

Zur standörtlichen und räumlich differenzierten Simulation des Wasserhaushaltes entstand das hydrologische Modell TRAIN¹, das Erkenntnisse ausgedehnter Feldstudien zur Verdunstung und zum Bodenwasserhaushalt beinhaltet. Bei der Modellierung der Verdunstung werden in TRAIN zunächst deren verschiedene Einzelkomponenten separat berechnet und in einem zweiten Schritt zur aktuellen Evapotranspiration kombiniert (Abbildung 1). Bei der regionalen Betrachtung der Verdunstung bzw. des Wasserhaushaltes gehen gebietspezifische Merkmale (Topographie, Landnutzung, Böden) und wechselnde meteorologische Bedingungen in das Berechnungsschema ein. Folgende für den Verdunstungsprozess bzw. den Wasserhaushalt bedeutende Komponenten werden berücksichtigt:

- Die am jeweiligen Standort bzw. der Gitterzelle zur Verfügung stehende Energie unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einstrahlungs- und Abschattungsbedingungen (OKE 1987) sowie der Albedo der Erdoberfläche
- Die aerodynamische Rauigkeit der Erdoberfläche und die Neigung der atmosphärischen Grenzschicht zum turbulenten Austausch von Wasserdampf (THOM und OLIVER 1977)
- Der temperaturabhängige Übergang von flüssigem in festen Niederschlag und die von der Niederschlagsform abhängige Niederschlagskorrektur
- Schneedeckenaufbau, Schneeschmelze sowie Sublimation von Schnee- und Eisflächen (OHMURA 2001)
- Die landnutzungsabhängige, zeitlich dynamische Entwicklung der Vegetation
- Interzeption und Interzeptionsverdunstung (MENZEL 1997)
- Verdunstung von unbewachsenen Landoberflächen (modifiziert nach LEE und PIELKE, 1992)
- Transpiration nach Penman-Monteith (MONTEITH 1965) in Abhängigkeit des aktuellen Entwicklungszustandes der Vegetation, der Bodenfeuchte und der Witterungsbedingungen (MENZEL 1996)
- Aktuelle Wasserverfügbarkeit im Boden und Tiefensickerung / Grundwasserneubildung

Das Modell unterscheidet verschiedene Oberflächenformen, die neben vegetationsbestandenen Flächen (z.B. Wald, landwirtschaftlich genutzte Gebiete mit Unterscheidung mehrerer Fruchtarten) auch unbewachsene Areale (z.B. Felsen, Schnee- und Eisflächen, versiegelte Oberflächen) sowie stehende Gewässer einschließen. Komplexe Strukturen, wie z.B. Siedlungsflächen, werden durch die gleichzeitige Berücksichtigung verschiedener Oberflächentypen innerhalb einer Gitterzelle und deren flächenmäßigen Gewichtung im Modell abgebildet. Bei landwirtschaftlich genutzten Flächen kann zudem Bewässerung simuliert werden, wobei im Normalfall der Netto-Wasserbedarf ermittelt wird. Das ist jene Wassermenge, die zur Erzielung des optimalsten Ernteertrages führt, ohne Berücksichtigung von möglichen Wasserverlusten durch den Transport des Wassers zum Feld oder während des Bewässerungsvorgangs.

¹ Der Name leitet sich aus der in TRAIN besonders detailliert berücksichtigten Beschreibung von Transpiration und Interzeption ab

