

DWA-Regelwerk

Merkblatt DWA-M 504-2

Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen –
Teil 2: Berechnungsverfahren der Landverdunstung

Dezember 2024

VORSCHAU

VORSCHAU

DWA-Regelwerk

Merkblatt DWA-M 504-2

Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen –
Teil 2: Berechnungsverfahren der Landverdunstung

Dezember 2024

VORSCHAU

Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) setzt sich intensiv für die Entwicklung einer sicheren und nachhaltigen Wasser- und Abfallwirtschaft ein. Als politisch und wirtschaftlich unabhängige Organisation arbeitet sie fachlich auf den Gebieten Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall und Bodenschutz.

In Europa ist die DWA die mitgliederstärkste Vereinigung auf diesem Gebiet und nimmt durch ihre fachliche Kompetenz bezüglich Gesetzgebung, Bildung und Information sowohl der Fachleute als auch der Öffentlichkeit eine besondere Stellung ein. Die rund 14 000 Mitglieder repräsentieren die Fachleute und Führungskräfte aus Kommunen, Hochschulen, Ingenieurbüros, Behörden und Unternehmen.

Impressum

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft,
Abwasser und Abfall e. V. (DWA)
Theodor-Heuss-Allee 17
53773 Hennef, Deutschland
Tel.: +49 2242 872-333
Fax: +49 2242 872-100
E-Mail: info@dwa.de
Internet: www.dwa.de

© DWA, 1. Auflage, Hennef 2024

Satz:

Christiane Krieg, DWA

Druck:

druckhaus köthen GmbH & Co KG

ISBN:

978-3-96862-761-8 (Print)

978-3-96862-762-5 (E-Book)

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Merkblatts darf vorbehaltlich der gesetzlich erlaubten Nutzungen ohne schriftliche Genehmigung der Herausgeberin in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Digitalisierung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen werden. Die DWA behält sich das Text- und Data-Mining nach § 44b UrhG vor, was hiermit Dritten ohne Zustimmung der DWA untersagt ist.

Bilder und Tabellen, die keine Quellenangaben aufweisen, sind im Rahmen der Merkblätterstellung als Gemeinschaftsergebnis des DWA-Fachgremiums zustande gekommen. Die Nutzungsrechte obliegen der DWA.

Vorwort

Defizite im Verständnis des Verdunstungsprozesses sowie das Fehlen einer systematischen und geschlossenen Darstellung von praxistauglichen Verfahren zur Messung und rechnerischen Abschätzung im mitteleuropäischen Raum, veranlassten den damaligen Deutschen Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) bereits 1996 in einem Fachausschuss das Merkblatt DVWK-M 238/1996 „Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen“ erarbeiten zu lassen. Die Zusammenhänge zwischen Landnutzung und Verdunstung konnten dort aus konzeptionellen Gründen nur in knapper Form besprochen werden. Diese wurden 2002 innerhalb eines weiteren Merkblatts ATV-DVWK-M 504 „Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden“ durch die Arbeitsgruppe „Verdunstung“ der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Nachfolgerin des DVWK und der Abwassertechnischen Vereinigung, zunächst mit ATV-DVWK, heute mit DWA abgekürzt) nachgeholt. Durch die Beteiligung von Fachleuten verschiedener Richtungen war es in beiden Merkblättern möglich, einen weiten Bereich an Methoden bzw. Landnutzungs- und Vegetationseinflüssen zu behandeln. Neben den methodischen Werkzeugen und ihrer praktischen Anwendung in den Bereichen, für die die DWA tätig ist, wurden auch die entsprechenden wissenschaftlichen Grundlagen ausführlicher dargestellt.

Von dem hiermit vorgelegten Merkblatt werden die beiden Merkblätter DVWK-M 238/1996 und ATV-DVWK-M 504 abgelöst. Anstoß dafür war zunächst die notwendige Überarbeitung des Merkblatts DVWK-M 238 aufgrund neuer Entwicklungen. Da die Mitglieder der DWA-Arbeitsgruppe HW-1.2 „Verdunstung“ innerhalb des DWA-Hauptausschusses „Hydrologie und Wasserbewirtschaftung“ zu der Auffassung gelangt sind, dass es auf Dauer nicht sinnvoll ist, zwei verschiedene Merkblätter zur Verdunstung herauszugeben und zu pflegen, wird die Überarbeitung zum Anlass genommen, die Merkblätter DVWK-M 238/1996 und ATV-DVWK-M 504 zu einem Merkblatt zusammenzuführen. Dies geschieht aus Gründen des Umfangs in zwei Teilen:

- Teil 1: Grundlagen, experimentelle Bestimmung der Landverdunstung, Gewässerverdunstung
- Teil 2: Berechnungsverfahren der Landverdunstung

Die Zusammenlegung hat es erforderlich gemacht, die bisherigen Inhalte teilweise zu straffen. Dies betrifft unter anderem Darstellungen zu meteorologischem und hydrologischem Standardwissen, soweit dies detaillierter in Lehrbüchern zu finden und hier nicht zwingend für das Verständnis von Prozessen und Zusammenhängen sowie die sachgerechte Abhandlung von Methoden erforderlich ist. Daneben wurde weitgehend auf Angaben verzichtet, die im Klimaatlas, im Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD) und anderen Standardwerken zu finden sind.

