

Forschungsreihe der FH Münster

RESEARCH

Birgitta Hörnschemeyer

Modellierung der Verdunstung urbaner Vegetation

Weiterentwicklung
des LID-Bausteins im US EPA
Storm Water Management Model



FH MÜNSTER



Springer Spektrum

Forschungsreihe der FH Münster

Die Fachhochschule Münster zeichnet jährlich hervorragende Abschlussarbeiten aus allen Fachbereichen der Hochschule aus. Unter dem Dach der vier Säulen Ingenieurwesen, Soziales, Gestaltung und Wirtschaft bietet die Fachhochschule Münster eine enorme Breite an fachspezifischen Arbeitsgebieten. Die in der Reihe publizierten Masterarbeiten bilden dabei die umfassende, thematische Vielfalt sowie die Expertise der Nachwuchswissenschaftler dieses Hochschulstandortes ab.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13854>

Birgitta Hörnschemeyer

Modellierung der Verdunstung urbaner Vegetation

Weiterentwicklung
des LID-Bausteins im US EPA
Storm Water Management Model

 Springer Spektrum

Birgitta Hörnschemeyer
Fachbereich Bauingenieurwesen, Institut
für Infrastruktur-Wasser-Ressourcen-
Umwelt (IWARU)
Fachhochschule Münster
Münster, Deutschland

ISSN 2570-3307

ISSN 2570-3315 (electronic)

Forschungsreihe der FH Münster

ISBN 978-3-658-26283-9

ISBN 978-3-658-26284-6 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-26284-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Tabellen	VII
Verzeichnis der Bilder	IX
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	XIII
1 Veranlassung und Zielsetzung	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik	3
2.1 Grundlagen der Verdunstung.....	3
2.1.1 Definition.....	3
2.1.2 Verdunstungskomponenten.....	3
2.1.3 Verdunstungsprozess.....	5
2.1.4 Einordnung der Verdunstung in den Naturhaushalt.....	10
2.1.5 Verdunstung als Bindeglied der Wasser- und Energiebilanz.....	12
2.1.6 Einflussgrößen auf den Vorgang der Verdunstung.....	15
2.1.7 Rechnerische Ermittlung der Verdunstungshöhe.....	20
2.1.8 Räumliche und zeitliche Variabilität.....	26
2.2 Methoden der Modellparametrisierung.....	27
2.2.1 Sensitivitätsanalyse.....	28
2.2.2 Automatische Kalibriermethoden.....	29
2.2.3 Gütekriterien.....	31
3 Material und Methoden	33
3.1 Vorgehensweise.....	33
3.2 Auswahl der Referenzflächen.....	34
3.3 Verwendete Software.....	35
3.3.1 Niederschlag-Abfluss-Modell SWMM (US EPA).....	35
3.3.2 KALIMOD.....	37
3.4 Voruntersuchung „Potentielle Verdunstung“.....	37
4 Weiterentwicklung des SWMM-LID-Bausteins	41
4.1 Grundlagen der Verdunstungsmodellierung.....	41
4.1.1 Modelle der Verdunstungsmodellierung.....	41
4.1.2 Vegetationsspezifische Parameter im Rahmen der Verdunstungsmodellierung.....	59
4.1.3 Verdunstungsmodellierung in SWMM (US EPA).....	63

