

ATV-DVWK- REGELWERK

**Merkblatt
ATV-DVWK-M 504**

**Verdunstung in Bezug
zu Landnutzung, Bewuchs
und Boden**

September 2002
ISBN 3-936514-03-8



Vertrieb: GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V.
Theodor-Heuss-Allee 17 • D-53773 Hennef
Tel. 0 22 42 / 8 72-120 • Fax 0 22 42 / 8 72-100
E-Mail: vertrieb@gfa-verlag.de • Internet: <http://www.gfa-verlag.de>

BITTE BEACHTEN!

Merkblatt ATV-DVWK-M 504

Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden

September 2002



Hinweis des Herausgebers:

Das Merkblatt ATV-DVWK-M 504 wird zurzeit überarbeitet und zusammen mit dem Merkblatt DVWK-M 238/1996 „Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen“ in die Merkblattreihe DWA-M 504 überführt. Aufgrund der neuen Struktur der Merkblattreihe DWA-M 504 werden die Inhalte beider Merkblätter thematisch den einzelnen Merkblattteilen zugewiesen. In dem im Juli 2018 veröffentlichten Merkblatt DWA-M 504-1 werden die Grundlagen, die experimentelle Bestimmung der Landverdunstung und die Gewässerverdunstung beschrieben. Der in Vorbereitung befindliche Teil 2 beschreibt Berechnungsmethoden, Modellierung und Anwendungsfälle. Die Merkblätter ATV-DVWK-M 504 (September 2002) und DVWK-M 238/1996 sind weiterhin gültig und neben dem Merkblatt DWA-M 504-1 anzuwenden; sie werden erst mit Erscheinen des Merkbllatts DWA-M 504-2 ungültig.

Benutzerhinweis

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

Jedermann steht die Anwendung des Merkblattes 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.

Das Länderfinanzierungsprogramm Wasser und Boden hat das Vorhaben finanziell gefördert.

Die Deutsche Bibliothek - CIP - Einheitsaufnahme

ATV-DVWK, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall:
ATV-DVWK-Regelwerk / ATV-DVWK, Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. – Hennef
GFA, Ges. zur Förderung der Abwassertechnik.

Früher u.d.T.: Abwassertechnische Vereinigung: ATV-Regelwerk

Merkblatt

M 504. Verdunstung in Abhängigkeit von Landnutzung, Bewuchs und Boden. – 2002

ISBN 3-936514-03-8

Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, ATV-DVWK, ist in Deutschland Sprecher für alle übergreifenden Wasserfragen und setzt sich intensiv für die Entwicklung einer sicheren und nachhaltigen Wasserwirtschaft ein. Als politisch und wirtschaftlich unabhängige Organisation arbeitet sie fachlich auf den Gebieten Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall und Bodenschutz.

In Europa ist die ATV-DVWK die mitgliederstärkste Vereinigung auf diesem Gebiet und nimmt durch ihre fachliche Kompetenz bezüglich Normung, Beruflicher Bildung und Information der Öffentlichkeit eine besondere Stellung ein. Die rund 16.000 Mitglieder repräsentieren die Fachleute und Führungskräfte aus Kommunen, Hochschulen, Ingenieurbüros, Behörden und Unternehmen.

Der Schwerpunkt ihrer Tätigkeiten liegt auf der Erarbeitung und Aktualisierung eines einheitlichen technischen Regelwerkes sowie der Mitarbeit bei der Aufstellung fachspezifischer Normen auf nationaler und internationaler Ebene. Hierzu gehören nicht nur die technisch-wissenschaftlichen Themen, sondern auch die wirtschaftlichen und rechtlichen Belange des Umwelt- und Gewässerschutzes.

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

Herausgeber: ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.,
Theodor-Heuss-Allee 17, 53773 Hennef

Vertrieb: GFA - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V., Hennef

Satz und Druck: Druckpartner Moser, Rheinbach

© ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, 2002

Vorwort

Das Wasser wird immer knapper auf der Erde, obwohl von den Ressourcen nichts verloren gehen kann. Der globale Wasserverbrauch ist in den letzten 100 Jahren auf das Sechsfache angestiegen, doppelt so stark wie die Weltbevölkerung. Immer größere Anstrengungen sind erforderlich, um die Menschen mit Trinkwasser zu versorgen, um die Bewässerung in der Landwirtschaft zu sichern und um der Industrie die erforderlichen Wassermengen bereitzustellen. Die im Jahr 1998 in Stockholm gegründete Welt-Wasser-Kommission kommt in ihrem neuesten Bericht „World Water Vision“ zu ernüchternden Ergebnissen. Selbst unter optimistischen Vorgaben wird auf der ganzen Erde der Wasserverbrauch und damit der Wassermangel deutlich zunehmen.

Um in der Nahrungsmittelproduktion annähernd mit dem Bevölkerungswachstum Schritt halten zu können, werden zwei Drittel des verfügbaren Wassers weltweit zur künstlichen Bewässerung auf den Feldern verbraucht. Durch vorzeitige Verdunstung geht dabei oft ein großer Teil des Wassers verloren, ohne für das Pflanzenwachstum wirksam zu werden. Auf dem zweiten Weltwasserforum im März 2000 in Den Haag wurde daher ausdrücklich die Notwendigkeit betont, in der Landwirtschaft nach dem Motto „more crop per drop“ die Effizienz der Wassernutzung zu erhöhen (BRINGEWSKI, 2000). Ziel ist es, Verfahren zur Erhöhung des Anteils der „produktiven Verdunstung“ zu entwickeln, um bei minimaler Zusatzbewässerung möglichst hohe Ernteerträge zu erzielen.

Wesentliche Auswirkungen haben die Landnutzung und ihre Veränderungen auf die Verdunstungshöhe eines Standortes, beispielsweise die zunehmende Versiegelung des Bodens durch Bebauung und Verkehrsflächen auf Kosten des Waldes. In bebauten Gebieten ist zwar die Verdunstung geringer, aber die Niederschläge fließen in der Regel rascher ab, weil die Bodenspeicherung fehlt. Auf dem Umweltgipfel in Rio 1992 hat sich die Bundesrepublik Deutschland dazu verpflichtet, die Versiegelung un bebauter Landflächen entscheidend zu reduzieren. Trotzdem verschwinden noch heute täglich ca. 120 Hektar natürlicher Bodenfläche durch die Errichtung von Bauwerken aller Art, das sind rd. 450 km² im Jahr (RAUTERBERG, 2000). Klimaforscher erwarten, dass die anthropogenen Veränderungen der Landnutzung und der CO₂-Anstieg in der Atmosphäre das globale Klima verändern. Für Mitteleuropa bedeutet das zumeist ansteigende Temperaturen, was auf eine Zunahme der Verdunstung und eine Änderung der innerjährlichen Verteilung der Niederschläge schließen lässt. Aller Voraussicht nach beschleunigen diese Vorgänge den globalen Wasserkreislauf. Das hätte erhebliche Änderungen in den regionalen Wasserressourcen zur Folge und würde den oben dargestellten Konflikt zwischen Wasserbedarf und -verfügbarkeit noch verschärfen.