Im ersten Teil des neuen Merkblatts DWA-M 504, der 2018 erschienen ist, werden Leser*innen in einem Grundlagenabschnitt mit den Phänomenen und Prozessen des komplexen Verdunstungsvorgangs vertraut gemacht. Die Komplexität kommt dabei auch in der Vielzahl an Einflussgrößen und in der Kopplung von Wärme- und Wasserhaushalt durch die Verdunstung zum Ausdruck. Daneben wird dort auf Messverfahren der Verdunstung von Landflächen eingegangen. Diejenigen, die ausschließlich Forschungszwecken dienen und dem Einsatz in der Praxis kaum zugänglich sind, sind im Teil 1 nur in Form knapper Übersichten dargestellt und bezüglich ihrer Möglichkeiten und Probleme beleuchtet. Dagegen wird dort Messverfahren, die mit vertretbarem Aufwand in der Praxis selbst angewendet werden können oder die Grundlage für Berechnungsverfahren bilden, umfassender Aufmerksamkeit geschenkt. Der Schlussabschnitt von Teil 1 widmet sich der Bestimmung der Verdunstung von Gewässern. Dies betrifft nicht nur die Messmethoden, sondern auch die Berechnung der Gewässerverdunstung.

Insofern beziehen sich im vorliegenden zweiten Teil des Merkblatts die Ausführungen zu den Berechnungsverfahren ausschließlich auf die Landverdunstung. Dabei wird in den beiden Hauptabschnitten zwischen der Berechnung mit täglicher und höherer zeitlicher Auflösung (Abschnitt 2) und mit geringerer Auflösung (Abschnitt 3) unterschieden. Wesentlich umfassender als bisher werden der physikalisch begründete Penman-Monteith-Ansatz und die Gras-Referenzverdunstung beschrieben. Letztere ist ein Spezialfall des Penman-Monteith-Ansatzes und inzwischen international gebräuchlicher

Standard für die maximal mögliche Verdunstung. Ausführungen zur Bereitstellung und Verfügbarkeit an Eingangsgrößen und Parametern sowie zur Berücksichtigung des Klimawandels runden die Darstellungen ab.

Ursprünglich war es vorgesehen, in diesem Teil 2 auf die Berechnung der Verdunstung als Bestandteil von Wasserhaushaltsmodellen und ausgewählte praktische Fragestellungen einzugehen. Nicht nur aus Gründen des Umfangs wurde davon Abstand genommen, sondern auch, weil diese Aspekte besser in einem gesonderten Themenband abgehandelt werden können. Die Autoren sind sich in diesem Zusammenhang bewusst, dass aufgrund der oben genannten Herausforderungen nicht alle Fragen beantwortet und nicht für alle Problemfälle Lösungswege aufgezeigt werden können, zu vielfältig sind die Fragestellungen bei der Verdunstungsermittlung. In vielen Fällen werden eigene Messungen und Lösungsansätze erforderlich sein. Dafür soll das vorliegende Merkblatt als Grundlage und Orientierungshilfe dienen.

Änderungen

Gegenüber den Merkblättern DVWK-M 238/1996 und ATV-DVWK-M 504 (September 2002) wurden im vorliegenden Merkblatt DWA-M 504 folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Aktualisierung und Zusammenführen der Merkblätter DVWK-M 238/1996 und ATV-DVWK-M 504 (September 2002) in das Merkblatt DWA-M 504;
- b) vollständige Umstrukturierung und Herausgabe in zwei Teilen: Merkblatt DWA-M 504-1 und Merkblatt DWA-M 504-2;
- c) umfangreichere Darstellungen, unter anderem zu den Berechnungsverfahren der Landverdunstung und Datengrundlagen;
- d) Anpassung an die europäische Normung und zwischenzeitlich eingetretene Veränderungen hinsichtlich Gesetzen und Verordnungen.

Die nachfolgende Liste der Verfasserinnen und Verfasser besteht aus den aktuellen Mitgliedern der Arbeitsgruppe HW-1.2 „Verdunstung“. Nicht aufgeführt sind ehemalige Mitglieder, die an der Erarbeitung der Merkblätter DVWK-M 238/1996 und ATV-DVWK-M 504 beteiligt waren und damit gleichfalls Anteil an der Entstehung des vorliegenden Merkblatts haben. Ihr Beitrag sei an dieser Stelle noch einmal gewürdigt.

Es handelt sich dabei um Dipl.-Met. Christoph DEYHLE (ehemals Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz), Dr. Gerhard GLUGLA (ehemals Bundesanstalt für Gewässerkunde, Außenstelle Berlin), Dr. Walther GOLF (ehemals Technische Universität Dresden), Dr. Jürgen von HOYNINGEN-HUEHNE (ehemals Deutscher Wetterdienst, Braunschweig), Dr.-Ing. LBD a. D. Heino KALWEIT (ehemals Landesamt für Wasserwirtschaft Mainz), Prof. Dr. Heinz-Dieter OLBRISCH und Prof. Dr. Hartmut WITTENBERG (ehemals Fachhochschule Nordostniedersachsen Suderburg), Dr. Dieter RICHTER (ehemals Deutscher Wetterdienst, Berlin) und nicht zuletzt Dr. Ulrich WENDLING (ehemals Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M.; vorhergehender, langjähriger Sprecher der Arbeitsgruppe).