4.2	Vorbereitende Untersuchungen der Modellparametrisierung	68
4.2.1	Sensitivitätsanalyse	68
4.2.2	Kalibrierung	73
4.2.3	Zusammenfassung und Zwischenfazit.....	78
4.3	Aufstellung des Untersuchungsrahmens	79
4.3.1	Definition verschiedener Modellparameter des Vegetations-Layers ..	81
4.3.2	I – Interzeptionsspeicher	85
4.3.3	Ei – Interzeptionsverdunstung.....	89
4.3.4	Es – (Boden-)Evaporation	91
4.3.5	Et – Transpiration	95
4.3.6	Ew – Evaporation von der freien Wasseroberfläche.....	96
4.3.7	C – Crop-Faktor.....	97
4.3.8	Zusammenfassende Darstellung des Untersuchungsrahmens	98
4.4	Bewertungsmethodik.....	99
4.5	Vergleich und Bewertung der verschiedenen Verdunstungsansätze	101
4.5.1	Grundsätzliches Modellverhaltens (BILANZ und GANG)	101
4.5.2	Analyse der Verdunstungsanteile (FRAC).....	110
4.5.3	Modellverhalten unter Berechnung mit Crop-Faktor	112
4.5.4	Modellverhalten unter verschiedenen Belastungszuständen.....	113
4.5.5	Zusammenfassung und Zwischenfazit.....	114
4.6	Empfehlungen zur Parameteroptimierung für Vegetationselemente	116
4.6.1	Sensitivitätsanalyse.....	116
4.6.2	Kalibrierung	118
4.6.3	Diskussion zur Bewertung des Crop-Faktors sowie des LAIs als zentrale vegetationspezifische Modellparameter	121
4.6.4	Zusammenfassung und Zwischenfazit.....	123
4.7	Sensitivität der Verdunstungsmodellierung auf den Wasserhaushalt in der Mikro- und Mesoskale	124
4.7.1	Beschreibung des Untersuchungsrahmens	124
4.7.2	Auswertung für Elemente in der Mikroskale.....	126
4.7.3	Auswertung für die Mesoskale	129
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	131
	Literaturverzeichnis	135
	Anhang.....	151

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1:	Mittlere Albedo von bewachsenen und unbewachsenen Flächen sowie Wasserflächen (Harlaß 2008).....	14
Tabelle 3.1:	Eingabedaten Verdunstung in SWMM.....	38
Tabelle 4.1:	Normierte r-Werte für verschiedene Vegetationsklassen (Disse 1995).....	59
Tabelle 4.2:	Mögliche Wertebereiche des Blattflächenindex für verschiedene Vegetationsarten (Breuer et al. 2003).....	61
Tabelle 4.3:	Interzeptionskapazität verschiedener Vegetationsbestände, zusammengetragen aus Baumgartner und Liebscher 1996; Dyck und Peschke 1995; Maniak 2010.....	62
Tabelle 4.4:	Relevante Modellparameter der LIDs in SWMM	66
Tabelle 4.5:	Modellparameter der Sensitivitätsanalyse mit recherchierten Wertebereichen	69
Tabelle 4.6:	Volumenberechnungen der Bodenschicht für verschiedene Kalibrierläufe	76
Tabelle 4.7:	Mittelwert (mean), Standardabweichung (SD), Variationskoeffizient (VarC) sowie Korrelationskoeffizienten (Cor) der Kalibrierläufe K3 und K4 - NADEL.....	76
Tabelle 4.8:	Literaturwerte für den Blattspeicher-Koeffizienten SL	84
Tabelle 4.9:	Zusammenstellung der Anteile der Verdunstungskomponenten an der Gesamtverdunstung sowie der Gesamtverdunstung am Niederschlag	100
Tabelle 4.10:	Verdunstungsanteile für LAI=2, Modell I = I-3-Braden, Model EI = facEI,p, ohne Crop-Faktor, Belastungsperiode TOTAL...	112
Tabelle 4.11:	Auswertung des Gesamtwasserhaushalts.....	129

