Hamburg | Behörde für Umwelt und Energie

Quantifizierung der Verdunstungsleistung (Kühlleistung) von Böden in Hamburg

Projektbericht

Bearbeiter:
Dr. Jürgen Domroese
Freie und Hansestadt Hamburg
Behörde für Umwelt und Energie
Amt für Umweltschutz
- Bodenschutz/Altlasten -

Hamburg, August 2017

Inhalt

Abbildungsverzeichnis 2
Tabellenverzeichnis 2
1 Das Konzept für die Quantifizierung der Kühlleistung 3
2 Ergebnisse für verschiedene Böden mit gleicher Vegetationsbedeckung 9
3 Ergebnisse für gleiche Böden mit unterschiedlicher Vegetationsbedeckung 13
4 Die Gesamtergebnisübersicht und ihre Bewertung 16
5 Literatur 19

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Das Konzept für die Quantifizierung der Kühlleistung verschiedener Böden 3
Abbildung 1-2: Die Verdunstungspotenzialkarte Hamburg und die Standorte für die Modellierung 4
Abbildung 1-3: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Bodenfeuchte (Modellvalidierung) 5
Abbildung 1-4: Bodenmodellparameter für die Modellierung des Bodenwasserhaushalts 6
Abbildung 1-5: Berechnung von Tagessummen der realen Evapotranspiration ET_r im Modell ArcEGMO-PSCN 8
Abbildung 2-1: Verdunstungsleistung an den Standorten in den Monaten Juni und Juli 2006 (Zeitreihen) 10
Abbildung 2-2: Verdunstungsleistung an den Standorten D_G3 und D_G4 in den Sommermonaten im Vergleich 11
Abbildung 2-3: Verdunstungsleistung der Böden an Sommertagen (Verdunstungsleistungsdiagramme) 12
Abbildung 3-1: Verdunstungsleistung am Standort D_G3 in den Monaten Juni und Juli 2006 (Zeitreihen) 13
Abbildung 3-2: Verdunstungsleistung am Standort D_G3 in den Sommermonaten im Vergleich 14
Abbildung 3-3: Verdunstungsleistung am Standort D_G4 in den Sommermonaten im Vergleich 15
Abbildung 4-1: Verdunstungsleistung in Abhängigkeit von Boden und Vegetationsbedeckung (Landnutzung) 16
Abbildung 4-2: Die Verdunstungspotenzialkarte und die Ergebnisse der Quantifizierung der Kühlleistung 17

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nutzbare Feldkapazität der maximalen Wurzelzone (nFK) an den Standorten D_G3 und D_G4 7

1 Das Konzept für die Quantifizierung der Kühlleistung

Die für Hamburg entwickelte Verdunstungspotenzialkarte (Domroese, 2011) klassifiziert die Hamburger Böden hinsichtlich ihrer zu erwartenden Kühlleistung in den Sommermonaten. Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, wie groß die Unterschiede in der Verdunstungsleistung an Sommer- bzw. Hitzetagen (Tage mit Maximum der Lufttemperatur >= 25 °C bzw. >= 30 °C) auf Böden mit unterschiedlichen Verdunstungspotenzialen sind.

Die Verdunstung ist eine Wasserhaushaltsgröße, die im Vergleich mit anderen Wasserhaushaltsgrößen - zum Beispiel mit dem Niederschlag - nur schwierig direkt zu messen ist. Tagessummen der Verdunstung als Äquivalent für die Kühlleistung an einem Standort müssen deshalb berechnet werden. Für die Berechnung der Verdunstungsleistung an Sommer- bzw. Hitzetagen eignen sich komplexe Bodenwasserhaushaltsmodelle, die in Tagesschritten die einzelnen Prozesse des Bodenwasserhaushalts quantifizieren und deren Zusammenwirken simulieren. Das Modell ArcEGMO-PSCN (Becker, et al., 2002) [www.arcegmo.de] ist ein derartiges Modell, das sowohl eine detaillierte, schichtweise Beschreibung des Bodenprofils als auch die Berücksichtigung des Wachstums verschiedener Vegetationsbedeckungen (Landnutzungen) ermöglicht.

Die Abbildung 1-1 zeigt in einer kompakten Übersicht das Konzept für die Quantifizierung der Unterschiede in der Kühlleistung verschiedener Böden im Hamburger Stadtgebiet an Sommertagen.

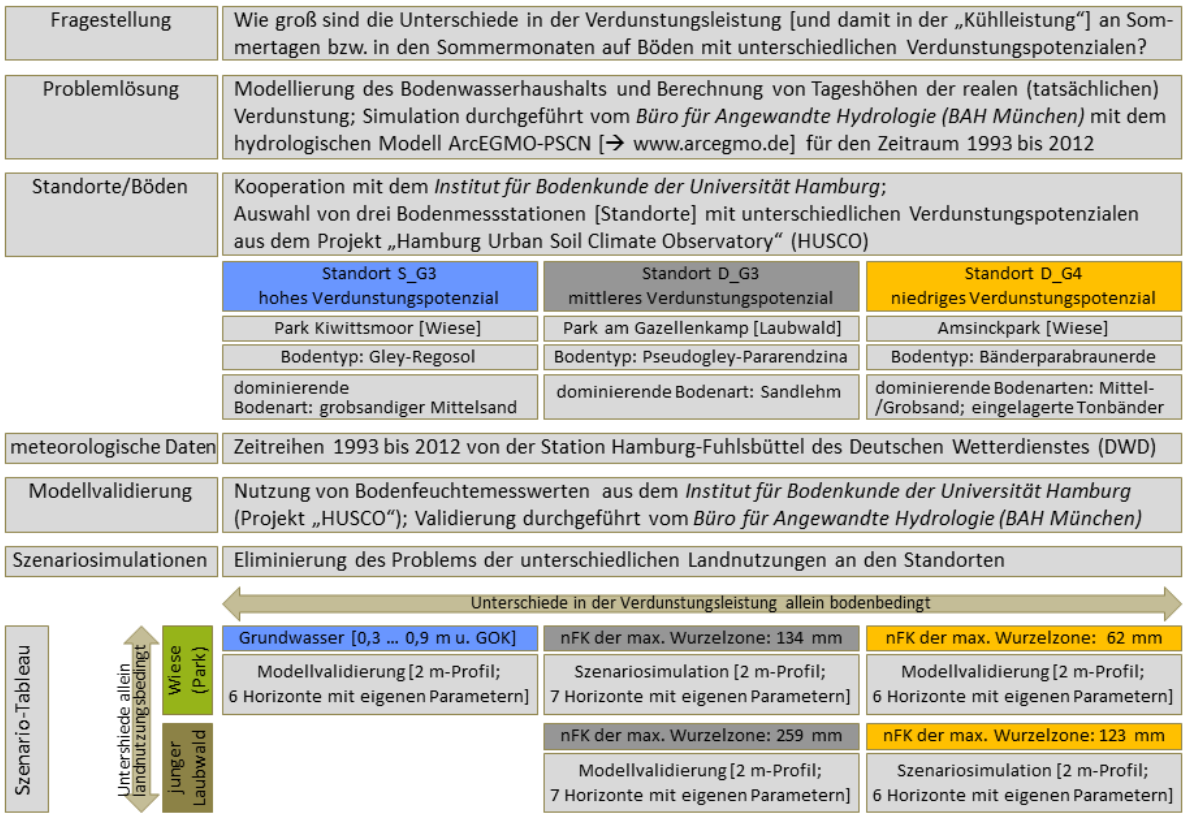

Abbildung 1-1: Das Konzept für die Quantifizierung der Kühlleistung verschiedener Böden

Für die Quantifizierung der Verdunstungsleistung wurden drei **Standorte** aus dem Projekt HUSCO [„Hamburg Urban Soil Climate Observatory“; https://www.clisap.de/de/forschung/b:-auspraegungen-und-auswirkungen-des-klimas/b5:-urbane-systeme-versuchsgebiet-hamburg/husco-hamburg-urban-soil-climate-observatory/] der Universität Hamburg, die gemäß Verdunstungspotenzialkarte (Domroese, 2011) unterschiedlichen Verdunstungspotenziale aufweisen, ausgewählt. Einen Überblick über Lage der Standorte, über deren Vegetationsbedeckung sowie über die dazugehörigen Bodentypen und dominierenden Bodenarten geben die Abbildungen 1-1 und 1-2. Die für die Modellierung des Bodenwasserhaushalts ausgewählten Böden liegen in Hamburger Parks in den Stadtteilen Langenhorn (Park Kiwittsmmor → Standort S_G3) und Stellingen (Park am Gazellenkamp → Standort D_G3 sowie Amsinckpark → Standort D_G4). Beim Standort S_G3 handelt es sich um einen Boden mit Grundwasseranschluss.