Die Arbeitsgruppe dankt Frau Silke Lorenz, Sekretärin der beiden Professuren Wasserwirtschaft und Hydrologie der Universität Rostock, für ihre Unterstützung bei der redaktionellen Bearbeitung des Merkblatts.

Rostock, im November 2024

Konrad Miegel
Sprecher der Arbeitsgruppe

In diesem Merkblatt werden, soweit wie möglich, geschlechtsneutrale Bezeichnungen für personenbezogene Berufs- und Funktionsbezeichnungen verwendet. Sofern dies nicht möglich ist, wird die weibliche und die männliche Form verwendet. Ist dies aus Gründen der Verständlichkeit nicht möglich, wird nur eine von beiden Formen verwendet. Alle Informationen beziehen sich aber in gleicher Weise auf alle Geschlechter.

Kosten- und Umweltauswirkungen sind durch das vorliegende Merkblatt nicht zu erwarten.

Frühere Ausgaben

Merkblatt ATV-DVWK-M 504 (September 2002) (in Teilen)

Merkblatt DVWK-M 238/1996 (in Teilen)

Die Merkblätter DWA-M 504-1 (07/2018) und DWA-M 504-2 ersetzen Merkblatt DVWK-M 238/1996 und Merkblatt ATV-DVWK-M 504 (09/2002)

DWA-Klimakennung

Im Rahmen der DWA-Klimastrategie werden Arbeits- und Merkblätter mit einer Klimakennung ausgezeichnet. Über diese Klimakennung können Anwendende des DWA-Regelwerks schnell und einfach erkennen, in welcher Intensität sich eine technische Regel mit dem Thema Klimaanpassung und Klimaschutz auseinandersetzt. Das vorliegende Merkblatt wurde wie folgt eingestuft:

KA1 = Das Merkblatt hat indirekten Bezug zur Klimaanpassung

KS1 = Das Merkblatt hat indirekten Bezug zu Klimaschutzparametern

BEGRÜNDUNG:

Das Merkblatt hat indirekten Bezug zur Klimaanpassung (KA1) und zum Klimaschutz (KS1), insbesondere was das "Monitoring von Klimadaten und Klimafolgen" anbelangt. In diesem Zusammenhang ist in erster Linie Abschnitt 5 zu den "Auswirkungen des Klimawandels" zu nennen.

Einzelheiten zur Ableitung der Bewertungskriterien sind im „Leitfaden zur Einführung der Klimakennung im DWA-Regelwerk“ erläutert, der online unter www.dwa.info/klimakennung verfügbar ist.

Verfasserinnen und Verfasser

Das Merkblatt wurde von der DWA-Arbeitsgruppe HW-1.2 „Verdunstung“ im Auftrag des DWA-Hauptausschusses „Hydrologie und Wasserbewirtschaftung“ (HA HW) im DWA-Fachausschuss HW-1 „Hydrologie“ erarbeitet.

Der DWA-Arbeitsgruppe HW-1.2 „Verdunstung“ gehören folgende Mitglieder an:

MIEGEL, Konrad	Prof. Dr., Universität Rostock (Sprecher)
ZIMMERMANN, Lothar	Dr., Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising (ab 2014 stellv. Sprecher der Arbeitsgruppe)
BERNHOFER, Christian	Prof. Dr., Technische Universität Dresden, Tharandt
GEBAUER, Petra	Dipl.-Met., Berliner Wetterkarte e.V., Berlin
HAFERKORN, Ulrike	Dr., ehemals Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft Sachsen, Lysimeterstation Brandis
RÖTZER, Thomas	Prof. Dr., Technische Universität München, Freising
SCHMIDT, Thomas	Dipl.-Met., Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Potsdam
SEIDLER, Christina	Dr., ehemals Technische Universität Dresden, Internationales Hochschulinstitut Zittau
SPANK, Uwe	Dr., Technische Universität Dresden, Tharandt

Als Gäste haben mitgewirkt:

DUNGER, Volkmar	Dr., Technische Universität Bergakademie Freiberg
MÜLLER, Jürgen	Dr., ehemals Thünen-Institut für Waldökosysteme Eberswalde
WESSOLEK, Gerd	Prof. Dr., Technische Universität Berlin

Dem DWA-Fachausschuss HW-1 „Hydrologie“ gehören folgende Mitglieder an:

MIEGEL, Konrad	Prof. Dr., Universität Rostock (Obmann)
WITTENBERG, Hartmut	Prof. Dr.-Ing., Weste (stellv. Obmann)
CASPER, Markus	Prof. Dr.-Ing., Universität Trier
CHRISTOFFELS, Ekkehard	Dr. rer. nat. Dipl.-Ing., IBC Ingenieure, Vettweiß
PFISTER, Angela	Dipl.-Geogr., Emschergenossenschaft, Essen

Projektbetreuer in der DWA-Bundesgeschäftsstelle:

BARION, Dirk	Dipl.-Geogr., Hennef Abteilung Wasser- und Abfallwirtschaft
--------------	--