Verzeichnis der Bilder

Abbildung 2.1:	Komponenten der Verdunstung (DWA-M 504-1 2018).....	4
Abbildung 2.2:	Vergleich täglicher Schwankungen meteorologischer, pflanzenphysiologischer, bodenphysikalischer und hydrologischer Größen (DYCK und PESCHKE 1995)	7
Abbildung 2.3:	Bodenphysikalische Zusammenhänge, HYDROTEC (2012) unter Ergänzung eigener bodenphysikalischer Skale.....	9
Abbildung 2.4:	Mittlere jährliche effektive Wurzel- bzw. Ausschöpfungstiefe (DYCK und PESCHKE 1995).....	10
Abbildung 2.5:	Vereinfachter globaler Wasserkreislauf, Werte aus Wetterbeobachtungen abgeleitet, Einheit 100 km ³ /a, HARLAß (2008) nach BAUMGARTNER und REICHEL (1975)	11
Abbildung 2.6:	Vereinfachter Energiekreislauf mit globalen Jahresmittelwerten, HARLAß (2008) nach BAUMGARTNER und LIEBSCHER (1996) sowie DYCK und PESCHKE (1995).....	13
Abbildung 2.7:	Abhängigkeit des Saffflusses von der Globalstrahlung (MIEGEL ET AL. 2007)	17
Abbildung 2.8:	Typische Abhängigkeiten des Stomatawiderstandes vom verfügbaren Licht (PPFD: photosynthetic photon flux density), Blattflächentemperatur T_{leaf} , Sättigungsdefizit der Luft v_{da} , CO ₂ -Konzentration, Blattwasserpotenzial (OKE 1987).....	18
Abbildung 2.9:	Typische Wertebereiche und Haupteinflussfaktoren des Crop-Faktors im Vegetationszyklus (ALLEN ET AL. 1998)	25
Abbildung 2.10:	Mittlerer täglicher Verlauf von Nettostrahlung sowie latentem und fühlbaren Wärmestrom für verschiedene Landnutzungsformen (BERNHOFER ET AL. 2005)	26
Abbildung 2.11:	LHS mit 5 Punkten für zwei Parameter p_1 und p_2 (VAN GRIENSVEN ET AL. 2006))	29
Abbildung 3.1:	Schematische Darstellung der Vorgehensweise	33
Abbildung 3.2:	Modell des Großlysimeters St. Arnold (SCHROEDER 1988).....	35
Abbildung 3.3:	Modellierte Prozesse in SWMM (ROSSMAN 2015)	36
Abbildung 3.4:	Sickerhöhe kumuliert - Zeitraum 01.07.2001-01.07.2004	40
Abbildung 4.1:	Reduktion der potentiellen Verdunstung in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (SEIBERT 2005)	42
Abbildung 4.2:	Interzeptionshöhe in Abhängigkeit vom Niederschlag.....	45
Abbildung 4.3:	Interzeption in Abhängigkeit vom Niederschlag für landwirtschaftliche Flächen nach BRADEN (1985) (blau) und Wälder nach GASH (1979) (orange), nach KROES ET AL. (2008)	46

Abbildung 4.4:	Abminderungsfaktoren für die aktuelle Transpiration (KROES ET AL. 2008)	48
Abbildung 4.5:	Zusammenhang der tatsächlichen Transpiration und der Bodenfeuchte (SCHULLA 2017).....	50
Abbildung 4.6:	Relative Transpirationsrate in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (%), Darstellung für verschiedene potentielle Transpirationsraten T_{FC} (DENMEAD und SHAW 1962).....	56
Abbildung 4.7:	Transpiration, Evaporation und Exfiltration in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte nach GUSWA ET AL. (2002)	57
Abbildung 4.8:	Berechnung der tatsächlichen Evaporation in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (ZHAO ET AL. 2013).....	58
Abbildung 4.9:	Entwicklung des Blattflächenindex eines Baumes innerhalb einer Vegetationsperiode (BRISSEON ET AL. 1998).....	60
Abbildung 4.10:	Einteilung des Einzugsgebiets in SWMM (ROSSMAN und HUBER 2016a).....	64
Abbildung 4.11:	Aufbau einer Bio-Retentionszelle (ROSSMAN und HUBER 2016b)...	65
Abbildung 4.12:	CDF-Diagramme aller Modellparameter für den Ergebnisparameter „Infiltration“	72
Abbildung 4.13:	CDF-Diagramme der sensitiven Parameter für das Abweichungsmaß E_1 (rot: $E_1 > 0$, türkis: $E_1 < 0$).....	73
Abbildung 4.14:	Ganglinienvergleich Mess- und Simulationsdaten 2002 - GRUEN	76
Abbildung 4.15:	Definition eines Vegetations-Layers im vorhandenen Bodenmodell	80
Abbildung 4.16:	Vergleich verschiedener vegetativer Jahrgänge.....	82
Abbildung 4.17:	Vergleich von Ansätzen für den SCF in Abhängigkeit vom LAI.....	83
Abbildung 4.18:	Vergleich von Ansätzen zur Berechnung der Interzeptionskapazität S_{max}	85
Abbildung 4.19:	Vergleich der Ansätze für die potentielle Interzeptionshöhe I	87
Abbildung 4.20:	Summenlinien der Niederschlags- und Interzeptionshöhen verschiedener Einheiten für einen LAI=10.....	88
Abbildung 4.21:	Vergleich verschiedener Ansätze zur wasserbenetzten Fläche	89
Abbildung 4.22:	Darstellung der drei Ansätze für die tatsächliche Evaporation	92
Abbildung 4.23:	Vergleich der beiden Ansätze in Abhängigkeit von der relativen Bodenfeuchte	94
Abbildung 4.24:	Übersicht über das Untersuchungsset.....	98
Abbildung 4.25:	Vergleich der Interzeptionsansätze für eine Simulation OHNE Crop-Faktor, Belastungsperiode TOTAL.....	102
Abbildung 4.26:	Vergleich der Summenlinien tatsächlicher und potentieller Interzeptionsverdunstung.....	103
Abbildung 4.27:	Vergleich der Evaporationsansätze für eine Simulation OHNE Crop-Faktor, Belastungsperiode TOTAL.....	104

