2.13 Mittlere jährliche tatsächliche Verdunstungshöhe

Die Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag und Verdunstung stehen in enger Wechselbeziehung zueinander. Die Wasserzufuhr durch den Niederschlag ermöglicht den Verdunstungsvorgang, der aufgrund des Energieangebots angeregt wird. Im Gegensatz zum Niederschlag erfolgt dieser Vorgang kontinuierlich und wird vom Tagesrhythmus (Temperatur, Strahlung) beeinflusst. Das verdunstete Wasser kann durch Konvektion in höhere Schichten der Atmosphäre transportiert werden, in denen es zur Wolkenbildung beiträgt, was Voraussetzung für die Niederschlagsentstehung ist. Der Verdunstungsprozess stellt somit eine notwendige Voraussetzung für den Erhalt des Wasserkreislaufs dar.

Die Verdunstung lässt sich im Gegensatz zum Niederschlag nur mit großem messtechnischen Aufwand erfassen. Wägbare Lysimeter stellen eine der wenigen Möglichkeiten dar, die Verdunstung für verschiedene Bodenarten und bestimmte Landnutzungen (zum Beispiel landwirtschaftliche Kulturen) kontinuierlich bzw. als Tageswert in mm/d ausreichend genau und vor allem direkt zu ermitteln. Für Waldflächen liefern nicht wägbare Lysimeter vieljährige Mittelwerte der Verdunstung als Jahressumme in mm/a. Alle diese Messungen müssen aufgrund ihrer Komplexität auf einige wenige Versuchsstationen beschränkt bleiben. Indirekte meteorologische Verfahren, zu denen auch die Bestimmung der Gras-Referenzverdunstung (Atlastafel 2.12) zählt, basieren auf Energie- und Wasserbilanzbetrachtungen, wobei der Zusammenhang zwischen den direkt zu messenden meteorologischen Parametern und dem Verdunstungswärmestrom bzw. dem Wasserdampftransport in der bodennahen Luftschicht berücksichtigt wird. Zur flächendeckenden Bestimmung mittlerer Jahressummen der tatsächlichen Verdunstungshöhe ist die Übertragung der gewonnenen Ergebnisse vom Standort auf Gebiete ähnlicher Gebietseigenschaften erforderlich.

Über mehrere Jahre betrachtet bestimmt die Differenz der beiden Größen *Niederschlag* (Atlastafel 2.5) und *Verdunstung* das Volumen des wasserwirtschaftlich maximal zur Verfügung stehenden Wassers, den *Gesamtabfluss* (Atlastafel 3.5).

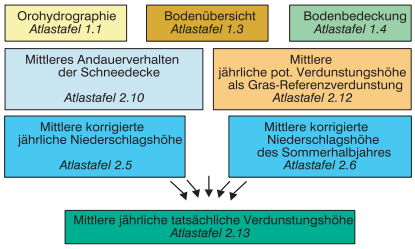


Abb. 2 Nutzung von HAD-Karten zur Ermittlung der mittleren jährlichen tatsächlichen Verdunstungshöhe

Wasseroberflächentemperatur bzw. Verdunstungshöhe sind von den meteorologischen Bedingungen und darüber hinaus von gewässerspezifischen Parametern abhängig, wie Gewässertiefe und Windexposition sowie ggf. von einer anthropogenen thermischen Belastung. Die in Karte 2.13 enthaltenen mittleren Jahreswerte der Gewässerverdunstung wurden unter der vereinfachenden Annahme einer mittleren Gewässertiefe von 6 m und einer ausreichend ventilierten Wasseroberfläche berechnet.

Für Ackerflächen auf sandigen Böden, wie z. B. für die Bewässerungsflächen östlich von Magdeburg (ACHTNICH 1980), wird abhängig vom Verhältnis Sommer-/Jahresniederschlag eine vom Sommerniederschlag abhängige Feldberegnung angenommen.

Abbildung 2 zeigt, welche Kartengrundlagen und Informationen des HAD in das Verfahren eingeflossenen sind. Es wird deutlich, wie eng die maßgeblichen Parameter und hydrometeorologischen Größen miteinander verknüpft sind.

