

# DWA-Regelwerk

## **Merkblatt DWA-M 504-1**

**Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen – Teil 1:  
Grundlagen, experimentelle Bestimmung der Landverdunstung,  
Gewässerverdunstung**

Juli 2018





# DWA-Regelwerk

## **Merkblatt DWA-M 504-1**

Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen – Teil 1:  
Grundlagen, experimentelle Bestimmung der Landverdunstung,  
Gewässerverdunstung

Juli 2018



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

### Herausgeber und Vertrieb:

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](mailto:info@dwa.de)  
Internet: [www.dwa.de](http://www.dwa.de)

### Satz:

Christiane Krieg, DWA

### Druck:

druckhaus köthen GmbH & Co KG

### ISBN:

978-3-88721-582-8 (Print)  
978-3-88721-583-5 (E-Book)

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier

© Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef 2018

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Merkblatts darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Digitalisierung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen werden.

## 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 darin 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 sollen die beiden Merkblätter DVWK-M 238/1996 und ATV-DVWK-M 504 weitgehend abgelöst werden. Anstoß dafür war zunächst die notwendige Überarbeitung des Merkblatts DVWK-M 238/1996 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 darüber hinaus zum Anlass genommen, die Merkblätter DVWK-M 238/1996 und ATV-DVWK-M 504 zu einem Merkblatt zusammenzuführen. Dies erfolgt aus Gründen des Umfangs in zwei Teilen, wobei das vorliegende Merkblatt Teil 1 entspricht:

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

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. Einige Verfahren, die in der wasserwirtschaftlichen Praxis Deutschlands keinerlei Bedeutung haben, sind hier nicht bzw. nicht mehr zu finden. Messverfahren, die ausschließlich Forschungszwecken dienen und dem Einsatz in der Praxis kaum zugänglich sind, werden nur in Form knapper Übersichten dargestellt und bezüglich ihrer Möglichkeiten und Probleme beleuchtet. Dagegen wird Messverfahren, die mit vertretbarem Aufwand in der Praxis selbst angewendet werden können oder die Grundlage für Berechnungsverfahren bilden, umfassender Aufmerksamkeit geschenkt. Besonderes Augenmerk wird auch auf die Vermittlung von Erfahrungen bei der Anwendung von Verfahren, auf praktische Fragestellungen sowie auf Beispiele und Richtwerte gelegt. Nicht zuletzt soll mit dem vorliegenden Merkblatt aktuellen Fragestellungen und Entwicklungen Rechnung getragen werden, so z. B. zur Ermittlung der Verdunstung unter Berücksichtigung von Klima- und Landnutzungsänderungen, innerhalb komplexer Modelle oder unter Einbeziehung von Fernerkundungsdaten.

Die DWA-Arbeitsgruppe ist sich 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 Ansätze erforderlich sein. Dafür soll das vorliegende Merkblatt Grundlage und Orientierungshilfe sein.

### Änderungen

Gegenüber dem Merkblatt ATV-DVWK-M 504 (09/2002) wurden im Merkblatt DWA-M 504-1 folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Aktualisierung und Zusammenführen der Merkblätter ATV-DVWK-M 504 (09/2002) und DVWK-M 238/1996 in die Merkblattreihe DWA-M 504;
- b) vollständige Umstrukturierung und Herausgabe in zwei Teilen: DWA-M 504-1 und DWA-M 504-2;
- c) umfangreichere Darstellungen: im vorliegenden ersten Teil DWA-M 504-1 unter anderem zu den Phänomenen und Prozessen der Verdunstung und zu ihrer Messung über Landflächen;
- d) im vorliegenden ersten Teil Darstellungen zur Bilanzierung des Energiehaushalts in einem eigenständigen Abschnitt;
- e) Anpassung an die europäische Normung und zwischenzeitlich eingetretene Veränderungen hinsichtlich Gesetzen und Verordnungen.