In dieser Situation werden zuverlässige, quantitative Angaben zu den Wasserhaushaltsgrößen benötigt, insbesondere zu ihrem zeitlichen Verhalten. Die wichtige Verlustgröße in diesem Prozess — die von jedem Quadratmeter der Erdoberfläche verdunstende Wassermenge — kann in der Regel nicht flächendeckend und kontinuierlich gemessen werden, der Aufwand wäre zu groß. Inzwischen liegen verschiedene validierte Verdunstungsberechnungen vor, die zeigen, dass in Mitteleuropa bis zu drei Viertel des Niederschlagsdarbgebots durch Verdunstung wieder verloren gehen. Diese Angaben schwanken allerdings je nach Landnutzung, Bewuchs, Orographie und Bodenverhältnissen sowie auch im innerjährlichen Gang erheblich.

Defizite im Verständnis des Verdunstungsprozesses sowie das Fehlen einer systematischen Darstellung von Verfahren zu ihrer Messung und rechnerischen Abschätzung veranlassten den Deutschen Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), in einem Fachausschuss das Merkblatt Nr. 238/1996 „Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen“ erarbeiten zu lassen (DVWK, 1996). Die Zusammenhänge zwischen Landnutzung und Verdunstung konnten dort aus konzeptionellen Gründen nur in knapper Form diskutiert werden. Ihre umfassende Darstellung ist Gegenstand des vorliegenden Merkblattes. Fragen der Gewässerverdunstung werden nicht erneut behandelt, hier hat sich der Wissensstand nicht wesentlich geändert. Durch die Beteiligung von Fachleuten verschiedener Richtungen war es möglich, einen weiten

Bereich von Landnutzungs- und Vegetationseinflüssen zu behandeln. Neben den methodischen Werkzeugen und ihrer praktischen Anwendung werden auch die entsprechenden wissenschaftlichen Grundlagen und zahlreiche Literaturstellen angeführt. Sie sollen den Zugang zu vertiefenden Arbeiten, die nach Möglichkeit auch künftig von der Arbeitsgruppe unterstützt bzw. vorangetrieben werden, erleichtern.

Offenbach am Main, im April 2002

Ulrich Wendling
Sprecher der Arbeitsgruppe

Verfasser

An dem vorliegenden Merkblatt haben in der Arbeitsgruppe „Verdunstung“ der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK) mitgewirkt:

BERNHOFER, Christian	Prof. Dr., Technische Universität Dresden
GLUGLA, Gerhard	Dr., Bundesanstalt für Gewässerkunde, Abteilung Berlin
GOLF, Walter	Dr.-Ing. habil., Technische Universität Dresden
GÜNTHER, Reinhard	Dr., Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft Jena
JANKIEWICZ, Petra	Dipl.-Met., Bundesanstalt für Gewässerkunde, Abteilung Berlin
KLÄMT, Adelheid	Dipl.-Met., Deutscher Wetterdienst, Außenstelle Berlin
MENZEL, Lucas	Dr., Potsdam Institut für Klimafolgenforschung
MIEGEL, Konrad	Prof. Dr., Universität Rostock
OLBRISCH, Heinz-Dieter	Prof. Dr.-Ing., Fachhochschule Nordostniedersachsen Suderburg
WENDLING, Ulrich	Dr., Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M.

Die Autoren sind Herrn Prof. Dr. Gerd Wessolek (Technische Universität Berlin) für wertvolle Anregungen und Hinweise dankbar.

Inhalt

Vorwort	3
Inhalt	5
Verzeichnis der Tabellen, Bilder und Beispiele	8
Definitionen — Begriffe, Symbole, Einheiten und Abkürzungen	14
1 Anwendungsbereich	19
1.1 Vorbemerkungen.....	19
1.1.1 Verdunstung als Wasserhaushaltsgröße	19
1.1.2 Messung der Verdunstung	21
1.2 Zielsetzung.....	23
1.2.1 Zur Problematik des Begriffes „potentielle Verdunstung“.....	23
1.2.2 Verdunstungsberechnung auf der Grundlage der Gras-Referenzverdunstung	24
1.2.3 Modelle zur Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung	25
1.3 Geltungsbereich der Relationen Verdunstung — Landnutzung.....	26
2 Grundlagen zur Dynamik des Wasserhaushaltes in Abhängigkeit von der Landnutzung	27
2.1 Einflussfaktoren auf die Dynamik des Wasserhaushaltes	27
2.2 Spezielle Aspekte des Wasserhaushaltes von Waldflächen	29
2.3 Besonderheiten des Wasserhaushaltes unter den Bedingungen landwirtschaftlicher Nutzung.....	33
2.4 Die Rolle der Interzeption bei Wasserhaushaltsbetrachtungen	37
2.5 Besonderheiten des Wasserhaushaltes unter globalen Gesichtspunkten	40
3 Ermittlung der weitgehend von der Landnutzung unabhängigen Grundgrößen des Wasserhaushaltes	44
3.1 Korrigierte Niederschlagshöhen.....	44
3.1.1 Problemstellung	44
3.1.2 Methodische Grundlagen des Korrekturverfahrens für den Niederschlagsmesser nach Hellmann.....	45
3.1.3 Größenordnung und regionale Verteilung der Korrekturwerte in Deutschland	46
3.2 Niederschlagsmessungen an Lysimeterstationen.....	50
3.3 Gras-Referenzverdunstung.....	53
3.3.1 Penman-Monteith-Beziehung als Grundlage des Verfahrens.....	53
3.3.2 Definition der Gras-Referenzverdunstung	53
3.3.3 Berechnung der Gras-Referenzverdunstung	54
3.3.4 Regionale Angaben zur Höhe der Gras-Referenzverdunstung in Deutschland.....	56
3.3.5 Gras-Referenzverdunstung und gemessene Verdunstung.....	57

