

# **Berechnung der Grundwasserneubildung mit dem Wasserhaushaltsmodell WHMOD**



Björnsen Beratende Ingenieure GmbH  
Standort München  
Anni-Albers-Straße 7, 80807 München  
Telefon +49 89 3066891-10, [bce-muenchen@bjoernsen.de](mailto:bce-muenchen@bjoernsen.de)  
März 2024, MH, bur1013036

## **Inhaltsverzeichnis**

### **Erläuterungsbericht**

<b>1</b>	<b>Allgemein</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Eingangsdaten</b>	<b>3</b>

## Verwendete Unterlagen

- [1] AG Boden, 1994: Bodenkundliche Kartieranleitung, Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter, 4. Aufl., Hannover
- [2] Allen R.G., Smith M., Perrier A., Pereira L.S., 1994: An update for definition of reference evapotranspiration – ICID Bulletin 43, No. 2, 1-34
- [3] Allen R.G., Smith M., Perrier A., Pereira L.S., 1998: Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome URL: <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- [4] Armbruster V., Leibundgut C., Menzel L., 2000: Modellierung der detaillierten Grundwasserneubildung im Lockergestein mit einem SVAT-Modell – Wasser & Boden, 52/11, 24–28, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin
- [5] Arbeitskreis KLIWA 2017 (LUBW, LfU Bayern, LfU RLP, HLNUG, DWD, [kliwa.de](http://kliwa.de)): Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951-2015), Heft 21, Freiburg, file:///P:/whm1500340/management/02\_projsteuerung/daten/Literatur/KLIWAHeft21.pdf
- [6] ATV-DVWK-M 504, Entwurf, 2001: Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden
- [7] Disse M., 1995: Modellierung der Verdunstung und der Grundwasserneubildung in ebenen Einzugsgebieten - Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe, Heft 53
- [8] Dommermuth H., Trampf W., 1990: Die Verdunstung in der Bundesrepublik Deutschland, Zeitraum 1951-1989 – Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
- [9] DWA-M 504, Entwurf, 2016: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen
- [10] Haude W., 1952 a: Zur Möglichkeit der nachträglichen Bestimmung der Wasserbeanspruchung durch die Luft und ihrer Nachprüfung an Hand von Topversuchen und Abflussmessungen – Berichte des Deutschen Wetterdienstes US-Zone, 32: 27-34
- [11] Haude W., 1952 b: Verdunstungsmenge und Evaporationskraft eines Klimas – Berichte des Deutschen Wetterdienstes US-Zone, 42: 225-229
- [12] Haude W., 1954: Zur praktischen Bestimmung der aktuellen und potentiellen Evaporation und Evapotranspiration – Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 8

- [13] Haude W., 1955: Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichste einfache Weise – Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 11
- [14] Haude W., 1958: Über die Verwendung verschiedener Klimafaktoren zur Berechnung der potentiellen Evaporation und Evapotranspiration – Meteorologische Rundschau (11), 96-99
- [15] Herrmann A., Kuhn M., 1996: Schnee und Eis – in: Lehrbuch der Hydrologie Band 1, Quantitative Hydrologie, Hrsg.: Baumgartner A., Liebscher H.-J., 2. Auflage, Gebrüder Bornträger Verlag, Berlin und Stuttgart
- [16] Kopp et al., 2018: Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern Rheinland-Pfalz und Hessen von 1951 bis 2015, Zeitschrift Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, HyWa  
DOI: 10.5675/HyWa\_2018,2\_1 (HW 62. 2018, H.2; S.62-76)  
file:///P:/whm1500340/management/02\_projsteuerung/daten/Literatur/Kopp%20et%20al.%20HyWa2-2018.pdf
- [17] Probst M., 2002: Der Einfluss des Grundwasserhaushalts auf das Abflussverhalten kleiner Einzugsgebiete im Festgesteinsbereich der Mittelgebirge – Dissertation eingereicht am Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, Januar 2002
- [18] Richter D., 1995: Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers – Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 194, Offenbach am Main
- [19] Schmidt, T., Thiel, S., Machui-Schwanitz, G., 2023 (DWD): Die Grasreferenzverdunstung für wasserhaushaltliche Bilanzierung in Deutschland (30-jährige Monatsmittelwerte 1991-2020 in hoher räumlicher Auflösung), DWD, Abteilung Hydrometeorologie, KU41, hydbil-105222
- [20] Wendling, U.; Fuchs, P.; Müller-Westermeier, G.; 1997: Modellierung des Zusammenhangs von Globalstrahlung, Sonnenscheindauer und Bewölkungsgrad, Arbeitsergebnisse Nr. 45, Deutscher Wetterdienst, Forschung und Entwicklung, Offenbach
- [21] Wigmosta, M.S., Vail, L.W., Lettenmaier, D.P., 1994: A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. Water Resources Research, 30(6), 1994..

## **1 Allgemein**

Zur Berechnung der Wasserhaushaltsbilanz und der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung steht uns eine Inhouse-Entwicklung zur Verfügung - das Boden**W**asser**H**aushalts**M**ODEll WHMOD. Das Modellsystem wurde im Jahr 2002 konzipiert und in C++ programmiert. Das Modellsystem beschreibt auf Basis physikalisch begründeter und wissenschaftlich anerkannter Prozesse den Wasserumsatz im System Boden, Pflanze, und Klima.