Die nachfolgende Liste der Verfasser besteht aus den aktuellen Mitgliedern der DWA-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 (Fachhochschule Nordostniedersachsen Suderburg), Dr. Dieter RICHTER (ehemals Deutscher Wetterdienst, Berlin), Prof. Dr. Gerd WESSOLEK (Technische Universität Berlin) und nicht zuletzt Dr. Ulrich WENDLING (ehemals Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M. und vorhergehender, langjähriger Sprecher der Arbeitsgruppe).

Die Arbeitsgruppe dankt Frau Silke Lorenz, Sekretärin der beiden Professuren Wasserwirtschaft und Hydrologie der Universität Rostock, für die redaktionelle Endbearbeitung des Merkblatts.

Rostock, im Mai 2018

Konrad Miegel  
Sprecher der Arbeitsgruppe

### Frühere Ausgaben

Merkblatt ATV-DVWK-M 504 (09/2002) (in Teilen)

Merkblatt DVWK-M 238/1996 (in Teilen)

Die Merkblätter DVWK-M 238/1996 und ATV-DVWK-M 504 sind weiterhin gültig und neben dem Merkblatt DWA-M 504-1 anzuwenden; sie werden erst mit Erscheinen des Merkblatts DWA-M 504-2 ungültig.

## Verfasser

Das Merkblatt wurde von der DWA-Arbeitsgruppe HW-1.2 „Verdunstung“ im DWA-Fachausschuss HW-1 „Quantitative Hydrologie“ erstellt, der folgende Mitglieder angehören:

BERNHOFER, Christian	Prof. Dr., Technische Universität Dresden
GEBAUER, Petra	Dipl.-Met., Berliner Wetterkarte e. V.
GÜNTHER, Reinhard	Dr., Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Lysimeterstation Buttstedt (bis 2014 stellv. Sprecher und Mitglied der Arbeitsgruppe)
HAFERKORN, Ulrike	Dr., Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Land- wirtschaft Sachsen, Lysimeterstation Brandis
KLÄMT, Adelheid	Dipl.-Met., Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeo- rologie, Außenstelle Berlin-Buch (bis 2014 Mitglied)
MENZEL, Lucas	Prof. Dr., Universität Heidelberg (bis 2015 Mitglied)
MIEGEL, Konrad	Prof. Dr., Universität Rostock (Sprecher und Obmann des Fachausschusses)
RÖTZER, Thomas	PD Dr., Technische Universität München
SCHMIDT, Thomas	Dipl.-Met., Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeo- rologie, Außenstelle Berlin-Buch
SEIDLER, Christina	Dr., Technische Universität Dresden, Internationales Hochschulinstitut Zittau
SPANK, Uwe	Dr., Technische Universität Dresden
ZIMMERMANN, Lothar	Dr., Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirt- schaft, Freising (ab 2014 stellv. Sprecher)

Als Gast hat mitgewirkt:

VOHLAND, Michael	Prof. Dr., Universität Leipzig
------------------	--------------------------------

Projektbetreuer in der DWA-Bundesgeschäftsstelle:

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

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>3</b>
<b>Verfasser</b> .....	<b>5</b>
<b>Bilderverzeichnis</b> .....	<b>8</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>10</b>
<b>Hinweis für die Benutzung</b> .....	<b>11</b>
<b>Einleitung</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Anwendungsbereich</b> .....	<b>12</b>
<b>2 Bedeutung und Einordnung der Verdunstung</b> .....	<b>12</b>
2.1 Globale Herausforderungen .....	12
2.2 Quantitative Einordnung der Verdunstung .....	14
<b>3 Phänomene und Prozesse</b> .....	<b>16</b>
3.1 Verdunstungskomponenten .....	16
3.2 Prozesse der Verdunstung .....	18
3.2.1 Die Verdunstung als physikalischer Vorgang .....	18
3.2.2 Biologische Einflüsse auf den Verdunstungsvorgang .....	21
3.2.3 Kopplung zwischen Wärme- und Wasserhaushalt .....	24
3.3 Zur Komplexität der Einflüsse auf den Verdunstungsvorgang .....	28
3.3.1 Einflussgrößen auf die Verdunstung .....	28
3.3.2 Tatsächliche, potenzielle und Gras-Referenzverdunstung .....	36
3.4 Aspekte der räumlichen und zeitlichen Variabilität .....	39
3.5 Besonderheiten der Verdunstung von landwirtschaftlichen Nutzflächen und Wäldern .....	42
<b>4 Zur Bilanzierung des Energiehaushalts</b> .....	<b>51</b>
4.1 Grundsätzliche Aspekte .....	51
4.2 Bestimmung von Größen der Strahlungsbilanz .....	52
4.3 Bestimmung von Größen der Energiebilanz .....	57
<b>5 Messverfahren der Verdunstung von Landflächen</b> .....	<b>58</b>
5.1 Wasserbilanzverfahren .....	58
5.1.1 Formen der Bilanzierung .....	58
5.1.2 Niederschlag und Niederschlagskorrektur .....	59
5.1.3 Lysimeter .....	64
5.1.4 Wassergehaltsbestimmung im Boden .....	69
5.1.5 Wasserbilanz von Einzugsgebieten (Hydrografische Methode) .....	77
5.2 Erfassung der Verdunstung als vertikaler Austauschvorgang in der bodennahen Luftschicht .....	79
5.2.1 Allgemeines .....	79
5.2.2 Eddykovarianzmethode (Turbulenzmethode) .....	79
5.2.3 Gradientenmethoden .....	83

5.2.4	Möglichkeiten der Ermittlung der Verdunstung auf der Grundlage von Fernerkundungsdaten .....	85
5.3	Pflanzenphysiologische Bestimmungsverfahren der Transpiration .....	90
5.3.1	Allgemeines .....	90
5.3.2	Messung von Transpirationsraten.....	90
5.3.3	Saftflussmessungen .....	92
5.3.4	Skalenwechsel Individuum – Bestand.....	94
5.4	Messung der Interzeption.....	96
5.4.1	Allgemeines .....	96
5.4.2	Messung des Freilandniederschlags .....	97
5.4.3	Messung des Bestandsniederschlags.....	98
5.4.4	Messung von Nebelniederschlag .....	102
<b>6</b>	<b>Bestimmung der Verdunstung von Gewässern .....</b>	<b>103</b>
6.1	Einordnung der Gewässerverdunstung.....	103
6.2	Experimentelle Bestimmung durch Floßverdunstungskessel .....	104
6.3	Besonderheiten der Bilanzierung des Wärmehaushalts von Gewässern .....	106
6.4	Berechnungsverfahren.....	110
6.4.1	Bestimmung der Temperatur der Gewässeroberfläche.....	110
6.4.2	Energiebilanzverfahren .....	113
6.4.3	Kombinationsverfahren .....	115
6.4.4	Empirische Berechnungsverfahren .....	116
6.5	Ergebnisse empirischer Berechnungsansätze .....	119
6.6	Verdunstung von Salzwasser .....	121
	<b>Anhang A Symbole und Abkürzungen.....</b>	<b>123</b>
A.1	Abkürzungen.....	123
A.2	Symbole .....	123
	<b>Anhang B Übersichtstabellen zu Albedo und Verdunstungsberechnung.....</b>	<b>128</b>
	<b>Quellen und Literaturhinweise .....</b>	<b>131</b>