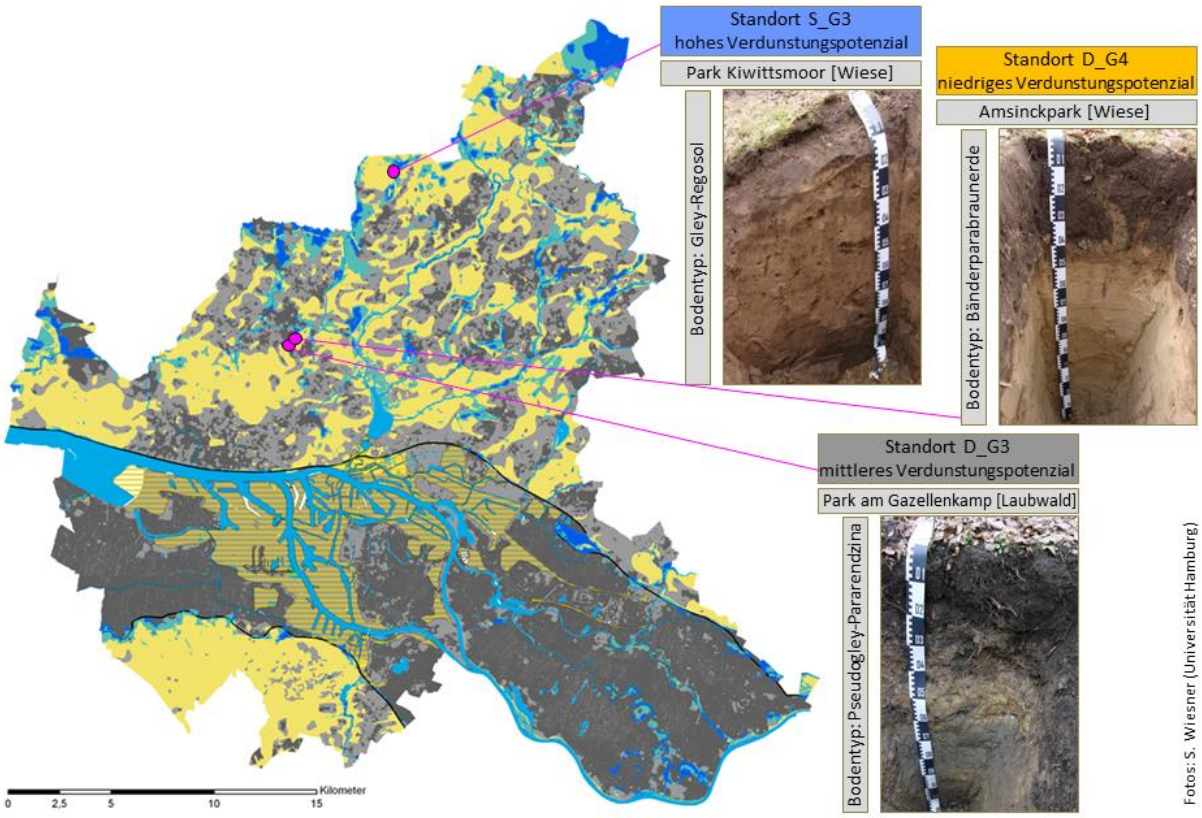

Abbildung 1-2: Die Verdunstungspotenzialkarte Hamburg und die Standorte für die Modellierung

Für die Standorte wurden im Rahmen des HUSCO-Projekts bodenkundliche Profilaufnahmen nach Bodenkundlicher Kartieranleitung KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) durchgeführt sowie bodenphysikalische Parameter im Labor bestimmt (Wiesner, 2013). Diese Untersuchungen bildeten die Grundlage für Unterteilung des Bodenprofils mit einer Gesamtmächtigkeit von 2 m in sechs bzw. sieben Bodenhorizonte und für eine erste Schätzung der dazugehörigen **Bodenmodellparameter**.

Die Modellvalidierung sowie die anschließenden Modellrechenläufe für den 20-Jahre-Zeitraum 01.01.1993 bis 31.12.2012 wurden vom Büro für Angewandte Hydrologie München durchge-

führt. Die Aus- und Bewertung der vom Büro für Angewandte Hydrologie übergebenen Modelleingangsdaten und Simulationsergebnisse erfolgte im Amt für Umweltschutz der Behörde für Umwelt und Energie Hamburg. Für die **Modellvalidierung** konnten an den drei Standorten Bodenfeuchtemesswerte in den Tiefen 0,1 m, 0,4 m, 0,8 m und 1,6 m aus den Jahren 2011 und 2012 aus dem Projekt HUSCO der Universität Hamburg herangezogen werden. Die Ergebnisse der Modellvalidierung, bei denen zufriedenstellende Übereinstimmungen zwischen gemessenen und simulierten Bodenfeuchten erreicht wurden, zeigt beispielhaft für die Bodentiefe 0,4 m die Abbildung 1-3. Weitere Validierungsergebnisse können dem Bericht von (Klöcking, 2014) entnommen werden.

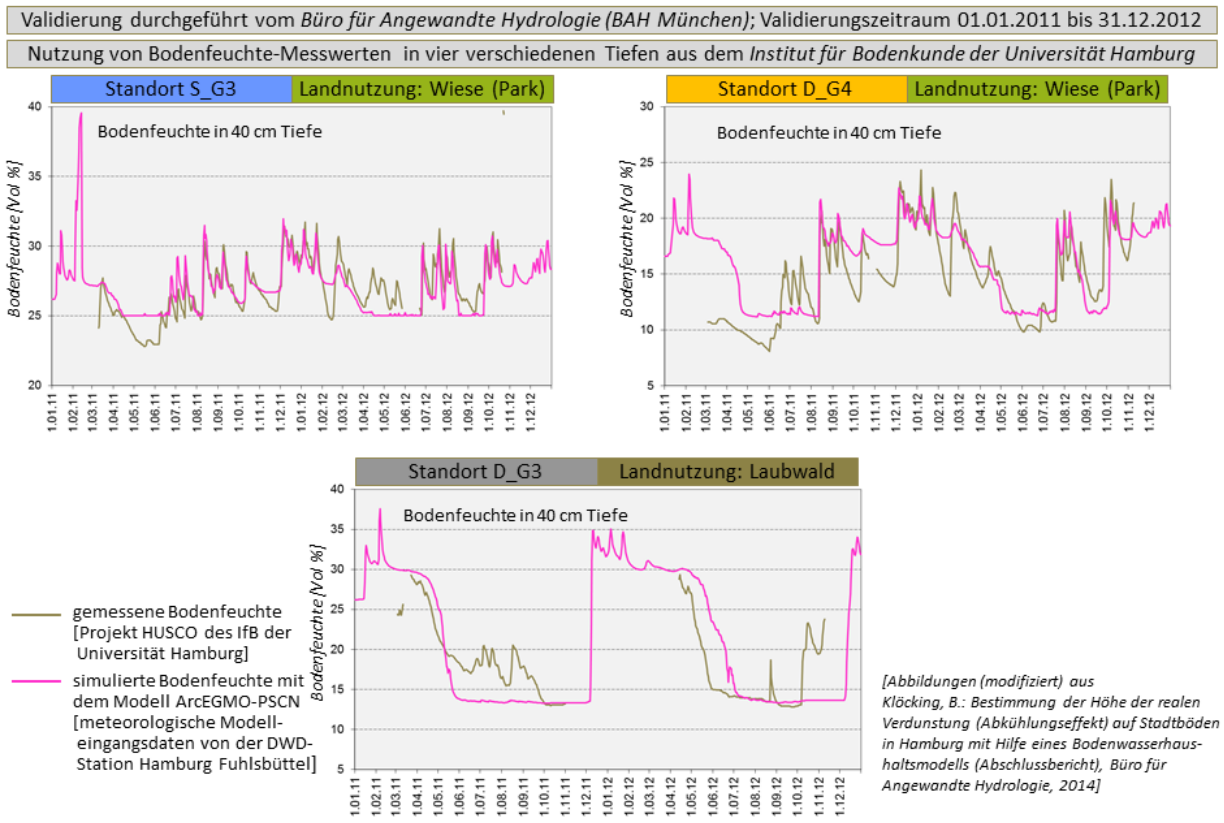

Abbildung 1-3: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Bodenfeuchte (Modellvalidierung)

Im Ergebnis des iterativen Verfahrens der Modellvalidierung wurde der **Bodenmodellparameter**satz - bestehend aus den wesentlichen bodenphysikalischen Parametern

- Gesamtporenvolumen (GPV),
- Feldkapazität (FK),
- permanenter Welkepunkt (PWP) und
- gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)

- für jeden Standort erhalten (siehe Abbildung 1-4), mit dem die Simulationsrechnungen für den 20-Jahre-Zeitraum durchgeführt wurden.

Die Standorte weisen unterschiedliche Arten von Vegetationsbedeckung auf, die ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Kühlleistung sind. Während es sich an den Standorten S_G3 und

D_G4 um eine Parkwiese handelt, tritt an Standort D_G3 ein junger Laubmischwald auf. Um den Einfluss der unterschiedlichen Vegetationsbedeckung zu eliminieren und nur den Einfluss des Bodens auf die Verdunstungsleistung zu erfassen, wurden die 20-Jahre-Simulationen an den Standorten D_G3 und D_G4 sowohl mit Wiese als auch mit Laubwald als Vegetation durchgeführt (**Szenario-Simulationen**; siehe auch Abbildung 1-1).