Inhalt

Vorwort	3
Verfasserinnen und Verfasser	6
Bilderverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	11
Hinweis für die Benutzung	13
Einleitung	13
1 Anwendungsbereich	14
2 Berechnung der Verdunstung von Landoberflächen mit täglicher oder höherer zeitlicher Auflösung	15
2.1 Grundlegende methodische Aspekte	15
2.2 Meteorologische Eingangsgrößen und Parameter	19
2.2.1 Übersicht über erforderliche Größen und Parameter	19
2.2.2 Strahlungsbilanz ebener und geneigter Flächen	22
2.2.3 Verdunstungswärme	24
2.2.4 Luftfeuchte	25
2.2.5 Windgeschwindigkeit	26
2.3 Der Penman-Monteith-Ansatz	29
2.3.1 Mathematische Formulierung	29
2.3.2 Bestandswiderstand	32
2.3.3 Aerodynamischer Widerstand	34
2.4 Der FAO-Ansatz zur Berechnung der Gras-Referenzverdunstung ET_0 als Standardwert	37
2.4.1 Bedarf an einem Referenzverfahren	37
2.4.2 Definition der Referenzbedingungen	38
2.4.3 Zeitschrittweite der Berechnung und meteorologische Eingangsgrößen	40
2.4.4 Mathematische Formulierung	42
2.4.5 Vereinfachter Ansatz als Ersatz für die Gras-Referenzverdunstung	46
2.5 Ansätze zur Berechnung der potenziellen Verdunstung ET_p	48
2.5.1 Einordnung der Berechnungsverfahren	48
2.5.2 Kombinationsverfahren von Penman	50
2.5.3 Verfahren mit Betonung des Strahlungsglieds	52
2.5.4 Weitere empirische Verfahren	54
2.5.5 Ergebnisvergleich verschiedener Verfahren	57
2.6 Umrechnung von ET_0 oder ET_p in die maximal mögliche Verdunstung ET_{pc} anderer Pflanzenbestände durch Bestandskoeffizienten	58
2.6.1 Ermittlung von Bestandskoeffizienten	58
2.6.2 Einflussgrößen auf Bestandskoeffizient und Bestandsentwicklung	60
2.6.3 Übertragbarkeit von Bestandskoeffizienten	63
2.6.4 Bestandskoeffizienten für landwirtschaftliche Nutzflächen	64
2.6.5 Bestandskoeffizienten von Wald	65
2.6.6 Maximal mögliche Verdunstung in Einzugsgebieten der Kammlagen	66

2.6.7	Abweichungen von den Standardbedingungen	66
2.7	Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung ET_a aus ET_{p_c}	67
2.7.1	Einflussgrößen	67
2.7.2	Reduktionsfunktionen zur Berechnung der tatsächlichen Verdunstung	69
2.7.3	Berücksichtigung von Kapillaraufstieg.....	72
2.8	Besonderheiten von unbewachsenen und teilweise bewachsenen Böden	73
2.8.1	Berücksichtigung von unbewachsenen Flächenanteilen (Schwarzbrachen)	73
2.8.2	Berechnungsmöglichkeiten	75
2.9	Verdunstung von Schnee und Eis.....	77
2.10	Interzeptionsverdunstung	78
2.11	Verdunstung von Hängen	86
2.12	Verdunstung von urbanen Gebieten.....	88
3	Berechnung der Verdunstung von Landoberflächen mit geringer zeitlicher Auflösung	91
3.1	Berechnung von Jahresmittelwerten mittels BAGLUVA-Verfahren.....	91
3.1.1	Berechnungsansatz und Eingangsgrößen.....	91
3.1.2	Ermittlung des Effektivitätsparameters n	98
3.1.3	Berücksichtigung von flurnahem Grundwasser und Beregnung.....	101
3.1.4	Anwendung und Berechnungsbeispiele	103
3.2	Berechnung von Jahreswerten mittels Hydro-Pedo-Transferfunktionen (HPTF) nach Wessolek & Duijnsveld	104
3.2.1	Anlass für die Weiterentwicklung der Ursprungsversion	104
3.2.2	Methodisches Grundkonzept.....	106
3.2.3	Datengrundlagen und Modellentwicklung	107
3.2.4	Berücksichtigung von flurnahem Grundwasser	110
3.2.5	Modifikation unter Hangbedingungen	111
3.2.6	Verdunstung urbaner Gebiete	112
3.2.7	Validierung des Verfahrens	113
3.3	Berechnung von Monatswerten	114
3.3.1	Berechnung auf Grundlage des Penman-Monteith-Ansatzes	114
3.3.2	Berechnung mit dem Disse-Modell	120
4	Bereitstellung und Verfügbarkeit von Eingangsgrößen und Parametern.....	123
4.1	Meteorologische Eingangsgrößen	123
4.2	Bodenkundliche Daten	125
4.3	Landnutzungsdaten	126
4.3.1	Allgemeines.....	126
4.3.2	Amtliches Topografisch-Kartografisches Informationssystem (ATKIS).....	127
4.3.3	Color-Infrarot-(CIR)-Biotopkartierung	128
4.3.4	CORINE Land Cover	129
4.3.5	Ableitung von Parametern.....	131
5	Einfluss von Klimaänderungen	135
5.1	Bisherige Beobachtungen zu verdunstungsrelevanten Klimagrößen und Klimaprojektionen für die Zukunft.....	135
5.2	Beobachtete Auswirkungen des Klimawandels auf die Verdunstung	137