WHMOD wurde im Rahmen verschiedener Anwendungsfälle getestet, geprüft und validiert (Probst 2002) und ist seither in zahlreichen Projektgebieten erfolgreich eingesetzt worden. 2018 wurde WHMOD in eine Python-Umgebung überführt und um weitere Komponenten ergänzt; WHMOD wurde dann im Rahmen eines Modellsystemvergleichs erneut getestet und validiert. Weitere projektspezifische Ergänzungen sind aufgrund des offenen Systems jederzeit möglich. Inzwischen bestehen langjährige Erfahrungen im Einsatz des WHMOD zur Berechnung der stationären und instationären, flächendifferenzierten Wasserhaushaltsbilanz

## **2 Grundlagen**

Beim Modellsystem WHMOD handelt es sich um ein sogenanntes „SVAT-Model“ (**S**oil-**V**egetation-**A**thmospere-**T**ransfer), das die Beschreibung der wesentlichen Prozesse des Wasserumsatzes im System Boden-Pflanze-Atmosphäre erlaubt. Der Einfluss der klimatischen, meteorologischen sowie pflanzen- und bodenspezifischen Randbedingungen, die den Wasserhaushalt prägen, wird durch etablierte Modellansätze der wesentlichen Teilprozesse abgebildet.

WHMOD berechnet die Wasserhaushaltskomponenten für definierte Flächen in Tageschritten. Die berechneten Tageswerte können über beliebige Zeiträume bilanziert und aggregiert werden. WHMOD ermöglicht die Bereitstellung der berechneten Datensätze für GIS sowie für weitergehende Modellierungen (z.B. Grundwassermodelle) über eine Ausgabeschnittstelle, so dass die berechneten Daten direkt übergeben werden können.

Hinsichtlich der Teilprozesse in WHMOD wurden gezielt Modellansätze ausgewählt, die die prinzipiellen Abhängigkeiten basierend auf den bei praktischen Fragestellungen üblicherweise vorliegenden Daten beschreiben können (PROBST 2002). Dies sind im Einzelnen

### **Regionalisierung meteorologischer Antriebsdaten**

Stationsdaten wie der Niederschlag oder die Lufttemperatur werden durch Interpolationsverfahren wie Nearest Neighbour oder die Inverse Distanz-Wichtung auf die einzelnen Flächen übertragen. Das programminterne Datenhandling erlaubt die Nutzung von Nachbarstationen bei Fehldaten an einzelnen Stationen. Für Größen wie die Lufttemperatur empfiehlt sich in reliefierten Untersuchungsgebieten die explizite Berücksichtigung der Höhenabhängigkeit, die über feste Gradienten vorgegeben oder mittels linearer Regression für jeden Tag automatisiert bestimmt wird.

#### **Niederschlagskorrektur (RICHTER 1995)**

Die an den Niederschlagssammlern gemessenen Niederschlagshöhen sind im Jahresmittel 10 – 14 % kleiner als die tatsächlichen Niederschläge, was im Wesentlichen durch Verwehungseffekte sowie untergeordnet durch Benetzungsverluste am Sammler begründet ist. Bei Bedarf erfolgt eine Korrektur der Messwerte nach Jahreszeit, Lage des Sammlers und Art des Niederschlages.

#### **Schneespeicher (HERRMANN & KUHN 1996)**

Die Akkumulation von Niederschlägen im Schneespeicher und deren Abgabe kann zu hohen Grundwasserneubildungsraten führen. Dieser Prozess wird über das Gradtagfaktorverfahren berücksichtigt, das die Freisetzung aus dem Schneespeicher in Abhängigkeit vom Tagesmittelwert der Lufttemperatur beschreibt. Als Gradtagfaktor wird der von HERRMANN & KUHN (1996) genannte Mittelwert von  $4,5 \text{ mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{K})$  verwendet.

#### **Potenzielle Verdunstung (ALLEN et al. 1998, WENDLING et al. 1997, DWA-M 504)**

Die Berechnung der potentiellen Verdunstung bzw. Evapotranspiration (PET) basiert auf dem physikalisch begründeten Verfahren nach PENMAN/MONTEITH (ALLEN et al. 1998). Folgende Parameter werden dabei berücksichtigt: Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer. Weitere wichtige Einflussfaktoren sind die Landnutzung und die Vegetationsphase. Die aus der PENMAN/MONTEITH-Gleichung abgeleitete FAO-Grasreferenzverdunstung dient als rechnerische Einheitsverdunstung. Alternativ ist die Berechnung der Grasreferenzverdunstung nach WENDLING et al. (1997) bzw. in der vom DWD verwendeten Form nach SCHMIDT et al. (2023) möglich. Diese für Deutschland angepasste, empirische Gleichung benötigt weniger Basisdaten (Lufttemperatur und Globalstrahlung). Die resultierende Referenzverdunstung wird in Verbindung mit nutzungs- und monatspezifischen Verdunstungskorrektur-Faktoren aus dem Merkblatt DWA-M 504 in die potentielle Verdunstung der entsprechenden Vegetation umgerechnet.

