

DWA-Regelwerk

Merkblatt DWA-M 504-2

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

April 2023

Entwurf

Frist zur Stellungnahme: 30. Juni 2023

Hinweis zur Abgabe von Stellungnahmen

Stellungnahmen im Rahmen des Beteiligungsverfahrens (Ergänzungen, Änderungen oder Einsprüche zum Entwurf einer Regelwerkspublikation, Gelbdruck) können von der DWA urheberrechtlich verwertet werden.

Mit der Abgabe einer Stellungnahme räumt die stellungnehmende Person der DWA die Nutzungsrechte an etwaigen schutzfähigen Inhalten ihrer Stellungnahme unentgeltlich zeitlich, räumlich sowie inhaltlich unbeschränkt ein. Die stellungnehmende Person wird in der Publikation nicht namentlich genannt.

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 Regelsetzung, 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

Satz:

Christiane Krieg, DWA

Druck:

druckhaus köthen GmbH & Co KG

ISBN:

978-3-96862-561-4 (Print)

978-3-96862-562-1 (E-Book)

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier

© DWA, 1. Auflage, Hennef 2023

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 Datenverarbeitungsanlagen, verwendbare Sprache übertragen werden.

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

1 Vorwort

2 Defizite im Verständnis des Verdunstungsprozesses sowie das Fehlen einer systematischen und ge-
3 schlossenen Darstellung von praxistauglichen Verfahren zur Messung und rechnerischen Abschät-
4 zung im mitteleuropäischen Raum veranlassten den damaligen Deutschen Verband für Wasserwirt-
5 schaft und Kulturbau (DVWK) bereits 1996 in einem Fachausschuss das Merkblatt DVWK-M 238/1996
6 „Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen“ erarbeiten zu lassen. Die Zusammen-
7 hänge zwischen Landnutzung und Verdunstung konnten dort aus konzeptionellen Gründen nur in
8 knapper Form besprochen werden. Diese wurden 2002 innerhalb eines weiteren Merkblatts ATV-
9 DVWK-M 504 „Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden“ durch die Arbeitsgruppe
10 „Verdunstung“ der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Nachfol-
11 gerin des DVWK und der Abwassertechnischen Vereinigung, zunächst mit ATV-DVWK, heute mit DWA
12 abgekürzt) nachgeholt. Durch die Beteiligung von Fachleuten verschiedener Richtungen war es in bei-
13 den Merkblättern möglich, einen weiten Bereich an Methoden bzw. Landnutzungs- und Vegetations-
14 einflüssen zu behandeln. Neben den methodischen Werkzeugen und ihrer praktischen Anwendung in
15 den Bereichen, für die die DWA tätig ist, wurden auch die entsprechenden wissenschaftlichen Grund-
16 lagen ausführlicher dargestellt.

17 Von dem hiermit vorgelegten Merkblatt werden die beiden Merkblätter DVWK-M 238/1996 und ATV-
18 DVWK-M 504 abgelöst werden. Anstoß dafür war zunächst die notwendige Überarbeitung des Merkblatts
19 DVWK-M 238 aufgrund neuer Entwicklungen. Da die Mitglieder der DWA-Arbeitsgruppe HW-1.2 „Ver-
20 dunstung“ innerhalb des DWA-Hauptausschusses „Hydrologie und Wasserbewirtschaftung“ zu der Auf-
21 fassung gelangt sind, dass es auf Dauer nicht sinnvoll ist, zwei verschiedene Merkblätter zur Verdun-
22 stung herauszugeben und zu pflegen, wird die Überarbeitung zum Anlass genommen, die Merkblätter
23 DVWK-M 238/1996 und ATV-DVWK-M 504 zu einem Merkblatt zusammenzuführen. Dies geschieht aus
24 Gründen des Umfangs in zwei Teilen, wobei das vorliegende Merkblatt Teil 2 entspricht:

25 ■ Teil 1: Grundlagen, experimentelle Bestimmung der Landverdunstung, Gewässerverdunstung

26 ■ Teil 2: Berechnungsverfahren der Landverdunstung

27 Die Zusammenlegung hat es erforderlich gemacht, die bisherigen Inhalte teilweise zu straffen. Dies
28 betrifft unter anderem Darstellungen zu meteorologischem und hydrologischem Standardwissen, so-
29 weit dies detaillierter in Lehrbüchern zu finden und hier nicht zwingend für das Verständnis von Pro-
30 zessen und Zusammenhängen sowie die sachgerechte Abhandlung von Methoden erforderlich ist. Da-
31 neben wurde weitgehend auf Angaben verzichtet, die im Klimaatlas, im Hydrologischen Atlas von
32 Deutschland (HAD) und anderen Standardwerken zu finden sind.