Über einen Vergleich der aus der Differenz (P_{korr} – ETa) berechneten Abflüsse mit gemessenen Abflüssen in Einzugsgebieten (Atlastafel 3.5 „Mittlere jährliche Abflusshöhe“) erfolgte eine Validierung der Werte für die tatsächliche Verdunstungshöhe.

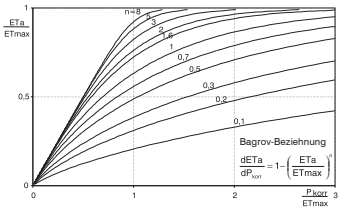
Zur Methodik

Zur Bestimmung mittlerer Jahressummen der tatsächlichen Verdunstungshöhe hat sich das Bagrov-Verfahren für die gegebenen Klimabedingungen in Deutschland als allgemein anwendbar erwiesen (GLUGLA & MÜLLER 1997). Hierbei werden mittlere jährliche Werte der Größen *korrigierter Niederschlag* P_{korr}, *maximale landnutzungsabhängige Verdunstung* ETmax und *tatsächliche Verdunstung* ETa miteinander verknüpft (Abb. 1).

Das von GLUGLA et al. (2001) modifizierte Verfahren BAGLUVA genügt den Grenzbedingungen für aride und humide Verhältnisse:

$ETa \mapsto P_{korr}$, falls $P_{korr} \mapsto 0$ — begrenzende Wasserverfügbarkeit

$ETa \mapsto ETmax$, falls $P_{korr} \mapsto \infty$ bzw. $ETmax \mapsto 0$ — begrenzende Energieverfügbarkeit



	Bagrov-Parameter n	
	sandige Böden Q_{nFK} = 12 %	bindige Böden Q_{nFK} = 20 %
versiegelte Fläche	0,16	
vegetationslose Fläche	0,53	1,02
Grünland	0,91	1,87
Ackerland	1,16	2,10
Laubwald 50/100 Jahre	1,94/2,21	2,04/2,22
Nadelwald 20/80 Jahre	2,00/3,76	2,01/3,77

Abb. 1 Die Bagrov-Beziehung (BAGROV 1953)

Der *Bagrov-Parameter* n kennzeichnet insbesondere die Ausnutzung der Wasserspeichereigenschaften des Bodens und wurde anhand umfangreicher Lysimeterauswertungen als Funktion von Bodenart und Landnutzung quantifiziert. Die abgeleiteten Beziehungsgleichungen ermöglichen es, unter Verwendung einer nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte im Maßstab 1 : 1 000 000, die auch für die Atlastafeln 4.1 bis 4.4 und 1.3 als Datengrundlage diente, sowie den Angaben zur Bodenbedeckung (Atlastafel 1.4) den entsprechenden Wert für n festzulegen.

Durch Verwendung der maximalen Verdunstung werden weitere Eigenschaften der Landnutzung und des Bodens berücksichtigt. Hierfür wird die in Atlastafel 2.12 dargestellte *Gras-Referenzverdunstung* ET_0 als Bezugsgröße genutzt, um die unter den jeweiligen Klimabedingungen bei ausreichender Wasserversorgung maximale Verdunstung für verschiedene Bodenbedeckungsklassen (versiegelte Flächen, vegetationslose Flächen, Grünland, Acker, Laubwald, Nadelwald) zu bestimmen:

$$ETmax = f \cdot f_H \cdot ET_0 \text{ (in mm/a)} \quad (1)$$

Der Faktor f wird ebenfalls auf die Bodeneigenschaften in Abhängigkeit von der Landnutzung zurückgeführt und basiert auf der Auswertung vieljähriger Messungen mit Lysimetern in Deutschland, bei denen eine ausreichende Wasserversorgung gegeben war (z. B. Boden aus tiefgründigem Löß). Der Faktor f_H gibt die Modifikation der Verdunstung durch die unterschiedliche Hangneigung und –exposition wieder, die aus den Höhenangaben der Atlastafel 1.1 „Orohydrographie“ abgeleitet worden sind.