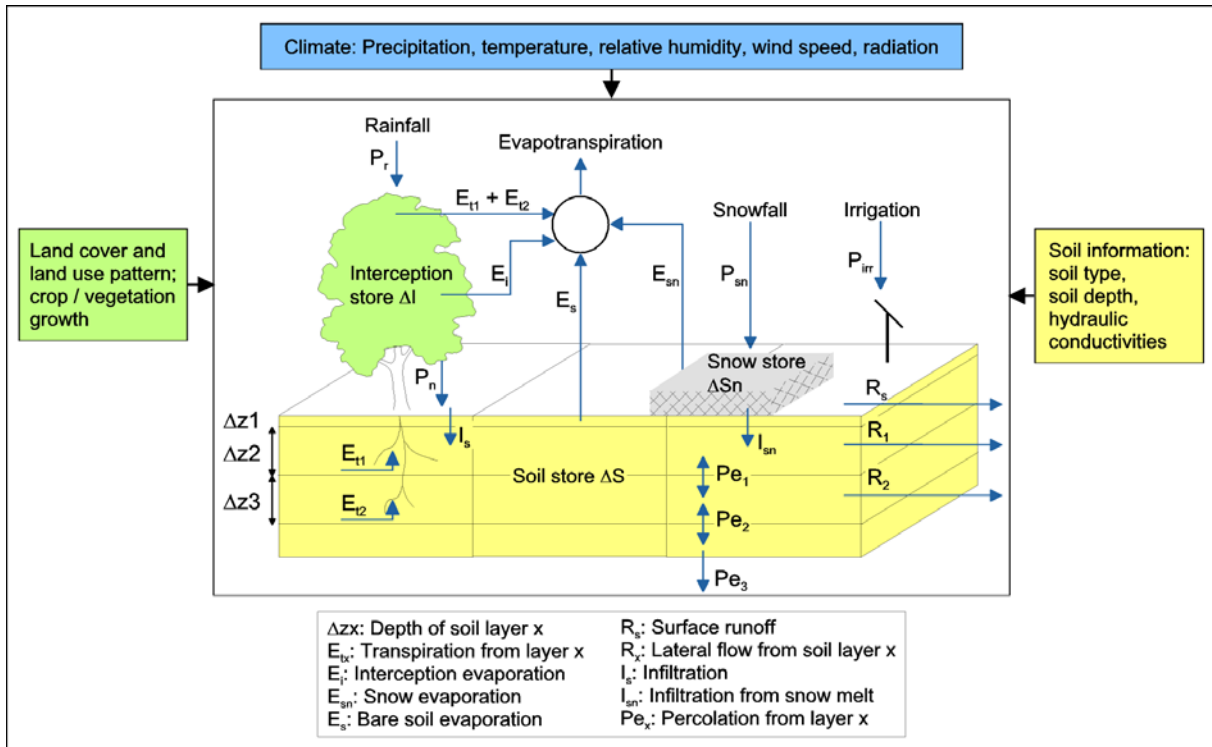


Abb. 1: Vereinfachtes Modellschema von TRAIN. Dargestellt sind die erforderlichen Modell-Eingangsdaten sowie die wesentlichen, vom Modell simulierten Prozesse

Die zur Wasserhaushalts-Simulation mit TRAIN notwendigen meteorologischen Daten entstammen üblicherweise dem amtlichen Messnetz der Wetterdienste, d.h. es sind keine zusätzlichen Messungen im Rahmen von Feldexperimenten erforderlich. Folgende Messgrößen gehen in die Berechnungen ein: Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und eine Strahlungsgröße (Global- bzw. Nettostrahlung), ersatzweise auch die Sonnenscheindauer. Bei der räumlich differenzierten Anwendung von TRAIN müssen die benötigten Modell-Eingangsdaten vorab auf digitalen Gitternetzen zur Verfügung stehen, d.h. das Modell beinhaltet keine Interpolationsalgorithmen. Neben den meteorologischen Daten benötigt die Flächenvariante von TRAIN ein digitales Höhenmodell und daraus abgeleitete Informationen zu Hangneigungen und Expositionen, Angaben zur Landbedeckung (z.B. CORINE Land Cover 2000) sowie eine digitale Bodenkarte. Erforderliche, bodenspezifische Informationen umfassen Angaben zur Gründigkeit bzw. Durchwurzelbarkeit der Böden, zur typischen Abfolge von Bodenhorizonten, zum Wasserspeichervermögen (mit den charakteristischen Kennwerten nutzbare Feldkapazität und Luftkapazität) sowie zur hydraulischen Leitfähigkeit der Böden. Liegen diese Informationen nicht vor, werden den unterschiedlichen Bodentypen häufig anzutreffende, typische Werte modellintern zugewiesen. In TRAIN benötigte Landnutzungs- und Vegetationsparameter wie Wuchs- bzw. Bestandeshöhen, effektive Durchwurzelungstiefen, Versiegelungsgrade, Daten zum Blattflächenindex und zur Albedo, werden auf Basis der Ausgangsinformation in der Landbedeckungs-Datei vom Modell festgesetzt, können bei Vorliegen entsprechender Erhebungen aber auch vom Modell eingelesen werden. Die jahreszeitliche Veränderung einiger Vegetationsparameter (phänologische Entwicklung) wird im Modell ansatzweise berücksichtigt, z.B. anhand der Temperatursumme im Verlauf eines Jahres.