33 Im ersten Teil des Merkblatts, der 2018 erschienen ist, werden Leser*innen in einem Grundlagenab-
34 schnitt mit den Phänomenen und Prozessen des komplexen Verdunstungsvorgangs vertraut gemacht.
35 Die Komplexität kommt dabei auch in der Vielzahl an Einflussgrößen und in der Kopplung von Wärme-
36 und Wasserhaushalt durch die Verdunstung zum Ausdruck. Daneben wird dort auf Messverfahren der
37 Verdunstung von Landflächen eingegangen. Diejenigen, die ausschließlich Forschungszwecken die-
38 nen und dem Einsatz in der Praxis kaum zugänglich sind, sind im Teil 1 nur in Form knapper Über-
39 sichten dargestellt und bezüglich ihrer Möglichkeiten und Probleme beleuchtet. Dagegen wird dort
40 Messverfahren, die mit vertretbarem Aufwand in der Praxis selbst angewendet werden können oder
41 die Grundlage für Berechnungsverfahren bilden, umfassender Aufmerksamkeit geschenkt. Der
42 Schlussabschnitt von Teil 1 widmet sich der Bestimmung der Verdunstung von Gewässern. Dies be-
43 trifft nicht nur die Messmethoden sondern auch die Berechnung der Gewässerverdunstung.

44 Insofern beziehen sich im vorliegenden zweiten Teil des Merkblatts die Ausführungen zu den Berech-
45 nungsverfahren ausschließlich auf die Landverdunstung. Dabei wird in den beiden Hauptabschnitten
46 zwischen der Berechnung mit täglicher und höherer zeitlicher Auflösung (Abschnitt 2) und mit gerin-
47 gerer Auflösung (Abschnitt 3) unterschieden. Wesentlich umfassender als bisher werden der physi-
48 kalisch begründete Penman-Monteith-Ansatz und die Gras-Referenzverdunstung, Spezialfall des
49 Penman-Monteith-Ansatzes und international gebräuchlicher Standard für die maximal mögliche

1 Verdunstung, beschrieben. Ausführungen zur Bereitstellung und Verfügbarkeit an Eingangsgrößen
2 und Parametern sowie zur Berücksichtigung des Klimawandels runden die Darstellungen ab.

3 Ursprünglich war es vorgesehen, in diesem Teil 2 auf die Berechnung der Verdunstung innerhalb von
4 Wasserhaushaltsmodellen und praktische Fragestellungen einzugehen. Davon ist die Arbeitsgruppe
5 „Verdunstung“ nicht nur aus Gründen des Umfangs abgewichen, sondern auch wegen der Erkenntnis,
6 dass diese Aspekte anstatt in einem Merkblatt, besser in einem gesonderten Themenheft abgehandelt
7 werden sollten. Die Autoren sind sich in diesem Zusammenhang bewusst, dass aufgrund der oben
8 genannten Herausforderungen nicht alle Fragen beantwortet und nicht für alle Problemfälle Lösungs-
9 wege aufgezeigt werden können, zu vielfältig sind die Fragestellungen bei der Verdunstungsermitt-
10 lung. In vielen Fällen werden eigene Messungen und Lösungsansätze erforderlich sein. Dafür soll das
11 vorliegende Merkblatt als Grundlage und Orientierungshilfe dienen.