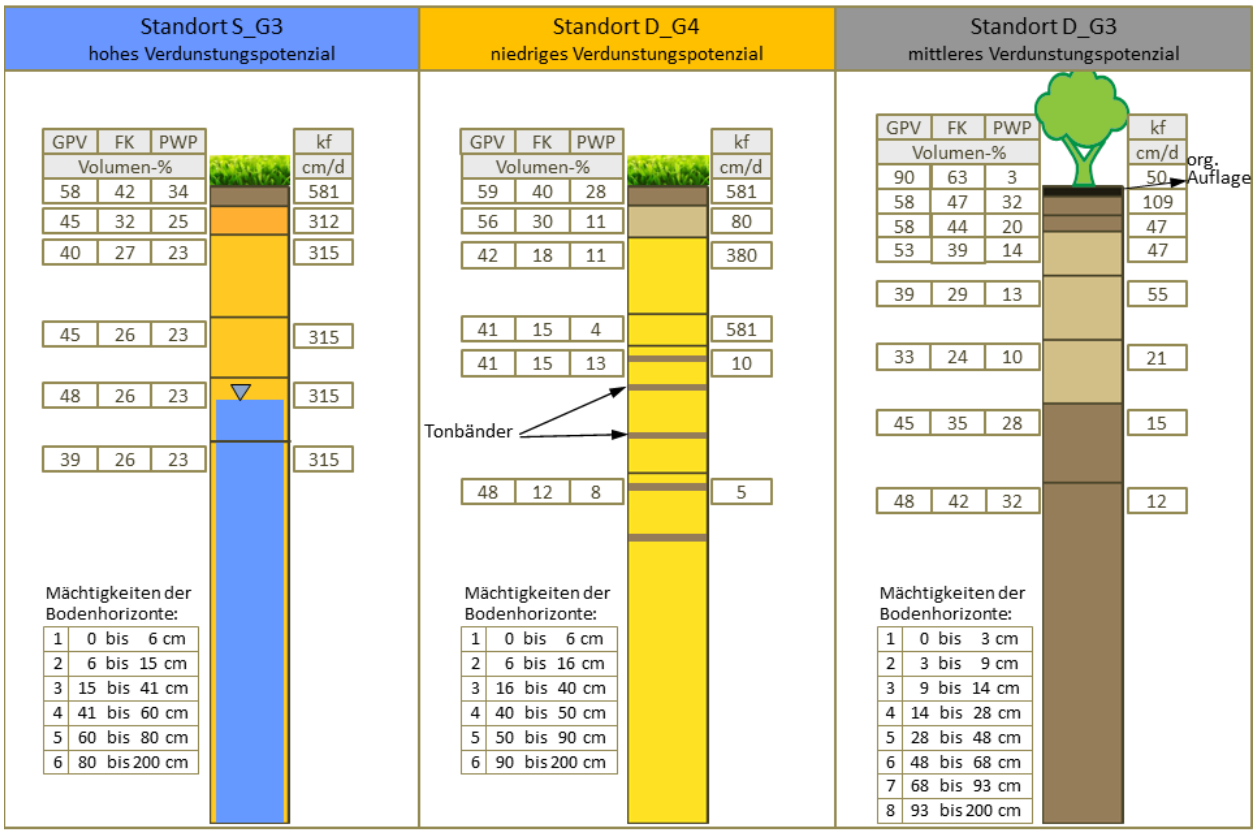

Abbildung 1-4: Bodenmodellparameter für die Modellierung des Bodenwasserhaushalts

Für die Schätzung der für die Modellierung erforderlichen standortabhängigen **Vegetationsparameter** wurden phänologische Beobachtungen an drei Phänostationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in der näheren Umgebung der Freien und Hansestadt Hamburg herangezogen (Klöcking, 2014). Beim Modellparameter Durchwurzelungstiefe wurde die erkennbare Durchwurzelung bei der bodenkundlichen Profilaufnahme berücksichtigt.

Beim Standort S_G3 bestimmt der Grundwasseranschluss maßgeblich den Bodenwasserhaushalt und damit auch die Verdunstungsleistung. Um die **Schwankungen des Grundwasserspiegels** bei der Modellierung zu erfassen, wurden gemessene Grundwasserstände von umliegenden Grundwassermessstellen genutzt und eine synthetische Ganglinie des Grundwasserflurabstands am Standort S_G3 für den 20-Jahre-Zeitraum berechnet (Klöcking, 2014).

Die nutzbare Feldkapazität der maximalen Wurzelzone (nFK) beschreibt die Menge des von den Pflanzen ausschöpfbaren Bodenwassers. Dieser Bodenkennwert ist der entscheidende Einflussfaktor auf die Verdunstungsleistung an den Standorten D_G3 und DG_4. Für die Vegetationsbedeckungen Wiese und junger Laubwald mit verschiedenen maximalen Wurzeltie-

fen wurden aus den Bodenmodellparametern in Abbildung 1-4 die in Tabelle 1 genannten nutzbaren Feldkapazitäten an den beiden Standorten berechnet.

Tabelle 1: Nutzbare Feldkapazität der maximalen Wurzelzone (nFK) an den Standorten D_G3 und D_G4

Vegetationstyp (Landnutzung)	maximale Durchwurzelungstiefe	Standort DG_G3	Standort DG_4
Wiese (Park)	0,9 m	nFK: 134 mm*)	nFK: 62 mm
junger Laubwald	2,0 m	nFK: 259 mm	nFK: 123 mm*)

*) … Szenario-Simulation

Als **meteorologische Modelleingangsdaten** für die Modellsimulation im 20-Jahre-Zeitraum 1993 bis 2012 wurden Tageswerte der nachfolgend aufgeführten meteorologischen Messdaten von der DWD-Station Hamburg-Fuhlsbüttel verwendet:

- Tagessumme des Niederschlags [mm],
- Tagesmittelwert der Lufttemperatur [°C],
- Tagesmaximum der Lufttemperatur [°C],
- Tagesminimum der Lufttemperatur [°C],
- Tagesmittelwert der relativen Luftfeuchte [%],
- Tagesmittelwert der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [m/s] und
- Sonnenscheindauer [h].

Für die nachfolgende Bewertung der Verdunstungsleistung an den verschiedenen Standorten muss der Algorithmus zur Berechnung von Tagessummen der realen Evapotranspiration (tatsächliche Verdunstung) im Modell ArcEGMO-PSCN näher beleuchtet werden. Die Berechnung der realen Evapotranspiration erfolgt im Modell in Anlehnung an die im ATV-DVWK-Regelwerk, Merkblatt M 504, (ATV-DVWK , 2002), beschriebenen Verfahren. Eine Übersicht über den gesamten Algorithmus und die dazugehörigen Maxima der Tagessummen im 20-Jahre-Zeitraum zeigt die Abbildung 1-5.

Zunächst wird die Gras-Referenzverdunstung ET_0 berechnet. Auf die Höhe der Gras-Referenzverdunstung wirken alle meteorologischen Faktoren, welche

a) die Energiezufuhr zur verdunstenden Oberfläche (→ Sonnenscheindauer) [Strahlungsterm]
und
b) den Verdunstungsanspruch der Atmosphäre, charakterisiert durch die Größe des Wasserdampfgradienten (→ relative Luftfeuchte) sowie den Abtransport des Wasserdampfes (→ Windgeschwindigkeit) [Ventilationsfeuchteterm],

beeinflussen. Die Gras-Referenzverdunstung gilt für einen exakt definierten Grasbestand mit stets ausreichender Wasserversorgung, so dass das im Boden gespeicherte und für die Verdunstung verfügbare Wasser nicht limitierend auf Prozess wirkt.

Anschließend wird die Art der Vegetationsbedeckung bzw. die Landnutzung am Standort berücksichtigt und in Abhängigkeit vom Bewuchs und vom Entwicklungsstadium der Pflanze die

potenzielle Evapotranspiration ET_p bestimmt. Für diese auch als landnutzungsabhängige maximale Verdunstung bezeichnete Rechengröße gilt ebenfalls, dass die Wasserversorgung am Standort den Verdunstungsprozess nicht limitiert und damit ihre Bestimmung unabhängig vom Bodenwasserhaushalt ist.

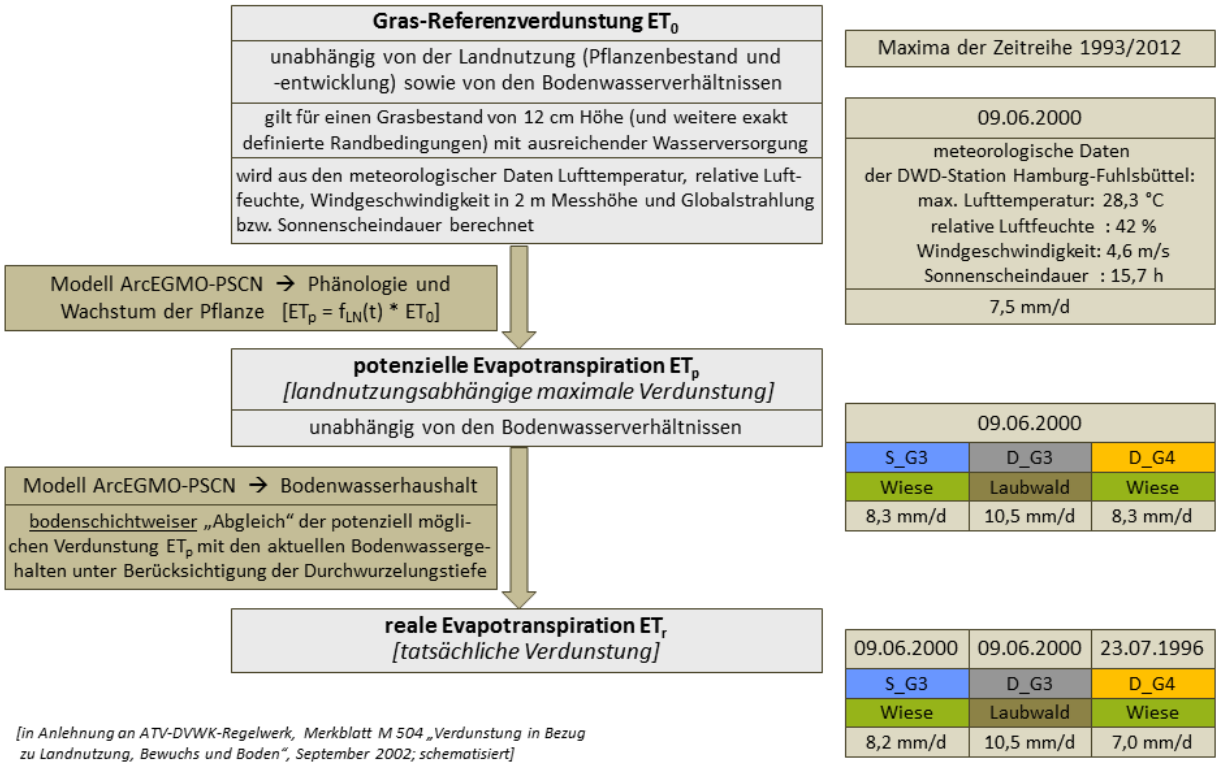

Abbildung 1-5: Berechnung von Tagessummen der realen Evapotranspiration ET_r im Modell ArcEGMO-PSCN