Abbildung 4.28: Vergleich der Verdunstungsanteile der Evaporationsansätze Es-0 bis Es-3.....	106
Abbildung 4.29: Vergleich der Transpirationsansätze für eine Simulation OHNE Crop-Faktor	108
Abbildung 4.30: Vergleich der Anteile tatsächlicher an potentieller Transpiration .	109
Abbildung 4.31: Vergleich der Modellergebnisse mit und ohne Crop-Faktor	113
Abbildung 4.32: Verdunstungshöhen für verschiedene Belastungsperioden	114
Abbildung 4.33: Matrizenplot der Korrelationskoeffizienten für den Ergebnisparameter „Infiltration“	116
Abbildung 4.34: CDF-Plots für den Ergebnisparameter „Infiltration“	117
Abbildung 4.35: Vergleich der gemessenen und simulierten Infiltration für das Jahr 1993	120
Abbildung 4.36: Flächentypen im Untersuchungsgebiet	125
Abbildung 4.37: Ergebnisplots der Simulationsläufe für den Parameter „Verdunstung“	127
Abbildung 4.38: Vergleich der simulierten Verdunstungshöhen für das Jahr 2017	128

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	(mm bzw. mm/h)	Abfluss
A _b	(-)	wasserbenetzter Blattoberflächenanteil
c	(-)	Beschattungskoeffizient
C1	(-)	Korrekturfaktor
C2	(-)	Korrekturfaktor
CDF	(-)	cumulative distribution function
C _{ET}	(°C)	Korrekturfaktor
C _f	(-)	Crop-Faktor
Cor	(-)	Korrelations-Koeffizienten
d	(m)	Verdrängungshöhe
d ₁	(mm)	Wassereinstau an der Oberfläche
d ₃	(mm)	Wasserstand in der Speicherschicht
D ₂	(mm)	Stärke der Bodenschicht
DWD	(-)	Deutscher Wetterdienst
e	(hPa)	(aktueller) Dampfdruck
E	(mm bzw. mm/h)	Verdunstung
E ₁	(-)	Effizienzkoeffizient
E ₂	(-)	Effizienzkoeffizient (Nash-Sutcliff)
E _{i,a}	(mm/d)	tatsächliche Interzeptionsverdunstung
E _{i,p}	(mm/d)	potentielle Interzeptionsverdunstung
E _{iT,a}	(mm/d)	tatsächliche Transpiration & Interzeptionsverdunstung
E _{iT,p}	(mm/d)	pot. Interzeptionsverdunstung + Transpiration
E _{pot,M}	(mm/d)	eingegebener Verdunstungswert
e _s	(hPa)	Sättigungsdampfdruck

