestandeshöhe und dem LAI höhenabhängig zu verschiedenen Zeitpunkten auf. Die zeitliche Entwicklung der genannten Parameter ist in allen Jahren des Auswertzeitraumes identisch, d.h. Einwirkungen des aktuellen Klimas auf das Wuchsverhalten werden nicht berücksichtigt.

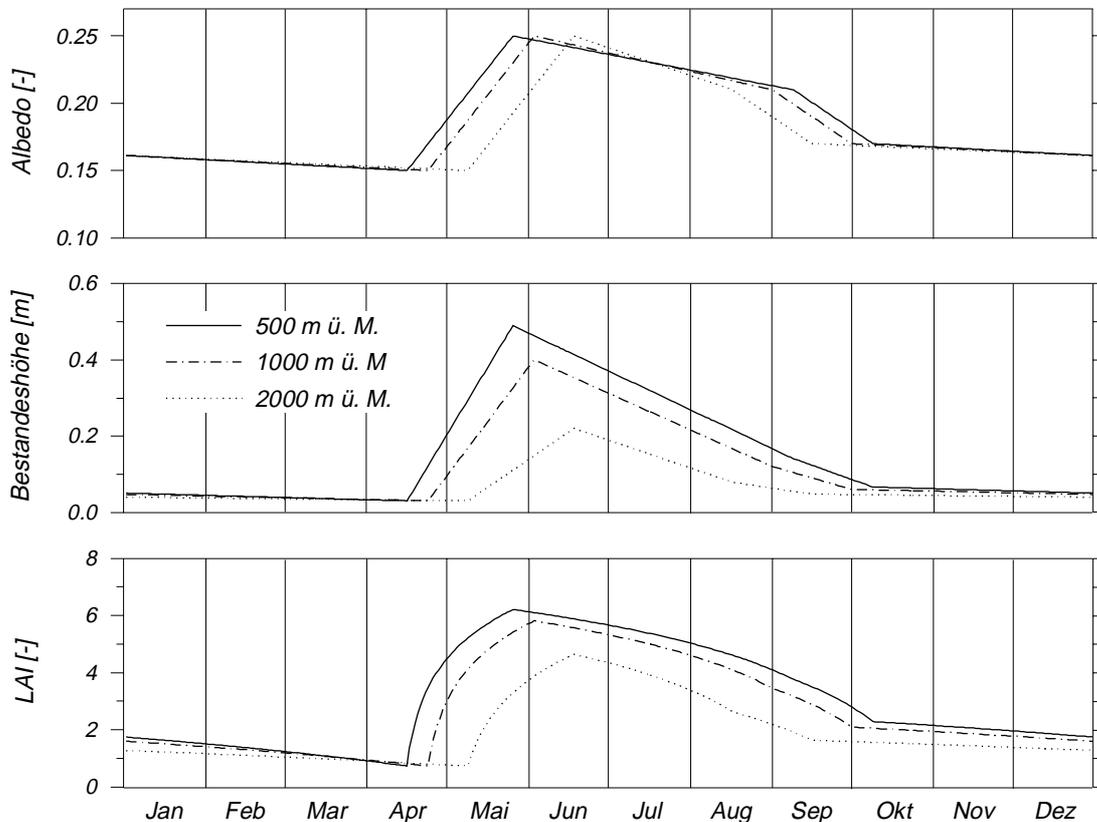


ABBILDUNG 2: Beispiel für die Parametrisierung pflanzenspezifischer Größen, dargestellt anhand der Nutzungsklasse „Land- und Alpwirtschaft“. Aufgezeichnet sind die modellintern berechneten, jahreszeitlich und mit der Höhe variablen Werte für die Größen Albedo, Bestandeshöhe und Blattflächenindex (LAI).

Vegetationslosen Flächen werden zeitlich meist invariante Angaben zur Rauigkeitslänge (dient analog der Bestandeshöhe als Ausdruck der aerodynamischen Rauigkeit) und Albedo zugewiesen. Siedlungs-, Verkehrs- und Felsflächen erhalten zudem Angaben zur Interzeptionsspeicherkapazität.

Die für TRAIN benötigten Angaben zur Bodengründigkeit sowie zum Wasserspeichervermögen der Böden in der Schweiz sind in der digitalen Bodeneignungskarte in mehrere, lediglich der qualitativen Beurteilung dienende Abstufungen unterteilt. Diesen Eignungsklassen sind jeweils unveränderliche Zahlenwerte, z.B. zur Durchwurzelungstiefe, zuzuweisen.

Die Struktur des Verdunstungsmodells TRAIN und die Verknüpfung mit den erforderlichen Eingangsdaten ist schematisch in der Abbildung 3 dargestellt. Das Simulationsverfahren besteht aus einer Abfolge selbständiger Teilmodelle, von denen die wichtigsten im Folgenden charakterisiert werden sollen.

- Unterschiedliche Einstrahlungs- und Abschattungsbedingungen sind das Ergebnis verschiedener topographischer (Hanggeometrie, Horizontweite) und himmelsmechanischer (Sonnenauf- und untergang, tages- bzw. jahreszeitlich variable Sonnenstände) Gegebenheiten. Dadurch wird besonders im Gebirge das für die Verdunstung nutzbare Energieangebot zum Teil erheblich modifiziert. In einer speziellen Prozedur wird die Einstrahlung auf beliebig geneigte Flächen berechnet (Oke, 1987; Schulla, 1997), wobei räumlich interpolierte Daten der Sonnenscheindauer bzw. der Globalstrahlung zur Verfügung stehen. Daran schließt sich die unter Verwendung des digitalen Höhenmodells durchzuführende Abschattungsberechnung an.
- In Zeitintervallen mit Schneefall oder bestehender Schneedecke werden in einem entsprechenden Teilmodell die Prozesse des Schneedeckenauf- und abbaus sowie der Albedovariation simuliert (siehe auch Abbildung 4). Die Schneeakkumulation wird nach dem in Schulla (1997) beschriebenen Verfahren berechnet. Hierbei wird anhand der Lufttemperatur bestimmt, in welchem Aggregatzustand der Niederschlag auftritt, wobei mit der Formulierung eines Temperatur-Übergangsbereiches Schnee und Regen auch gemischt fallen können. Die Schneeschmelzberechnung ist an das Temperatur-Index-Verfahren angelehnt. Der temperaturabhängige Schmelzfaktor ist in der zur Zeit gültigen Modellversion räumlich und jahreszeitlich nicht variabel. Die Berechnung der Albedo einer Schneedecke erfolgt nach der in Plüss (1997) beschriebenen Prozedur. Die durch Alterung der Schneedecke hervorgerufenen Albedovariationen werden dabei in Abhängigkeit der Anzahl Tage seit dem letzten Schneefall und den seit diesem Zeitpunkt herrschenden Temperaturverhältnissen berechnet.
- Die Nachbildung von Interzeption und Interzeptionsverdunstung stützt sich auf ausgedehnte Feldstudien (Menzel, 1997; Schlegel et al., 1998) und wird vergleichsweise detailliert vorgenommen. So wird die betrachtete Vegetationsdecke in mehrere Schichten unterteilt, auf die das Niederschlagswasser entsprechend der Blattflächenverteilung innerhalb des Bestandes ungleich aufgeteilt wird. Das so zwischengespeicherte Wasser verdunstet anschließend von jeder Schicht mit unterschiedlicher Intensität, wobei hier vor allem die bestandesinnere Variation der meteorologischen Einflußgrößen eine Rolle spielt. Die Berechnung der Interzeptionsverdunstung ist detailliert in Menzel (1997) beschrieben.

Ein großer Teil der Schweizer Alpen wird von unbewachsenen Blockhalden, Hangschutt und Felsflächen eingenommen. Die Interzeptionscharakteristika dieser und einer Reihe weiterer Landbedeckungen werden im entsprechenden Teilmodell ebenfalls berücksichtigt. Nicht mit Vegetation bestandene Landoberflächen, z. B. Felsen, weisen nur Interzeptionsverdunstung sowie Schnee-Evaporation (Sublimation) auf.

- Während Zeitintervallen mit langsam abtrocknenden Pflanzenoberflächen ist eine zeitgleiche Simulation von Interzeptionsverdunstung und Transpiration im Modell vorgesehen (Menzel, 1997).