5.3	Globale Projektionen zur künftigen Veränderung der Verdunstung	139
5.4	Methodische Aspekte der Berücksichtigung des Klimawandels bei der Verdunstungsberechnung.....	140
Anhang A Abkürzungen und Symbole		141
A.1	Abkürzungen.....	141
A.2	Symbole.....	142
Anhang B Landnutzungsabhängige Parameter bzw. Berechnungsgleichungen		148
B.1	Algorithmen zur Berechnung des Parameters $\bar{f} = \overline{ET_{max}}/\overline{ET_0}$, θ_{nFK} in Vol.-%	148
B.2	Algorithmen zur Berechnung der Ausschöpfungstiefe \overline{We} in dm mit $\overline{We} \geq 0$, θ_{nFK} in Vol.-%	149
B.3	Algorithmen zur Berechnung des Effektivitätsparameters n der BAGROV-Gleichung, $n > 0$, θ_{nFK} in Vol.-%.....	151
Anhang C Mittlere kapillare Aufstiegsrate KR aus dem Grundwasser bis zur Untergrenze des effektiven Wurzelraums für verschiedene Böden und Torfarten in $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$		152
Anhang D Berechnung der mittleren jährlichen Verdunstung \overline{ETa} und des Gesamtabflusses \overline{R} für ausgewählte Berechnungsvarianten (Varianten 1 bis 9) nach dem Wasserhaushaltsverfahren BAGLUVA		153
Anhang E Bodenparameter als Grundlage für die Berechnung von Jahreswerten der Verdunstung nach Wessolek und Duijnsveld.....		156
E.1	Luftkapazität, Feldkapazität und nutzbare Feldkapazität in Volumen-% in Abhängigkeit von der Bodenart und Trockenrohdichte für Böden mit Humusgehalten kleiner 1 %.....	156
E.2	Zu- und Abschläge zur Luftkapazität, nutzbaren Feldkapazität und Feldkapazität in Volumen-% in Abhängigkeit von der Bodenart und vom Gehalt an organischer Substanz.....	158
E.3	Effektive Durchwurzelungstiefe für Ackerkulturen auf homogenen Böden in Abhängigkeit von der Bodenart und effektiven Lagerungsdichte	160
Anhang F Parameterliste zu den aus den CORINE-Daten abgeleiteten 12 Landnutzungsklassen und für Verhältnisse unter Schneebedeckung (Sommer-, Winterhalbjahr)		161
Quellen und Literaturhinweise.....		162

Bilderverzeichnis

Bild 1:	Bodennahe Windgeschwindigkeit v als Funktion der Höhe z über dem Grund für Verhältnisse ohne und mit Pflanzenbestand mit der Höhe z_B (bei unbelebten Objekten Hindernishöhe z_H), d ist die Verdrängungshöhe	28
Bild 2:	Monatliche Verdunstungshöhen ETa von Gras, gemessen mit verschiedenen wägbaren Lysimetern, in Bezug zur Gras-Referenzverdunstung ET_0	39
Bild 3:	Jahresgang der Gras-Referenzverdunstung im Vergleich zum Niederschlag, vier Gebiete mit unterschiedlichem Niederschlagsregime, mittlere Monatssummen 1961–1990	45
Bild 4:	Entwicklung des k_c -Werts in den verschiedenen Entwicklungsphasen landwirtschaftlicher Kulturen mit der Unterscheidung von trockenen und feuchten Bedingungen.....	61
Bild 5:	An wägbaren Lysimetern in Brandis gemessene tägliche Verdunstungshöhen von Getreide in Relation zur Höhe der Gras-Referenzverdunstung	63
Bild 6:	Monatsmittelwerte $k_{c,M} = \bar{f}_M$, Brandis, Lysimetergruppe 10	65
Bild 7:	Vieljähriger Mittelwert des Parameters $k_{c,M} = \bar{f}$ für Nadel- und Laubwald auf verschiedenen Böden in Abhängigkeit vom Umtriebsalter UA in Jahren.....	66
Bild 8:	An wägbaren Lysimetern in Brandis gemessene tägliche Verdunstungshöhen von Getreide mit teilweise unzureichender Wasserversorgung in Relation zur Höhe der Gras-Referenzverdunstung.....	68
Bild 9:	Abhängigkeit der Verdunstung von der Bodenfeuchte bei Anwendung linearer Reduktionsfunktionen	70
Bild 10:	Reduktionsbeziehung nach DISSE (1995), reduziert durch den Bezug auf die maximal mögliche Verdunstung und durch die Berücksichtigung der Interzeption ...	71
Bild 11:	Qualitative Aufteilung des Niederschlags in durchtropfenden Anteil, Stammablauf und Interzeption mit zunehmender Niederschlagssumme	79
Bild 12:	Veranschaulichung des einfachen Interzeptionsmodells.....	80
Bild 13:	Mediane der Anzahl an Niederschlagsstunden pro Tag in Deutschland für Tage mit Niederschlägen $P > 0,1$ mm	81
Bild 14:	Abhängigkeit des Faktors f_H für die Korrektur von ET_0 von der Hangneigung und Exposition	88
Bild 15:	Grafische Lösung der Bagrov-Beziehung (Gl. (148)), auf Basis von GLUGLA et al. (2002) modifiziert für das WH-Verfahren BAGLUVA, mit Kurven für verschiedene Effektivitätsparameter n	93
Bild 16:	Schema zur Berechnung der mittleren jährlichen tatsächlichen Verdunstung \overline{ETa} und des mittleren jährlichen Gesamtabflusses \bar{R} nach dem WH-Verfahren BAGLUVA.....	95
Bild 17:	Abhängigkeit des Effektivitätsparameters n bzw. n^* vom Wasservorrat bei nutzbarer Feldkapazität als Produkt von Bodenfeuchte gemäß θ_{nFK} in Vol.-% und Ausschöpfungstiefe \overline{We} in dm	98
Bild 18:	Abhängigkeit des Effektivitätsparameters n vom Umtriebsalter von Laub- und Nadelwäldern für bindige Böden und sandige Böden	99
Bild 19:	Abhängigkeit des Effektivitätsparameters n von der nutzbaren Feldkapazität θ_{nFK} für verschiedene Landnutzungen (bei versiegelten Flächen gilt $n = 0,16$)	100
Bild 20:	Illustration der kapillaren Aufstiegshöhe z_A als Abhängige von GW-Flurabstand z_e und Durchwurzelungstiefe We	101
Bild 21:	Mittlere jährliche effektive Wurzel- bzw. Ausschöpfungstiefe \overline{We} in Abhängigkeit von Bodenart bzw. nutzbarer Feldkapazität nFK in Vol.-%.....	102