Die Standortvariante von TRAIN dient der Bestimmung des Wasserhaushaltes einer räumlich begrenzten Untersuchungsfläche. Auf dieser Skala sind auch Modell-Zeitschritte von einer Stunde möglich, falls die erforderlichen meteorologischen Größen in dieser zeitlichen Auflösung vorliegen. Die

Standortvariante von TRAIN wird häufig zu Validierungszwecken eingesetzt, d.h. anhand präziser Messungen einzelner Wasserhaushaltskomponenten (z.B. Evapotranspiration, Interzeption, Bodenfeuchte, Schnee-Wasseräquivalente) in dafür besonders ausgestatteten Feld-Experimentalflächen oder in Lysimeterstationen wird die Güte der von TRAIN ausgegebenen Modellgrößen geprüft, und es werden gegebenenfalls Modellanpassungen (Kalibrierung) bzw. Weiterentwicklungen des Modells vorgenommen.

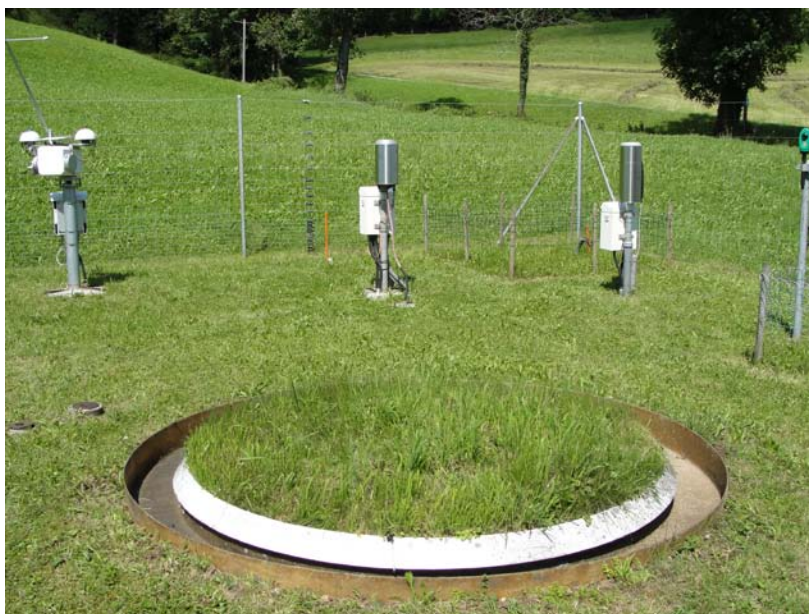


Abb. 2: Das Lysimeter im hydrologischen Forschungsgebiet Rietholzbach der ETH Zürich. Im Hintergrund Messeinrichtungen, u.a. zur Bestimmung des Niederschlages und der Strahlungskomponenten. Foto: L. Menzel

Ein Beispiel zur standörtlichen Anwendung von TRAIN kommt aus dem hydrologischen Forschungsgebiet Rietholzbach (Schweiz). Dieses kleine Einzugsgebiet liegt auf einer Meereshöhe zwischen 680 und ca. 900 Metern in der voralpinen Ostschweiz (Toggenburg). Charakteristisch sind insbesondere die hohen Jahresniederschlagssummen von im Mittel 1500 mm (MENZEL 1997) sowie die ausschließliche Weidewirtschaft. Auf einer Höhe von 755 m, im Zentrum des Einzugsgebietes gelegen, befindet sich eine Klimastation, welche über ein 3,1 m² großes Wägelysimeter verfügt (Abbildung 2). Dieses Lysimeter ist wie seine Umgebung von einer Mähwiese bestanden, die genauso bearbeitet wird wie die Wiesen in ihrer direkten und weiteren Umgebung. Die in Stunden- und Tagesschrittweiten erhobenen Daten der Evapotranspiration des Lysimeters wurden zur Kalibrierung und Validierung von TRAIN genutzt.