Das Teilmodell zur Berechnung der Transpiration basiert auf der Penman-Monteith-Beziehung. Für die erforderliche Bereitstellung von Bestandeswiderständen wird auf den Ansatz von Menzel (1996) zurückgegriffen, der anhand umfangreicher Feldexperimente

entwickelt wurde. Die Bereitschaft der Pflanzen, über die Stomata-Öffnungen aktiv die Transpiration zu kontrollieren, wird über den aktuellen Entwicklungszustand der Pflanzen (LAI-Entwicklung), das Bodenfeuchtedefizit und die Lufttemperatur berücksichtigt. Die Evaporation von schneebedeckten Oberflächen (Sublimation) sowie aus Seen wird ebenfalls über den Penman-Monteith-Ansatz berechnet. Dabei spielen neben dem Energieangebot und der dazugehörigen Albedo-Formulierung die aerodynamischen Eigenschaften der Oberfläche eine wichtige Rolle. Diese werden über zeitlich invariante Rauheitslängen im Modell parametrisiert.

- Im Boden-Teilmodell wird das für die Pflanzen und damit für die Transpiration nutzbare Bodenwasser-Angebot berechnet. Die aus der digitalen Bodeneignungskarte vorliegenden Informationen werden dazu verwendet, Angaben zur nutzbaren Feldkapazität bereitzustellen. Die Auffüllung des Bodenfeuchtespeichers erfolgt durch die modellierten Schmelzwasserraten bzw. den Nettoniederschlag (Freilandniederschlag abzüglich Interzeption). Bei hohen Niederschlagsmengen, oder wenn der Bodenwassergehalt bereits Feldkapazität überschritten hat, kann schnelle Tiefenversickerung über bevorzugte Abflußwege (Makroporen) auftreten. In Abhängigkeit des aus der digitalen Bodeneignungskarte entnommenen und nachfolgend parametrisierten „Wasserspeichervermögens“ wird die Wasserleitfähigkeit zur Beschreibung der Perkolationsgeschwindigkeit im Boden festgesetzt. Kapillarer Aufstieg ist in der derzeit verwendeten Version des Bodenmodells noch nicht berücksichtigt. Ein Beispiel zur Bodenfeuchteberechnung ist in der Abbildung 4 gegeben.

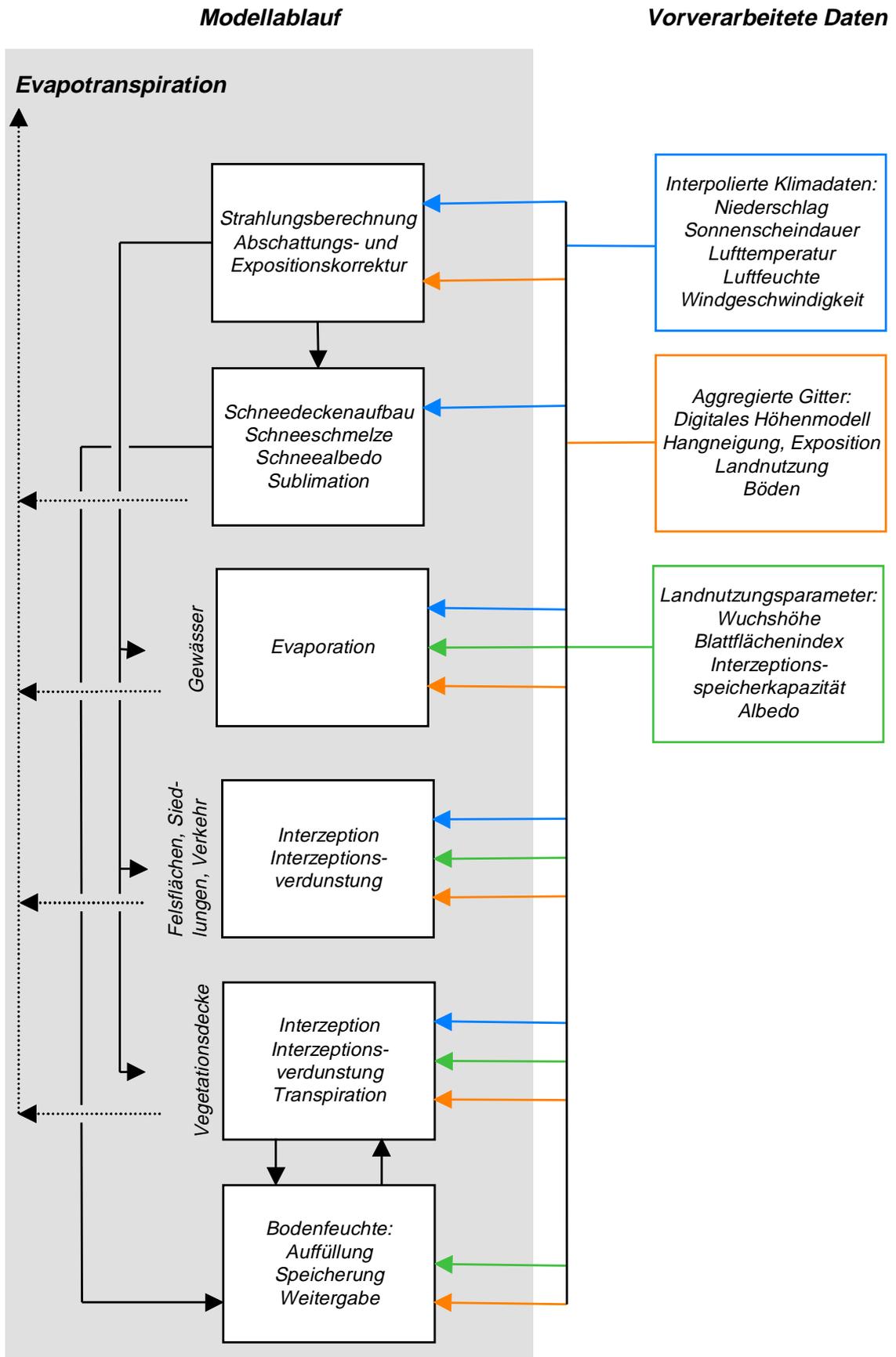


ABBILDUNG 3: Schema zum Aufbau des Verdunstungsmodells TRAIN mit den wichtigsten Datenflüssen und Verknüpfungen zwischen den Teilmodellen.