12 **Änderungen**

13 Gegenüber den Merkblättern DVWK-M 238/1996 und ATV-DVWK-M 504 (September 2002) wurden im
14 vorliegenden Entwurf des Merkblatts DWA-M 504-2 folgende Änderungen vorgenommen:

- 15 a) Aktualisierung und Zusammenführen der Merkblätter DVWK-M 238/1996 und ATV-DVWK-M 504
16 (September 2002) in das Merkblatt DWA-M 504;
- 17 b) vollständige Umstrukturierung und Herausgabe in zwei Teilen: Merkblatt DWA-M 504-1 und Merk-
18 blatt DWA-M 504-2;
- 19 c) umfangreichere Darstellungen: im vorliegenden zweiten Teil Merkblatt DWA-M 504-2 unter ande-
20 rem zu den Berechnungsverfahren der Landverdunstung und Datengrundlagen;
- 21 d) Anpassung an die europäische Normung und zwischenzeitlich eingetretene Veränderungen hin-
22 sichtlich Gesetzen und Verordnungen.

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

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

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

39 Rostock, im Februar 2023

Konrad Miegel
Sprecher der Arbeitsgruppe

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

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

1 Frühere Ausgaben

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

3 Merkblatt DVWK-M 238/1996 (in Teilen)

4 Die Merkblätter DWA-M 504-1 (07/2018) und DWA-M 504-2 ersetzen mit Erscheinen des Weißdrucks

5 Merkblatt DVWK-M 238/1996 und Merkblatt ATV-DVWK-M 504 (09/2002)

6 DWA-Klimakennung

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

11 **KA1** = Das Merkblatt hat indirekten Bezug zur Klimaanpassung

12 **KS1** = Das Merkblatt hat indirekten Bezug zu Klimaschutzparametern

13 BEGRÜNDUNG:

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

17 Einzelheiten zur Ableitung der Bewertungskriterien sind im „Leitfaden zur Einführung der Klimaken-
18 nung im DWA-Regelwerk“ erläutert, der online unter www.dwa.de/klimakennung verfügbar ist.

Frist zur Stellungnahme

Dieses Merkblatt wird bis zum

30. Juni 2023

zur Diskussion gestellt. Für den Zeitraum des öffentlichen Beteiligungsverfahrens
kann der Entwurf kostenfrei im DWA-Entwurfsportal (DWA-direkt):
www.dwa.de/entwurfsportal eingesehen werden.

Dort und unter www.dwa.de/Stellungnahmen-Entwurf
finden Sie eine digitale Vorlage für Ihre Stellungnahme.

Hinweis zur Abgabe von Stellungnahmen

Stellungnahmen im Rahmen des Beteiligungsverfahrens (Ergänzungen, Änderungen oder Ein-
sprüche zum Entwurf einer Regelwerkpublikation, Gelbdruck) können von der DWA urheber-
rechtlich verwertet werden. Mit der Abgabe einer Stellungnahme räumt die stellungnehmende
Person der DWA die Nutzungsrechte an etwaigen schutzfähigen Inhalten ihrer Stellungnahme
unentgeltlich zeitlich, räumlich sowie inhaltlich unbeschränkt ein. Die stellungnehmende Person
wird in der Publikation nicht namentlich genannt.

Stellungnahmen sind zu richten – gerne auch per E-Mail – an:
Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA)
Theodor-Heuss-Allee 17
53773 Hennef
wielpuetz@dwa.de

1 Verfasserinnen und Verfasser

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

5 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., Deutsche Meteorologische Gesellschaft 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, Außenstelle Berlin-Buch
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
--------------	--