4	Abgeleitete Größen zur Ermittlung der Verdunstung	59
4.1	Von der Landnutzung weitgehend unabhängige Größen zur Verdunstungsermittlung.....	59
4.1.1	Klimatische Wasserbilanz und ihre regionalen Besonderheiten	60
4.1.1.1	Jahreswerte und Jahresgang der klimatischen Wasserbilanz im Norddeutschen Tiefland ..	61
4.1.1.2	Jahreswerte und Jahresgang der klimatischen Wasserbilanz im Mittelgebirge und im Alpenraum.....	62
4.1.2	Häufigkeitsangaben zu den abgeleiteten Wasserhaushaltsgrößen, die weitgehend unabhängig von der Landnutzung sind.....	64
4.2	Von Landnutzung und Boden abhängige Größen zur Verdunstungsermittlung.....	66
5	Verfügbare regionale Daten zur Landnutzung und zum Boden	69
5.1	Die CORINE-Landnutzungsdaten.....	69
5.1.1	Inhalt der CORINE-Landnutzungsdaten	69
5.1.2	Parameterangaben zu den Landnutzungsklassen der CORINE-Daten.....	71
5.2	Die Bodentypen-Datei BÜK 1000.....	74
5.2.1	Inhalt der Bodentypen-Datei BÜK 1000.....	74
5.2.2	Der Boden und seine Eigenschaften.....	74
5.2.3	Übersicht über die Bodendatei und die landnutzungsabhängige Profildatei zur Bodenkarte BÜK 1000	76
6	Beziehungen zwischen Landnutzung und Verdunstung	80
6.1	Landnutzungsabhängige maximale Verdunstung	80
6.1.1	Bestimmung der maximalen Verdunstung von landwirtschaftlichen Beständen und von Grünland	80
6.1.2	Bestimmung der maximalen Verdunstung von vegetationslosen und versiegelten Flächen	82
6.1.3	Bestimmung der maximalen Verdunstung von Wald	82
6.1.4	Bestimmung der maximalen Verdunstung in Einzugsgebieten der Kammlagen.....	82
6.2	Tatsächliche Verdunstung in Abhängigkeit von Landnutzung und Bodenwasserspeicher....	85
6.2.1	Ermittlung der tatsächlichen Verdunstungshöhe aus maximaler Verdunstung und Wasserverfügbarkeit in Tagesschritten	85
6.2.2	Mittlerer Jahresgang der tatsächlichen Verdunstung	88
7	Berechnung der mittleren jährlichen tatsächlichen Verdunstung unter Berücksichtigung von Landnutzung und Boden	91
7.1	Die Bagrov-Glugla-Beziehung als Berechnungsgrundlage der mittleren Jahressummen der tatsächlichen Verdunstungshöhe	91
7.2	Berechnungsgang.....	93
7.2.1	Ermittlung der Faktoren zur Berechnung der mittleren jährlichen maximalen Verdunstung	96
7.2.2	Ermittlung des Effektivparameters n der Bagrov-Beziehung	96
7.2.3	Berücksichtigung der kapillaren Aufstiegsrate	97
7.2.4	Berechnung der mittleren jährlichen Verdunstungshöhe und der Abflusshöhe.....	97
7.3	Berechnungsbeispiele.....	98

8	Weitere Verfahren zur Berechnung der landnutzungsspezifischen Verdunstung	101
8.1	Berechnung der mittleren monatlichen Verdunstung mittels landnutzungsspezifischer Funktionen, abgeleitet aus der Penman-Monteith-Beziehung	101
8.2	Empirische Modelle zur Berechnung der Verdunstung.....	106
8.3	Faktoren zur Steuerung der Berechnung von Gemüse und Feldbeständen	109
8.4	Ermittlung der Gebietsverdunstung mit Fernerkundungsverfahren	114
9	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die Anwendung in der Praxis	115
10	Literatur	117
Anhänge:.....		125
A	Anforderungen an Lysimeteranlagen zur Bestimmung des Wasser- und Nährstoffhaushaltes und erforderliche zusätzliche Beobachtungen	126
B	Programm LYDIA zur Datenanalyse von Messungen mit wägbaren Lysimetern.....	133
C	Ergänzende Berechnungsformeln für Verdunstungsmodelle.....	138
D	Landnutzungsabhängige Parameter bzw. Berechnungsgleichungen für das Wasserhaushaltsverfahren BAGLUVA (GLUGLA u. a., 2002)	141

Verzeichnis der Tabellen, Bilder und Beispiele

Tabelle 1.1	Mittlere jährliche Verdunstungshöhen nach verschiedenen Berechnungsverfahren, entnommen aus Kartenwerken für das untere Main-Gebiet zwischen Frankfurt/M., Offenbach und Hanau.....	23
Tabelle 2.1	Zustandsgrößen der oberen, verdunstungsbeeinflussten Bodenschicht und ihr Einfluss auf den Wasserhaushalt	29
Tabelle 2.2	Mittlere jährliche Interzeptions- und Gesamtverdunstung (E_{Ta} bzw. E_I) sowie Sickerwasserhöhe von Kiefern- und Buchenbeständen in unterschiedlichen Wuchsstadien, nordostdeutsches Tiefland, Finowtaler Sandbraunerde, mittlere jährliche Niederschlagshöhe 620 mm/a (nach MÜLLER, 1999)	33
Tabelle 2.3	Wasserverbrauch und Wasserausnutzung landwirtschaftlicher Fruchtarten auf drei Böden mit unterschiedlichem Wasserspeichervermögen bei gleichen Umwelt- und Bewirtschaftungsbedingungen, Lysimeteranlage Brandis	35
Tabelle 2.4	Anteil der aktuellen Evapotranspiration (E_{Ta}) und der Versickerung (SW) am Gesamtniederschlag (P) bei Feldfrüchten und Gemüse auf einer tiefgründigen Löß-Braunschwarzerde (Lysimeterstation Großobringen, ROTH u. a., 1984)	36
Tabelle 2.5	Wasserverbrauch von landwirtschaftlichen Kulturen und beregnetem Feldgemüse im Zeitraum von Aufgang bzw. Pflanzung bis Ernte auf einer Löß-Schwarzerde (Lysimeterstation Großobringen).....	37
Tabelle 2.6	Mittels Lysimeter gemessene Evapotranspiration E_{Ta} , modellierte Interzeptionsverdunstung E_I und deren prozentuale Anteile an Niederschlag P und Verdunstung E_{Ta} in %, Forschungsgebiet Rietholzbach, Schweiz, Wiesenbestand (MENZEL, 1997)	38
Tabelle 2.7	Regionale Verteilung des Wasserdargebotes der Erde und der Wassernutzung im Jahr 1990 (nach WOLFF, 1996).....	40
Tabelle 2.8	Beitrag der Bewässerungslandwirtschaft zur Nahrungsmittelerzeugung in den drei Ländern mit dem höchsten Anteil bewässerter Flächen an der landwirtschaftlichen Nutzfläche (nach HOFF, 1998)	41
Tabelle 3.1	Koeffizienten b und ε der Niederschlags-Korrekturfunktion in Abhängigkeit von der Niederschlagsart, der Horizontabschirmung und der Geschütztheit der Lage (nach RICHTER, 1995).....	45
Tabelle 3.2	Lufttemperatur-Grenzwerte zur Unterscheidung der Niederschlagsarten	46
Tabelle 3.3	Bewertungsrahmen für die Lage von Niederschlagsmessstellen	46
Tabelle 3.4	Jahresgang des mittleren prozentualen Niederschlagsmessfehlers, gebietsweise zusammengefasst, Stationslage a (frei), b (leicht geschützt), c (mäßig geschützt), d (stark geschützt), nach RICHTER (1995)	48
Tabelle 3.5	Korrektur der im Bodenniveau gemessenen täglichen Niederschlagshöhen P_0 (nach RICHTER, 1997).....	51
Tabelle 3.6	Auswirkung unterschiedlich bestimmter (z. T. korrigierter) Niederschlagshöhen (fünf Varianten) auf die daraus bilanzierte Verdunstung E_{Ta} bei täglicher Messung von P und ΔW , Station Brandis, $E_{Ta} = P - \Delta W$	52
Tabelle 3.7	Vergleich der Berechnungen der Gras-Referenzverdunstung nach den Gleichungen (3.3) und (3.6), Mittel für 24 Stationen	55