Die tatsächliche Verdunstungshöhe wird für die in der Atlastafel 1.4 „Bodenbedeckung“ klassifizierten Einheiten anteilmäßig aus der jeweils anhand der Bagrov-Beziehung (Abb. 1) berechneten Verdunstung ETa für die sechs oben genannten Klassen zusammengesetzt (z. B. wird die Einheit 1.4.1 „Städtische Grünflächen“ mit 50 % Grünland und 50 % Laubwald wiedergegeben) und gilt für schneefreie Zeiten im Jahr.

Zeiten, in denen die Flächen schneebedeckt sind, tragen abhängig von der Jahreszeit unterschiedlich zur Gesamtverdunstung bei. Die in Atlastafel 2.10 „Mittleres Andauerverhalten der Schneedecke“ auf den Karten A bis D dargestellten Parameter werden genutzt, um diesen Zeitraum im Jahr abzuschätzen, für den die in Tabelle 1 aufgeführten Werte der Verdunstung anzusetzen sind. Dabei ist zu beachten, dass regional- und standortbedingte Faktoren Abweichungen von den genannten Angaben hervorrufen können.

Tab. 1 Mittlere Schneeverdunstung einer geschlossenen Schneedecke (RACHNER 1999)

Monat	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai
Schneeverdunstung [mm/d]	0,20	0,10	0,05	0,00	0,05	0,15	0,30	0,30	0,30

Die Berechnung der Verdunstungshöhen von Binnengewässerflächen erfolgt nach einem Modellkonzept von RICHTER (in DVWK 1996), das eine Verdunstungsformel vom Dalton-Typ (Gl. 2) mit einem Modell zur Berechnung der Gewässeroberflächentemperatur als erforderlicher Eingangsgröße zur Berechnung des Dampfdruckgradienten an der Wasseroberfläche verknüpft.

$$E_W = a \cdot (e_S(T_{W,O}) - e) + b \text{ (in mm/d)} \quad (2)$$

Hierin sind E_W der Verdunstungsverlust des Gewässers, $e_S(T_{W,O})$ der Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur $T_{W,O}$ der Wasseroberfläche und e der Dampfdruck der Luft. Die Werte der Koeffizienten a und b wurden auf der Grundlage vieljähriger Messreihen der Verdunstungshöhe von verschiedenen Gewässertypen ermittelt.

Zur Kartendarstellung

Karte 2.13 zeigt die mittlere jährliche tatsächliche Verdunstungshöhe der Zeitreihe 1961–1990 auf Rasterfeldbasis in der Auflösung 1 km². Für Deutschland ergibt sich eine mittlere Verdunstungshöhe von 532 mm/a. Die Legende entspricht der in Karte 2.12 (Gras-Referenzverdunstung) mit Klassenbreiten von 50 mm/a, bzw. 25 mm/a für den Bereich zwischen 500 und 600 mm/a. Die tatsächliche Verdunstungshöhe ist wesentlich stärker differenziert als die Gras-Referenzverdunstung. Sie wird außer vom Niederschlag und von dem in der Gras-Referenzverdunstung ausgedrückten Verdunstungsanspruch der Atmosphäre im wesentlichen von den Boden- und Landnutzungsgegebenheiten bestimmt, die eine ausgeprägtere Variabilität aufweisen.

Die Werte der tatsächlichen Verdunstungshöhe liegen in den städtischen Gebieten und den höheren Lagen von Erzgebirge, Alpen und weiteren Mittelgebirgsgebieten unter 350 mm/a, vor allem in der Oberrheinebene und in Gebieten mit flurnahem Grundwasserstand dagegen über 700 mm/a. Städtische Gebiete weisen infolge ausgedehnter versiegelter Flächen mit geringer Wasserspeicherkapazität geringe Werte der tatsächlichen Verdunstung auf, so dass außer den Großstädten Berlin, Hamburg, München und dem Ruhrgebiet auch kleinere Städte wie Rostock oder Münster erkennbar sind. Gewässerflächen heben sich dagegen deutlich durch entsprechend höhere Verdunstung ab.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen West-Ost- bzw. Nord-Süd-Schnitte für Rasterzellen der mittleren tatsächlichen Verdunstungshöhe, deren Schnittpunkt im Gipfel des Harzes liegt. Entsprechend der hohen Variabilität der Landnutzung treten größere Schwankungen der Verdunstung im Vergleich zum Niederschlag (Abb. 1 und 2 in Atlastafel 2.2) auf, das heißt, die klimatischen Unterschiede haben gegenüber den regional wechselnden Einflüssen untergeordnete Bedeutung. Die Kurven der Gras-Referenzverdunstung spiegeln diese klimatischen Einflüsse wider, die durch die Bodenbedeckung und den Boden modifiziert werden.