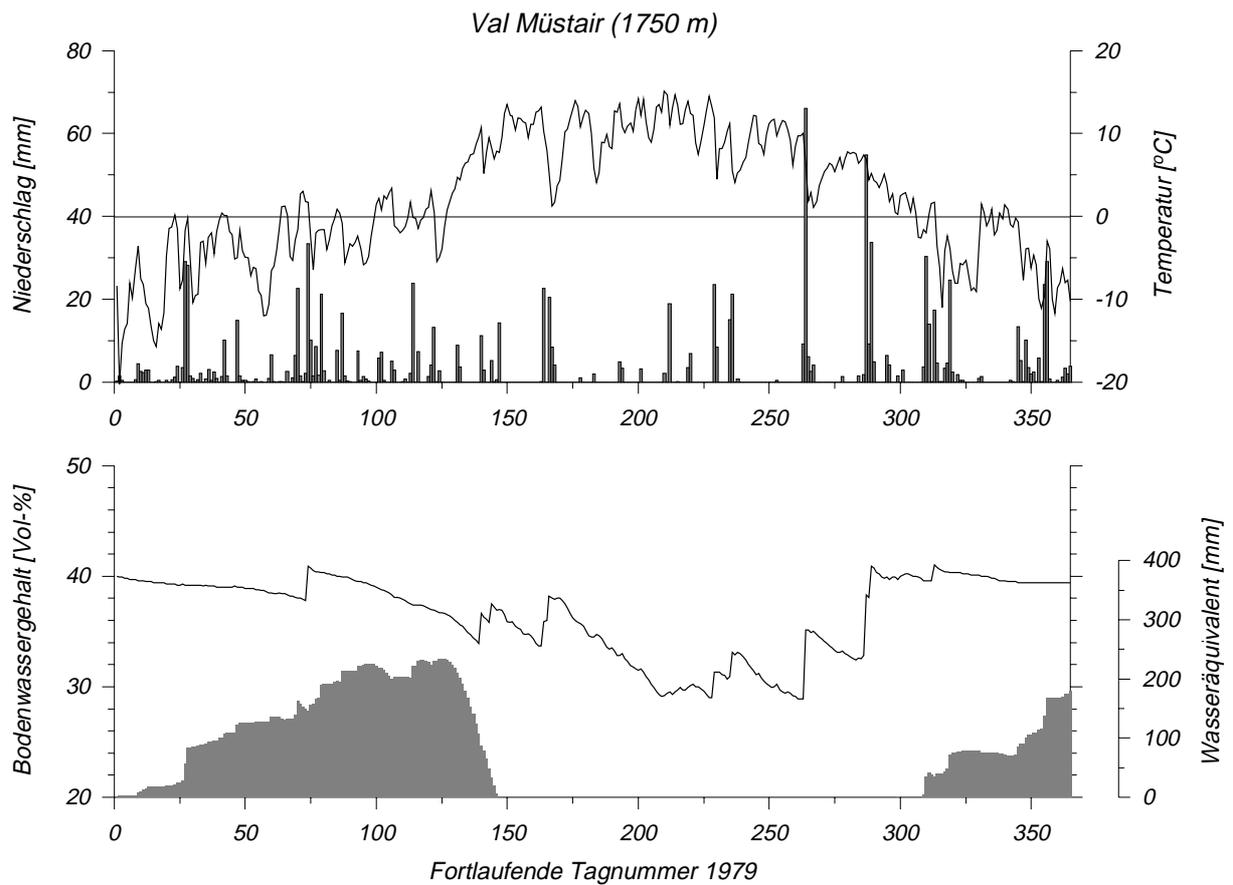


ABBILDUNG 4: Beispiel für die Funktionsweise einiger der im Text erwähnter Teilmodelle. In der oberen Teilgraphik sind interpolierte Tageswerte des Niederschlages (Säulen) und der Temperatur (Kurve) aufgetragen. Die untere Teilgraphik zeigt modellierte Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehaltes (Kurve) sowie des Wasseräquivalents der Schneedecke (graue Flächen). Die Daten beziehen sich auf eine im Val Müstair (Graubünden) in 1750 Metern Höhe gelegene Fläche (siehe auch Abbildung 8) und geben die Verhältnisse des Jahres 1979 wieder.

### 3 Ergebnisse

Die Isolinienkarte gibt die Jahresmittel der aktuellen Verdunstung der 20-jährigen Referenzperiode wieder. Ein Ausschnitt der gesamtschweizerischen Karte ist in Abbildung 5 für Graubünden wiedergegeben. Auf den ersten Blick fällt die Höhenabhängigkeit der Verdunstung auf, mit hohen Werten im Rheintal und den alpinen Tallagen und einer deutlichen Abnahme der Verdunstung mit der Meereshöhe in den Bergregionen. Dies ist bei zunehmender Höhe vor allem auf längerandauernde Schneebedeckung sowie allgemein tiefere Temperaturen zurückzuführen, welche die eigentlich verdunstungsfördernde Zunahme der Globalstrahlung überkompensieren. Hinzu kommen die im Gebirge häufig flachgründigen Böden mit ihrem geringen Wasserspeichervermögen sowie die zum Teil spärliche Vegetationsbedeckung mit kürzeren Wachstumsphasen. Ein Großteil der Flächen in den Alpen ist vegetationsfrei und die Verdunstung von Fels- und Eisflächen ist ebenfalls niedrig. Vergletscherte Gebiete größerer Ausdehnung, z.B. im Berninagebiet, sind auf der Isolinienkarte gut als äußerst verdunstungsarme Flächen zu erkennen. Auf der gesamtschweizerischen Darstellung (Menzel et al., 1999) treten auch die von Siedlungen, Industrie oder Verkehr beanspruchten Flächen durch niedrige Verdunstungswerte hervor. Einige Höhenzüge des Mittellandes fallen demgegenüber als verdunstungsreiche Gebiete auf. Hier macht sich die hohe Verdunstung waldbestandener Flächen bemerkbar. Das Tessin und Lagen um den Genfer See treten als klimatische Gunstregionen auch bei der Verdunstung deutlich hervor. Mit Abstand die höchsten Beträge in der Schweiz erreicht jedoch 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 der Abbildung 6 augenfällig, welche der Isoliniendarstellung als Vorlage diente. In dieser sind die mittleren Jahresverdunstungshöhen jeder Gitterzelle dargestellt.

Kleinräumige Variationen der Verdunstung, wie sie in der Abbildung 6 z.B. im Mittelland zutage treten, sind in der Isolinienkarte aufgrund der erwünschten Generalisierung nicht dargestellt. Sie ergeben sich u.a. durch räumlich häufig wechselnde Landnutzungen. Im Mittelland ist dabei besonders der Wechsel zwischen forst- und landwirtschaftlich genutzten Flächen zu nennen. Dichter besiedelte Regionen, z.B. um den Genfer- oder Zürichsee, weisen häufig Zellen mit der niedrigen Verdunstung bebauter Flächen auf. Ein ähnlich differenziertes Bild zeigt sich auch im Tessin, wo die recht uneinheitliche, aber allgemein hohe Verdunstung in den Tälern im Kontrast zu den niedrigen Verdunstungswerten der umliegenden Bergregionen steht. Demgegenüber fällt z.B. im überwiegend waldbestandenen Jura oder in den Tälern des Engadin die räumlich einheitliche Verdunstung auf. Bemerkenswert ist auch die hohe Verdunstung von Seeflächen.

Aus der Zusammenfassung sämtlicher Gitterzellen mit gleicher Landnutzung in der Schweiz kann die mittlere flächenspezifische Verdunstung ermittelt werden. In der Tabelle 2 sind diesbezügliche Angaben für die wichtigsten Landbedeckungen aufgeführt. Für Wald und Landwirtschaft werden neben Daten zur mittleren Gesamtverdunstung auch die mittleren Verdunstungshöhen von je zwei Höhenstufen wiedergegeben.