## Bilderverzeichnis

Bild 1:	Komponenten der Verdunstung; nicht dargestellt ist die Evaporation von Gewässern .....	17
Bild 2:	Jährliche Verdunstung verschiedener Landnutzungskategorien, gültig für untere deutsche Mittelgebirgslagen, Jahresniederschläge von 700 mm bis 800 mm und $nFK$ von 140 mm bis 170 mm.....	23
Bild 3:	Schematische Veranschaulichung der Größen des Bodenwasserhaushalts ohne laterale Flüsse im Boden und an der Bodenoberfläche .....	25
Bild 4:	Schematische Veranschaulichung der Größen des Bodenwärmehaushalts ohne laterale Flüsse in Boden und Atmosphäre.....	26
Bild 5:	Abhängigkeit des Saftflusses und damit der Transpiration von Sonnenblumen von der Strahlung während einer strahlungsreichen Periode im Juli 2000 .....	30
Bild 6:	Zusammenhang zwischen Bestandswiderstand $r$ und Bodenfeuchte für einen Winterweizen-, Mais- und Sonnenblumenbestand – experimentell ermittelt an der Zittauer Ökologischen Forschungsstation ZÖF.....	32
Bild 7:	Abhängigkeit des Bestandswiderstands $r_c$ vom Blattflächenindex $LAI$ bei einem Sonnenblumenbestand im Jahr 2000 – ermittelt aus Lysimetermessungen an der Zittauer Ökologischen Forschungsstation ZÖF.....	32
Bild 8:	Veränderung der potenziellen und tatsächlichen Verdunstung bei großflächiger Bewässerung mit zunehmender Wasserverfügbarkeit .....	37
Bild 9:	Tagesverläufe meteorologischer, pflanzenphysiologischer, bodenphysikalischer und hydrologischer Messgrößen im Einzugsgebiet Wernersbach/Sachsen für niederschlagsfreie Strahlungstage (Messungen der pflanzenphysiologischen Größen an 90-jährigen Fichten).....	40
Bild 10:	Mittlere Wasserbilanz aller Lysimeter an der Lysimeterstation Groß Lüsewitz im Zeitraum 1972 bis 2011.....	41
Bild 11:	Beispiel für einen Tagesgang von Lufttemperatur ( $T_c$ ), Globalstrahlung ( $R_g$ ), Luftfeuchte ( $U$ ), Windgeschwindigkeit ( $v$ ) und tatsächlicher Verdunstung ( $ET_a$ ) von Wintergerste an einem strahlungsreichen Tag mit nicht (tiefgründiger Löss) und stark (Sandboden) limitierend wirkender Wasserverfügbarkeit – gemessen an der Lysimeterstation Brandis am 30. Mai 2008.....	41
Bild 12:	Dekadenwerte der berechneten Gras-Referenzverdunstung $ET_0$ im Vergleich zur gemessenen Verdunstung $ET_a$ einer landwirtschaftlich genutzten Fläche für Zuckerrüben, Lysimeterstation Großobringen, Januar bis Dezember 1988 .....	43
Bild 13:	An wägbaren Lysimetern in Brandis gemessene tägliche Verdunstungshöhen $ET_a$ von Winterweizen im Zeitraum vom 01. Juni bis 31. Juli 2013 für verschiedene Bodenbedingungen in Relation zur Höhe der Gras-Referenzverdunstung $ET_0$ .....	46
Bild 14:	Jahresgang der Energiebilanzkomponenten eines Waldstandorts (ca. hundertjährige Fichten) und deren jährliche Mittelwerte aus direkten mikrometeorologischen Messungen aller Komponenten an der Ankerstation Tharandter Wald .....	50
Bild 15:	Zonen mit einheitlicher Niederschlagskorrektur für Mittelwerte der Niederschlagshöhe nach RICHTER (1995).....	62
Bild 16:	Lysimeter und Umgebungsfläche der Station Brandis/Sachsen mit Winterweizen .	65
Bild 17:	Verlauf von Niederschlag $P$ , Änderung des Bodenwasserspeichers $S$ , Versickerung $R$ , tatsächliche und potenzielle Verdunstung $ET_a$ und $ET_p$ und Ausschöpfungstiefe $We$ eines Braunerde-Pseudogley mit Winterraps (2003) und Winterweizen (2004) am Standort Brandis auf der Basis von Dekadenwerten.....	66
Bild 18:	Wägbares Lysimeter mit zusätzlichen Messeinrichtungen, Station Brandis/ Sachsen.....	68