1	Inhalt	
2	Vorwort	3
3	Verfasserinnen und Verfasser	6
4	Bilderverzeichnis	9
5	Tabellenverzeichnis	11
6	Hinweis für die Benutzung	13
7	Einleitung	13
8	1 Anwendungsbereich	14
9	2 Berechnung der Verdunstung von Landoberflächen mit täglicher	
10	oder höherer zeitlicher Auflösung	15
11	2.1 Grundlegende methodische Aspekte	15
12	2.2 Meteorologische Eingangsgrößen und Parameter	19
13	2.2.1 Übersicht über erforderliche Größen und Parameter	19
14	2.2.2 Strahlungsbilanz ebener und geneigter Flächen	22
15	2.2.3 Verdunstungswärme	24
16	2.2.4 Luftfeuchte	25
17	2.2.5 Windgeschwindigkeit	26
18	2.3 Der Penman-Monteith-Ansatz	30
19	2.3.1 Mathematische Formulierung	30
20	2.3.2 Bestandswiderstand	33
21	2.3.3 Aerodynamischer Widerstand	34
22	2.4 Der FAO-Ansatz zur Berechnung der Gras-Referenzverdunstung ET_0 als	
23	Standardwert	38
24	2.4.1 Bedarf an einem Referenzverfahren	38
25	2.4.2 Definition der Referenzbedingungen	39
26	2.4.3 Zeitschrittweite der Berechnung und meteorologische Eingangsgrößen	41
27	2.4.4 Mathematische Formulierung	43
28	2.4.5 Vereinfachter Ansatz als Ersatz für die Gras-Referenzverdunstung	47
29	2.5 Ansätze zur Berechnung der potentiellen Verdunstung ET_p	49
30	2.5.1 Einordnung der Berechnungsverfahren	49
31	2.5.2 Kombinationsverfahren von Penman	51
32	2.5.3 Verfahren mit Betonung des Strahlungsglieds	52
33	2.5.4 Weitere empirische Verfahren	55
34	2.5.5 Ergebnisvergleich verschiedener Verfahren	57
35	2.6 Umrechnung von ET_0 oder ET_p in die maximal mögliche Verdunstung ET_{p_c}	
36	anderer Pflanzenbestände durch Bestandskoeffizienten	59
37	2.6.1 Ermittlung von Bestandskoeffizienten	59
38	2.6.2 Einflussgrößen auf Bestandskoeffizient und Bestandsentwicklung	61
39	2.6.3 Übertragbarkeit von Bestandskoeffizienten	64
40	2.6.4 Bestandskoeffizienten für landwirtschaftliche Nutzflächen	65
41	2.6.5 Bestandskoeffizienten von Wald	66
42	2.6.6 Maximal mögliche Verdunstung in Einzugsgebieten der Kammlagen	67

1	2.6.7	Abweichungen von den Standardbedingungen	67
2	2.7	Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung ET_a aus ET_p	68
3	2.7.1	Einflussgrößen.....	68
4	2.7.2	Reduktionsfunktionen zur Berechnung der tatsächlichen Verdunstung	70
5	2.7.3	Berücksichtigung von Kapillaraufstieg	72
6	2.8	Besonderheiten von unbewachsenen und teilweise bewachsenen Böden	74
7	2.8.1	Berücksichtigung von unbewachsenen Flächenanteilen (Schwarzbrachen)	74
8	2.8.2	Berechnungsmöglichkeiten	75
9	2.9	Verdunstung von Schnee und Eis	77
10	2.10	Interzeptionsverdunstung	78
11	2.11	Verdunstung von Hängen	87
12	2.12	Verdunstung von urbanen Gebieten	89
13	3	Berechnung der Verdunstung von Landoberflächen mit geringer	
14		zeitlicher Auflösung	92
15	3.1	Berechnung von Jahresmittelwerten mittels BAGLUVA-Verfahren.....	92
16	3.1.1	Berechnungsansatz und Eingangsgrößen	92
17	3.1.2	Ermittlung des Effektivitätsparameters n	99
18	3.1.3	Berücksichtigung von flurnahem Grundwasser und Beregnung.....	102
19	3.1.4	Anwendung und Berechnungsbeispiele	104
20	3.2	Berechnung von Jahreswerten mittels Hydro-Pedo-Transferfunktionen (HPTF)	
21		nach Wessolek & Duijnsveld.....	105
22	3.2.1	Anlass für die Weiterentwicklung der Ursprungsversion.....	105
23	3.2.2	Methodisches Grundkonzept	107
24	3.2.3	Datengrundlagen und Modellentwicklung	108
25	3.2.4	Berücksichtigung von flurnahem Grundwasser	111
26	3.2.5	Modifikation unter Hangbedingungen	112
27	3.2.6	Verdunstung urbaner Gebiete	113
28	3.2.7	Validierung des Verfahrens	114
29	3.3	Berechnung von Monatswerten	115
30	3.3.1	Berechnung auf Grundlage des Penman-Monteith-Ansatzes.....	115
31	3.3.2	Berechnung mit dem Disse-Modell	122
32	4	Bereitstellung und Verfügbarkeit von Eingangsgrößen und Parametern	124
33	4.1	Meteorologische Eingangsgrößen.....	124
34	4.2	Bodenkundliche Daten	126
35	4.3	Landnutzungsdaten	127
36	4.3.1	Allgemeines	127
37	4.3.2	Amtliches Topografisch-Kartografisches Informationssystem (ATKIS).....	128
38	4.3.3	Color-Infrarot-(CIR)-Biotopkartierung.....	129
39	4.3.4	CORINE Land Cover	130
40	4.3.5	Ableitung von Parametern.....	132
41	5	Einfluss von Klimaänderungen	136
42	5.1	Bisherige Beobachtungen zu verdunstungsrelevanten Klimagrößen und	
43		Klimaprojektionen für die Zukunft	136
44	5.2	Beobachtete Auswirkungen des Klimawandels auf die Verdunstung	138