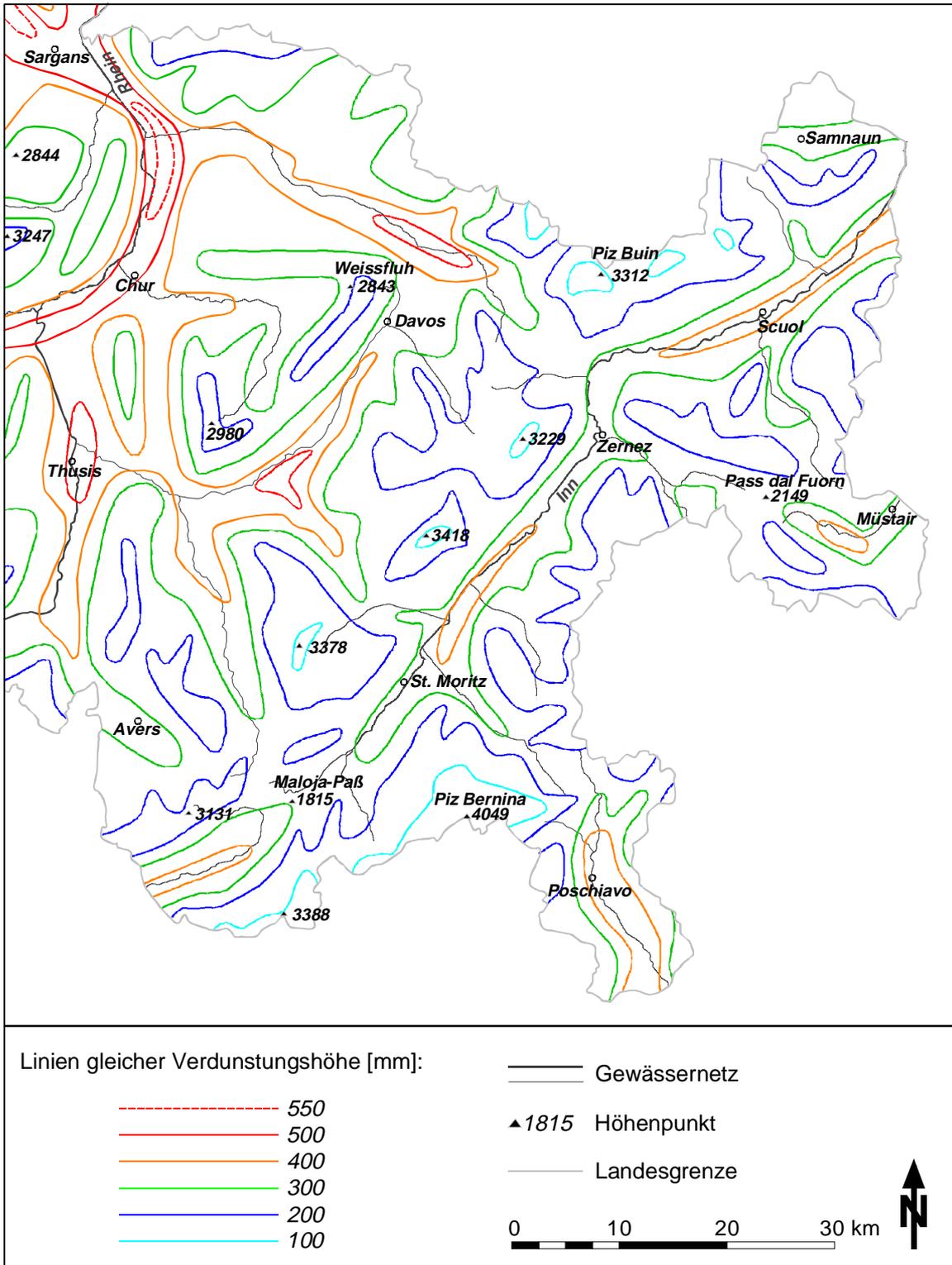


ABBILDUNG 5: Isoliniendarstellung mittlerer jährlicher Verdunstungshöhen (1973–1992) in Graubünden. Ausschnitt aus der für die gesamte Schweiz vorliegenden Karte.

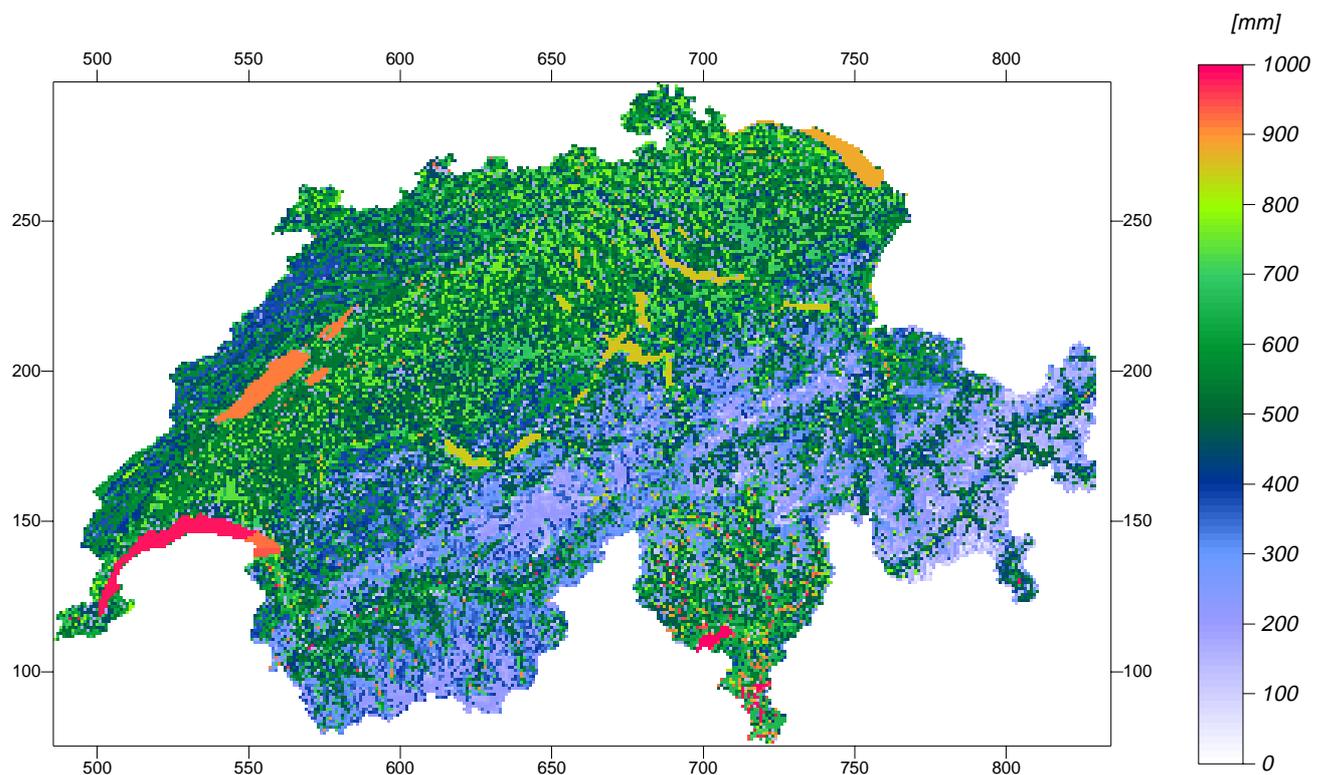


ABBILDUNG 6: Mittlere Jahresverdunstung des Zeitraumes 1973–1992 in der Schweiz (Pixeldarstellung). Die räumliche Auflösung beträgt einen Quadratkilometer. Die Achsenbeschriftung entspricht dem schweizerischen Koordinatensystem in Kilometern.

TABELLE 2: Mittlere jährliche Verdunstung in der Schweiz, getrennt nach den wichtigsten Landbedeckungs-Klassen. Für Wald und Landwirtschaft sind zusätzlich die Mittelwerte für einzelne Höhenstufen angegeben.

| <i>Nutzungs-kategorie</i>       | <i>Mittlere Verdunstung [mm]</i> |
|---------------------------------|----------------------------------|
| Wald (alle Höhen)               | 616                              |
| (600 m)                         | 712                              |
| (1800 m)                        | 523                              |
| Landwirtschaft (alle Höhen)     | 436                              |
| (600 m)                         | 537                              |
| (1800 m)                        | 334                              |
| Siedlung und Industrie          | 434                              |
| Verkehrsflächen                 | 199                              |
| Gewässer                        | 901                              |
| Felsflächen                     | 234                              |
| Eis- und Firnflächen            | 156                              |
| <b>Gesamtfläche der Schweiz</b> | <b>484</b>                       |

Werden die Verdunstungswerte der gesamten bearbeiteten Fläche (alle Landnutzungen und Höhen) zusammengekommen, kann die mittlere Jahresverdunstung in der Schweiz berechnet werden. Für den 20-jährigen Zeitraum 1973–1992 beläuft sich diese auf 484 mm.

Die in den vorangegangenen Darstellungen sowie in der Tabelle 2 bereits angedeutete Höhenabhängigkeit der Verdunstung ist in der Abbildung 7 in Form kontinuierlicher Höhenprofile wiedergegeben. Hierzu wird die Schweiz in einzelne Höhenstufen untergliedert und diesen das Verdunstungsmittel aller Gitterzellen des jeweiligen Höhenbereiches zugewiesen.