Bild 19:	Verteilung von Gravitations-, Matrix- und Gesamtpotenzial im Boden unter Verdunstungsbedingungen.....	72
Bild 20:	Änderung der Bodenfeuchte im Profil während einer Austrocknungsperiode.....	73
Bild 21:	$ETa$ berechnet aus Lysimetermessungen und dem Bodenfeuchteentzug für einen Sonnenblumenbestand im Jahr 2000.....	77
Bild 22:	links: EC-System mit offenem Messpfad für Wasserdampf und $CO_2$ ; rechts: Gasanalysator mit geschlossenem Messpfad für Wasserdampf und $CO_2$ ; beide Messstationen der Professur für Meteorologie der TU Dresden.....	81
Bild 23:	Jahressummen der mit der EC-Methode direkt gemessenen Verdunstung $ET$ , der Restgliedverdunstung $ET_{rest}$ , der schließungslückenkorrigierten Verdunstung $ET_{korrr}$ , des Wasseräquivalents der verfügbaren Energie $AE$ und des korrigierten Niederschlags $P_{korrr}$ für Fichte und Grasland 2005 – 2011.....	82
Bild 24:	BREB-System nach BERNHOFER et al. (1992) mit 2 aspirierten Psychrometern, Strahlungsbilanz- und Globalstrahlungsmesser über einem landwirtschaftlichen Bestand (Sojabohnen).....	84
Bild 25:	Küvette (offenes Messsystem) mit eingeschlossenem Blatt in einem Maisbestand, Zittauer ökologische Forschungsstation 2002.....	91
Bild 26:	Stundenwerte der Gesamtverdunstung $ETa$ bzw. der Transpiration eines Maisbestands, gemessen mit einem wägbaren Lysimeter und einem Küvettensystem.....	92
Bild 27:	Saftflussmesssystem für krautige Pflanzen (Manschette) an einem Maisstängel, Zittauer Ökologische Forschungsstation 2002.....	93
Bild 28:	Komponenten der Interzeption in einem Waldbestand.....	96
Bild 29:	Messung der Kronentraufe und des Stammabflusses in einem Buchen-Eichen-Mischbestand (Waldklimastation Freising).....	99
Bild 30:	Kippschalenwaage zur Messung des Stammabflusses.....	100
Bild 31:	Floßverdunstungskessel auf dem Stechlinsee (Nahansicht).....	105
Bild 32:	Floßverdunstungskessel auf dem Stechlinsee (Gesamtansicht).....	105
Bild 33:	Kannenmessung der Wasserstandshöhe und Temperaturmessung in einem Floßverdunstungskessel auf dem Stechlinsee.....	106
Bild 34:	Vertikale Verteilung der Wassertemperatur und der Sprungschichttiefe (Obergrenze) in ausgewählten Monaten, Stechlinsee, Mittelwerte 1991 – 2001.....	108
Bild 35:	Mittlerer Jahresgang der Strahlungs- und Wärmebilanzkomponenten des Stechlinsees mit einer mittleren Tiefe von 23 m, Zeitreihe 1991 – 2001.....	108
Bild 36:	Mittlerer Jahresgang der Strahlungs- und Wärmebilanzkomponenten eines 2 m tiefen Sees im Stechlinseegebiet, Zeitreihe 1991 – 2001.....	109
Bild 37:	Mittlere Jahresgänge der Wasseroberflächentemperatur eines flachen Sees, eines tiefen Sees und der Lufttemperatur; Stechlinseegebiet, 1991 – 2001.....	112
Bild 38:	Mittlerer Jahresgang von Wasseroberflächentemperatur und gewichteter Mitteltemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur, Stechlinsee, 1991 – 2001.....	114
Bild 39:	Mittlerer Jahresgang der berechneten Verdunstungshöhen von Seen unterschiedlicher mittlerer Wassertiefe, Zeitreihe Potsdam 1961 – 1990; Vergleichsgröße: Niederschlagshöhe (korrigiert um den systematischen Messfehler).....	120
Bild 40:	Mittlere jährliche Verdunstungs- und Bilanzhöhe der Gewässeroberfläche in mm, Zeitreihe 1961 – 1990.....	120