Im dritten Schritt wird die potenzielle Evapotranspiration ET_p zunächst mit der Tagessumme des Niederschlags und anschließend mit dem aktuellen Bodenwasservorrat in der durchwurzelten Bodenzone, den das Modell ArcEGMO-PSCN für jeden Tag bereitstellt, bodenhorizontweise abgeglichen und die reale Evapotranspiration ET_r (tatsächliche Verdunstung) bestimmt. Die reale Evapotranspiration ET_r ist kleiner als die potenzielle Evapotranspiration ET_p, wenn der Wassergehalt in der durchwurzelten Bodenzone nicht im optimalen Bereich für den Verdunstungsprozess liegt; d.h. wenn die Wassergehalte in einzelnen Bodenhorizonten nicht im näheren Umfeld der Feldkapazität liegen. Für Wassergehalte zwischen permanentem Welkepunkt und 0,9 * Feldkapazität werden sogenannte Reduktionsfunktionen eingesetzt, um aus der potenziellen Evapotranspiration ET_p die Tagessumme der realen Evapotranspiration ET_r zu ermitteln. Wassergehalte deutlich über der Feldkapazität beeinträchtigen die Sauerstoffversorgung der Pflanzenwurzel und damit den Verdunstungsprozess.

Abbildung 1-5 verdeutlicht, dass erst im dritten Schritt der Einfluss des Bodens auf den Verdunstungsprozess berücksichtigt wird. Alle anderen Einflussfaktoren sind in den Berechnungsschritten 1 und 2 vollständig enthalten und zeigen, dass sich die Verdunstungsleistung an verschiedenen Standorten bereits ohne Berücksichtigung der Bodenwassergehalte unterschei-

den kann. Zur Beurteilung der Kühlleistung von Böden an verschiedenen Standorten ist deshalb die Tagessumme der tatsächlichen Verdunstung ET_r nur im Falle von ansonsten exakt gleichen Bedingungen - gleiche Klimadaten sowie gleiche Vegetationsbedeckung mit gleichem Entwicklungsstadium an den Standorten - geeignet. In allen anderen Fällen bietet sich an, die reale Evapotranspiration ET_r ins Verhältnis zur potenziellen Evapotranspiration ET_p zu setzen (Normierung) und Tageswerte des Quotienten ET_r/ET_p zu berechnen. Diese Quotienten erlauben, die Kühlleistung von Böden an verschiedenen Standorten mit jeweils unterschiedlichen Klima- und Vegetationsbedingungen vergleichend zu bewerten.

Bei den Simulationsrechnungen für den 20-Jahre-Zeitraum mit dem Modell ArcEGMO-PSCN wurden für alle drei Standorte die gleichen Zeitreihen der meteorologischen Modelleingangsdaten verwendet. Allerdings unterschiedet sich die Art der Vegetationsbedeckung an den Standorten (siehe Abbildung 1-2 und Szenario-Tableau in Abbildung 1-1), so dass für die Ableitung wesentlicher vergleichender Aussagen auf Tageswerte des Quotienten ET_r/ET_p zurückgegriffen werden musste.

2 Ergebnisse für verschiedene Böden mit gleicher Vegetationsbedeckung

In diesem Kapitel werden die Unterschiede in der Verdunstungsleistung an den drei Standorten, die ausschließlich bodenbedingt sind (vgl. Szenario-Tableau in Abbildung 1-1), herausgearbeitet. Dafür wurde am Standort D_G3 zusätzlich zur realen Vegetationsbedeckung Laubwald ein Szenario mit der Vegetationsbedeckung Gras (Parkwiese) und - mit Ausnahme der maximalen Durchwurzelungstiefe - den gleichen Vegetationsparametern wie an den Standorten S_G3 und D_G4 gerechnet.

Die Abbildung 2-1 zeigt die Simulationsergebnisse in Tagesschritten an den drei Standorten für den außergewöhnlich trockenen und heißen Sommerzeitraum 01.06.2006 bis 31.07.2006 und die Vegetationsbedeckung Parkwiese. In die Darstellung wurden die meteorologischen Modelleingangsgrößen Niederschlag und maximale Tagestemperatur aufgenommen. In der Abbildung sind sowohl die Tagessummen der tatsächlichen Verdunstung ET_r (im Vordergrund als blaue Balken) als auch die Tagessummen der potenziellen Evapotranspiration ET_p (im Hintergrund als hellbraune Balken) dargestellt. Ist in Abbildung 2-1 an einem Tag nur ein blauer Balken zu sehen, hat die tatsächliche Verdunstung die Höhe der potenziellen Evapotranspiration erreicht.

Die Abbildung zeigt, dass der Bodenwasservorrat in der Wurzelzone am Ende des Monats Mai und die am 01.06. dazugekommene Niederschlagsmenge an allen drei Standorten ausreichen, um in der ersten Juni-Dekade eine tatsächliche Verdunstung auf dem Niveau der potenziellen Evapotranspiration zu erreichen.

Im Park Kiwittsmoor am Standort S_G3 reißt der kapillare Aufstieg aus dem hoch anstehenden Grundwasser in die Wurzelzone über den gesamten dargestellten Zeitraum nicht ab und ermöglicht damit durchgehend hohe Tagessummen der realen Evapotranspiration und eine dementsprechend hohe Kühlleistung auch in der trockenen Hitzeperiode 01.07. bis 31.07..

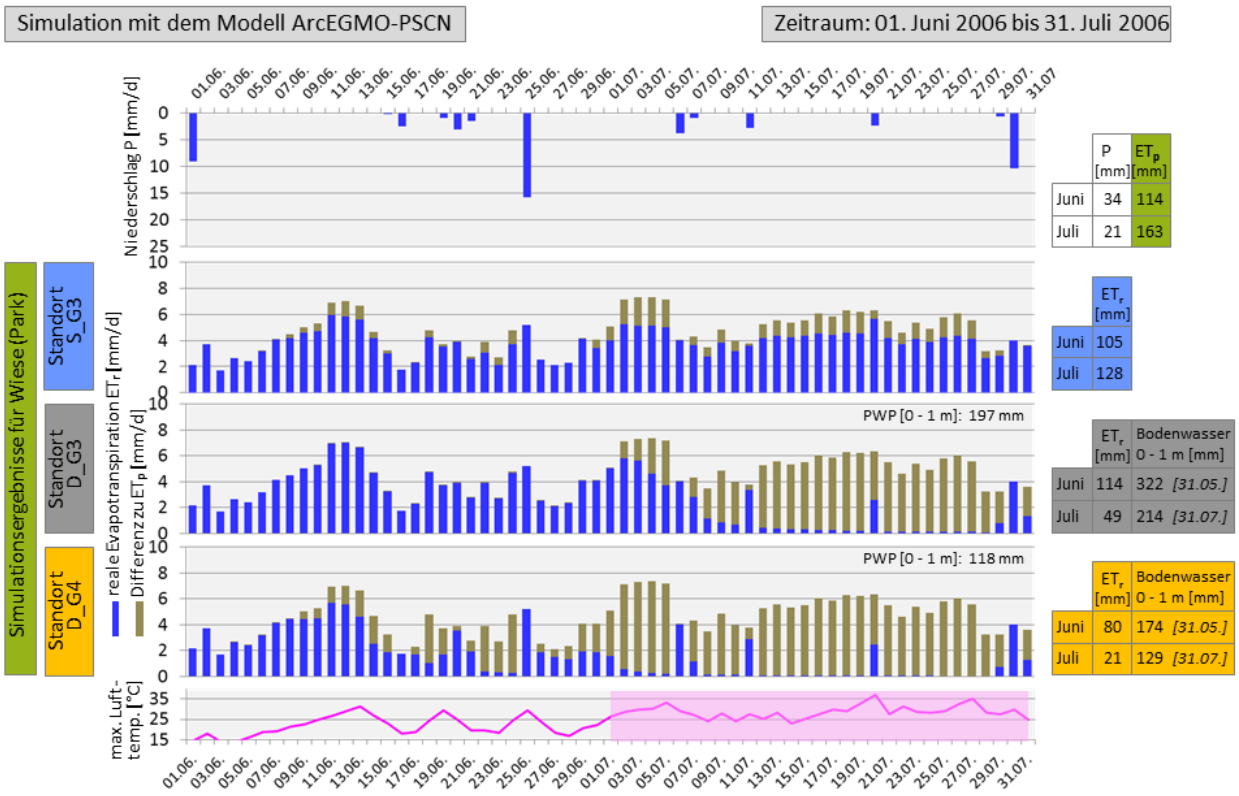

Abbildung 2-1: Verdunstungsleistung an den Standorten in den Monaten Juni und Juli 2006 (Zeitreihen)

Im Amsinckpark am Standort D_G4 führt die mit Beginn des Monats Juni einsetzende Trockenheit dazu, dass der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat in der Wurzelzone (nFK: 62 mm) immer weiter abnimmt und bereits mit Beginn der zweiten Monats-Dekade im Juni die tatsächliche Verdunstung unter die potenzielle Evapotranspiration sinkt. Der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat wird im weiteren Verlauf schnell vollständig ausgeschöpft, so dass in der gesamten Hitzeperiode vom 01.07. bis 31.07. nur an Tagen mit Niederschlagsereignissen Wasser verdunsten kann. In der Hitzeperiode, in der eine Kühlung am Standort wünschenswert gewesen wäre, tendiert die Kühlleistung des Bodens damit gegen Null.