Bild 22:	Wasserhaushaltskomponenten, wie sie konzeptionell bei der Entwicklung der Hydro-Pedo-Transferfunktionen berücksichtigt wurden	106
Bild 23:	Beispiel für den standortabhängigen Zusammenhang zwischen dem Quotienten ET_a / ET_0 und der Wasserverfügbarkeit WV	107
Bild 24:	Interflowanteil r_f an der Versickerung [%] als Funktion des k_f -Werts des Stauhorrizonts	110
Bild 25:	Gemessene und berechnete Abflussraten von 106 Einzugsgebieten	114
Bild 26:	Funktionen zur Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung aus der Gras-Referenzverdunstung. a) Albedo-Funktion, b) Funktion der Bestandshöhe der Pflanzen, c) Trockenstresssituation, d) Funktion zur Berücksichtigung des minimalen Bestandswiderstands.....	115
Bild 27:	Mit wägbaren Lysimetern gemessene Evapotranspiration nach Angaben im IHP/OHP-Jahrbuch für die Jahre 1989 und 1990, verglichen mit berechneten Werten aus der Gras-Referenzverdunstung und Funktionen der Landnutzung	120
Bild 28:	Messnetze der Klima- und Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes, links: aktive Stationen, rechts: aktive und aufgelöste Stationen	124
Bild 29:	Struktur des ATKIS-DLM am Beispiel der Kategorie Vegetation und ihrer weiteren Gliederung	127
Bild 30:	Struktur der CIR-Daten am Beispiel der Kategorie 7 Wälder und Forsten.....	128
Bild 31:	Struktur der CORINE-Daten für die Hauptobjektgruppe Wälder und naturnahe Flächen.....	129
Bild 32:	Phänologische Uhr der DWD-Station Groß Lüsewitz für die Jahre 1961 und 2017	136

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Häufig benötigte meteorologische Größen und Parameter (Δt = Zeitintervall) für die Berechnung der Evapotranspiration	19
Tabelle 2:	Umrechnungsfaktoren $1 / L$ für die Umrechnung von Energiemengen in Verdunstungsäquivalente bei einer Ausgangstemperatur $T_c = 10$ °C.....	25
Tabelle 3:	Werte des Exponenten k_{WP} in Gl. (22) zur Transformation der Windgeschwindigkeit aus der Höhe z_2 in eine andere Höhe z_1 , zum Beispiel aus der Messhöhe 10 m in die Höhe 2 m über Grund	27
Tabelle 4:	Richtwerte für die Rauigkeitslänge bzw. Rauigkeitshöhe z_0	29
Tabelle 5:	Sensivität der landnutzungsabhängigen Einflussgrößen aus der Penman-Monteith-Beziehung, die bei der Berechnung der Gras-Referenzverdunstung ET_0 nicht berücksichtigt worden sind, zugelassene Toleranz von + 5 % von ET_0	46
Tabelle 6:	Haude-Faktoren f_r zur Berechnung von Tageswerten der potenziellen Verdunstung	56
Tabelle 7:	Mittlere Monats- und Jahreswerte der potenziellen Evapotranspiration, berechnet nach verschiedenen Verfahren	58
Tabelle 8:	Bestandskoeffizienten zur Berechnung von ET_{p_c} unterschiedlicher Pflanzenbestände aus der potenziellen Evapotranspiration ET_p	62
Tabelle 9:	Jahresverlauf des Blattflächenindex LAI verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen	74
Tabelle 10:	Richtwerte für die Kapazität des Interzeptionsspeichers.....	85