Tabelle 3.8	Sensitivität der landnutzungsabhängigen Einflussgrößen aus der Penman-Monteith-Beziehung, die bei der Berechnung der Gras-Referenzverdunstung ET_0 nicht berücksichtigt worden sind, zugelassene Toleranz von $\pm 5\%$ der ET_0	58
Tabelle 4.1	Mittlere Jahreswerte der klimatischen Wasserbilanz KWB bei Verwendung verschiedener Berechnungsverfahren der potentiellen Verdunstung ET_p , Station Potsdam, Reihe 1961-1990	60
Tabelle 4.2	Mittelwerte der klimatischen Wasserbilanz $KWB = P_{\text{korr}} - ET_0$ in mm für das Jahr und die hydrologischen Halbjahre Winter (Nov-Apr) und Sommer (Mai-Okt) in ausgewählten Regionen Deutschlands, Zeitreihe 1961-1990.....	61
Tabelle 4.3	Höhenverteilung der bearbeiteten 200 Klimastationen mit 30-jährigen Reihen.....	64
Tabelle 5.1	Gliederung der CORINE Land Cover-Daten der Bodenbedeckung bzw. Landnutzung für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland und Flächenanteile der einzelnen Gliederungen (Statistisches Bundesamt Wiesbaden, Datenerhebungsanleitung zu CORINE, Oktober 1994)	70
Tabelle 5.2	Zusammenfassung der CORINE-Daten in 12 Klassen und Schneebedeckung (bei jahreszeitlich differierenden Flächenanteilen) A = bebaute Flächen; B = landwirtschaftliche Flächen; C = Wälder und naturnahe Flächen; D = Feucht- und Wasserflächen	71
Tabelle 5.3	Anbaustruktur der landwirtschaftlichen Kulturen auf den Ackerflächen Deutschlands (Differenzierung der Klasse B 1 „Ackerflächen“ aus Tabelle 5.2)	71
Tabelle 5.4	Parameterliste zu den aus den CORINE-Daten abgeleiteten 12 Landnutzungsklassen und der zeitweiligen Schneedecke (Sommer-, Winterhalbjahr)	73
Tabelle 5.5	Angaben zum minimalen Bestandeswiderstand $r_{c, \text{min}}$ nach verschiedenen Autoren	74
Tabelle 5.6	Korngrößendurchmesser der Hauptbodenarten und der zugeordneten Böden.....	75
Tabelle 5.7	Angaben zur Größenordnung der nutzbaren Feldkapazität ohne Berücksichtigung des Kapillaraufstieges aus dem Grundwasser, nach DVWK (1999)	76
Tabelle 5.8a	Zuordnung der Bodeneinheiten der BÜK 1000 (Legendeneinheiten Nr. 1 bis 72) zu Bodenregionen und ihre Flächenanteile in Deutschland	77
Tabelle 5.8b	Mittlere Werte und Extreme des Wasservorrates bei Feldkapazität W_{FK} (bis 1 m Tiefe), der effektiven Durchwurzelungstiefe z_{We} und des nutzbaren Wasservorrates $W_{nFK, We}$ im effektiven Durchwurzelungsraum in den Bodenregionen 1 bis 8 der BÜK 1000, unterschieden nach landwirtschaftlicher und forstlicher Nutzung	77
Tabelle 5.9	Charakteristische, landnutzungsabhängige Profilparameter zu den Leitbodentypen der „Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland“ BÜK 1000 (HARTWICH u. a., 1995), Bodeneinheit 42 (Parabraunerde/Fahlerde/Pseudogley aus Löß oder Lößlehm über verschiedenen Gesteinen).....	79
Tabelle 6.1	Liste der in die Untersuchungen einbezogenen Lysimeterstationen.....	84
Tabelle 6.2	Interzeptionshöhe [mm] in Abhängigkeit von der Höhe des Einzelniederschlages im Freiland und des Blattflächenindex LAI bei landwirtschaftlichen Kulturen (nach HOYNINGEN-HUENE, 1983)	86
Tabelle 6.3	Mittlere Jahresgänge des Parameters \bar{f}_M und der Ausschöpfungstiefe \overline{We}_M sowie mittlere Jahreswerte \bar{f} bzw. \overline{We} der Reihe 1981-1997 für zwei Böden der Lysimeteranlage Brandis	87
Tabelle 6.4	Richtwerte für die Faktoren i_M und j_M zur Berechnung von Monatsmittelwerten a) der maximalen Verdunstung, b) der Ausschöpfungstiefe	90

Tabelle 7.1	Anteile in % der im Berechnungsschema (Bild 7.4) verwendeten sechs Landnutzungseinheiten und der Gewässer an den Landnutzungsarten der CORINE-Nomenklatur gemäß Tabelle 5.1 sowie Zuordnung weiterer Parameter	95
Tabelle 7.2	Festlegung des Umtriebsalters UA für Nadelwald durch Zuordnung zur geographisch bedingten Variation der Gras-Referenzverdunstung $\overline{ET_0}$	96
Tabelle 8.1	Zusammengefasste Landnutzungsparameter f_{LN} (a) und effektive Durchwurzelungstiefe z_{We} (b) zur Liste der Landnutzungsklassen gemäß Tabelle 5.4	104
Tabelle 8.2	Vergleich des gemessenen Pflanzenwasserverbrauches ETa (Lysimeter) bei annähernd potentiellen Verdunstungsbedingungen (= 100 %) mit Ergebnissen von Schätzverfahren und der Kesselverdunstung (Verdunstungskessel mit 3 m ² Oberfläche) in mm während der Hauptvegetationszeit.....	108
Tabelle 8.3	Für die Bewässerungssteuerung bei Gemüse benutzte k_c -Faktoren (nach PASCHOLD u. ZENGERLE, 1993, Beispiel für Kopfkohl und Brokkoli)	110
Tabelle 8.4	Gemessene Dekadenwerte der Verdunstung ETa eines Weißkohlbestandes und Quotienten zu der nach PENMAN (1956) berechneten potentiellen Verdunstung ET_{Penm} , Jahr 1997	111
Tabelle 8.5	Fruchtartenspezifische maximale Korrekturfaktoren für die ETp nach Penman und Turc-Wendling zur Abschätzung der ETa ausgewählter landwirtschaftlicher Kulturen und Gemüsearten bei potentiellen Verdunstungsbedingungen, Lysimeter Großobringen	113
Tabelle 8.6	Vergleich der Verdunstungssummen Etp (unkorrigiert und korrigiert) und ETa (Lysimeter) im Zeitraum von Bestandesschluss bis Ernte (ETp nach Penman-Wendling Gl. (8.13) berechnet)	113
Tabelle B.1	Korrekturmaßnahmen bei Lysimeterauswertungen	134
Tabelle B.2	Interpolation fehlender Niederschlagshöhen	134
Tabelle B.3	Interpolation fehlender Verdunstungshöhen	135
Tabelle D.1	Algorithmen zur Berechnung des Parameters $\bar{f} = \overline{ET_{max}} / \overline{ET_0}$, Θ_{nFK} in Vol.%	141
Tabelle D.2	Algorithmen zur Berechnung der Ausschöpfungstiefe \overline{We} in dm mit $\overline{We} \geq 0$, Θ_{nFK} in Vol.-%.....	142
Tabelle D.3	Algorithmen zur Berechnung des Effektivitätsparameters n der BAGROV-Gleichung, $n > 0$, Θ_{nFK} in Vol.-%	143
Bild 1.1	Beispiel für die Zunahme der Grundwasserneubildung bei Landnutzungsänderungen auf einer Fläche von etwa 10 km ² (nach WESSOLEK u. a. ,1985)	20
Bild 1.2	Relation der jährlichen Verdunstung verschiedener Pflanzenbestände in Bezug zu den Werten von Grünland (gültig für untere deutsche Mittelgebirgslagen bei Jahresniederschlägen von P = 700 mm/a bis 800 mm/a und Böden mit nutzbarer Feldkapazität zwischen 140 mm und 170 mm (nach ERNSTBERGER, 1987))	20
Bild 1.3	An wägbaren Lysimetern in Brandis gemessene tägliche Verdunstungshöhen ETa von Getreide (y-Achse) unterschiedlicher Bestandeshöhen z_B für verschiedene Bodenbedingungen in Relation zur Höhe der Gras-Referenzverdunstung ET_0 (x-Achse)	22
Bild 1.4	Monatliche Verdunstungshöhen ETa von Gras, gemessen mit verschiedenen wägbaren Lysimetern, in Bezug zur Gras-Referenzverdunstung ET_0	25
Bild 2.1	Übersicht zum hydrologischen Kreislauf und seinen Komponenten (aus DISSE, 1995).	27

