

# ENTWICKLUNG EINES KONZEPTES ZUR ABSCHÄTZUNG / QUANTIFIZIERUNG DER BODENKÜHLLLEISTUNG IN BERLIN

Senatsverwaltung  
für Mobilität, Verkehr,  
Klimaschutz und Umwelt

**BERLIN**

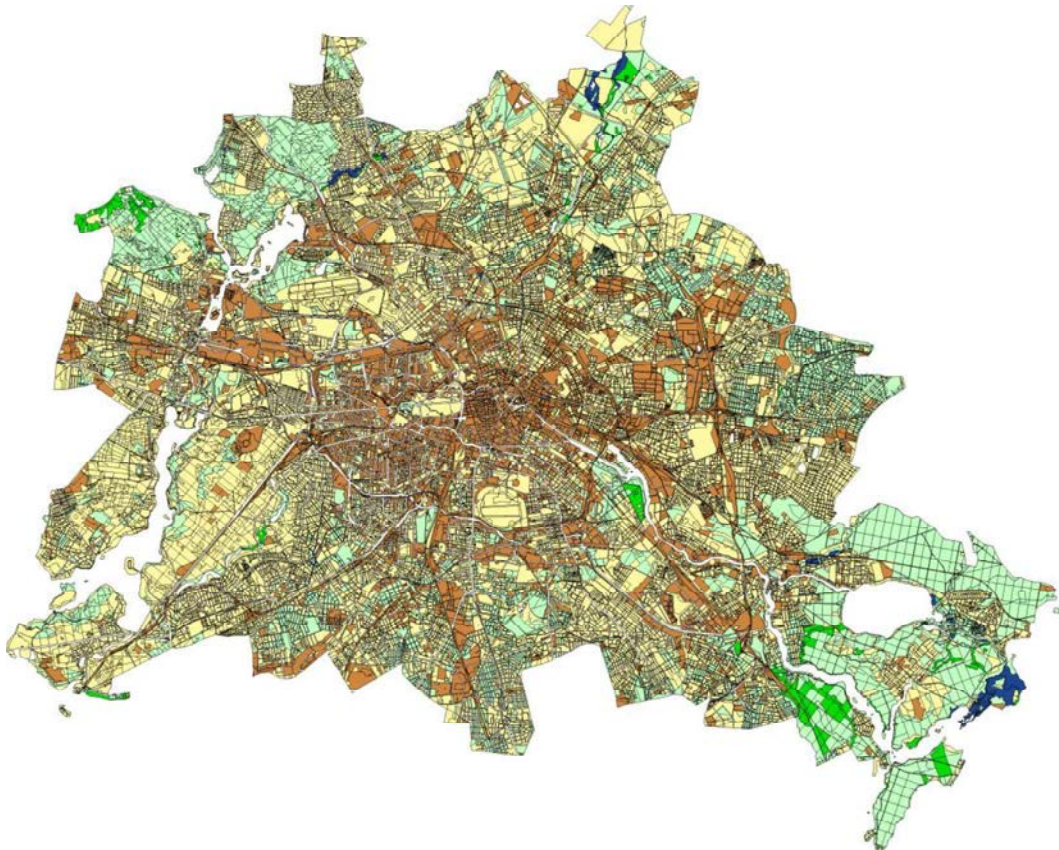


# **Entwicklung eines Konzeptes zur Abschätzung / Quantifizierung der Bodenkühlleistung in Berlin**

Im Auftrag der

**Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz  
Referat II C, Boden- und Altlastensanierung, Bodenschutz**

Stand: 15.12.2020, Textanpassung SenMVKU, 10.10.2023



FPB GmbH

J. H. Gerstenberg

PLANUNGSGRUPPE CASSENS + SIEWERT

**Auftraggeber**

**Senatsverwaltung  
für Umwelt, Verkehr und  
Klimaschutz, Referat II C  
Boden- und Altlastensanierung, Bodenschutz**

Brückenstraße 6  
10179 Berlin

Sabine Hilbert  
Dr. Michael Thelemann

**Verfasser**

**Freie Planungsgruppe Berlin GmbH**

Giesebrechtstr. 10  
10629 Berlin  
Tel. (030) 887 188-26

Britta Deiwick  
Halina Zeisler

**J. H. Gerstenberg**

Fritschestraße 68  
10585 Berlin  
Tel. (030) 341 87 74

**PLANUNGSGRUPPE CASSENS  
+SIEWERT**

Landschaftsarchitekten · Landschaftsplaner  
Streitstraße 13  
13587 Berlin  
Tel. (030) 261 77 97