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$E_{S,a}$	(mm/d)	tatsächliche Evaporation (von der Bodenfläche)
$E_{S,p}$	(mm/d)	potentielle Evaporation (von der Bodenfläche)
e_{ST}	(-)	Anteil tatsächliche Evapotranspiration / potentieller Evapotranspiration
$E_{STI,a}$	(mm/d)	Evapotranspiration
$E_{STI,0}$	(mm/d)	Gras-Referenzverdunstung
$E_{STI,a}$	(mm/d)	tatsächliche Evapotranspiration
$E_{STI,p}$	(mm/d)	potentielle Evapotranspiration (inkl. Interzeption)
$E_{T,a}$	(mm/d)	tatsächliche Transpiration
$E_{T,p}$	(mm/d)	potentielle Transpiration
E_{Tp0}	(mm/d)	potentielle Referenz-Transpiration
$E_{W,a}$	(mm/d)	tatsächliche Evaporation von freier Wasseroberfläche
$E_{W,p}$	(mm/d)	potentielle Evaporation von freier Wasseroberfläche
fak	(-)	Anteilsfaktor Evapotranspiration
FAO	(-)	Food and Agriculture Organization der Vereinten Nationen
Fe	(-)	nicht-lineare Verdunstungs-Funktion in Abhängigkeit der Bodenfeuchte
f_k	(-)	Küsten-Faktor
FK	(Vol-%)	Feldkapazität
f_m	(-)	monatlicher Korrekturfaktor
FMO	(-)	Flughafen Münster-Osnabrück
G	(mm bzw. mm/h)	Grundwasserneubildung
G	(W/m ²)	Bodenwärmestrom
GOK	(-)	Geländeoberkante
GPV	(Vol-%)	Gesamtporenvolumen
H	(W/m ²)	fühlbarer Wärmestrom
HAD	(-)	Hydrologischer Atlas Deutschland
h_s	(h)	Sonnenscheindauer

Symbol	Einheit	Bezeichnung
h_s	(mm)	Durchwurzelte Schicht
l	(mm)	potentielle Interzeptionshöhe
l	(mm)	berechnete Interzeptionshöhe (für Zeitschritt)
l_i	(W/m ²)	Sonneneinstrahlung unter der Pflanze
l_o	(W/m ²)	Sonneneinstrahlung über der Pflanze
infil	(mm/h)	Infiltrationsrate
k	(-)	Strahlungsminderungs-Koeffizient
L	(kJ/(m ² *mm))	spezifische Verdunstungswärme
LAI	(-) / (m ² /m ²)	Blattflächenindex
LAI _{day}	(-) / (m ² /m ²)	tagesspezifischer Blattflächenindex
LHS	(-)	Latin-Hypercube-Sampling
LID	(-)	Low Impact Development
LK	(Vol-%)	Luftkapazität
maxInf	(mm/h)	maximale Infiltrationsrate
mean	()	Mittelwert
MCS	(-)	Monte-Carlo-Simulation
NA-Modell	(-)	Niederschlag-Abfluss-Modell
nFK	(Vol-%)	nutzbare Feldkapazität
NSGA2	(-)	Non Dominated Sorting Algorithm II (NSGA II)
p	(-)	Koeffizient freien Durchfalls
P	(mm bzw. mm/h)	Niederschlag
P_m	(mm)	mittlere Niederschlagshöhe
P_{net}	(mm bzw. mm/h)	Netto-Niederschlag
P_s	(mm)	Niederschlagshöhe, die Interzeptionsspeicher füllt
p_t	(-)	Anteil Stammabfluss
Q	(m ³ /s)	Durchfluss / Abfluss
Q_{ber}	(m ³ /s)	berechneter Durchfluss
Q_{gem}	(m ³ /s)	gemessener Durchfluss

Symbol	Einheit	Bezeichnung
r	(-)	Eich-Parameter für den Ansatz nach Disse
R	(J/(mol · K))	allgemeine Gaskonstante
R	(mm/a)	Abfluss (Versickerung + Oberflächenabfluss)
r _a	(s/m)	aerodynamischer Widerstand
R _G	(MJ/(m ² *d))	Globalstrahlung
R _k	(W/m ²)	kurzwellige Strahlung
R _l [↓]	(W/m ²)	einfallende langwellige Strahlung
R _l [↑]	(W/m ²)	ausstrahlende langwellige Strahlung
R _n	(W/m ²)	Nettostrahlung
r _s	(s/m)	Bestandswiderstand
RWB	(-)	Regenwasserbewirtschaftung
S _i	(mm)	berechnete Höhe Interzeptionsspeicher
S _{i,alt}	(mm)	Höhe Interzeptionsspeicher vorheriger Zeitschritt
S _{i,act}	(mm)	tatsächliche Höhe Interzeptionsspeicher
S _L	(mm/LAI)	Blattspeicher-Koeffizient
S _{max}	(mm)	maximale Höhe Interzeptionsspeicher
SA	(-)	Sensitivitätsanalyse
SCE-UA	(-)	Shuffled Complex Evolution (University of Arizona)
SCF	(-)	(Vegetations-)bedeckter Flächenanteil
SD	()	Standardabweichung
So_Depth	(mm)	Stärke Bodenschicht (SWMM-Parameter)
So_FK	(-)	Feldkapazität Bodenschicht (SWMM-Parameter)
So_GPV	(-)	Gesamtporenvolumen Bodenschicht (SWMM-Parameter)
So_kf	(mm/h)	Durchlässigkeitsbeiwert Bodenschicht (SWMM-Parameter)
So_kf_sl	(%)	Rezessionskonstante Bodenschicht (SWMM-Parameter)
So_nFK	(-)	nutzbare Feldkapazität Bodenschicht (SWMM-Parameter)