1	5.3	Globale Projektionen zur künftigen Veränderung der Verdunstung	140
2	5.4	Methodische Aspekte der Berücksichtigung des Klimawandels bei der	
3		Verdunstungsberechnung	141
4	Anhang A	Abkürzungen und Symbole	142
5	A.1	Abkürzungen	142
6	A.2	Symbole	143
7	Anhang B	Landnutzungsabhängige Parameter bzw. Berechnungsgleichungen	149
8	B.1	Algorithmen zur Berechnung des Parameters $\bar{f} = \overline{ET_{max}} / \overline{ET_0}$, θ_{nFK} in Vol.%	149
9	B.2	Algorithmen zur Berechnung der Ausschöpfungstiefe \overline{We} in dm mit $\overline{We} 0$, θ_{nFK}	
10		in Vol.-%	150
11	B.3	Algorithmen zur Berechnung des Effektivitätsparameters n der	
12		BAGROV-Gleichung, $n > 0$, θ_{nFK} in Vol.%	152
13	Anhang C	Mittlere kapillare Aufstiegsrate KR aus dem Grundwasser bis zur	
14		Untergrenze des effektiven Wurzelraums für verschiedene Böden und	
15		Torfarten in $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	153
16	Anhang D	Berechnung der mittleren jährlichen Verdunstung \overline{ETa} und des	
17		Gesamtabflusses \overline{R} für ausgewählte Berechnungsvarianten (Varianten 1 bis 9)	
18		nach dem Wasserhaushaltsverfahren BAGLUVA	154
19	Anhang E	Bodenparameter als Grundlage für die Berechnung von Jahreswerten	
20		der Verdunstung nach Wessolek und Duijnsveld	157
21	E.1	Luftkapazität, Feldkapazität und nutzbare Feldkapazität in Volumen-%	
22		in Abhängigkeit von der Bodenart und Trockenrohdichte für Böden mit	
23		Humusgehalten kleiner 1 %	157
24	E.2	Zu- und Abschläge zur Luftkapazität, nutzbaren Feldkapazität und	
25		Feldkapazität in Volumen-% in Abhängigkeit von der Bodenart und vom	
26		Gehalt an organischer Substanz	159
27	E.3	Effektive Durchwurzelungstiefe für Ackerkulturen auf homogenen Böden	
28		in Abhängigkeit von der Bodenart und effektiven Lagerungsdichte	161
29	Anhang F	Parameterliste zu den aus den CORINE-Daten abgeleiteten	
30		12 Landnutzungsklassen und für Verhältnisse unter Schneebedeckung	162
31	Quellen und Literaturhinweise		163