Im Park am Gazellenkamp am Standort D_G3 mit mittlerem Verdunstungspotenzial (nFK: 134 mm) erreicht die tatsächliche Verdunstung über den gesamten Monat Juni, der auch 6 Tage mit einem Maximum der Lufttemperatur >= 25 °C (Sommertage) beinhaltet, das Niveau der potenziellen Evapotranspiration. Der Boden kann noch in der ersten Dekade der anschließenden Hitzeperiode im Juli zur Kühlung am Standort beitragen, bevor auch an diesem Standort der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat aufgebraucht ist.

Die Abbildung 2-1 verdeutlicht die überlegene Kühlleistung am Standort S_G3 mit Grundwasseranschluss. Der Boden am Standort D_G3 mit mittlerem Verdunstungspotenzial kann noch bis zum Ende der ersten Juli-Dekade zum Kühlen seiner Umgebung beitragen, während am Standort D_G4 bereits am 24.06. erstmalig nahezu keine Kühlleistung mehr festzustellen ist.

In der Abbildung 2-2 sind jährlichen Monatssummen der tatsächlichen Verdunstung für die Sommermonate Juni, Juli und August in der 20-Jahre-Periode 1993 bis 2012 für die beiden Standorte ohne Grundwasseranschluss dargestellt. Einerseits bestätigt die Abbildung die nahezu durchgängig höhere Kühlleistung am Standort D_G3 gegenüber Standort D_G4 und die bereits bei Abbildung 2-1 diskutierte extreme Situation im Juli 2006. Andererseits erlaubt die Darstellung die Ableitung weiterer Erkenntnisse. So sind die Unterschiede in der Kühlleistung an beiden Standorten im Monat Juni im Allgemeinen am größten (vgl. Tabelle mit den Monatsmittelwerten in Abbildung 2-2). Das bedeutet, dass nach trockenen Frühjahren und in sehr trockenen Juni-Monaten die nur geringe nutzbare Feldkapazität am Standort D_G4 bereits im Monat Juni die Kühlleistung limitiert. Dagegen erschöpft der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat aufgrund der höheren nutzbaren Feldkapazität am Standort D_G3 deutlich später. Im Monat August kann jedoch im Allgemeinen an beiden Standorten kaum noch gespeichertes Bodenwasser aus den Vormonaten verdunsten, so dass die Evapotranspiration auf das Wasser aus aktuellen Niederschlägen beschränkt bleibt und beide Standorte sich in ihrer Kühlleistung in diesem Monat kaum unterscheiden. Eine Ausnahme bildet diesbezüglich nur das Jahr 1997, das in den Monaten Juni und Juli mit einer ausgeglichenen klimatischen Wasserbilanz und erst im Monat August mit einer dreiwöchigen, sehr warmen Trockenperiode aufwartete.

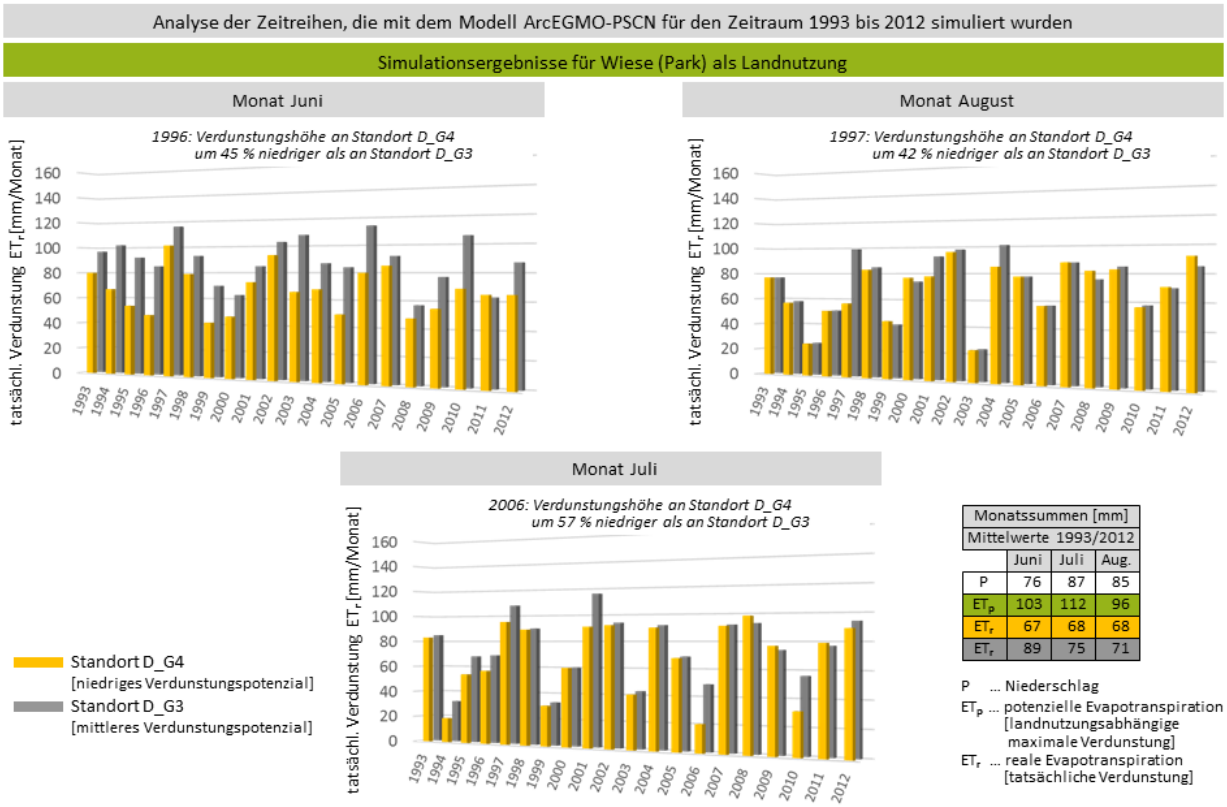

Abbildung 2-2: Verdunstungsleistung an den Standorten D_G3 und D_G4 in den Sommermonaten im Vergleich

Den besten Vergleich der Kühlleistung an den drei Standorten ermöglichen die entwickelten **Verdunstungsleistungsdiagramme**, die in Abbildung 2-3 dargestellt sind. Die Verdunstungsleistungsdiagramme, die den gesamten 20-Jahre-Zeitraum erfassen, bieten den großen Vorteil,

die Kühlleistung von Böden an verschiedenen Standorten mit jeweils unterschiedlichen Witterungs- und Vegetationsbedingungen vergleichend bewerten zu können (siehe auch Kap. 4). Außerdem beziehen sie sich ausschließlich auf die Sommertage (Tage mit Maximum der Lufttemperatur >= 25 °C; n = 574) aus dem 20-Jahre-Simulationszeitraum; d.h. auf die Tage, an denen eine Kühlleistung wünschenswert gewesen wäre.
Mit den Verdunstungsleistungsdiagrammen werden die Tageswerte des Quotienten Et_r/ET_p (siehe Kap. 1) an Sommertagen einer Häufigkeitsanalyse unterzogen und deren empirische Verteilungsfunktion ermittelt. In den Diagrammen sind relative Summenhäufigkeiten für die Tageswerte des Quotienten Et_r/ET_p dargestellt.

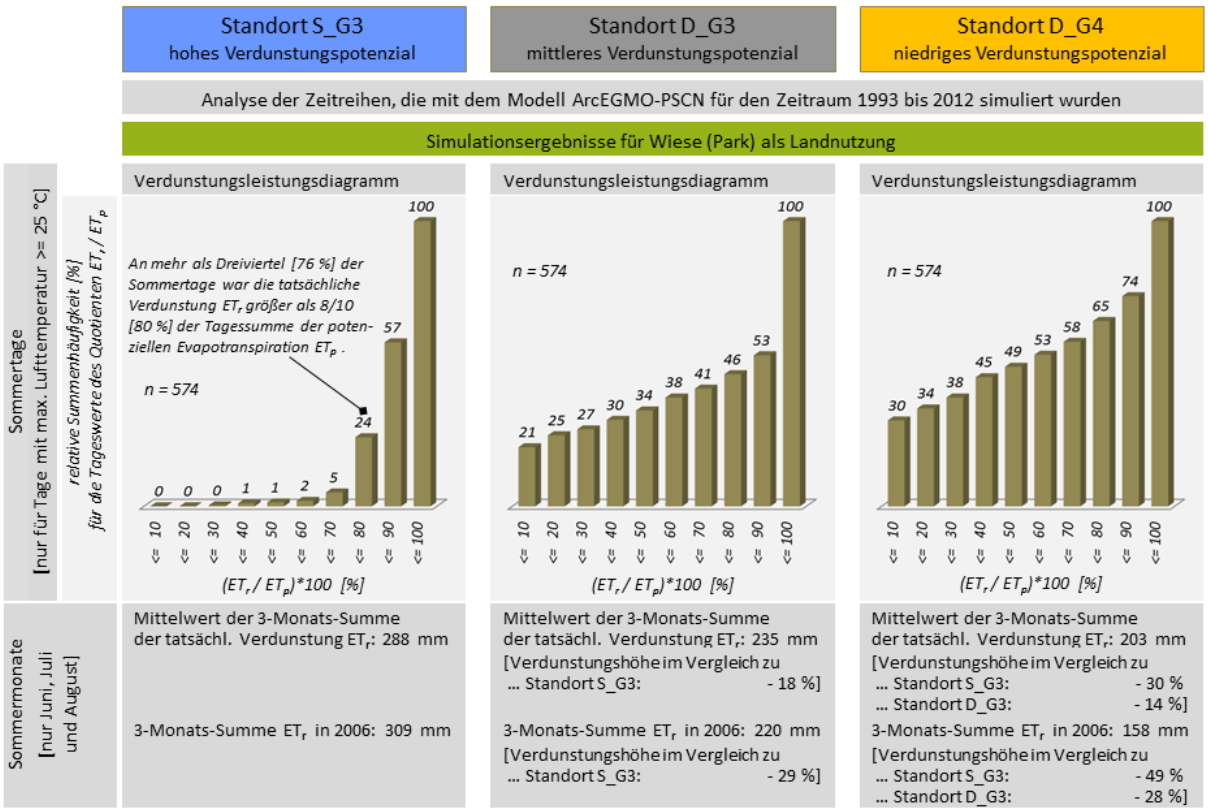

Abbildung 2-3: Verdunstungsleistung der Böden an Sommertagen (Verdunstungsleistungsdiagramme)