Bild 2.2	Jahresgang der Energiebilanzkomponenten eines Waldstandortes (ca. hundertjährige Fichten) im Jahr 1999 aus direkten mikrometeorologischen Messungen aller Komponenten an der Ankerstation Tharandter Wald (Grafik: T. Grünwald, Inst. f. Hydrologie und Meteorologie der TU Dresden); Nettostrahlung R_n , fühlbarer Wärmestrom H , latenter Wärmestrom LE (= Verdunstung), Niederschlag	31
Bild 2.3	Verdunstung, berechnet aus der hydrologischen Bilanz Niederschlag P – Abfluss R für die Zeit vom 1.5.1997 bis 31.3.1998 im Einzugsgebiet Wernersbach und Ergebnisse der ECEB-Verdunstungsmessungen an der Ankerstation Tharandter Wald bei Dresden ($ET_{a_{ECEB}}$). Linke Skala: kumulativ aufsummierte Tageswerte der Verdunstung, rechte Skala: tägliche Niederschlagshöhen zum Vergleich (aus FRÜHAUF u. a., 1999)	32
Bild 2.4	Dekadenwerte der berechneten Referenzverdunstung ET_0 im Vergleich zur gemessenen Verdunstung ET_a einer landwirtschaftlich genutzten Fläche bei Anbau von Zuckerrüben, Lysimeterstation Großobringen, Januar bis Dezember 1988	34
Bild 2.5	Interzeptionshöhe I in Abhängigkeit vom Freilandniederschlag P_{korrr} und von der Interzeptionskapazität I_{max} ; die Kurven beziehen sich auf unterschiedliche Blattflächenindizes, oben $LAI = 5,8$ und unten $LAI = 1,6$ (n. SCHLEGEL u. a., 1998) ...	39
Bild 3.1	Mittlerer Jahresgang des Niederschlagsfehlers in Abhängigkeit von der Stationslage, berechnet für das Gebiet um Potsdam, 1961-1990	47
Bild 3.2	Karte der Bundesrepublik Deutschland mit den Gebieten einheitlicher Niederschlagskorrektur für vieljährige Mittelwerte (Gebiete siehe Tabelle 3.4) (nach RICHTER, 1995)	48
Bild 3.3	Relation zwischen täglichen Niederschlagshöhen, gemessen mit dem Hellmann-Niederschlagsmesser und mit einem kontinuierlich registrierenden Lysimeter (Großobringen, Monate April-September der Jahre 1988, 1996, 1997, 1999)	51
Bild 3.4	Vergleich der korrigierten täglichen Niederschlagshöhen bei a) flüssigem und b) festem Niederschlag aus Messungen in 1 m Höhe (P_1) und im Bodenniveau (P_0), Lysimeterstation Brandis, leicht geschützte Stationslage	52
Bild 3.5	Jahresgang der Gras-Referenzverdunstung (Linien) im Vergleich zum Niederschlag (Säulen) für vier Gebiete mit unterschiedlichem Niederschlagsregime, mittlere Monatssummen 1961-1990	56
Bild 3.6	Vergleich der Gras-Referenzverdunstung mit Lysimetermessungen für verschiedene Standorte (kumulativ aufsummierte Monatswerte). Linie: tatsächliche Verdunstungshöhe der wägbaren Lysimeter, Punkte: berechnete Gras-Referenzverdunstungshöhe, Säulen: Niederschlagshöhen zum Vergleich	59
Bild 4.1	Mittlere jährliche klimatische Wasserbilanz (korrigierte Niederschlagshöhe minus Gras-Referenzverdunstung) in mm/a, Zeitraum 1961-1990	63
Bild 4.2	Häufigkeitsverteilung der Wasserhaushaltsgrößen, jährliche Werte für 200 Stationen in Deutschland, 30-jährige Mittel; a) Gras-Referenzverdunstung, b) korrigierter Niederschlag, c) Differenz (Klimatische Wasserbilanz), d) Quotient aus beiden Größen	65
Bild 4.3	Beispiele für den Jahresgang der kumulativ aufsummierten klimatischen Wasserbilanz KWB für vier Gebiete mit unterschiedlichem Niederschlagstyp	66
Bild 4.4	Abhängigkeit der relativen Verdunstung vom relativen Bodenwasservorrat, die Kurven a bis e bezeichnen die entsprechenden Beziehungen verschiedener Autoren (s. ERNSTBERGER, 1987)	67