Symbol	Einheit	Bezeichnung
So_Such	(mm)	Saugspannung Bodenschicht (SWMM-Parameter)
So_WP	(-)	Welkepunkt Bodenschicht (SWMM-Parameter)
St_Height	(mm)	Stärke Speicherschicht (SWMM-Parameter)
St_kf	(mm/h)	Durchlässigkeitsbeiwert Erdreich (SWMM-Parameter)
St_VoidR	(-)	Porosität Speicherschicht (SWMM-Parameter)
Su_ManN	(-)	Rauigkeit Oberfläche (SWMM-Parameter)
Su_Slope	(%)	Gefälle Oberfläche (SWMM-Parameter)
Su_Stor	(mm)	Speicherhöhe Oberfläche (SWMM-Parameter)
SWMM	(-)	Stormwater Management Model
T	(°C)	Tagesmittel Temperatur
T _M	(°C)	Langzeitmittel der Temperatur
T(t)	(°C)	Aktuelle Temperatur
v	(m/s)	Windgeschwindigkeit
V	(mm bzw. mm/h)	Verdunstung
VarC	(%)	Variationskoeffizient
Vol	(-)	Volumenabweichung
W _{frac}	(-)	Anteil d. Tages mit wasserbenetzter Blattoberfläche
WP	(Vol-%)	Welkepunkt
z ₀	(m)	Rauheitshöhe
α	(°)	Einstrahlungswinkel
α	(-)	Albedo
ΔS	(mm/a)	Speicheränderung
Δt_w	(h)	Zeit, die für Verdunstung der Interzeption mit der potentiellen Rate benötigt wird
η	(-)	Maximaler relativer Wassergehalt ohne anaerobe Verhältnisse
η	(-)	Grenzwert, ab dem abgemindert wird

Symbol	Einheit	Bezeichnung
θ_2	(Vol-%)	Bodenfeuchte der Bodenschicht
$\theta(t)?$	(Vol-%)	aktuelle Bodenfeuchte
θ_{FK}	(Vol-%)	Bodenfeuchte Feldkapazität
θ_{GPV}	(Vol-%)	Gesamtporenvolumen
θ_{WP}	(Vol-%)	Bodenfeuchte Welkepunkt
$\theta(\psi)$	(Vol-%)	Bodenfeuchte bei der aktuellen Saugspannung ψ
$\theta_{\psi g}$	(Vol-%)	Bodenfeuchte bei einer definierten Saugspannung
Θ_H	(Vol-%)	Hygroskopizität
Θ_{SW}	(Vol-%)	Bodenfeuchte bei maximalem Stomatawiderstand
λ	(J/g)	spezifische Verdampfungswärme
μ	(g·mol ⁻¹)	Molekulargewicht des Wassers
ρ_w	(kg·m ⁻³)	Dichte des Wassers
ϕ_2	(Vol-%)	Porenvolumen der Bodenschicht
ϕ_3	(Vol-%)	Porenvolumen der Speicherschicht
Φ	(1000 hPa)	Saugspannung der Luft
ψ	(m)	aktuelle Saugspannung



1 Veranlassung und Zielsetzung

Städte als bevorzugte Lebensräume stehen in Zeiten des Klimawandels, der Urbanisierung sowie des demographischen Wandels zunehmend vor der Herausforderung neuer Systembelastungen. Der Wasser- sowie Energiehaushalt ist durch die zunehmende Versiegelung von starken Veränderungen betroffen. In Siedlungsgebieten ist von einer Verringerung der Grundwasserneubildung und Verdunstung auszugehen, während Abflussvolumen und Abflussspitzen zunehmen und der Niederschlagsabfluss stark beschleunigt auftritt. Nachhaltige Anpassungsstrategien sollen diesen negativen Effekten entgegenwirken.