In der Abbildung 3 sind in einer Regressionsanalyse mit TRAIN simulierte Tageswerte der aktuellen Evapotranspiration den Messergebnissen des Lysimeters gegenübergestellt. In diese Auswertung sind alle möglichen Fälle eingeschlossen, also z.B. reine Interzeptionsverdunstung an Tagen mit Niederschlag, Interzeptionsverdunstung und Transpiration bei benetztem Bestand sowie ausschließliche Transpiration bei trockenem Bestand. Es sind dabei Tage mit zum Teil sehr ungünstigen Bedingungen für eine einwandfreie Bestimmung der Verdunstung nach dem Lysimeterverfahren enthalten (hohe Tages-Niederschlagssummen, Verdunstungswerte im Bereich minimaler Messauflösung usw.). Daher sind die Resultate als sehr gut zu bezeichnen (MENZEL 1997). Gleichzeitig zeigt die Abbildung 3, dass die Tageswerte der Verdunstung von intensiv bewirtschafteter Wiese mit bis zu 6 mm sehr hoch ausfallen können und dann durchaus im Bereich der Wald-Verdunstung liegen.

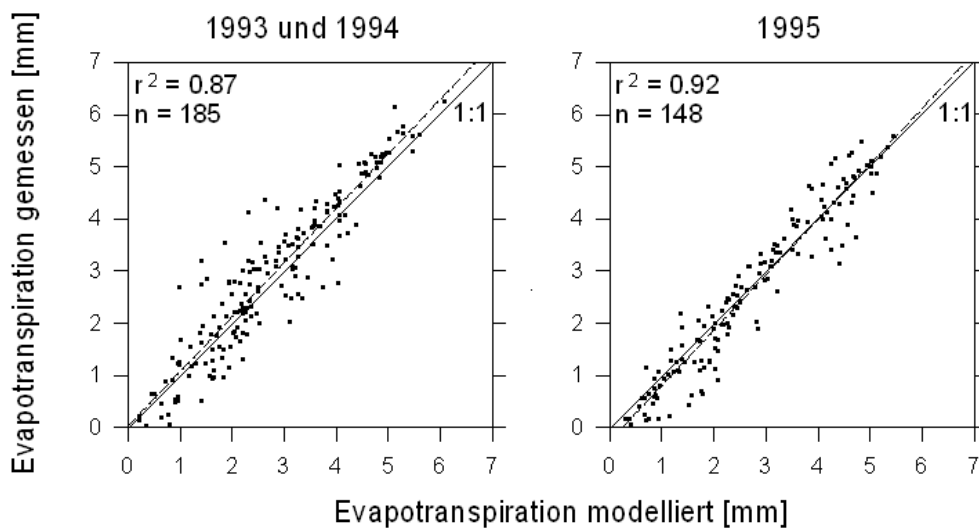


Abb. 3: Verdunstung eines Wiesenbestandes: Regressionsanalyse zwischen mit TRAIN modellierten und am Lysimeter Rietholzbach gemessenen Tages-Verdunstungshöhen für alle auswertbaren Tage der Jahre 1993 und 1994 (links; Modell-Kalibrierung) sowie 1995 (rechts; Modell-Validierung). In den Daten sind Tage mit Niederschlag enthalten. Die Regressionsgeraden sind als gestrichelte Linien eingezeichnet (MENZEL 1997)

Zur flächendifferenzierten Modellierung der Verdunstung wird das Untersuchungsgebiet in ein regelmäßiges Gitter mit beliebiger Maschenweite unterteilt (üblicherweise 500 m oder 1 km). Die meteorologischen Daten werden vor der eigentlichen Modellanwendung in Tagesschritten auf das Gitternetz interpoliert. Für jede Gitterzelle können anschließend mittels TRAIN die aktuelle Verdunstung bzw. der Wasserhaushalt in täglicher Auflösung berechnet werden.