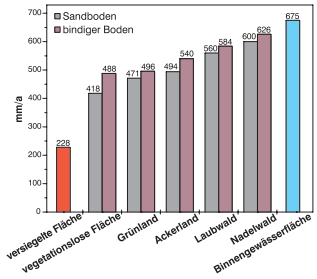


Abb. 3 Tatsächliche Verdunstungshöhen verschiedener Bodenbedeckungen auf unterschiedlichen Böden

So sind versiegelte Flächen grundsätzlich durch Minima der tatsächlichen Verdunstungshöhe zu erkennen, die sich eindeutig den jeweiligen Ortschaften zuordnen lassen. Dabei sind Industrieflächen und Flugplätze aufgrund ihres hohen Versiegelungsgrades durch die niedrigsten Werte gekennzeichnet. In Waldgebieten wird die Gras-Referenzverdunstung überschritten, wobei Boden, Höhenlage und Waldtyp den Absolutwert der tatsächlichen Verdunstung bestimmen. Einzelne Rasterfelder weisen durch überdurchschnittliche Werte der tatsächlichen Verdunstung auf Gewässerflächen hin. Bei der Zusammenfassung gleichartiger Flächeneinheiten ergeben sich in Deutschland mittlere Werte der tatsächlichen Verdunstungshöhe wie sie in Abbildung 3 wiedergegeben sind. Hieran wird deutlich, welch hohen Einfluss die Landnutzung auf die Verdunstung hat, modifiziert durch die Eigenschaften des Bodens. Bindige Böden führen bei vegetationsbedeckten Flächen zu einer Erhöhung der Verdunstung um 20 bis 30 mm/a. Der geringe Wert für versiegelte Flächen macht deutlich, wie wichtig die Einbeziehung der Verdunstungsbetrachtung in landschaftsplanerische Maßnahmen ist.

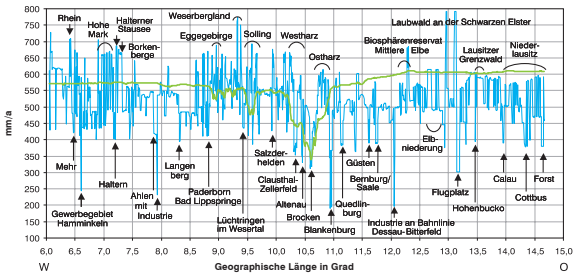


Abb. 4 West-Ost-Schnitt mittlerer jährlicher Werte der tatsächlichen Verdunstung (——) und der Gras-Referenzverdunstung (——) 1961–1990 in 51°50' nördlicher Breite

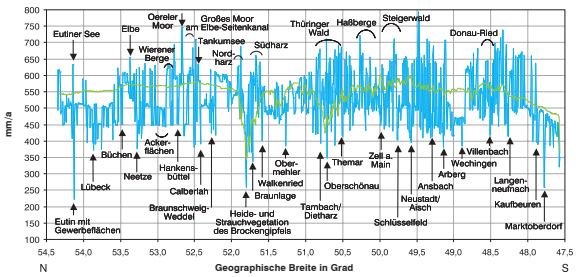


Abb. 5 Nord-Süd-Schnitt mittlerer jährlicher Werte der tatsächlichen Verdunstung (——) und der Gras-Referenzverdunstung (——) 1961–1990 in 10°10' östlicher Länge