Bild 6.1	Tageswerte der tatsächlichen Verdunstung ET_a bei ausreichender Wasserverfügbarkeit, bezogen auf die Gras-Referenzverdunstung ET_0 (Brandis, Lysimetergruppe 10, Halmfrüchte, Pflanzenhöhe >90 cm).....	81
Bild 6.2	Monatsmittelwerte von $\bar{f}_M = \overline{ET_{maxM}} / \overline{ET_{0M}}$, Brandis, Lysimetergruppe 10	81
Bild 6.3	Vieljähriger Mittelwert des Parameters \bar{f} für unterschiedliche Landnutzungsformen in Abhängigkeit von der Volumenfeuchte der nutzbaren Feldkapazität Θ_{nFK} (Kurzzeichen an den Punkten kennzeichnen die Lysimeterstationen gemäß Tabelle 6.1)	83
Bild 6.4	Vieljähriger Mittelwert des Parameters \bar{f} für Nadel- und Laubwald auf verschiedenen Böden in Abhängigkeit vom Umtriebsalter UA	85
Bild 6.5	Reduktionsbeziehung nach DISSE (1995), modifiziert durch den Bezug auf die maximale Verdunstung und durch die Berücksichtigung der Interzeption	86
Bild 7.1	Graphische Darstellung der Bagrov-Beziehung, modifiziert nach GLUGLA u. a. (2002), und des Einflusses der Landnutzung auf den Effektivitätsparameter n . Die überstrichenen Formelzeichen sind <u>vieljährige Mittel des korrigierten Niederschlages $\overline{P_{kor}}$</u> , der maximalen Verdunstung $\overline{ET_{max}}$ und der tatsächlichen Verdunstung $\overline{ET_a}$	91
Bild 7.2	Effektivitätsparameter n bzw. n^* in Abhängigkeit vom Wasservorrat bei nutzbarer Feldkapazität $\Theta_{nFK} \cdot \overline{We}$ (Die Buchstaben bezeichnen die ausgewerteten Lysimeter gemäß Tabelle 6.1)	92
Bild 7.3	Effektivitätsparameter n in Abhängigkeit vom Umtriebsalter von Laub- und Nadelwald für bindige Böden (schwarze dünne Linien) und sandige Böden (blaue dicke Linien)	93
Bild 7.4	Schema zur Berechnung der mittleren jährlichen tatsächlichen Verdunstung $\overline{ET_a}$ und des mittleren jährlichen Gesamtabflusses R nach dem Wasserhaushaltsverfahren BAGLUVA (GLUGLA, 1999b; GLUGLA u. a., 2002)	94
Bild 8.1	Funktionen zur Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung aus der Gras-Referenzverdunstung: a) Albedofunktion, b) Funktion der Bestandeshöhe der Pflanzen, c) Trockenstressfunktion, d) Funktion zur Berücksichtigung des minimalen Bestandswiderstandes	102
Bild 8.2	Gemessene Evapotranspiration wägbarer Lysimeter nach Angaben im IHP/OHP-Jahrbuch für die Jahre 1989 und 1990, verglichen mit den berechneten Werten aus der Gras-Referenzverdunstung mit Funktionen der Landnutzung	105
Bild 8.3	Verdunstung bei einem Zwiebelbestand im ersten Wachstumsstadium (14.05.1999 bis 25.05.1999) mit einem Bedeckungsgrad des Bodens von 20 %, Lysimeteranlage Großobringen	110
Bild 8.4	Herleitung der Korrekturfunktion der potentiellen Verdunstung ET_p gemäß Gleichungen (8.16) - (8.18) aus den Funktionsparametern x_b, x_s, x_r, y_r, y_s	112
Bild B.1	Jahresgang der Albedo für Wintergetreide	137
Bild D.1	Graphische Darstellung der BAGROV-Beziehung nach dem Wasserhaushaltsverfahren BAGLUVA (GLUGLA, 2002) mit dem BAGROV-Parameter n als Scherparameter ...	144
Beispiel 3.1	Korrektur von mittleren Monatssummen der Niederschlagshöhe nach Tabelle 3.4, Station Potsdam mit stark geschützter Stationslage (Lage d) im Gebiet III (s. Bild 3.2), Niederschlagshöhen aus DWD (1996)	49
Beispiel 3.2	Korrektur von Tageswerten der Niederschlagshöhe in mm, Station Berlin-Schönefeld mit freier Stationslage, Gebiet III, $b = 0,345$ und $\varepsilon = 0,38$ (s. Tabelle 3.1)	49

Beispiel 3.3 Berechnung von täglichen Werten der Gras-Referenzverdunstung (Gleichung (3.3)) für die Station Braunschweig	57
Beispiel 3.4 Verdeutlichung der Unsicherheiten gegenüber den Werten aus Beispiel 3.3 bei der Anwendung der Klimavariante (Gleichung (3.6) für Monatswerte) für Tageswerte, Klimadaten der Station Braunschweig	57
Beispiel 3.5 Berechnung von mittleren monatlichen Werten der Gras-Referenzverdunstung ET_0^* ... (Gleichung (3.6)) für die Station Braunschweig	58
Beispiel 6.1 Berechnung der Verdunstung ET_a in Tagesschritten für Getreide mit der Disse-Beziehung (Bild 6.5) und den Parametern \bar{f}_M bzw. \bar{w}_{eM} für den Monat Mai gemäß Tabelle 6.3.....	89
Beispiel 7.1 Berechnung der mittleren jährlichen Verdunstung $\overline{ET_a}$ und des Gesamtabflusses \bar{R} für ausgewählte Berechnungsvarianten (Varianten 1 bis 9) nach dem Wasserhaus-haltsverfahren BAGLUVA (GLUGLA u. a., 1999b, GLUGLA u. a., 2002)	99
Beispiel 8.1 Berechnung von Monatswerten der Evapotranspiration, Braunschweig 1990	106

Definitionen — Begriffe, Symbole, Einheiten und Abkürzungen

Formelzeichen	physikalische Einheit	Bedeutung
A_L	m^2	Lysimeteroberfläche
a		Rauigkeitsparameter
B	mm	Beregnung (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
b		Koeffizient zur Berücksichtigung des Einflusses der Niederschlagsart und der Windexposition der Messstelle bei der Korrektur des in 1 m Höhe gemessenen Niederschlages
c_p	J/(kg·K)	spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck (= 1005 J/(kg·K))
D	d	Hauptwachstumszeit
E	mm	Verdunstungshöhe allgemein (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
E_I	mm	Interzeptionsverdunstung (= Verdunstungshöhe von Interzeptionswasser) (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
E_s	mm	Evaporationshöhe schneebedeckter Flächen (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
E_w	mm	Evaporationshöhe freier Wasserflächen (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
E_a	mm	tatsächliche (reale) Evaporationshöhe (actual evaporation) (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
E_{max}	mm	landnutzungsabhängige maximale Evaporationshöhe (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
E_p	mm	potentielle Evaporationshöhe (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
ET_x	mm	landnutzungsabhängige maximale Evapotranspirationshöhe ($\neq ET_{max}$) (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
ET_0	mm	Gras-Referenzverdunstung (FAO-Standard) (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
ET_0^*	mm	Gras-Referenzverdunstung (aus Klimadaten mittels Kalibrierung) (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
ET_a	mm	tatsächliche Evapotranspirationshöhe (actual evapotranspiration) (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
ET_a^*	mm	um die Interzeptionsverdunstung verminderte Werte von ET_a (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
ET_{max}	mm	landnutzungsabhängige maximale Evapotranspirationshöhe ($\neq ET_x$) (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
ET_{max}^*	mm	um die Interzeptionsverdunstung verminderte Werte von ET_{max} (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)