Tabelle 11:	Jahressummen der realen Verdunstung in mm eines Nord- und Südhangs von je 10° Neigung im Vergleich zur horizontalen Fläche	88
Tabelle 12:	Physikalische Eigenschaften von Versiegelungsmaterialien und ihre mittlere Speicherkapazität für Wasser	90
Tabelle 13:	Mittlere Wasserhaushaltsgrößen in mm für bebautes Gelände im Raum Berlin, Versiegelungsstufen I – IV	90
Tabelle 14:	Festlegung des mittleren Umtriebsalters UA für Nadelwald in Abhängigkeit von der Gras-Referenzverdunstung \overline{ET}_0 , deren Variation vorrangig geografisch bedingt ist.....	92
Tabelle 15:	Mittlere monatliche Anteile der Jahressumme der tatsächlichen Verdunstung in Prozent, abgeleitet aus Lysimeterdaten im Tiefland Norddeutschlands.....	94
Tabelle 16:	Prozentuale Anteile der im Berechnungsschema verwendeten sechs Landnutzungseinheiten und der Gewässer an den Landnutzungsarten der CORINE-Nomenklatur sowie Zuordnung weiterer Parameter	96
Tabelle 17:	Faktoren für die Korrektur des Effektivitätsparameters n in anderen Klimaregionen	101
Tabelle 18:	Mittelwerte (1961-1990) des korrigierten Niederschlags P_{kor} , der Gras-Referenzverdunstung ET_0 und der klimatischen Wasserbilanz in mm an verschiedenen Wetterstationen	108
Tabelle 19:	Power-Funktionen zur Berechnung der jährlichen tatsächlichen Verdunstung ETa in $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	109
Tabelle 20:	Mittlere Zu- und Abschläge zur tatsächlichen Evapotranspiration in Abhängigkeit von Hangneigung, Hangexposition und Bodenart	111
Tabelle 21:	Infiltrationskoeffizienten für Sommermonate β_s und Wintermonate β_w für unterschiedliche Versiegelungsmaterialien	112
Tabelle 22:	Landnutzungsparameter f_{LN} für verschiedene Landnutzungsklassen nach Anhang F.....	118
Tabelle 23:	Landnutzungsparameter effektive Durchwurzelungstiefe We (dm) für verschiedene Landnutzungsklassen nach Anhang F	119
Tabelle 24:	Richtwerte für den Faktor i_M zur Berechnung von Monatsmittelwerten der maximalen Verdunstung $\overline{ETmax}_M = i_M \cdot \bar{f} \cdot \overline{ET}_{0M}$	121
Tabelle 25:	Richtwerte für den Faktor j_M zur Berechnung von Monatsmittelwerten der Ausschöpfungstiefe $\overline{We}_M = j_M \cdot \overline{We}$	122
Tabelle 26:	Ausschnitt aus der Attribut-Tabelle der Bodenübersichtskarte	126
Tabelle 27:	Entwicklung des CORINE Land Cover Datensatzes	130
Tabelle 28:	Parameter zu den aus den CORINE-Daten abgeleiteten 12 Landnutzungsklassen und der zeitweiligen Schneedecke (Sommer-, Winterhalbjahr).....	131
Tabelle 29:	Mittlere Rauigkeitslängen z_0 (m) für die Landbedeckungsklassen des CORINE-Katasters nach Technischer Anleitung zur Reinhaltung der Luft	132
Tabelle 30:	Durchwurzelungstiefe We in Abhängigkeit von Baumart und Bodenbedingungen	134

Hinweis für die Benutzung

Dieses Merkblatt ist das Ergebnis ehrenamtlicher, technisch-wissenschaftlicher/wirtschaftlicher Gemeinschaftsarbeit, das nach den hierfür geltenden Grundsätzen (Satzung, Geschäftsordnung der DWA und dem Arbeitsblatt DWA-A 400) zustande gekommen ist. Für ein Merkblatt besteht eine tatsächliche Vermutung, dass es inhaltlich und fachlich richtig ist.

Jeder Person steht die Anwendung des Merkblatts frei. Eine Pflicht zur Anwendung kann sich aber aus Rechts- oder Verwaltungsvorschriften, Vertrag oder sonstigem Rechtsgrund ergeben.

Dieses Merkblatt ist eine wichtige, jedoch nicht die einzige Erkenntnisquelle für fachgerechte Lösungen. Durch seine Anwendung entzieht sich niemand der Verantwortung für eigenes Handeln oder für die richtige Anwendung im konkreten Fall; dies gilt insbesondere für den sachgerechten Umgang mit den im Merkblatt aufgezeigten Spielräumen.

Normen und sonstige Bestimmungen anderer Mitgliedstaaten der Europäischen Union oder anderer Vertragsstaaten des Abkommens über den Europäischen Wirtschaftsraum stehen Regeln der DWA gleich, wenn mit ihnen dauerhaft das gleiche Schutzniveau erreicht wird.

Einleitung

Die Verdunstung ist der Übergang von Wasser aus dem Boden, aus Pflanzen und von freien Wasserflächen in die Atmosphäre. Sie ist damit das Bindeglied zwischen dem Wasser auf und unter der Erdoberfläche und dem Wasser in der Atmosphäre. Gemeinsam mit dem Niederschlag gehört sie zu den hydrometeorologischen Größen, durch die Meteorologie und Hydrologie in enger Beziehung zueinander stehen. Da die Verdunstung nicht nur mit einem Wasser-, sondern auch Energieumsatz einhergeht, sind durch sie Wasser- und Wärmehaushalt von Landoberflächen miteinander gekoppelt, mit entsprechenden Auswirkungen auf Wasserkreislauf, Klima und Wettergeschehen. Berücksichtigt man neben den meteorologischen und hydrologischen Einflüssen ihre Abhängigkeit von den Standortfaktoren Boden und Pflanze, dann wird deutlich, dass es sich hierbei um eine vielfältig determinierte und komplexe Größe handelt, die sich durch eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität auszeichnet.