Anwendungen von TRAIN sind u.a. in den Hydrologischen Kartenwerken verschiedener Länder zu finden, z.B. im Hydrologischen Atlas der Schweiz (MENZEL et al. 1999, Abbildung 4) oder im Hydrologischen Atlas von Rheinland-Pfalz (DEMUTH 2005), u.a. im Zusammenhang mit der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie. Standörtliche Anwendungen von TRAIN werden beispielsweise für Lysimeterstationen durchgeführt, wo der Einfluss unterschiedlicher Böden und ackerbaulicher Nutzung auf den Wasserhaushalt untersucht und gleichzeitig TRAIN anhand gemessener Daten fortentwickelt wird. Darüber hinaus bestehen Anwendungen von TRAIN in Regionen mit unterschiedlichen Klimaten, z.B. im semi-ariden Teil des Jordan-Einzugsgebietes (MENZEL et al. 2009) oder in der Mongolei (MENZEL et al. 2011). Schließlich wird TRAIN auch im Rahmen von Szenarienstudien eingesetzt, um die Auswirkungen sich ändernder klimatischer Bedingungen (MENZEL und LANG 2005, MENZEL et al. 2007) oder veränderter Landnutzung (MENZEL et al., 2009) auf den Wasserhaushalt zu untersuchen.

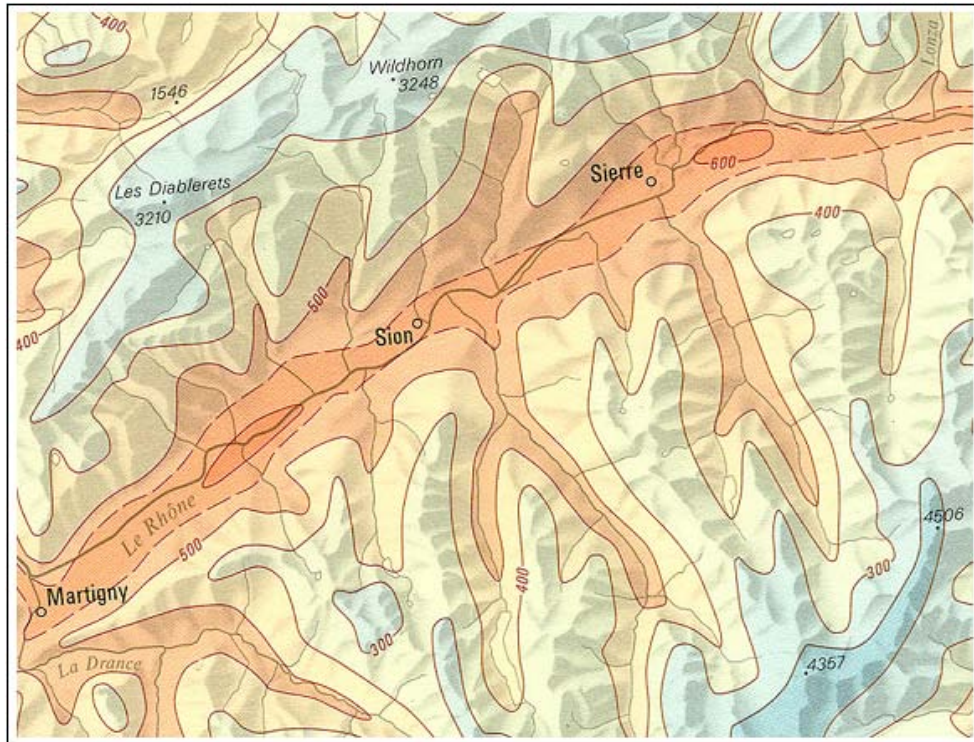


Abb. 4: Ausschnitt aus der Verdunstungskarte (Tafel 4.1) des Hydrologischen Atlas der Schweiz. Dargestellt sind Isolinien der mittleren jährlichen Verdunstung (1973-1992) für das untere Tal der Rhone und die angrenzenden Gebirgsregionen. Die Daten beruhen auf einer in Tagesschrittweite durchgeführten Simulation mit TRAIN in der räumlichen Auflösung von 1x1 km (MENZEL et al. 1999)