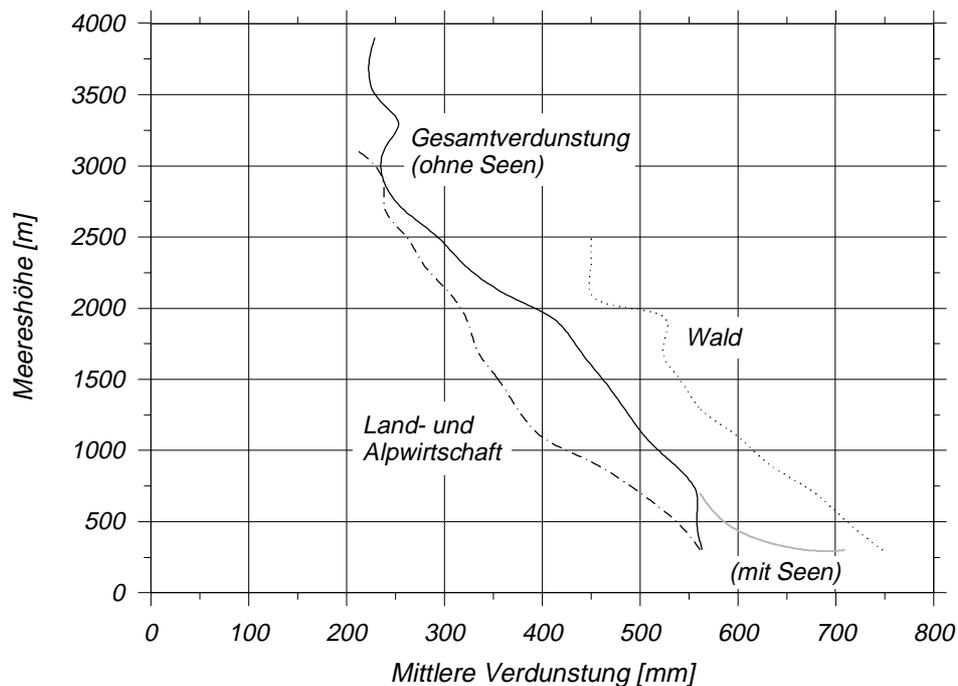


ABBILDUNG 7: Höhenprofile der mittleren Verdunstung in der Schweiz. Die durchgezogene schwarze bzw. graue Linie repräsentieren die Höhenabhängigkeit der Verdunstung für alle Landbedeckungsklassen (ohne bzw. mit Seen).

Die in der Abbildung 7 aufgetragene Höhenabhängigkeit der Gesamtverdunstung (alle Nutzungsklassen; durchgezogene Linie) zeigt im unteren Höhenbereich bis ca. 700 m ü. M. die Maximalwerte der mittleren Jahresverdunstung bei etwa 560 mm an. Werden die Seen mit ihrer allgemein hohen Verdunstung hinzugenommen (graue Zusatzlinie) so resultiert eine mittlere Jahresverdunstung von über 700 mm in den untersten Höhenbereichen. Aufgrund des mit zunehmender Höhe stetig geringer werdenden Flächenanteils der Seen nimmt die durch die graue Linie repräsentierte Verdunstung schnell mit der Höhe ab und entspricht oberhalb etwa 700 m ü. M. der Gesamtverdunstung ohne Berücksichtigung der Seen. Bis etwa 3000 m ü. M. nimmt die Verdunstung dann stetig bis auf einen mittleren Jahreswert von ca. 230 mm ab. Darüber ist keine eindeutige Höhenabhängigkeit der Verdunstung mehr zu erkennen, was u.a. auf die relativ geringe Zahl von Stützwerten in diesen Höhenklassen zu erklären ist. Die in der Abbildung 7 für die beiden Haupt-Nutzungsklassen Wald bzw. Landwirtschaft wiedergegebenen Höhenabhängigkeiten entsprechen in ihrem allgemeinen Verlauf etwa der Linie der mittleren Gesamtverdunstung in der Schweiz, die absoluten Verdunstungsbeträge

sind jedoch wesentlich verschieden. Bemerkenswert ist die hohe Verdunstung von Wald, die überwiegend auf die hohen Werte der Interzeptionsverdunstung zurückzuführen ist. Die bereits in 2500 m ü.M. endende Höhenbeziehung bei Wald ist durch die Lage der Waldgrenze bedingt; für Landwirtschaft liegen Daten bis in eine Höhe von ca. 3100 m ü. M. vor.

Interessant ist auch die räumliche Variation der Verdunstung über zwei Profile, welche Wallis im Südwesten, Berner Oberland, Mittelland, Jura und Ajoie im Nordwesten bzw. Jungfrau-region im Westen, Greina, Hinterrhein- und Landwassertal sowie Engadin im Osten miteinander verbinden (Abbildung 8).

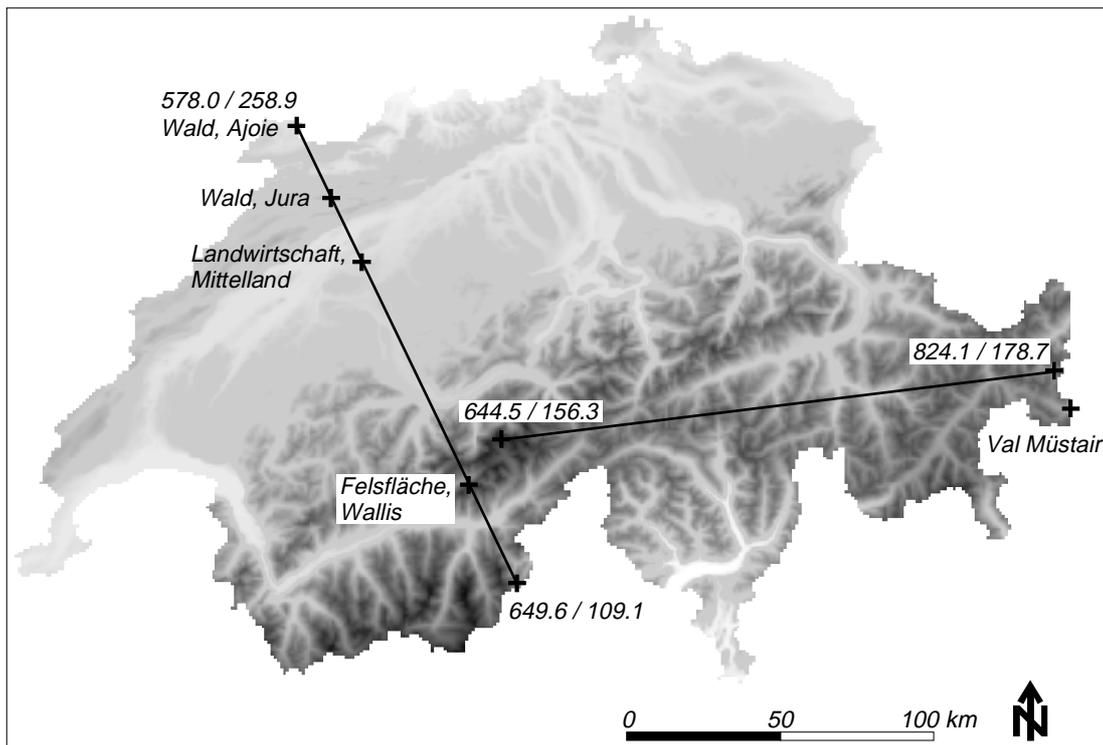


ABBILDUNG 8: Lage der durch die Schweiz gezogenen Profile mit den entsprechenden Anfangs- und Endkoordinaten. Die Markierungen auf dem linken Profil geben die räumliche Verteilung der in Abbildung 11 behandelten Beispielflächen wieder. Die Kennzeichnung der Einzelfläche (Val Müstair) bezieht sich auf die Darstellung der Abbildung 4.

In der Abbildung 9 ist entlang dem etwa 150 km langen Profil Wallis–Ajoie der Höhenverlauf überhöht als durchgezogene Linie wiedergegeben. Die parallel dazu aufgetragenen Säulen repräsentieren die mittleren Jahresverdunstungshöhen der einzelnen, von der Profillinie gequerten Gitterflächen. Neben der Abhängigkeit von der Meereshöhe werden die Variationen der Verdunstung auch durch den Einfluß der verschiedenen Landbedeckungen sowie durch unterschiedliche Expositionen und Bodeneigenschaften bestimmt. Am augenfälligsten wird dies an der nordwestlichen Flanke der Alpen. Der hohen Verdunstung aus dem Thuner See stehen die geringen, zum Teil unter 200 mm pro Jahr liegenden Verdunstungsbeträge im stark vergletscherten Gebiet der Berner Alpen gegenüber – in lediglich etwa 25 Kilometern Horizontaldistanz zum Thuner See.