Allgemein gilt, dass die Verdunstungsleistung an einem Standort umso größer ist, je kleiner die von den dargestellten Balken eingenommene Gesamtfläche ist. Die Abbildung 2-3 unterstreicht noch einmal die überlegene Kühlleistung am Standort mit Grundwasseranschluss S_G3, an dem an 95 % der Sommertage die tatsächliche Verdunstung ET_r größer als 7/10 der für den jeweiligen Tag berechneten Tagessumme der potenziellen Evapotranspiration ET_p war. Dagegen war die tatsächliche Verdunstung an den Standorten D_G3 bzw. D_G4 nur an 59 % bzw. 42 % der Sommertage größer als 7/10 der o. g. Tagessumme. Die tatsächliche Verdunstung an den Standorten D_G3 und D_G4 unterschreitet an 21 % bzw. an 30 % der Sommertage sogar 1/10 der Tagessumme der potenziellen Evapotranspiration und tendiert an solchen Tagen gegen Null.

Ergänzend zu den Verdunstungsleistungsdiagrammen enthält die Abbildung 2-3 zusammenfas-

sende Informationen zur Verdunstungsleistung für die Sommermonate Juni, Juli und August als 3-Monats-Summen.

3 Ergebnisse für gleiche Böden mit unterschiedlicher Vegetationsbedeckung

Um Unterschiede in der Verdunstungsleistung an ein und demselben Standort, die ausschließlich vegetationsbedingt sind (vgl. Szenario-Tableau in Abbildung 1-1), bewerten zu können, wurde am Standort D_G4 zusätzlich zur realen Vegetationsbedeckung Parkwiese ein Szenario mit der Vegetationsbedeckung junger Laubwald und den gleichen Vegetationsparametern wie am Standort D_G3 gerechnet. Auf die Simulation mit einem Laubwald als Vegetationsbedeckung am Standort S_G3 wurde verzichtet, da die Wirkung des hohen Grundwasserstandes auf die Baumwurzeln modelltechnisch nur schwer zu erfassen ist.

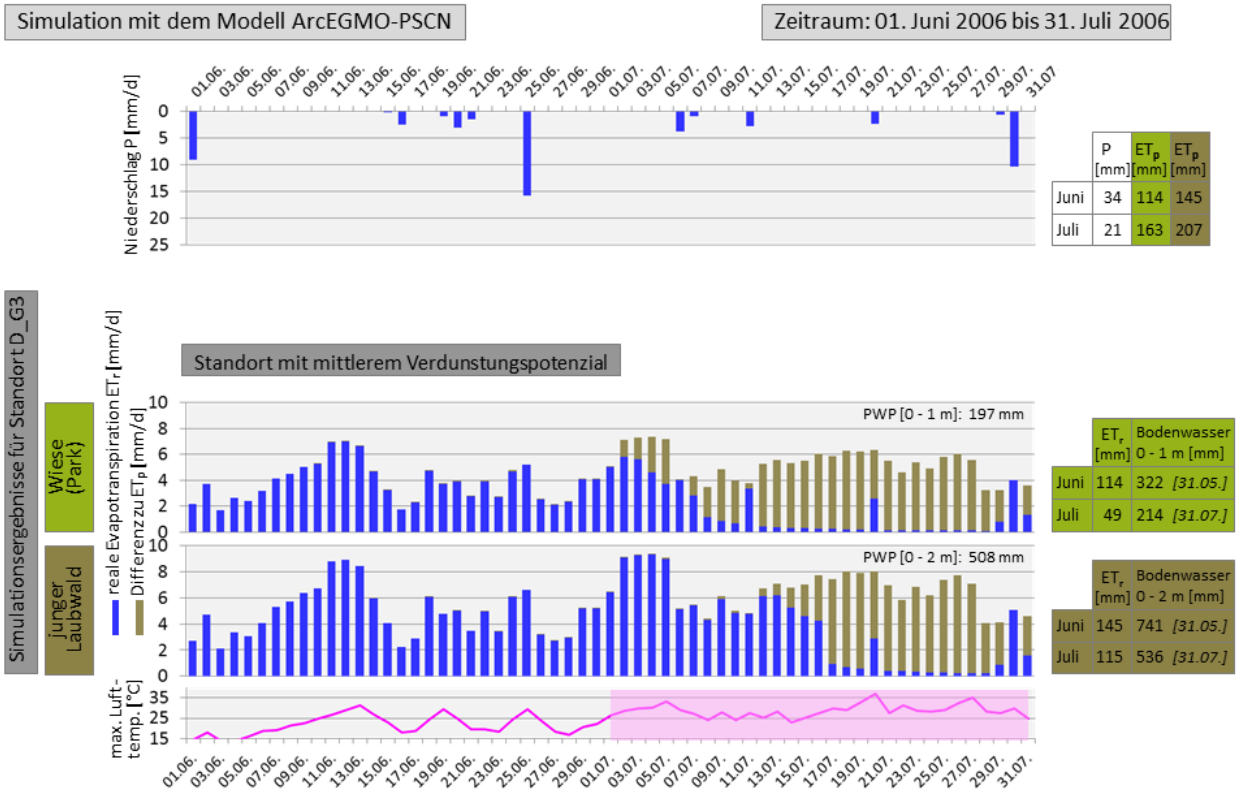

Abbildung 3-1: Verdunstungsleistung am Standort D_G3 in den Monaten Juni und Juli 2006 (Zeitreihen)

Ähnlich wie Abbildung 2-1 zeigt die Abbildung 3-1 die Simulationsergebnisse in Tagesschritten für den trockenen und heißen Sommerzeitraum 01.06.2006 bis 31.07.2006 am Standort mit mittlerem Verdunstungspotenzial D_G3. Die Abbildung lenkt zunächst das Augenmerk auf die

im Vergleich mit der Parkwiese höhere potenzielle „Verdunstungsleistungsfähigkeit“ des jungen Laubwalds (siehe Tagessummen der potenziellen Evapotranspiration; vgl. auch Abbildung 1-5). Mit der maximalen Durchwurzelungstiefe (siehe Tabelle 1) ergibt sich für die Vegetationsbedeckung junger Laubwald auch eine im Vergleich mit der Parkwiese deutlich höhere nutzbare Feldkapazität der maximalen Wurzelzone am Standort (nFK: 259 mm). Das führt zum einen dazu, dass bei ausreichender Wasserversorgung die tägliche Verdunstungsleistung des jungen Laubwalds höher ist als die Kühlleistung der Parkwiese. Außerdem zeigt die Abb. 6, dass der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat vom Laubwald erst am Ende der zweiten Juli-Dekade vollständig ausgeschöpft wurde. Damit erbrachte der Laubwald bei ausreichender Wasserversorgung nicht nur eine vegetationsbedingt höhere Kühlleistung, sondern konnte auch ca. 10 Tage länger als die Parkwiese zur Abkühlung am Standort D_G3 in der Hitzeperiode 01.07. bis 31.07.2006 beitragen.

Die Abbildungen 3-2 und 3-3 zeigen die Monatssummen der tatsächlichen Verdunstung für die Sommermonate Juni, Juli und August für die beiden Vegetationsbedeckungen an den Standorten D_G3 und D_G4.