32 Bilderverzeichnis

33	Bild 1:	Bodennahe Windgeschwindigkeit v als Funktion der Höhe z über dem Grund	
34		für Verhältnisse ohne (linker Bildteil) und mit (rechts) Pflanzenbestand mit	
35		der Höhe z_b (bei unbelebten Objekten Hindernishöhe z_H), d ist die	
36		Verdrängungshöhe	29
37	Bild 2:	Monatliche Verdunstungshöhen ETa von Gras, gemessen mit verschiedenen	
38		wägbaren Lysimetern, in Bezug zur Gras-Referenzverdunstung ET_0	40
39	Bild 3:	Jahresgang der Gras-Referenzverdunstung im Vergleich zum	
40		Niederschlag, vier Gebiete mit unterschiedlichem Niederschlagsregime,	
41		mittlere Monatssummen 1961–1990	46

1	Bild 4:	Entwicklung des k_c -Werts in den verschiedenen Entwicklungsphasen	
2		landwirtschaftlicher Kulturen mit der Unterscheidung von trocken und feuchten	
3		Bedingungen während der Vegetationsperiode und im Zeitraum davor	62
4	Bild 5:	An wägbaren Lysimetern in Brandis gemessene tägliche Verdunstungshöhen	
5		von Getreide in Relation zur Höhe der Gras-Referenzverdunstung	64
6	Bild 6:	Monastmittelwerte $k_{c,M} = \overline{f_M}$, Brandis, Lysimetergruppe 10	65
7	Bild 7:	Vieljähriger Mittelwert des Parameters $k_{c,M} = \overline{f}$ für Nadel- und Laubwald auf	
8		verschiedenen Böden in Abhängigkeit vom Umtriebsalter UA in Jahren.....	66
9	Bild 8:	An wägbaren Lysimetern in Brandis gemessene tägliche	
10		Verdunstungshöhen von Getreide mit teilweise unzureichender	
11		Wasserversorgung in Relation zur Höhe der Gras-Referenzverdunstung.....	69
12	Bild 9:	Abhängigkeit der Verdunstung von der Bodenfeuchte bei Anwendung	
13		linearer Reduktionsfunktionen.....	71
14	Bild 10:	Reduktionsbeziehung nach Disse, reduziert durch den Bezug auf die maximal	
15		mögliche Verdunstung und durch die Berücksichtigung der Interzeption.....	72
16	Bild 11:	Qualitative Aufteilung des Niederschlags in durchtropfenden Anteil,	
17		Stammablauf und Interzeption mit zunehmender Niederschlagssumme	79
18	Bild 12:	Veranschaulichung des einfachen Interzeptionsmodells	81
19	Bild 13:	Mediane der Anzahl an Niederschlagsstunden pro Tag in Deutschland für	
20		Tage mit Niederschlägen $P > 0,1$ mm	82
21	Bild 14:	Abhängigkeit des Faktors f_H für die Korrektur von ET_0 von der	
22		Hangneigung und Exposition	89
23	Bild 15:	Grafische Lösung der Bagrov-Beziehung (Gl. (148)), auf Basis von	
24		GLUGLA et al. (2002) modifiziert für das WH-Verfahren BAGLUVA, mit Kurven	
25		für verschiedene Effektivitätsparameter n	94
26	Bild 16:	Schema zur Berechnung der mittleren jährlichen tatsächlichen	
27		Verdunstung \overline{ETa} und des mittleren jährlichen Gesamtabflusses \overline{R} nach	
28		dem WH-Verfahren BAGLUVA	96
29	Bild 17:	Abhängigkeit des Effektivitätsparameters n bzw. n^* vom Wasservorrat bei	
30		nutzbarer Feldkapazität als Produkt von Bodenfeuchte gemäß θ_{nFK} in Vol.-% und	
31		Ausschöpfungstiefe \overline{We} in dm	99
32	Bild 18:	Abhängigkeit des Effektivitätsparameters n vom Umtriebsalter von	
33		Laub- und Nadelwäldern für bindige Böden und sandige Böden.....	100
34	Bild 19:	Abhängigkeit des Effektivitätsparameters n von der nutzbaren Feldkapazität	
35		θ_{nFK} für verschiedene Landnutzungen (bei versiegelten Flächen gilt $n = 0,16$).....	101
36	Bild 20:	Illustration der kapillaren Aufstiegshöhe z_A als Abhängige von GW-Flurabstand z_G und	
37		Durchwurzelungstiefe We	102
38	Bild 21:	Mittlere jährliche effektive Wurzel- bzw. Ausschöpfungstiefe \overline{We} in	
39		Abhängigkeit von Bodenart bzw. nutzbarer Feldkapazität nFK in Vol.-%.....	103
40	Bild 22:	Wasserhaushaltskomponenten, wie sie konzeptionell bei der Entwicklung	
41		der Hydro-Pedo-Transferfunktionen berücksichtigt wurden	107
42	Bild 23:	Beispiel für den standortabhängigen Zusammenhang zwischen dem	
43		Quotienten ETa / ET_0 und der Wasserverfügbarkeit WV	108
44	Bild 24:	Interflowanteil r_i an der Versickerung (%) als Funktion des k_i -Werts	
45		des Stauhorrizonts	111
46	Bild 25:	Gemessene und berechnete Abflussraten von 106 Einzugsgebieten.....	115
47	Bild 26:	Funktionen zur Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung aus der Gras-	
48		Referenzverdunstung. a) Albedo-Funktion, b) Funktion der Bestandshöhe	
49		der Pflanzen, c) Trockenstresssituation, d) Funktion zur Berücksichtigung	
50		des minimalen Bestandswiderstands	116