Wolfram Siewert

**Inhaltliche Anpassung zur  
Kühlleistungsmodellierung  
der Stadt Düsseldorf, NRW  
Stand: 10.10.2023**

**Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr,  
Klimaschutz und Umwelt (SenMVKU)  
Referat II C – Bodenschutz, Boden-, Altlasten- und Grundwassersanierung**

Brückenstraße 6  
10179 Berlin

Dr. Michael Thelemann

Zitationsvorschlag:

Deiwick, B., Zeisler, H., Gerstenberg, J. H., Siewert, W. 2023: Entwicklung eines Konzeptes zur Abschätzung / Quantifizierung der Bodenkühlleistung in Berlin (Projektbericht), Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt, Berlin (Hrsg.)

(Deiwick et al. 2023)

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Hintergrund der Bodenkühlleistung</b>	<b>3</b>
1.1	Anlass	3
1.2	Entstehung und Wirkung	3
1.3	Wasserhaushaltsbetrachtung der Evapotranspiration	4
1.4	Einflussfaktoren	5
1.4.1	Bodenfunktionen	5
1.4.2	Faktoren für Verdunstung und Bodenkühlung	6
1.4.3	Wasserspeichervermögen des Bodens	6
1.5	Allgemeine Bodeneigenschaften	6
<b>2</b>	<b>Fallbeispiele zur Bodenkühlleistung in Deutschland</b>	<b>8</b>
2.1	Fallbeispiel Bottrop	9
2.2	Fallbeispiel Düsseldorf	12
2.3	Fallbeispiel Neuss	16
2.4	Fallbeispiel Wuppertal	18
2.5	Fallbeispiel Oberhausen	20
2.6	Fallbeispiel Hamburg	22
2.7	Zusammenfassung der Fallbeispiele und Übertragbarkeit auf Berlin	26
<b>3</b>	<b>Wasserhaushaltsmodell im Land Berlin – ABIMO</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>Ermittlung und Priorisierung bestehender Daten in Berlin</b>	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>Modellvergleich</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Methodische Ansätze und erste Simulation</b>	<b>43</b>
6.1	Berechnung des Verdunstungspotenzials aus Bodendaten	43
6.2	Berechnung mit dem ABIMO-Modell	44
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>46</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick</b>	<b>48</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>50</b>
<b>10</b>	<b>Anhang</b>	<b>55</b>
10.1	Erläuterungen zur Anwendung des Modells ABIMO	55
10.2	Erste Bodenkühlleistungskarten für Berlin	59
10.2.1	Potenzielle Bodenkühlleistungskarte der Böden auf Basis der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes und des Flurabstandes	60
10.2.2	Bodenkühlleistungskarte des ABIMO-Modells ohne Versiegelung und mit Bewässerung unter Einbeziehung der Vegetation	61
10.2.3	Bodenkühlleistungskarte des ABIMO-Modells mit Versiegelung und mit Bewässerung unter Einbeziehung der Vegetation	62

**Tabellenverzeichnis:**

Tabelle 1:	Kriterien zur Beschreibung von Teilfunktionen der Wasserhaushalts- und Puffer- und Filterfunktion (nach Hartmann 2002)	6
Tabelle 2:	Beispiele der Zuordnung von Kriterien zur Identifikation von Maßnahmenräumen und Maßnahmen innerhalb der Handlungsfelder (Sperling et al. 2019).	15
Tabelle 3:	Eingangsgrößen konstante Parameter	30
Tabelle 4:	Bewertung allgemeiner Parameter zur Bestimmung der Bodenkühlleistung in Berlin.	35
Tabelle 5:	Gegenüberstellung des ABIMO-TUB-BGR-Modells, ArcEGMO und der Hamburger Verdunstungspotenzialkarte.	38
Tabelle 6:	Charakterisierung und Ergebnisse der Modelle ABIMO und ArcEGMO	42
Tabelle 7:	Klassifizierung der Verdunstungspotenzialkarte	44
Tabelle 8:	Verdunstung und Bewertung der Kühlleistung	45
Tabelle 9:	Felder und Quellen der Feldinhalte der ABIMO Eingangstabelle	55
Tabelle 10:	Alte Bezirke und potenzielle Evapotranspiration	56
Tabelle 11:	ABIMO Nutzung, Typ und Bewässerung	57
Tabelle 12:	Temperatur und Verdunstungsenergie je Liter Wasser	58
Tabelle 13:	ABIMO Felder der Ergebnistabelle	59