#### **Aktuelle Verdunstung (DISSE 1995, WIGMOSTA et al. 1994)**

Die aktuelle Verdunstung aus dem Bodenkörper ist aufgrund verschiedener Randbedingungen praktisch immer kleiner als die potentielle Verdunstung. Wesentlichste Einflussgröße ist dabei die Verdunstungsregulierung der Pflanzen als Schutz vor Austrocknung bei abnehmender Bodenfeuchte. Diese Abminderung der potentiellen Bodenverdunstung erfolgt nutzungsspezifisch mit dem durch DISSE (1995) vorgeschlagenen Ansatz.

Wurde die Vegetationsoberfläche durch vorangegangene Niederschläge benetzt, tritt zusätzlich Interzeptionsverdunstung auf. Diese Interzeptionsverdunstung wird gegenüber der Bodenverdunstung nach dem von WIGMOSTA et al. 1994 verwendeten Schema priorisiert.

#### **Bodenspeicher mit Makroporeninfiltration (ARMBRUSTER et al. 2000)**

Entgegen der Betrachtung des Bodenspeichers als Überlaufspeicher, aus dem Wasser erst bei Überschreitung der nutzbaren Feldkapazität der durchwurzelten Bodenzone absickert, weisen natürliche Böden bereits bei Bodenfeuchten unterhalb der nutzbaren Feldkapazität eine Versickerung und damit eine Grundwasserneubildung auf. Das Verfahren nach ARMBRUSTER et al. (2000) beschreibt diese prinzipielle Abhängigkeit der ungesättigten Strömung im Sinne eines konzeptionellen Modells. Die Reduktion der für eine physikalisch begründete Modellierung erforderlichen Vielzahl schwierig zu

ermittelnder Parameter und Abhängigkeiten auf die nutzbare Feldkapazität der durchwurzelten Bodenzone macht diesen Ansatz für Untersuchungen sehr robust und praktikabel.

#### **Kapillarer Aufstieg (nach AG BODEN 1994)**

Bei kleinen Flurabständen wird durch den kapillaren Aufstieg gegebenenfalls Grundwasser in die durchwurzelte Bodenzone eingebracht, das der Vegetation zur Verfügung steht. WHMOD geht davon aus, dass ein kapillarer Aufstieg in der Größenordnung der potentiellen Verdunstung (maximal 5 bis 6 mm/d) in Abhängigkeit von Flurabstand, Wurzeltiefe, Schwellen- und Grenzwert des kapillaren Aufstiegs stattfinden kann (nach AG BODEN 1994).

#### **Zeitliche Verzögerung bei der Durchsickerung der ungesättigten Zone (PROBST 2002)**

Das WHMOD berechnet die Perkolation aus der durchwurzelten Bodenzone. In Abhängigkeit vom Flurabstand sowie der Ausbildung der ungesättigten Zone muss eine zeitliche Verzögerung berücksichtigt werden. Dieser Einfluss wird durch einen Linearspeicher berücksichtigt, wobei die Schwerpunktlaufzeit direkt oder in Abhängigkeit vom Flurabstand angesetzt werden kann. Die Beziehung zum Flurabstand wurde anhand der Messdaten aus verschiedenen Projekten bestimmt (PROBST 2002) und kann ggf. projektspezifisch an die regionalen Gegebenheiten angepasst werden.

#### **BFI - Base-Flow-Index (vom jeweiligen Umweltamt)**

Der BFI-Faktor ist in der Regel (in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz) aus dem Verhältnis von Basis- und Gesamtabfluss auf Grundlage langer Abflusszeitreihen für Einzugsgebiete in teils aufwendigen Verfahren flächendifferenziert abgeleitet worden. Bei nennenswerten lateralen Abflüssen, z. B. infolge des Reliefs oder aufgrund des Untergrundtyps, wird die Perkolation aus dem Bodenspeicher mittels BFI-Faktor (Wert zwischen 0 und 1) reduziert. Einige Landesbehörden stellen inzwischen flächendifferenzierte BFI-Kartendaten digital zur Verfügung.

### **3 Eingangsdaten**

Zeitreihen Tageswerte: Niederschlag, für Verdunstung nach PENMAN/MONTEITH Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer; alternativ für Verdunstung nach WENDLING: Lufttemperatur, Globalstrahlung.

Gebietsdaten: Modell-/Bilanzgebietsgrenze, nutzbare Feldkapazität der Böden (Bodenkarten), Landnutzung (ATKIS, CORINE,...), Flurabstand mittlere Verhältnisse (Grundwasserstandshöhen, DGM), Zusammensetzung der ungesättigten Zone (Ton, Sand, Schluff, Lehm, gemischt), Stationsstammdaten, Base-Flow-Index, ggf. Wurzeltiefen der regionalen Vegetation, ggf. regionale pflanzenspezifische Faktoren zur Berechnung der Verdunstung und Interzeption