1	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	121
4	Bild 28:	Messnetze der Klima- und Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes, links: aktive Stationen, rechts: aktive und aufgelöste Stationen ...	125
6	Bild 29:	Struktur des ATKIS-DLM am Beispiel der Kategorie Vegetation und ihrer weiteren Gliederung	128
8	Bild 30:	Struktur der CIR-Daten am Beispiel der Kategorie 7 Wälder und Forsten	129
9	Bild 31:	Struktur der CORINE-Daten für die Hauptobjektgruppe Wälder und naturnahe Flächen.....	130
11	Bild 32:	Phänologische Uhr der DWD-Station Groß Lüsewitz für die Jahre 1961 und 2017...	137

12 Tabellenverzeichnis

13	Tabelle 1:	Häufig benötigte meteorologische Größen und Parameter (Δt = Zeitintervall) für die Berechnung der Evapotranspiration	19
15	Tabelle 2:	Umrechnungsfaktoren $1/L$ für die Umrechnung von Energiemengen in Verdunstungsäquivalente bei einer Ausgangstemperatur $T_c = 10$ °C	25
17	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
20	Tabelle 4:	Richtwerte für die Rauiglängelänge bzw. Rauiglängelhöhe z_0	30
21	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
25	Tabelle 6:	Haude-Faktoren f_T zur Berechnung von Tageswerten der potentiellen Verdunstung.....	56
27	Tabelle 7:	Mittlere Monats- und Jahreswerte der potentiellen Evapotranspiration, berechnet nach verschiedenen Verfahren, angegeben in mm, Reihe 1981–2010	59
30	Tabelle 8:	Bestandskoeffizienten zur Berechnung von ETp_c unterschiedlicher Pflanzenbestände aus der potentiellen Evapotranspiration ETp	63
32	Tabelle 9:	Jahresverlauf des Blattflächenindex LAI verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen.....	75
34	Tabelle 10:	Richtwerte für die Kapazität des Interzeptionsspeichers	86
35	Tabelle 11:	Jahressummen der realen Verdunstung in mm eines Nord- und Südhanges von je 10° Neigung im Vergleich zur horizontalen Fläche	89
37	Tabelle 12:	Physikalische Eigenschaften von Versiegelungsmaterialien und ihre mittlere Speicherkapazität für Wasser	91
39	Tabelle 13:	Mittlere Wasserhaushaltsgrößen in mm für bebautes Gelände im Raum Berlin, Versiegelungsstufen I – IV.....	91
41	Tabelle 14:	Festlegung des mittleren Umtriebsalters UA für Nadelwald in Abhängigkeit von der Gras-Referenzverdunstung $\overline{ET_0}$, deren Variation vorrangig geografisch bedingt ist	93
44	Tabelle 15:	Mittlere monatliche Anteile der Jahressumme der tatsächlichen Verdunstung in Prozent, abgeleitet aus Lysimeterdaten im Tiefland Norddeutschlands	95