**Abbildungsverzeichnis:**

Abbildung 1:	Schematische Darstellung des Gebietswasserhaushalts (Jankiewicz et al. 2005).	4
Abbildung 2:	Mittlere jährliche Verdunstungsrate Testgebiet Bottrop (Höke & Kaufmann-Boll 2012).	10
Abbildung 3:	Karte der Bodenkühlleistung in Düsseldorf (Umweltamt Düsseldorf 2020).	14
Abbildung 4:	Verschneidung der Planungshinweiskarte aus klimatologischer Sicht mit der Karte zur Wasserspeicherkapazität (LANUV 2015, 49).	17
Abbildung 5:	Kühlungspotenziale in Wuppertal auf Grundlage der Bodenkennwerte gemäß BK50, angepasst für offene Wasserflächen. Versiegelungsgrade auf Baublockebene mit Stand 2007 (Ingenieurbüro Feldwisch 2017).	19
Abbildung 6:	Untersuchungsgebiet in Oberhausen (Püllen et al. 2011).	21
Abbildung 7:	Die Verdunstungspotenzialkarte Hamburg und die Standorte für die Modellierung (Domroese 2017).	23
Abbildung 8:	Ablaufschema der Berechnung der Bodenkühlleistung auf Tagesbasis mit Arc-EGMO-PSCN (Domroese 2017).	23
Abbildung 9:	Verdunstungsleistung der Böden an Sommertagen (Verdunstungsleistungsdiagramme) (Domroese 2017).	26
Abbildung 10:	Verdunstung und Flurabstand verschiedener Nutzungen	31
Abbildung 11:	Zusammenhang zwischen der Bewertung des Stadtklimas und der Verdunstung (Gerstenberg 2020, eigene Simulation).	33
Abbildung 12:	Karte der alten Bezirke mit Bezirksnummern und -namen	57

## **1 Hintergrund der Bodenkühlleistung**

### **1.1 Anlass**

Städte heizen sich bei intensiver Sonneneinstrahlung stark auf, da durch versiegelte Baustrukturen, Grundwasserabsenkung, wenig Grünflächen, durch den Eintrag von Bauschutt und den erhöhten Oberflächenabfluss eine geringere Verdunstung stattfindet. Die verstärkte Erwärmung der Luft fördert die Entstehung urbaner Hitzeinseln. Auf unversiegelten Flächen hingegen leistet der Boden mit der Verdunstung von Wasser über Bodenoberflächen direkt und indirekt über die Verdunstung der Pflanzen einen Beitrag zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln durch die Abkühlung der umgebenden Luft. Diverse wissenschaftliche Studien weisen die Kühlfunktion der Böden durch Verdunstung nach (Wessolek et al. 2011, Kowarik et al. 2016, Al-Gretawee 2018). Dadurch erhält der Boden als Wasserspeicher und Wasserlieferant eine wichtige Rolle für das Stadtklima. In Hinblick auf den Klimawandel und die damit häufiger auftretenden Hitzeperioden ist diese Kühlleistung stärker zu nutzen. Hitzeperioden führen zu gesundheitlichen Risiken für die Bevölkerung. In Hitzeperioden ist gegenüber dem statistischen Mittel des Jahresverlaufs eine erhöhte Sterblichkeit zu beobachten. Im Sommer 2003 wurden in Westeuropa ca. 70.000 hitzebedingte Sterbefälle verzeichnet, davon rund 7.000 in Deutschland. Am stärksten betroffen waren die über 70-Jährigen, insbesondere Frauen, sozial schwache Bevölkerungsschichten und chronisch Kranke (LANUV 2015, 29).

Die Tendenz der Zunahme der mittleren Jahrestemperatur in Berlin, der Hitzetage und tropischen Nächte sowie der Abnahme sommerlicher Niederschläge wird sich weiter verschärfen (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen 2015). Daher müssen Maßnahmen ergriffen werden, die zu einem Schutz der Bevölkerung beitragen.