Eine unabhängige Kontrolle der mittels TRAIN für die gesamte Schweiz erzielten Ergebnisse erfolgte neben einem Abgleich der Bilanzgrößen mit dem Wasserhaushaltsverfahren (SCHÄDLER 1985) über den Vergleich mit anderen Modellergebnissen. So ermittelte ZIERL (2001) mit dem Wald-Wasserhaushaltsmodell WAWAHAMO eine mittlere Wald-Verdunstung in der Schweiz von 617 mm, während MENZEL et al. (1999) mit TRAIN den Wert von 616 mm erhielten.

Literatur

- DEMUTH, N. (2005): Mittlere Verdunstung. Normalperiode 1961-1990. - In: Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (Hrsg.): Hydrologischer Atlas Rheinland-Pfalz, Oppenheim
- LEE, J. & R. A. PIELKE (1992): Estimating the soil surface specific humidity. J. Appl. Meteor. 31, S. 480-484
- MENZEL, L. (1996): Modelling canopy resistances and transpiration of grassland. - Phys. Chem. Earth, 21 (3), S. 123-129
- MENZEL, L. (1997): Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. - Zürcher Geographische Schriften, Heft 67, ETH, Zürich
- MENZEL, L., H. LANG, M. ROHMANN (1999): Mittlere jährliche Verdunstung. - In: Landeshydrologie und -geologie (Hrsg.): Hydrologischer Atlas der Schweiz, Kapitel 4. EDMZ, Wabern-Bern

- MENZEL, L. & H. LANG (2005): Spatial heterogeneity of snow conditions and evapotranspiration in the Swiss Alps. - In: HUBER, U., H. BUGMANN, M. REASONER (Hrsg.): Global change in mountain regions – an overview of current knowledge. Springer, Dordrecht, S. 275-282
- MENZEL, L., E. TEICHERT, M. WEISS (2007): Climate change impact on the water resources of the semi-arid Jordan region. - In: HEINONEN, M. (Hrsg.): Proc. of the Third Conference on Climate and Water, Helsinki, S. 320-325
- MENZEL, L., J. KOCH, J. ONIGKEIT, R. SCHALDACH (2009): Modelling the effects of land-use and land-cover change on water availability in the Jordan River region. *Adv. Geosci.*, 21, S. 73-80
- MENZEL, L., J. HOFMANN, R. IBISCH (2011): Untersuchung von Wasser- und Stoffflüssen als Grundlage für ein Integriertes Wasserressourcenmanagement im Kharaa-Einzugsgebiet, Mongolei. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 55 (2), S. 88-103
- MONTEITH, J.L. (1965): Evaporation and environment. - In: Fogg, G. (Hrsg.): The state and movement of water in living organisms, *Sympos. Soc. Exper. Biol.* 19, S. 205-234
- OHMURA, A. (2001): Physical basis for the temperature-based melt-index method. *J. Appl. Met.*, 40 (4), S. 753-761
- OKE, T.R. (1987): *Boundary Layer Climates* - Methuen, London-New York
- SCHÄDLER, B. (1985): *Der Wasserhaushalt der Schweiz* - Mitteilungen der Landeshydrologie Nr. 6, Bern
- THOM, A.S. & H.R. OLIVER (1977): On Penman's equation for estimating regional evaporation. - *Quart. J. R. Met. Soc.*, 103, S. 345-357
- ZIERL, B. (2001): A water balance model to simulate drought in forested ecosystems and its application to the entire forested area in Switzerland. - *J. Hydrol.*, 242, S. 115-136