1	Tabelle 16:	Prozentuale Anteile der im Berechnungsschema verwendeten sechs	
2		Landnutzungseinheiten und der Gewässer an den Landnutzungsarten	
3		der CORINE-Nomenklatur sowie Zuordnung weiterer Parameter	97
4	Tabelle 17:	Faktoren für die Korrektur des Effektivitätsparameters n in anderen	
5		Klimaregionen	102
6	Tabelle 18:	Mittelwerte (1961-1990) des korrigierten Niederschlags P_{korrt} der Gras-	
7		Referenzverdunstung ET_0 und der Klimatischen Wasserbilanz in mm an	
8		verschiedenen Wetterstationen	109
9	Tabelle 19:	Power-Funktionen zur Berechnung der jährlichen tatsächlichen	
10		Verdunstung ETa in $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	110
11	Tabelle 20:	Mittlere Zu- und Abschläge zur tatsächlichen Evapotranspiration in	
12		Abhängigkeit von Hangneigung, Hangexposition und Bodenart	112
13	Tabelle 21:	Infiltrationskoeffizienten für Sommermonate β_s und Wintermonate β_w	
14		für unterschiedliche Versiegelungsmaterialien	113
15	Tabelle 22:	Landnutzungsparameter f_{LN} für verschiedene Landnutzungsklassen	
16		nach Anhang F	119
17	Tabelle 23:	Landnutzungsparameter effektive Durchwurzelungstiefe We (dm)	
18		für verschiedene Landnutzungsklassen nach Anhang F	121
19	Tabelle 24:	Richtwerte für den Faktor i_M zur Berechnung von Monatsmittelwerten	
20		der maximalen Verdunstung $\overline{ETmax}_M = i_M \cdot \bar{f} \cdot \overline{ET}_{0M}$	122
21	Tabelle 25:	Richtwerte für den Faktor j_M zur Berechnung von Monatsmittelwerten	
22		der Ausschöpfungstiefe $\overline{We}_M = j_M \cdot \overline{We}$	123
23	Tabelle 26:	Ausschnitt aus der Attribut-Tabelle der Bodenübersichtskarte	
24		(Klassifizierung nach KA5)	127
25	Tabelle 27:	Entwicklung des CORINE Land Cover Datensatzes	131
26	Tabelle 28:	Parameter zu den aus den CORINE-Daten abgeleiteten	
27		12 Landnutzungsklassen und der zeitweiligen Schneedecke	132
28	Tabelle 29:	Mittlere Rauigkeitslängen z_0 (m) für die Landbedeckungsklassen des	
29		CORINE-Katasters nach Technischer Anleitung zur Reinhaltung der Luft	133
30	Tabelle 30:	Durchwurzelungstiefe We in Abhängigkeit von Baumart und	
31		Bodenbedingungen	135

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.

1 Einleitung

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

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

21 Angaben zur Verdunstung werden für die Lösung vielfältiger wasserwirtschaftlicher, landwirtschaft-
22 licher und anderer Aufgaben benötigt. Es existiert jedoch kein einheitliches Verfahren für ihre Bestim-
23 mung, vielmehr steht eine Vielfalt von Methoden zur Verfügung. Dabei ist zu unterscheiden zwischen
24 Verfahren

- 25 ■ zur Berechnung der potentiellen bzw. maximal möglichen und tatsächlichen Verdunstung;
- 26 ■ für unterschiedliche zeitliche Auflösungen von Stunden- bis zu vieljährigen Mittelwerten;
- 27 ■ für Gewässer, unbewachsene Böden, landwirtschaftliche Kulturen, Waldbestände, versiegelte Flä-
28 chen, 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 potentiellen 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 setzen die existierenden Verfahren stets die erprobten – jeweils für die Aufstellung des Verfahrens vorgegebenen Datengegebenheiten voraus.

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 Bänden 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 Klimänderungen.

ISBN: 978-3-96862-561-4 (Print)
978-3-96862-562-1 (E-Book)

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA)

Theodor-Heuss-Allee 17 · 53773 Hennef
Telefon: +49 2242 872-333 · Fax: +49 2242 872-100
info@dwa.de · www.dwa.de