In diesem Kontext ist es besonders wichtig, Schlüsselstrategien für eine hitzeangepasste Stadt zu entwickeln. Dazu gehören Kernthemen wie Durchlüftung, Verschattung, Erhöhung der Rückstrahlung und Kühlung durch Verdunstung (Brandl 2011). Durch die Verdunstung des Wassers durch die Pflanze und von der Bodenoberfläche erfolgt eine fühlbare Abkühlung der umgebenden Luft. Einen bedeutsamen Einfluss auf das Stadtklima haben damit vor allem unversiegelte Böden, die als Wasserspeicher und Wasserlieferant für die Pflanzen fungieren. Diese „Bodenkühlleistung“ stellt in Städten eine weitgehend unbetrachtete Leistung dar, obwohl sie einen wesentlichen Beitrag zur Regulierung der städtischen Überhitzung leisten kann.

Bisher haben sich vor allem die Bundesländer Nordrhein-Westfalen (und v. a. dortige Städte) und Hamburg mit dem Thema der Bodenkühlleistung intensiver auseinandergesetzt. Für Berlin soll nun ein Konzept zur Abschätzung und Quantifizierung der Bodenkühlleistung entwickelt und Vorschläge erarbeitet werden, wie dieser Belang Eingang in die Planungspraxis finden kann.

Die Initiierung des Projektes zur Bodenkühlleistung basiert auf dem Berliner Energie- und Klimaschutzprogramm 2030 (BEK). Mit dem BEK strebt das Land Berlin an, mithilfe von vielfältigen Klimaanpassungsmaßnahmen bis 2050 klimaneutral zu werden. Der Bodenschutz bildet hierbei einen wichtigen Bestandteil und die Novellierung des Berliner Bodenschutzgesetzes 2019 stellt die gesetzliche Grundlage der für das BEK vorgesehenen Klimawandelanpassungsmaßnahmen dar.

Im Rahmen des Projektes werden zunächst Einflussfaktoren der Bodenkühlleistung aufgezeigt und die Untersuchungen zu Nordrhein-Westfalen und Hamburg ausgewertet, um Rückschlüssen für Berlin zu entwickeln. Darauf aufbauend wird ein Vergleich verschiedener Modelle und eigene Überlegungen und Schlussfolgerungen für die Handhabung im Land vorgenommen.

### **1.2 Entstehung und Wirkung**

Die Eigenschaften der Oberflächen, also die Art der Flächennutzung, die Bepflanzung und der Zustand der Böden wirken auf das Aufheizungs- und Rückstrahlungsverhalten in die Atmosphäre (LANUV 2015, 21). Besonders der Wasserhaushalt des Bodens und die darüber beeinflusste Verdunstung der Pflanzen sind wesentliche Stellschrauben für die Nutzung der Bodenkühlleistung auf Freiflächen in stadtklimatischen Anpassungskonzepten.

Das Grundprinzip der Bodenkühlleistung besteht darin, dass der Boden gespeichertes Wasser zur Verdunstung bereitstellt. Man bezeichnet die Verdunstung als Evapotranspiration, die sich aus Evaporation und Transpiration zusammensetzt. Der Begriff Evaporation beinhaltet die Verdunstung über die unbewachsene Bodenoberfläche, das zurückgehaltene Niederschlagswasser über Pflanzenoberflächen (Interzeptionsverdunstung) sowie die Verdunstung von Wasserflächen (Gewässerverdunstung). Die Transpiration der Vegetation erfolgt in weit größerem Umfang, abgesehen von der Gewässerverdunstung, und beschreibt die Wasserregulierung der Pflanzen durch die Spaltöffnungen (Stomata) an der Blattunterseite. Die Evapotranspiration ist mit einem Anteil von 15 % am Wasserkreislauf der Erde beteiligt und spielt für das System Boden-Pflanze eine große Rolle, da das Pflanzenleben durch das Wasserangebot und die Transpirationsleistung bestimmt wird (Schaumberger et al. 2008). Bei der Verdunstung wird Wasser von dem flüssigen in den gasförmigen Zustand überführt. Dafür wird bis zur Hälfte der eingestrahelten Sonnenenergie verbraucht. Die verwendete Energie wird dabei in sogenannte latente, nicht fühlbare Wärme umgewandelt und gespeichert und trägt damit nicht mehr zur Erwärmung der Luft bei (Damm, 2013, LANUV 2015, 22).