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Wasserverbrauch und Wasserausnutzung landwirtschaftlicher Fruchtarten auf drei Böden mit unterschiedlichem Wasserspeichervermögen bei gleichen Bewirtschaftungs- und Umweltbedingungen, Lysimeterstation Brandis .....	45
Tabelle 2:	Anteil der tatsächlichen Evapotranspiration $ET_a$ und der Versickerung $SW$ am Gesamtniederschlag $P$ bei Feldfrüchten und Gemüse auf einer tiefgründigen Löss-Braunschwarzerde .....	47
Tabelle 3:	Wasserverbrauch von landwirtschaftlichen Kulturen und beregnetem Feldgemüse im Zeitraum von Aufgang bzw. Pflanzung bis Ernte auf einer Löss-Schwarzerde .....	48
Tabelle 4:	Jahresgang der Koeffizienten zur Berechnung der Globalstrahlung mit den Gl. (17) bzw. (18), Koeffizienten $a$ und $b$ nach WENDLING (1992), $a'$ und $b'$ nach SCHÖNE (1981) .....	53
Tabelle 5:	Jahresgang der Albedo von freien Wasserflächen und des Bedeckungskoeffizienten $k_N$ nach RICHTER (1988), der in Gl. (29) zur Anwendung kommt .....	55
Tabelle 6:	Spezifische Koeffizienten $k_i$ der Gl. (28) für verschiedene Wolkenarten.....	56
Tabelle 7:	Angaben zum relativen mittleren Niederschlagsmessfehler $f_p$ des Hellmann-Niederschlagsmessers in Prozent für unterschiedliche Regionen Deutschlands sowie in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der Geschüttheit der Messstation (nach RICHTER 1995) .....	61
Tabelle 8:	Koeffizienten $b$ und $\varepsilon$ der Niederschlags-Korrekturfunktion in Abhängigkeit von Niederschlagsart, Horizontabschirmung und Geschüttheit der Lage.....	63
Tabelle 9:	Verdunstungsbeeinflusste Bodenzone $h_{ET}$ , Kapillarwasserzone $h_K$ und notwendige Tiefe des Lysimeters $h_L$ .....	67
Tabelle 10:	Beispiele kapillarer Aufstiegsraten $KR$ in $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ .....	75
Tabelle 11:	Effektive Durchwurzelungstiefe ( $We$ ) in dm bei mehrjährigen forstlichen Nutzpflanzen. Als unterste Grenze der $We$ gilt der Grundwassertiefstand bzw. die Obergrenze des Stauhizonts .....	76
Tabelle 12:	Exemplarische Messgeräte zur Bestimmung der Verdunstung nach der EC-Methode .....	81
Tabelle 13:	Messgeräte zur Bestimmung der Verdunstung nach der BREB-Methode (Wiese).....	84
Tabelle 14:	Koeffizienten $p$ und $q$ der Temperaturfunktion nach Gl. (72) in der eisfreien Jahreszeit .....	112
Tabelle 15:	Auswahl an empirisch abgeleiteten Berechnungsformeln für die Verdunstung freier Wasserflächen $E_w$ in $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ , entwickelt bzw. erprobt im Klimaraum Deutschland.....	117
Tabelle 16:	Veränderung von Gewässerparametern des Toten Meeres im Vergleich verschiedener Perioden nach STANHILL (1994), aus VIETINGHOFF (2000).....	122
Tabelle B.1:	Albedo unterschiedlicher Oberflächen.....	128
Tabelle B.2:	Kurzweilige Albedo von Wasserflächen .....	128
Tabelle B.3:	Temperaturabhängige Größen zur Verdunstungsberechnung .....	129

## 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 über 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 realen Verdunstung;
- für unterschiedliche zeitliche Auflösungen von Stunden- bis zu langjährigen Mittelwerten;
- für Gewässer, unbewachsene Böden, landwirtschaftliche Kulturen, Waldbestände, versiegelte Flächen, Schneeoberflächen, Deponien und andere Landnutzungsformen;