Im Sinne einer integralen Entwässerungsplanung ist es das Ziel, den lokalen Wasserhaushalt hydraulisch sowie stofflich möglichst wenig zu beeinträchtigen (DWA-A 100 2006). Aus Sicht der Stadthydrologie stellt die Verdunstung einen entscheidenden Parameter in der Wasserhaushaltsbilanzierung dar. Dieser wird von verschiedenen meteorologischen und hydrologischen Einflüssen geprägt und steht gleichermaßen in Abhängigkeit von Standortfaktoren wie Bodeneigenschaften und Vegetation.

Im Rahmen der ressourceneffizienten Stadtentwicklung wurden in der Vergangenheit für die Verdunstung oftmals nur überschlägige Ansätze gewählt, die mit gemittelten Gebieteigenschaften in die Wasserhaushaltsmodellierung eingingen. Kleinskalige Strukturen, wie die verschiedenen urbanen Vegetationsflächen, fanden in nur sehr geringem Maße Abbildung in den Modellen, obwohl die nachhaltige Strategieentwicklung auf dieser Ebene abläuft.

Ziel dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung der Verdunstungsmodellierung, die im Niederschlag-Abfluss Modell SWMM für die Abbildung blau-grüner Infrastruktur angewendet wird. Dabei sollen so weit wie möglich die komplexen Zusammenhänge des Systems Pflanze-Boden-Atmosphäre beachtet werden, so dass eine realitätsnahe Modellierung verschiedener Vegetationselemente möglich ist. Gründende Basis ist eine umfassende Literaturrecherche zur Verdunstungsmodellierung von Vegetationsflächen. Für die auszuwählenden Ansätze sollen Erkenntnisse hinsichtlich Parametersensitivitäten gewonnen und darauf aufbauend Empfehlungen zur Parametrisierung gegeben werden. Die Übertragung der Modellierung auf großskalige Gebiete soll die Anwendbarkeit für durchgehende Planungen im Sinne des „water sensitive urban design“ sichern.



2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Grundlagen der Verdunstung

2.1.1 Definition

Unter „Verdunstung“ versteht man den physikalischen Vorgang, bei dem Wasser bei Temperaturen unterhalb des Siedepunktes vom flüssigen (oder festen) in den gasförmigen Aggregatzustand übergeht. Der Prozess kann sowohl an vegetationsfreien Oberflächen oder Flüssigkeiten, als auch an pflanzenbewachsenen Arealen erfolgen und ist ein energieverbrauchender Vorgang. Diese Energie wird der Umgebung entzogen. Die Folge ist eine Abkühlung der Oberfläche, was auch als „Verdunstungskälte“ bezeichnet wird. Diese ist darauf zurückzuführen, dass stets das energiestärkste Molekül die Flüssigkeit verlässt (BAUMGARTNER und LIEBSCHER 1996).

2.1.2 Verdunstungskomponenten

An allen Grenzflächen zur Atmosphäre, an denen Wasser zur Verfügung steht, findet Verdunstung statt. Dazu gehören Wasser-, Boden- und Pflanzenoberflächen sowie benetzte und künstliche Oberflächen. Auch Schnee und Eis sind dem Verdunstungsprozess hinzuzuzählen, da Wasser auch direkt vom festen in den gasförmigen Aggregatzustand wechseln kann.

Man unterscheidet grundsätzlich die folgenden in Abbildung 2.1 dargestellten Verdunstungskomponenten:

- Die **Evaporation** wird auch als „unproduktive Verdunstung“ bezeichnet. Sie findet ausgehend von der unbewachsenen Erdoberfläche oder von freien Wasserflächen statt. Über der Erdoberfläche hängt sie von der Bodenfeuchte sowie von der Nachlieferung aus tieferen Bodenschichten ab. Über Wasseroberflächen fungiert sie fast unbegrenzt. In Mitteleuropa kann laut DWA-M 504-1 (2018) für Landoberflächen von einem Anteil der Evaporation an der Gesamtverdunstung zwischen 5 und 25% ausgegangen werden.