Der Rückgang der Verdunstung im Jura ist nicht nur höhenbedingt, zumal dieses Gebiet überwiegend von Wald mit seiner üblicherweise hohen Verdunstung bestanden ist. Im Jura machen sich die vergleichsweise ungünstigen Bodeneigenschaften, wie geringe Bodentiefen und schlechtes Wasserspeichervermögen bemerkbar, welche die Transpiration einschränken. Die waldbestandenen Flächen der Ajoie erreichen wiederum hohe Verdunstungswerte, da die Böden sowie die klimatischen Bedingungen der Transpiration optimale Voraussetzungen bieten.

Entsprechend der Darstellung in Abbildung 9 sind in der Abbildung 10 Variationen der mittleren Jahresverdunstung entlang dem Profil Jungfrau–Engadin wiedergegeben. Die Querung der Alpen in östlicher Richtung wird nur von wenigen Haupttälern unterbrochen und somit überwiegen Gebiete mit relativer Verdunstungsarmut. Hier treten insbesondere die vergletscherten Flächen in der Jungfrauregion, um den Piz Medel sowie im Bereich der Keschgruppe in Erscheinung, die mittlere Jahreswerte der Verdunstung von unter 200 mm bzw. sogar unter 100 mm aufweisen.

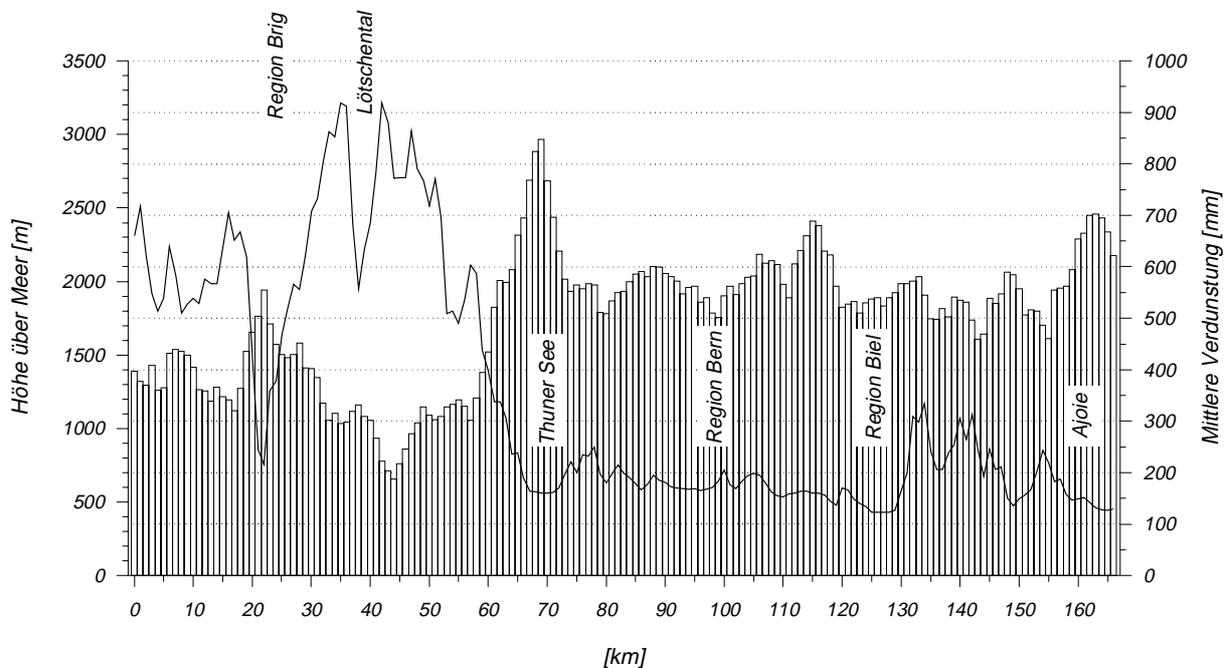


ABBILDUNG 9: Höhen- (durchgezogene Linie) und Verdunstungsprofil (Säulen) entlang der Linie Wallis-Jura-Ajoie. Die Verdunstungshöhen sind als Mittelwerte des Zeitraumes 1973–1992 angegeben.

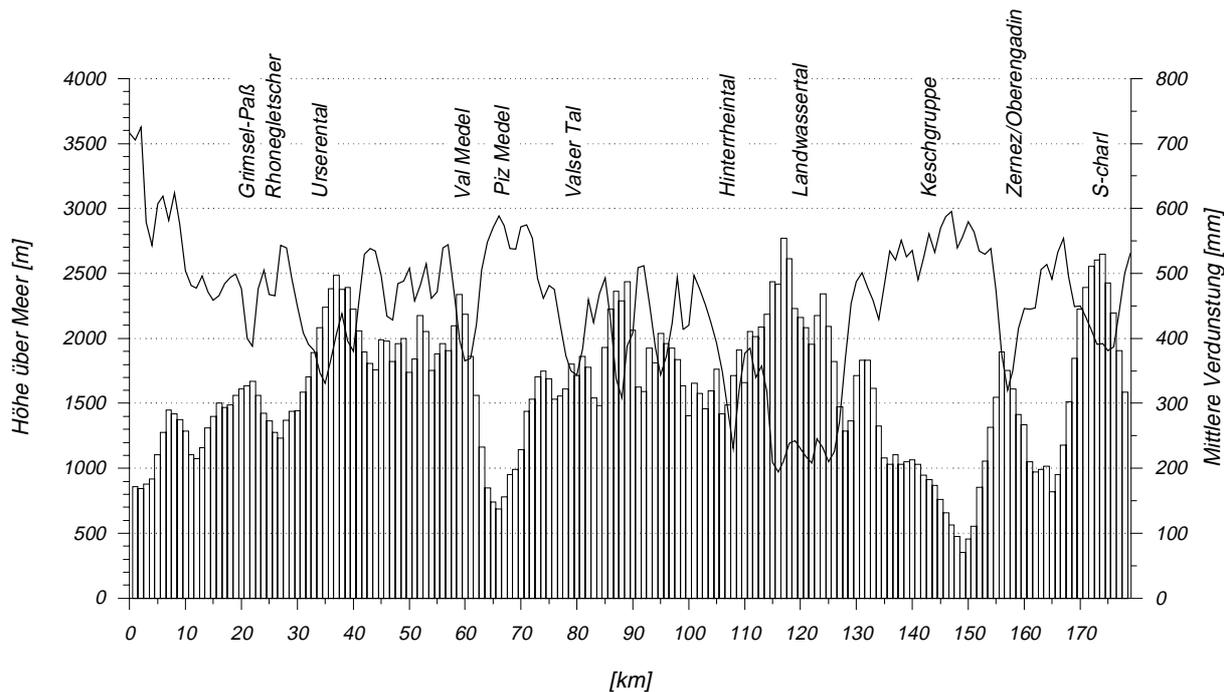


ABBILDUNG 10: : Höhen- (durchgezogene Linie) und Verdunstungsprofil (Säulen) entlang der Linie Jungfrau-Engadin. Die Verdunstungshöhen sind als Mittelwerte des Zeitraumes 1973–1992 angegeben.

In der Abbildung 8 sind auf der Profillinie Wallis–Ajoie vier Flächen mit unterschiedlichen Landbedeckungen markiert. Die mittleren Verläufe täglicher Verdunstungshöhen dieser Flächen sind in der Abbildung 11 über das Jahr hinweg dargestellt. Die Felsfläche in den Walliser Alpen weist einen überdurchschnittlich hohen Jahreswert der Schnee- bzw. Interzeptionsverdunstung auf (vgl. Tabelle 2). Das dürfte an den relativ hohen Beträgen der Evaporation während Zeiten mit Schneebedeckung liegen. Die hohen Werte der Interzeptionsverdunstung während des kurzen Sommers deuten häufige Wechsel zwischen Befeuchtungsphasen (Regen) und nachfolgender Abtrocknung an.