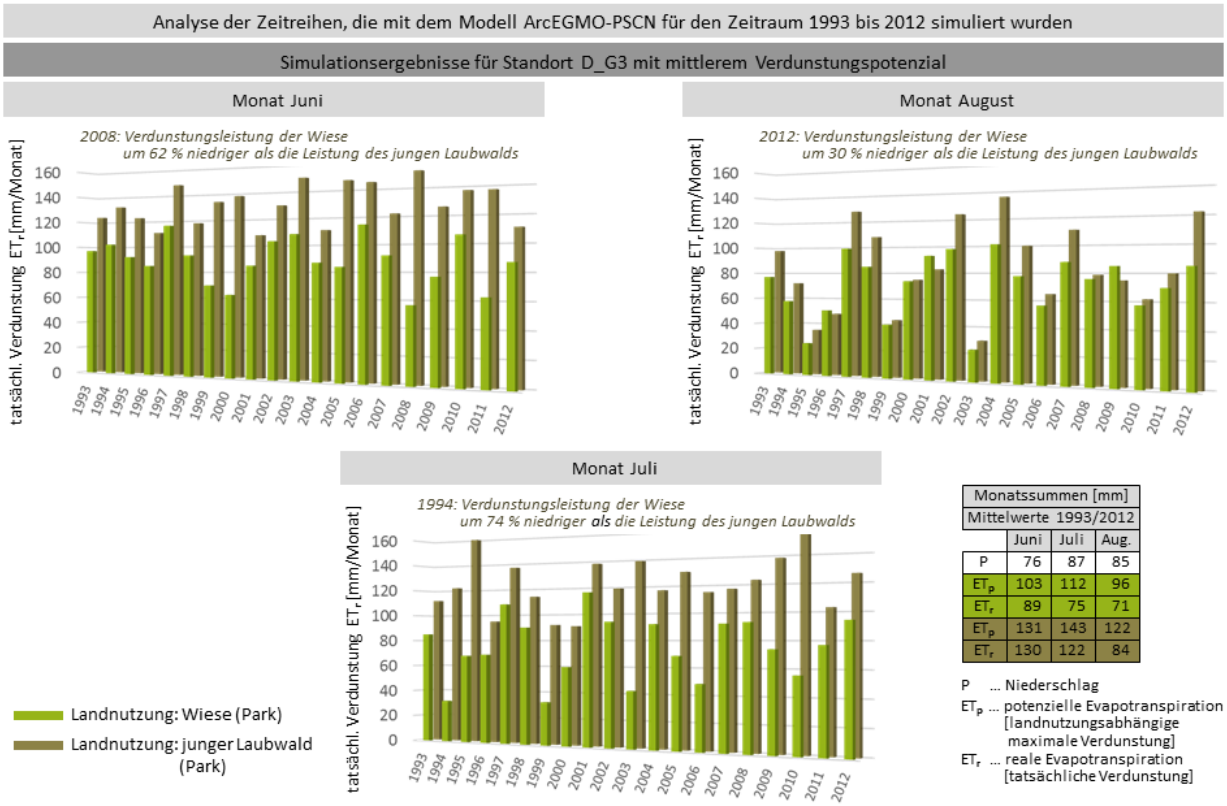

Abbildung 3-2: Verdunstungsleistung am Standort D_G3 in den Sommermonaten im Vergleich

Bereits die in der Tabelle in Abbildung 3-2 aufgeführten Mittelwerte der Monatssummen der tatsächlichen Verdunstung ET_r für den Standort D_G3 verdeutlichen, dass sich die Kühlleistungen von Wiese und Laubwald für die Monate Juni und Juli deutlich unterscheiden. Die Diagrammdarstellungen für die Monate Juni und Juli zeigen, dass die Unterschiede in diesen beiden Sommermonaten - in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf - sehr groß werden können.

Mit Beginn des Monats August ist der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat sowohl bei kleiner (Wiese) als auch großer Durchwurzelungstiefe (junger Laubwald) in der Mehrzahl der Jahre im Wesentlichen ausgeschöpft, so dass dieser Monat die geringsten Unterschiede in der Kühlleistung von Wiese und Laubwald aufweist.

Am Standort mit niedrigem Verdunstungspotenzial D_G4 (siehe Abbildung 3-3) sinkt die Kühlleistung im Vergleich zum Standort mit mittlerem Verdunstungspotenzial D_G3 bei beiden Vegetationsbedeckungen sehr deutlich. Außerdem sind die Unterschiede in den Kühlleistungen von Parkwiese und Laubwald an diesem Standort deutlich geringer als am Standort D_G3. Der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat wird bei beiden Vegetationsbedeckungen bereits im Monat Juli ausgeschöpft, so dass nur im Monat Juni große Unterschiede in der Kühlleistung zwischen der Wiese und dem Laubwald auftreten.

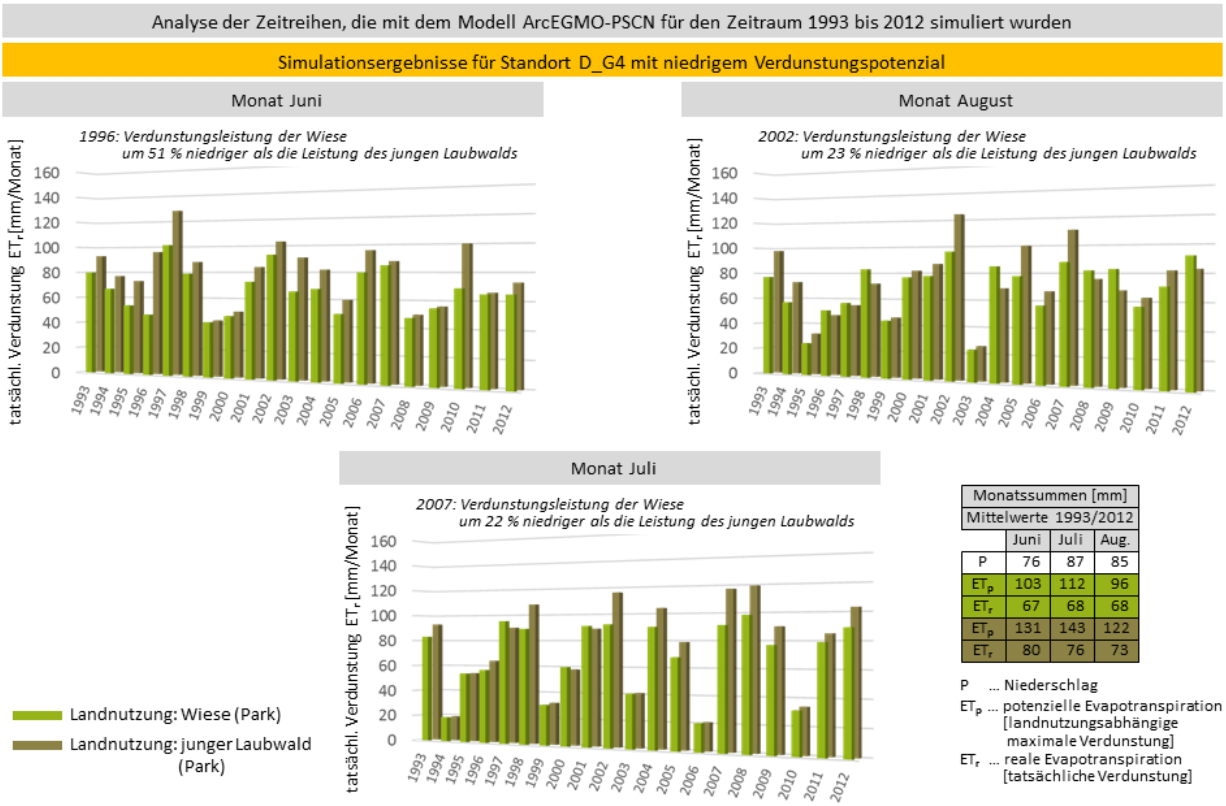

Abbildung 3-3: Verdunstungsleistung am Standort D_G4 in den Sommermonaten im Vergleich

Die **Verdunstungsleistungsgramme** für die Vegetationsbedeckung Laubwald an den Standorten D_G3 und D_G4 enthält das nachfolgende Kapitel 4.

4 Die Gesamtergebnisübersicht und ihre Bewertung

Eine Gesamtübersicht über die Modellierungsergebnisse zur Quantifizierung der Kühlleistung an Sommertagen im 20-Jahre-Zeitraum gibt Abbildung 4-1. Die Abbildung bezieht das gesamte Szenario-Tableau aus der Abbildung 1-1 ein. In die Abbildung wurden die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Kühlleistung am jeweiligen Standort, und zwar

- der Grundwasserflurabstand am Standort mit Grundwasseranschluss,
- die nutzbare Feldkapazität der maximalen Wurzelzone an den Standorten ohne Grundwasseranschluss und
- die Art der Vegetationsbedeckung und die dazugehörige maximale Durchwurzelungstiefe

integriert.