Formelzeichen	physikalische Einheit	Bedeutung
ETp	mm	potentielle Evapotranspirationshöhe (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
e	hPa	Dampfdruck der Luft
e _s (T)	hPa	Sättigungsdampfdruck der Luft bei der Temperatur T, auch für Luft mit Wasseroberflächentemperatur T = T _{w0} ; teilweise auch als e _s bezeichnet
e _s (T) – e	hPa	Sättigungsdefizit
f		Faktor zur Ableitung der landnutzungsabhängigen maximalen Evapotranspiration ET _{max} aus der Gras-Referenzverdunstung ET ₀
f _H		Faktor zur Berücksichtigung des Einflusses von Hangneigung und -exposition auf die Verdunstung
f _{LN}		Landnutzungsparameter zur Ableitung der landnutzungsabhängigen maximalen Evapotranspiration ET _x aus der Gras-Referenzverdunstung ET ₀
f ₀		Faktor zur Bestimmung der Verdunstung unbewachsener Flächen aus der Gras-Referenzverdunstung
G	W/m ²	Bodenwärmestromdichte
H	W/m ²	fühlbare Wärmestromdichte
h	m	Höhe über NN
h _L	m	Lysimetertiefe
I	mm	Interzeptionshöhe, vorübergehend an Oberflächen gespeicherter Niederschlag (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
I _{max}	mm	Interzeptionskapazität, maximal an Oberflächen haftendes Wasser
J	°C	Wärmeindex
JT		Tag des Jahres, Tageszählung ab Jahresbeginn (1...365/366)
k		Küstenfaktor
k _C		Faktor zur Bewässerungssteuerung
KR	mm/d	kapillare Aufstiegsrate, Bewegung von Wasser aus dem Grundwasserraum in den Sickerraum entgegen der Schwerkraft
KWB	mm	Klimatische Wasserbilanz (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
L*	J/kg	spezifische Verdampfungswärme (≈ 2,45·10 ⁶ J/kg bei 20 °C)
L	J/(m ² mm)	spezielle Verdunstungswärme, Wärmemenge, die für die Verdunstungshöhe von 1 mm nötig ist
LAI		Blattflächenindex (blaf arla index)
LE	W/m ²	latente Wärmestromdichte der Verdunstung als Produkt der Größen L und E (≈ 28,36 W/m ² entsprechen 1 mm/d Verdunstung)
LK		Luftkapazität

Formelzeichen	physikalische Einheit	Bedeutung
n, n^*, n_K		Effektivitätsparameter nach BAGROV, ~ unter Berücksichtigung der Interzeption, ~ unter Berücksichtigung des Kapillarwasseraufstiegs
n_M		Zahl der Monatstage
P	mm	Niederschlagshöhe, gemessen (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
P_{grenz}	mm	Niederschlagshöhe, bei der die Interzeptionskapazität I_{max} erreicht wird (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
P_{korr}	mm	Niederschlagshöhe nach Korrektur der systematischen Messfehler (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
P_0	mm	Niederschlagshöhe gemessen im Bodenniveau (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
P_1	mm	Niederschlagshöhe gemessen in 1 m Höhe (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
p_a		Pflanzenbedeckungsgrad
Q_H		Quotient aus P_{korr} und ET_0
R	mm	Abflusshöhe (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
R^2		Streuungsmaß
R_A	W/m^2	langwellige Ausstrahlung von der Land- oder Wasseroberfläche
R_A^*	mm/d	Verdunstungsäquivalent der langwelligen Ausstrahlung von der Land- oder Wasseroberfläche
R_G	W/m^2	Globalstrahlung, auf der horizontalen Fläche auftreffende kurzwellige Strahlung als Summe aus direkter Sonnenstrahlung und diffuser Himmelsstrahlung
R_L	W/m^2	langwellige Gegenstrahlung der Atmosphäre
R_L^*	mm/d	Verdunstungsäquivalent der langwelligen Gegenstrahlung der Atmosphäre
R_0	W/m^2	extraterrestrische Strahlung
R_n	W/m^2	Strahlungsbilanz (Nettostrahlung)
R_n^*	mm/d	Verdunstungsäquivalent der Strahlungsbilanz (der Nettostrahlung)
R_{n_K}	W/m^2	kurzwellige Strahlungsbilanz der Oberfläche
$R_{n_K}^*$	mm/d	Verdunstungsäquivalent der kurzwelligen Strahlungsbilanz (der Nettostrahlung)
R_{n_L}	W/m^2	langwellige Strahlungsbilanz der Oberfläche
$R_{n_L}^*$	mm/d	Verdunstungsäquivalent der langwelligen Strahlungsbilanz (der Nettostrahlung)
r		Disse-Parameter
r_a	s/m	aerodynamischer Widerstand
r_c	s/m	Verdunstungswiderstand des Pflanzenbestandes
$r_{c,\text{min}}$	s/m	minimaler Verdunstungswiderstand des Pflanzenbestandes

Formelzeichen	physikalische Einheit	Bedeutung
S	h	Sonnenscheindauer
S_r		relative Sonnenscheindauer
S_0	h	astronomisch mögliche Sonnenscheindauer
SW	mm	Sickerwasserhöhe (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
s	hPa/K	$\partial e_s / \partial T$, Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve
T	°C	Lufttemperatur
T_{abs}	K	absolute Temperatur (= T + 273,15)
TL	h	Tageslänge
T_a	mm	tatsächliche (reale) Transpirationshöhe (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
T_m	°C	Mitteltemperatur eines Bezugszeitraumes
T_p	mm	potentielle Transpirationshöhe (bezogen auf die jeweilige Zeiteinheit s, h, d, Monat, a)
t	s, h, d, Monat, a	Zeit
U		relative Luftfeuchte, Dampfdruck in Prozent des Sättigungsdampfdruckes
UA	a	Umtriebsalter eines Waldes
v_z	m/s	Windgeschwindigkeit, Messhöhe z in m als Index
W	mm	Wasservorrat allgemein
W_{FK}	mm	Bodenwasservorrat bei Feldkapazität (z. B. in der Bodenschicht bis 1 m Tiefe)
$W_{nFK, We}$	mm	pflanzennutzbarer Bodenwasservorrat im effektiven Wurzelraum bei Feldkapazität
W_{PWP}	mm	Bodenwasservorrat bei permanentem Welkepunkt
W_{pfl}	mm	pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat als Summe aus $W_{nFK, We}$ und der kapillaren Aufstiegsmenge
W_{rel}		Relativwert des Wasservorrates einer Bodenschicht als Anteil des pflanzennutzbaren Bodenwasservorrates in % (relative Bodenfeuchte)
WB	mm	Wasserbilanz
W_e	dm	Ausschöpfungstiefe
ΔW	mm	Speicheränderung im Wasservorrat
z	m	Höhe bzw. Tiefe über/unter der Erdoberfläche, auch als Index bei Messwerten angegeben
z_0	m	Rauigkeitshöhe, physikalischer Parameter zur Beschreibung der Unebenheit der Landnutzungen
$z_{0,eff}$	m	effektive Rauigkeitshöhe