Deshalb ist die direkte Bestimmung der Verdunstung schwierig und anspruchsvoll. Sie kann nur mit beträchtlichem Aufwand und mit Einrichtungen, die eher der Forschung als der Praxis zuzuordnen sind, ermittelt werden. Die resultierenden Angaben sind in der Regel nur für Messstandorte und deren nähere Umgebung repräsentativ. Ihre Übertragung auf größere Gebiete ist nicht ohne Weiteres möglich. Aus diesem Grund hat in der Praxis die rechnerische Bestimmung der Verdunstung mit geeigneten Verfahren große Bedeutung erlangt. Da für ihre Entwicklung Messergebnisse die Grundlage bilden, bedeutet die Anwendung von Berechnungsverfahren auf der Grundlage leicht messbarer meteorologischer Größen und verfügbarer Boden- und Landnutzungsinformationen quasi die Übertragung von Messergebnissen auf unbeobachtete Standorte, Nutzflächen, Landschaften und Einzugsgebiete.

Angaben zur Verdunstung werden für die Lösung vielfältiger wasserwirtschaftlicher, landwirtschaftlicher und anderer Aufgaben benötigt. Es existiert jedoch kein einheitliches Verfahren für ihre Bestimmung, vielmehr steht eine Vielfalt von Methoden zur Verfügung. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Verfahren

- zur Berechnung der potenziellen bzw. maximal möglichen und tatsächlichen Verdunstung,
- für unterschiedliche zeitliche Auflösungen von Stunden- bis zu vieljährigen Mittelwerten,
- für Gewässer, unbewachsene Böden, landwirtschaftliche Kulturen, Waldbestände, versiegelte Flächen, Schneeoberflächen, Deponien und andere Landnutzungsformen,

VORSCHAU

Die Wasserhaushaltsgröße Verdunstung wird für die Lösung vielfältiger wasserwirtschaftlicher, landwirtschaftlicher und weiterer Aufgaben benötigt. Es existiert jedoch kein einheitliches Verfahren zu ihrer Bestimmung, das alle Anwendungsbereiche abdeckt. Vielmehr steht eine Vielfalt von Methoden zur Verfügung. Die existierenden Verfahren umfassen Vorgaben für die Berechnung der potenziellen bzw. maximal möglichen und realen Verdunstung. Sie beziehen sich auf unterschiedliche zeitliche Auflösungen von Stunden- bis zu vieljährigen Mittelwerten. Die Verfahren gelten in der Regel für definierte Umweltbedingungen, zum Beispiel für Gewässer, unbewachsene Böden, landwirtschaftliche Kulturen, Waldbestände, versiegelte Flächen, Schneeoberflächen, Deponien oder andere Landnutzungsformen. Meist gelten die Berechnungen auch für ein definiertes Klima bzw. für regionale Rahmenbedingungen. Schließlich erfordern die existierenden Verfahren stets die erprobten Datengrundlagen, von denen jeweils bereits bei ihrer Aufstellung ausgegangen worden ist.

Die Wahl eines geeigneten Berechnungsverfahrens hängt davon ab, unter welchen Bedingungen und Zielvorgaben die Verdunstung bestimmt wird. Ihre sachgerechte Anwendung setzt daneben ein Grundverständnis zu den Prozessen im System Boden-Pflanze-Atmosphäre und zu maßgeblichen Einflussfaktoren voraus.

Durch die Beteiligung von Fachleuten verschiedener Richtungen war es bereits in den beiden Vorgänger-Merkblättern (DVWK-M 238 und ATV-DVWK-M 504) möglich, einen weiten Bereich an Methoden bzw. Landnutzungs- und Vegetationseinflüssen in Mitteleuropa darzustellen. Neben den methodischen Werkzeugen und ihrer praktischen Anwendung in den Bereichen, für die die DWA tätig ist, wurden auch die entsprechenden wissenschaftlichen Grundlagen ausführlicher vorgestellt.

Mit Erscheinen des vorliegenden zweiten Teils der Merkblattreihe DWA-M 504 werden die Merkblätter DVWK-M 238 und ATV-DVWK-M 504 zurückgezogen. Aus Gründen des Umfangs wird die Thematik weiterhin in zwei Teilen behandelt. Teil 1 beschreibt die Grundlagen, die experimentelle Bestimmung der Landverdunstung und die Gewässerverdunstung. Der hiermit vorgelegte Teil 2 widmet sich den Berechnungsverfahren, der Bereitstellung von Parametern und Eingangsgrößen sowie dem Einfluss von Klimaänderungen.

ISBN: 978-3-96862-761-8 (Print)
978-3-96862-762-5 (E-Book)

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA)
Theodor-Heuss-Allee 17 · 53773 Hennef
Telefon: 02242 872-333 · info@dwa.de · www.dwa.de