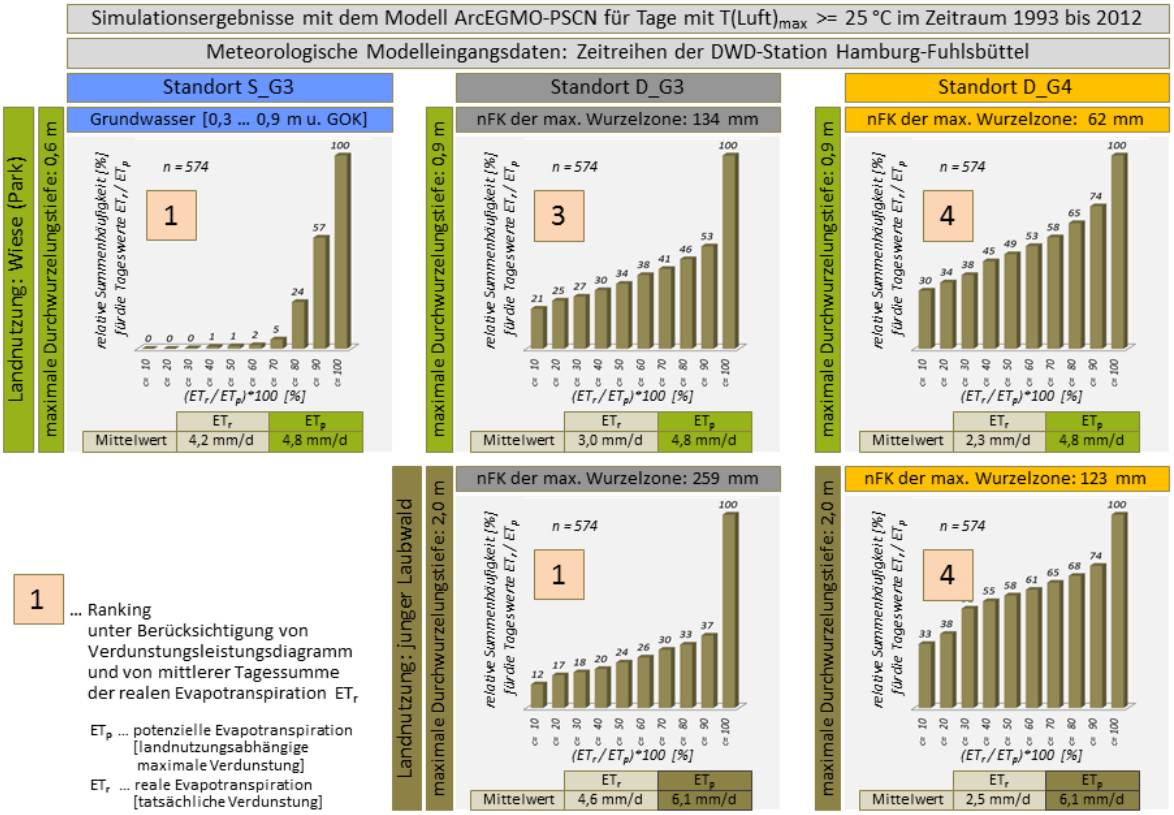

Abbildung 4-1: Verdunstungsleistung in Abhängigkeit von Boden und Vegetationsbedeckung (Landnutzung)

Als Quintessenz der durchgeführten Untersuchungen enthält die Abbildung 4-1 ein Ranking der Verdunstungsleistung für die bei der Modellierung gerechneten verschiedenen Szenarios. Beim Ranking wurden

- die dargestellten Verdunstungsleistungsdiagramme und
- die berechneten mittleren Tagessumme der realen Evapotranspiration ET_r an den Sommertagen im 20-Jahre-Zeitraum (n = 574)

berücksichtigt. Es wurden zwei erste Ränge vergeben, weil die Untersuchungen gezeigt haben, dass nicht nur am grundwasserbeeinflussten Standort S_G3 mit der Vegetationsbedeckung Wiese, sondern auch am Standort D_G3 ohne Grundwasseranschluss und mit der Vegetationsbedeckung Laubwald die besten Kühlleistungen erzielt werden. Dabei zeichnet sich der Standort mit Grundwasseranschluss S_G3 durch eine kontinuierlich hohe Kühlleistung an allen Sommertagen aus, während sich am Standort D_G3 diese Kontinuität leicht verschlechtert, dafür jedoch - bedingt durch die Vegetationsbedeckung Laubwald - im Mittel höhere Tagessummen der tatsächlichen Verdunstung ET_r erreicht werden. Auf dem dritten Rang folgt der Standort mit mittlerem Verdunstungspotenzial D_G3 mit der Vegetationsbedeckung Wiese. Am sehr sandigen Standort D_G4 unterscheiden sich die Kühlleistungen zwischen den Vegetationsbedeckungen Wiese und Laubwald dagegen bei beiden angewandten Ranking-Kriterien kaum, so dass auch Rang 4 zweimal vergeben wurde. Am Standort D_G4 mit der Vegetationsbedeckung Wiese ist die Kühlleistung an Sommertagen im Mittel nur noch halb so groß wie am Standort D_G3 mit Vegetationsbedeckung Laubwald.

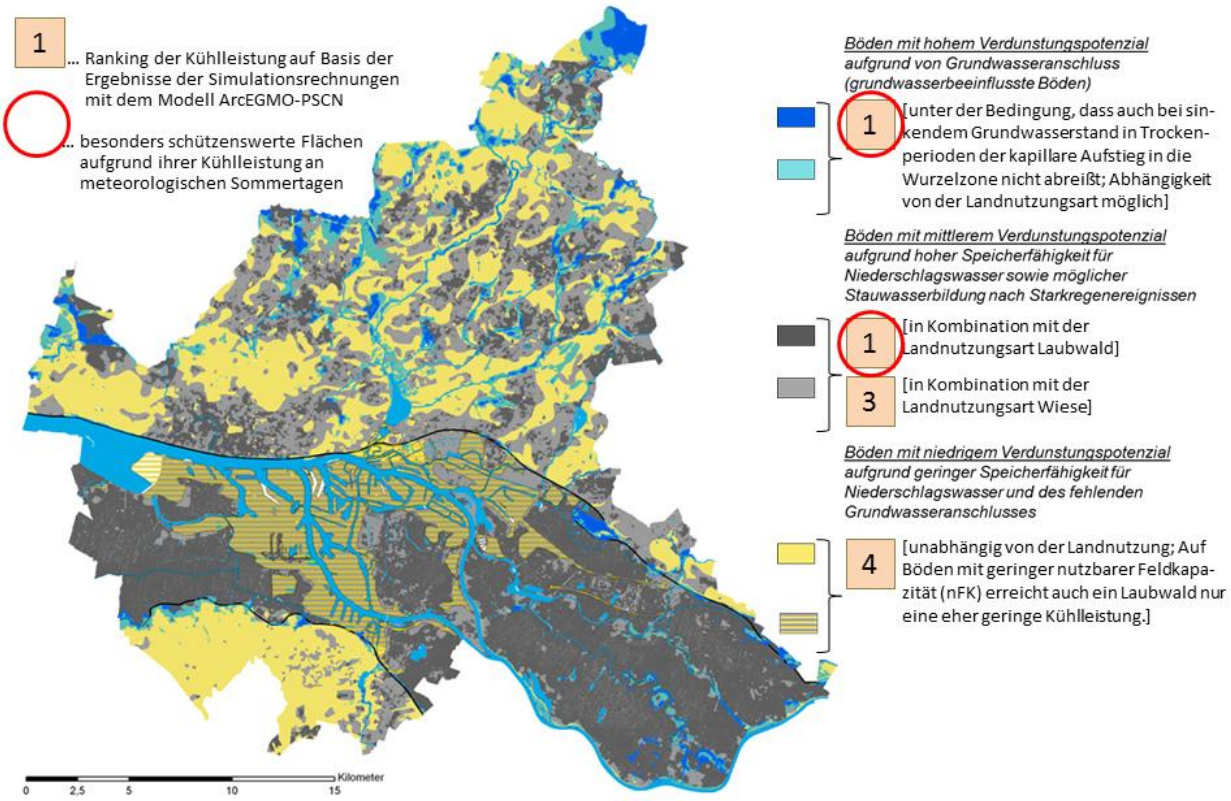

Abbildung 4-2: Die Verdunstungspotenzialkarte und die Ergebnisse der Quantifizierung der Kühlleistung

In der Abbildung 4-2 wurden die Rankingergebnisse aus Abbildung 4-1 in die Verdunstungspotenzialkarte (Domroese, 2011) übertragen. Abbildung 4-2 unterstreicht noch einmal die gewonnene Erkenntnis, dass aus stadtklimatischer Sicht besonders schützenswerte Flächen mit hoher Kühlleistung an Sommertagen nicht nur Böden mit Grundwasseranschluss, sondern auch Böden mit ausgewiesenem mittleren Verdunstungspotenzial und der Vegetationsbedeckung Laubwald sind. Voraussetzung für eine hohe Kühlleistung im erstgenannten Fall ist,

dass auch bei sinkendem Grundwasserstand in Trockenperioden der kapillare Aufstieg in die Wurzelzone der Vegetationsbedeckung nicht abreißt. Auf Böden mit niedrigem Verdunstungspotenzial ist die Kühlleistung dagegen in jedem Fall als niedrig zu bewerten.

Die in der Abbildung 4-1 zusammengefassten Modellierungsergebnisse geben auch Hinweise darauf, wie bei der Neuanlage von Parks In Hamburg - zum Beispiel in der HafenCity - die Kühlleistung von Boden und Vegetation gezielt optimiert werden kann, um maximal positive Effekte für das Stadtklima zu erreichen. Als verdunstungsfördernd sind diesbezüglich

- die Verwendung bzw. der Einbau von Bodensubstraten mit hoher nutzbarer Feldkapazität (nFK),
- das gezielte Anpflanzen von Baumgruppen und
- die Schaffung von Bewässerungsmöglichkeiten, die ggf. in lang anhaltenden Trocken- bzw. Hitzeperioden genutzt werden können,

zu nennen.

5 Literatur

Ad-hoc-AG Boden Bodenkundliche Kartieranleitung [Buch]. - Hannover : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 2005. - Bd. 5. Aufl..

ATV-DVWK Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden [Merkblatt ATV-DVWK-M 504] [Buch]. - Hennef : ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2002.

Becker A. [et al.] The Hydrological Modeling System ARC/EGMO [Buchabschnitt] // Mathematical Models of Large Watershed Hydrology / Buchverf. Singh V.P. und Frevert D.K.. - Colorado (U.S.A.) : Water Resources Publications, LLC , 2002.

Domroese J. Entwicklung der Verdunstungspotenzialkarte Hamburg (Erläuterungsbericht) [Bericht]. - Hamburg : Behörde für Umwelt und Energie, Amt für Umweltschutz, 2011.

Klöcking B. Bestimmung der Höhe der realen Verdunstung (Abkühlungseffekt) auf Stadtböden in Hamburg mit Hilfe eines Bodenwasserhaushaltsmodells (Abschlussbericht zum Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie) [Bericht]. - München : [s.n.], 2014.

Wiesner S. Observing the impact of soils on local urban climate [Dissertation] [Buch]. - Hamburg : Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg (Hamburger Bodenkundliche Arbeiten), 2013. - Bd. 69.