Formelzeichen	physikalische Einheit	Bedeutung
z_A	dm	kapillare Aufstiegshöhe des Grundwassers
z_B	m	Bewuchshöhe, mittlere Höhe eines Pflanzenbestandes zum Termin
z_G	dm	Flurabstand der Grundwasseroberfläche
z_H	m	Hindernishöhe, Höhe unterschiedlicher Landnutzungen (definiert zur einheitlichen Berechnung von z_0)
z_{We}	dm	effektive Durchwurzelungstiefe
Θ		Bodenfeuchte als Wasservolumenanteil in % des Bodenvolumens
Θ_{FK}		Volumenanteil des Wassers im Boden in % bei Feldkapazität, der in der ungesättigten Bodenzone maximal gegen die Schwerkraft gehalten werden kann
Θ_{PWP}		Volumenanteil des Wassers im Boden in % bei permanentem Welkepunkt, der nicht mehr von den Pflanzen zur Transpiration genutzt werden kann
Θ_{nFK}		Volumenanteil des Wassers im Boden in % bei nutzbarer Feldkapazität
α		kurzwellige solare Albedo (Reflexionskoeffizient) der Oberfläche, abhängig von deren Beschaffenheit
γ	hPa/K	Psychrometerkonstante ($\gamma = 0,65$ hPa/K)
γ^*	hPa/K	modifizierte Psychrometerkonstante
ε		Koeffizient zur Berücksichtigung der Niederschlagsart bei der Korrektur des in 1 m Höhe gemessenen Niederschlages
κ		von Kármán-Konstante ($\kappa = 0,41$)
λ		geographische Länge
ρ	kg/m ³	Dichte, auch in g/cm ³ , z. B. Luftdichte $\rho_L = 1,20$ kg/m ³ bei 20 °C und 1013 hPa, Wasserdichte $\rho_W \approx 1$ g/cm ³
σ	W/(m ² ·K ⁴)	Stefan-Boltzmann-Konstante ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W/(m ² ·K ⁴))
φ		geographische Breite

Erläuterungen zur Schreibweise der Formelzeichen:

überstrichenes Formelzeichen (z. B. \overline{ETa}) bedeutet:	vieljähriger Mittelwert einer Größe, hier mittlere jährliche tatsächliche Verdunstungshöhe, etwa für die Normalperiode 1961-1990
Δ (z. B. ΔW) bedeutet:	zeitliche Änderung der Größe, hier des Wasservorrates W
Zeitangabe als Index (z. B. e_{14}) bedeutet:	Messwert der angegebenen Stunde, hier des Dampfdruckes um 14 Uhr

1 Anwendungsbereich

1.1 Vorbemerkungen

1.1.1 Verdunstung als Wasserhaushaltsgröße

Verdunstung ist die Umwandlung von Wasser in Wasserdampf bei Temperaturen unterhalb des Siedepunktes. Sie findet sowohl von Wasser und vegetationsfreien Oberflächen aus statt, als auch in Pflanzenbeständen bewachsener Areale. Selbst bei negativen Temperaturen verdunstet Wasser, zum Beispiel über Schnee- und Eisflächen. Oberflächlich trockene Böden sind ebenfalls an der Verdunstung beteiligt. Im Boden wird kapillar Wasser in geringen Mengen an die Oberfläche befördert, von wo aus es in die Atmosphäre gelangt. Die Verdunstung von vegetationslosen Flächen bezeichnet man als *Evaporation*, bei Einzelpflanzen und Pflanzenbeständen spricht man von *Transpiration*, die in Mitteleuropa den Hauptanteil der Gesamtverdunstung ausmacht. Die Pflanzen entnehmen mit ihren Wurzeln das Wasser aus dem Boden und geben es hauptsächlich über die Stomataöffnungen der Blätter als Wasserdampf an die bodennahe Luftschicht ab. Sie regeln damit ihren Energiehaushalt und den Nährstofftransport zu den assimilierenden Pflanzenteilen. Diese biologische Steuerung erschwert verständlicherweise die physikalisch begründete Modellierung des Verdunstungsprozesses.

Verdunstung und Niederschlag sind die zwei Hauptkomponenten des globalen Wasserkreislaufs. Sie spielen ebenso im Energiehaushalt der Atmosphäre die entscheidende Rolle. Durch die Verdunstung gelangt ein großer Teil des Niederschlages wieder zurück in die Atmosphäre. Der Phasenübergang in den gasförmigen Zustand erfordert Energie, Verdunstung ist deshalb immer mit Abkühlung verbunden, wenn nicht andere atmosphärische Prozesse der Abkühlung entgegenwirken. Dieser Energieverbrauch tritt als Verdunstungskälte in Erscheinung. Die im Wasserdampf gespeicherte latente (verborgene) Energie wird bei der Kondensation wieder freigesetzt und ist Antrieb zahlreicher Wettervorgänge.

In erster Linie steuern die Wetterbedingungen des Standortes die Verdunstung (Energieangebot, Wasserverfügbarkeit durch Niederschläge, Sättigungsdefizit der Luft, Windgeschwindigkeit u. a.). Zusätzlich haben über Landflächen die Art und Dichte der Vegetation, der Anteil der versiegelten Flächen und die Bodenzusammensetzung einen großen Einfluss. Die Böden unterscheiden sich in ihrer Speicherfähigkeit für Wasser und in den kapillaren Aufstiegsraten aus dem Grundwasser. Ein weiterer Verdunstungsanteil beruht auf der Interzeption, wenn Pflanzen und andere Gegenstände nach Niederschlägen zeitweise benetzt sind und dann langsam abtrocknen.

Die Verfahren zur Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen werden ausführlich im DVWK-Merkblatt 238 (1996) beschrieben. Die Zusammenhänge zwischen Landnutzung und Verdunstung bilden den Gegenstand der vorliegenden Schrift. Welche Bedeutung die Änderung der Landnutzung im Laufe der Jahre haben kann, ist aus **Bild 1.1** zu ersehen (nach WESSOLEK u. a., 1985). In einem größeren Untersuchungsgebiet nordöstlich von Hannover wurden die Auswirkungen der Nutzungsänderungen auf die Grundwasserspende des Gebietes, die sich aus der Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung ergibt, analysiert.

In der Zeit von 1960 bis 1982 war der Ackeranteil auf 75 % angestiegen. Grünland und Nadelwald, die 1960 zusammen noch fast 50 % der Fläche bedeckten, gingen entsprechend zurück. Damit verbunden erhöhte sich die jährliche Grundwasserneubildung um 7 % auf umgerechnet 183 mm/a, obwohl die Niederschlagshöhen der angegebenen Jahre abnahmen (s. Kopfzeile von **Bild 1.1**). Der Grund ist die geringere Verdunstung ackerbaulich genutzter Flächen durch den Wechsel von Heranwachsen, Reifeperiode und Ernte der Feldbestände mit Zeiten der Brache bzw. Winterruhe im Verlaufe der Fruchtfolge. Dagegen verdunsteten Dauerkulturen wie Grünland und Nadelwald das ganze Jahr über und können mit ihren Wurzeln Wasservorräte tieferer Schichten erschließen. Der Anstieg der Grundwasserneubildung 1975 trotz geringerer Niederschläge und nur wenig geänderter Landnutzung erklärt sich aus den höheren Niederschlägen des Vorjahres. Hier handelt es sich um ein typi-