Die landwirtschaftlich genutzte Fläche im Mittelland (zweite Teilgrafik in der oberen Bildreihe der Abbildung 11) zeigt einen für diesen Landnutzungstyp charakteristischen Jahresverlauf der Verdunstung. Hervorzuheben ist dabei, daß während der Wintermonate praktisch keine Verdunstung auftritt. Dagegen steigen die Tageswerte während der Hauptwachstumsphase in den Monaten April/Mai stark an und fallen zum Herbst hin flach ab. Die Verdunstung von der waldbestandenen Fläche im Jura weist deutlich auf die im Sommer eingeschränkte Transpiration hin (Begründung siehe weiter oben). Das geringe Jahresmittel der Verdunstung liegt weit unter dem Jahresdurchschnitt der Waldverdunstung für diese Höhenlage (Tabelle 2). Dagegen gehören die knapp 780 mm mittlerer Jahresverdunstung von der in der Ajoie gelegenen Waldfläche zu den höchsten simulierten Werten der Waldverdunstung in der Schweiz. Im Vergleich zur landwirtschaftlich genutzten Fläche fällt auch der weniger ausgeprägte Jahresgang der Verdunstung auf, wozu die nicht unbedeutende Interzeptionsverdunstung von Wäldern während der Winterzeit beiträgt.

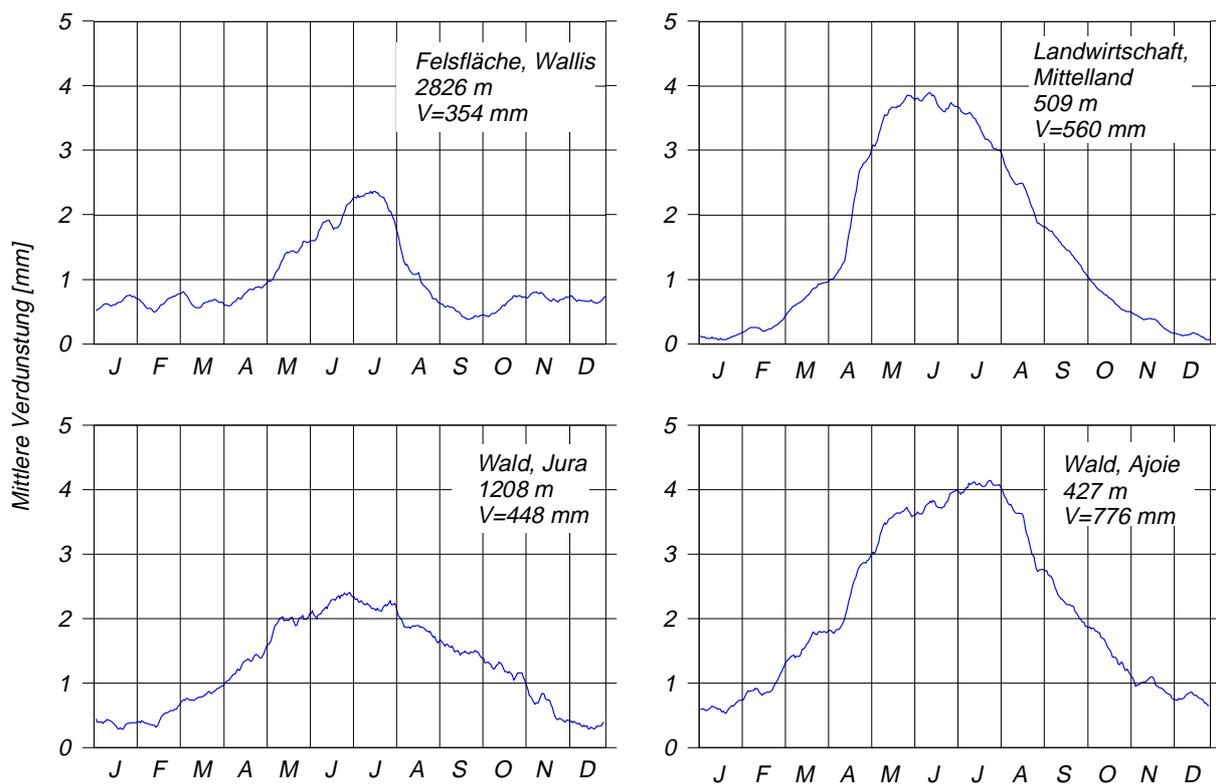


ABBILDUNG 11: Mittlere Jahressgänge täglicher Verdunstungswerte für vier verschiedene Flächen auf dem Profil Wallis-Jura-Ajoie (siehe auch Abbildung 8). Die in den jeweiligen Legenden angegebenen Werte bezeichnen die Höhe über dem Meer sowie die mittlere Jahressumme der Verdunstung.

Die in der Abbildung 11 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 werden die in allen Landesteilen großflächig vorhandenen Waldgebiete exemplarisch untersucht. Um Vergleichsmöglichkeiten zwischen den einzelnen Regionen zu schaffen, bezieht sich die Untersuchung einheitlich auf die Höhenzone von 800–1000 m ü.M. In der Abbildung 12 sind die Ergebnisse in Form mittlerer Jahressgänge 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/Waadtland auf. Dagegen ist die Verdunstung – insbesondere die Transpiration – der Waldflächen im Jura und Tessin während des Sommers eingeschränkt, was wiederum einen Hinweis auf die vergleichsweise ungünstigen Bodenverhältnisse gibt. Obgleich der mittlere Jahreswert im Tessin über dem entsprechenden Wert des Schweizer Jura liegt, fällt die im Tessin noch weiter eingeschränkte, sommerliche Transpiration auf. Im Winterhalbjahr ist die Waldverdunstung im Tessin dagegen relativ hoch, hier spielen offensichtlich die günstigen klimatischen Bedingungen die Hauptrolle.

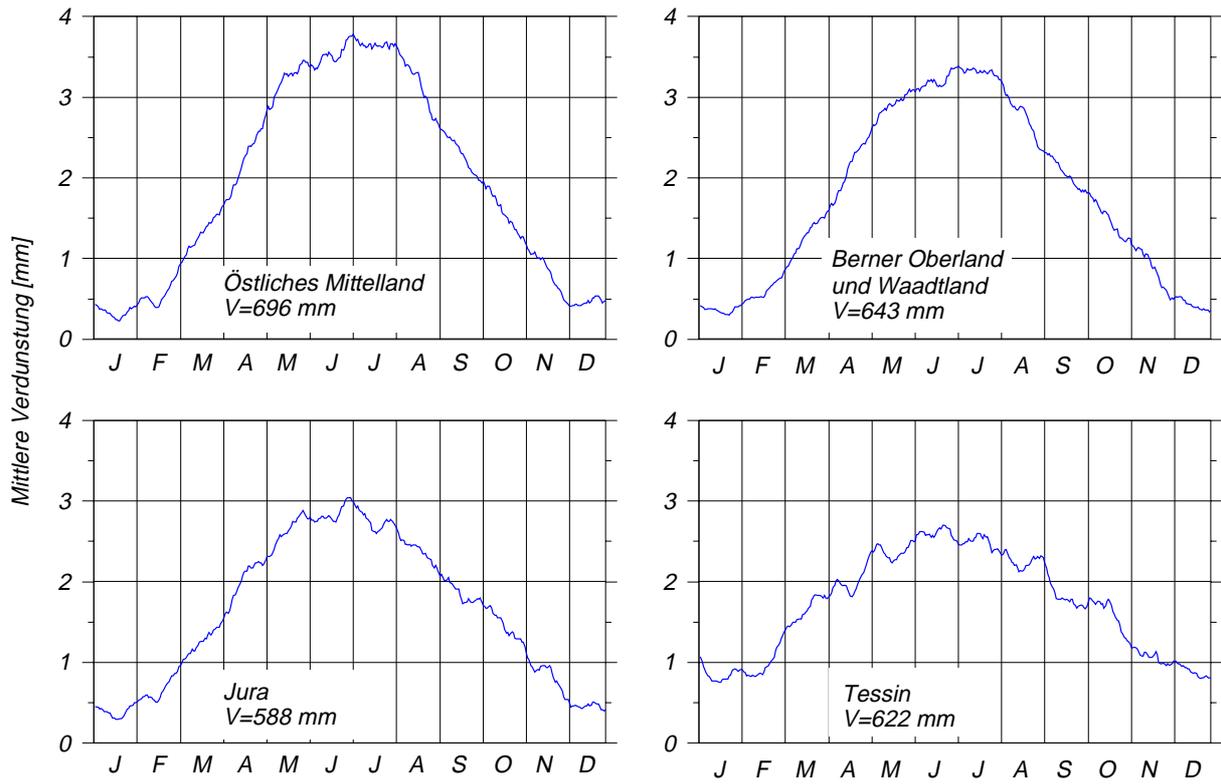


ABBILDUNG 12: Mittlere Jahresgänge täglicher Verdunstungshöhen von Wald, bezogen auf den Höhenbereich von 800–1000 m ü. M. Gegenüberstellung von vier Regionen der Schweiz.

## 4 Diskussion

Die Grundlagen zu dem hier beschriebenen Verfahren der Flächenmodellierung der Verdunstung wurden anhand von Punktstudien erarbeitet. Die Anwendung des in diesem Rahmen entwickelten, physikalisch basierten Verdunstungsansatzes auf größere Flächeneinheiten erforderte zunächst die Angliederung weiterer Teilmodelle zur Beschreibung wichtiger Wasser- und Energieflüsse, die den Verdunstungsvorgang beeinflussen. Beim Skalenübergang vom Punkt auf die Fläche waren Vereinfachungen in der Modellstruktur unvermeidlich. Diese ergaben sich einerseits aus den Rechnerressourcen, die bei der Bearbeitung des makroskaligen Auswertgebietes über einen langen Zeitraum begrenzt sind, zum anderen aus der Verfügbarkeit der benötigten Eingabeparameter. Hier soll vor allem auf die unbefriedigende Datensituation bei den Böden hingewiesen werden, die Ableitungen bodenphysikalischer Parameter nur mit großen Unsicherheiten zuließ.

Grundannahme bei der Anwendung von TRAIN ist die zeitliche und räumliche Skalenunabhängigkeit bei der Verdunstungsmodellierung. Bei einem Auswertgebiet dieser Größenordnung treten jedoch Rückwirkungen, z.B. der Verdunstung auf die meteorologischen Randbedingungen auf, die hier nicht berücksichtigt werden können. Der räumlichen Differenzierung der modellierten Verdunstung sind durch die Größe der Flächenelemente von  $1 \text{ km}^2$  Grenzen gesetzt. Die Verteilung der Eingabeparameter innerhalb einer solchen Elementarfläche (Pixel) wurde in dem hier beschriebenen Anwendungsfall nicht berücksichtigt. So verblieb z.B. nach der Aggregation der Landnutzung auf die jeweilige Elementarfläche nur jeweils eine Landnutzungs-kategorie. Insbesondere die Pixelkarte sollte daher nicht zur Festlegung von Verdunstungshöhen sehr kleinräumiger Gebiete oder gar einzelner Elementarflächen verwendet werden. Die theoretisch beliebige Größenwahl der Elementarflächen in TRAIN erlaubt in solchen Fällen, die interessierenden Flächen separat und mit höherer räumlicher Auflösung zu modellieren.

Die Anwendung des Penman-Monteith-Ansatzes zur Berechnung der (aktuellen) Verdunstung ist in der hydrologischen Modellierung inzwischen zu einem akzeptierten Standard geworden. Auf Nachteile dieser Methode wurde z.B. in Menzel (1997) hingewiesen, weshalb in TRAIN eine Kombination des Penman-Monteith-Ansatzes mit einem eigenständigen Interzeptionsmodell verwendet wird. Dennoch verbleiben Unsicherheiten, die sich aus der physikalischen Grundlage der Methode ergeben und z.B. bei der Modellierung nicht vollständig von Vegetation eingenommener Flächen auftreten. Auch die Berücksichtigung pflanzenphysiologischer Reaktionen über die Formulierung des Bestandeswiderstandes ist sowohl in TRAIN als auch in anderen hydrologischen Modellen verbesserungswürdig.

Die Anwendung des Penman-Monteith-Ansatzes zur Berechnung der Sublimation über Schneeflächen sowie der Modellierung der Seenverdunstung ist als Provisorium zu betrachten. Insbesondere bei der Seenverdunstung bestehen Unsicherheiten, die sich aus der Wahl des Verfahrens ergeben, in das lediglich das Energieangebot, nicht aber Wasseroberflächentemperaturen eingehen. Auch stellt die Formulierung unveränderlicher Rauigkeitslängen über Eis-, Schnee- und Wasserflächen eine unbefriedigende Lösung dar. Entsprechende Daten aus Feldstudien stehen nicht zur Verfügung oder sind unbrauchbar.

Trotz der hier notwendigerweise aufgezählten Unzulänglichkeiten stehen mit den Arbeiten zur Modellierung der Verdunstung in der Schweiz Daten mit bisher noch nicht gekanntem Informationsgehalt zur Verfügung. Die Berücksichtigung einer Vielzahl von Einflußfaktoren, die Aufteilung der Verdunstung in ihre Einzelkomponenten und deren getrennte Modellierung sowie der Auswertzeitraum mit Berechnungsschritten in täglicher Auflösung ermöglichen, die Verdunstung und ihre naturräumlichen Voraussetzungen äußerst detailliert zu analysieren. Abschließend sei auf den Vergleich des in dieser Arbeit erhaltenen Flächenmittelwertes der Verdunstung (1973–1992) von 484 mm mit dem Ergebnis einer Wasserbilanzrechnung hingewiesen. Schädler (1985) errechnete aus der Bilanzierung sämtlicher Wasserhaushaltskomponenten in der Schweiz eine mittlere Jahresverdunstung für den Zeitraum 1901–1980 von ebenfalls 484 mm.

## 5 Literatur

- Baumgartner, A.; Reichel, E.; Weber, G. (1983): *Der Wasserhaushalt der Alpen*. Oldenbourg, München und Wien.
- Hofmann, P.; Menzel, L.; Lang, H.; Konzelmann, T.; Plüss, Ch.; Schroff, K. (1998): Bodenfeuchteuntersuchungen im hochalpinen Raum. *Berichte und Skripten, Nr. 64*. Geographisches Institut ETH, Zürich.
- Konzelmann, T.; Calanca, P.; Müller, G.; Menzel, L.; Lang, H. (1997): Energy Balance and Evapotranspiration in a High Mountain Area During Summer. *J. Appl. Meteorol.*, 36, S. 966–973.
- Menzel, L. (1996): Modelling Canopy Resistances and Transpiration of Grassland. *Phys. Chem. Earth*, Vol. 21, S. 123–129.
- Menzel, L. (1997): Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. *Zürcher Geographische Schriften, Nr. 67*. Geographisches Institut ETH, Zürich.
- Menzel, L.; Rohmann, M.; Lang, H. (1997): Eine Verdunstungskarte für das Schweizer Mittelland. *Wasser, Energie, Luft*, 11/12, S. 273–277.
- Menzel, L.; Lang, H.; Rohmann, M. (1999): Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973–1992. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 4.1, Bern.
- Monteith, J. L. (1965): Evaporation and Environment. In: G. Fogg (Hrsg.), *The State and Movement of Water in Living Organisms, Sympos. Soc. Exper. Biol.*, Heft 19, S. 205–234. Society for Experimental Biology.
- Oke, T.R. (1987): *Boundary Layer Climates*. Methuen, London und New York.
- Plüss, Ch. (1997): The Energy Balance Over an Alpine Snowcover. *Zürcher Geographische Schriften, Nr. 65*. Geographisches Institut ETH, Zürich.
- Rohmann, M. und Menzel, L. (1999): Räumliche Interpolation von Niederschlag, Lufttemperatur und Verdunstung. Grundlagen und Methoden. *Berichte und Skripten, Nr. 67*. Geographisches Institut ETH, Zürich.
- Schädler, B. (1985): Der Wasserhaushalt der Schweiz. *Mitteilung Nr. 6 der Landeshydrologie*. Bundesamt für Umweltschutz, Bern.
- Schlegel, T.; Menzel, L.; Lang, H.; Konzelmann, T.; Plüss, Ch.; Schroff, K. (1998): Interzeptionsverdunstung im hochalpinen Raum. *Berichte und Skripten, Nr. 62*. Geographisches Institut ETH, Zürich.
- Schulla, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flußgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. *Zürcher Geographische Schriften, Nr. 69*. Geographisches Institut ETH, Zürich.
- Zraggen, L.: Temperaturverhältnisse in der Schweiz in Abhängigkeit von der Strahlungsbilanz. Dissertation am Geographischen Institut der ETH Zürich (in Vorbereitung).