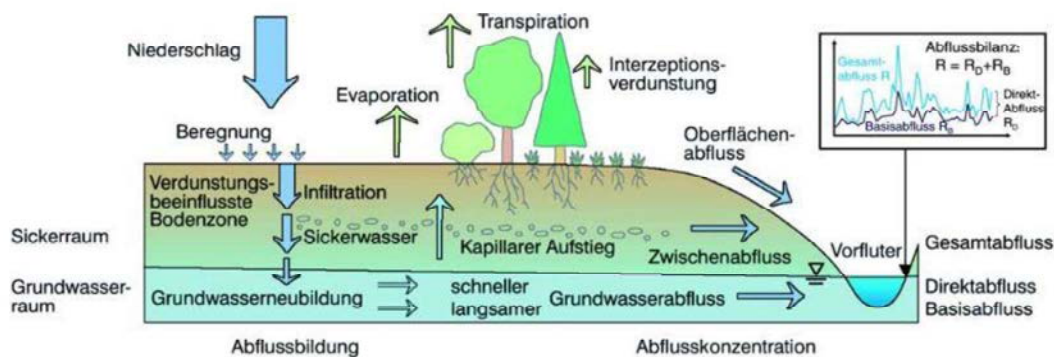


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Gebietswasserhaushalts (Jankiewicz et al. 2005).

Die Verdunstung ist abhängig von Wetterbedingungen, Art und Dichte der Vegetation, dem Anteil der versiegelten Flächen sowie den Bodeneigenschaften. Dabei stellen die klimatischen Faktoren die Strahlungsenergie, das Sättigungsdefizit der Atmosphäre (relative Luftfeuchte), den Niederschlag und die Windstärke dar.

In Deutschland ergeben sich über 70 % der Verdunstung aus der Transpiration der Pflanzen und zusammen mit der Interzeptionsverdunstung bis zu 90 % der Gesamtverdunstung (Schrödter 1985). Die Höhe der Transpiration ist je nach Bestand unterschiedlich und hängt von der Wachstumsphase, dem Bedeckungsgrad, der Blattfläche eines Pflanzenbestandes und dem effektiven Wurzelraum ab.

Dabei kann durch die Pflanzen nur die Wassermenge verdunsten, die für sie verfügbar im Boden gespeichert ist. Im urbanen Kontext ist der Speicher für pflanzenverfügbares Wasser durch Verdichtungen und grobe Bestandteile wie Bauschutt oder Schlacken eingeschränkt. Sie stellen physiologische Barrieren dar, die die Durchwurzelbarkeit einschränken und die effektive Durchwurzelungstiefe begrenzen. Der während des Winterhalbjahrs aufgefüllte Bodenwasservorrat ist deshalb oft schon nach den ersten Sommertagen oder -wochen aufgebraucht. Die Vegetation reduziert daher aktiv ihre Verdunstungsleistung. Die Größe der Bodenwasserspeicherkapazität ist daher sehr wichtig (LANUV 2015, 23). Sommerniederschläge können jedoch weiterhin zur Evapotranspiration beitragen.

### 1.3 Wasserhaushaltsbetrachtung der Evapotranspiration

In Wasserhaushaltsbetrachtungen wird zwischen potenzieller und tatsächlicher Verdunstung unterschieden. Die potenzielle Verdunstung orientiert sich an der maximal möglichen Verdunstungsrate, die unter bestimmten meteorologischen Bedingungen entsteht. Die tatsächliche Verdunstung ist die Verdunstung, die sich unter den gegebenen meteorologischen Bedingungen von einer nicht ausreichend wasserversorgten Oberfläche ergibt. Sie ist somit von der Energiezufuhr und dem aktuellen Angebot des Wassers abhängig.

Um eine Berechnung der tatsächlichen Evapotranspiration vorzunehmen, wird zunächst die potenzielle (maximal mögliche) Evapotranspiration unter Ausschluss des tatsächlichen

Wasserdargebotes bestimmt. Im zweiten Schritt wird der Einfluss eines zeitweise reduzierten Wasserangebotes ermittelt. Dies führt zu der tatsächlichen Verdunstungsrate (Hölting & Coldewey 2009).

Zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration wird die Betrachtung auf den zeitlich variablen Witterungseinfluss reduziert. Es wird zudem vorausgesetzt, dass für die Verdunstung des angenommenen Pflanzenbestandes stets ausreichend Wasser zur Verfügung steht. Die potenzielle Evapotranspiration stellt somit die Wassermenge dar, die bei unlimitierter Wasserverfügbarkeit verdunsten könnte. Für diesen Verdunstungsprozess sind der Energieeintrag in Form von Strahlung und Temperatur sowie der Feuchtigkeitstransfer durch Wind und Luftfeuchtigkeit in der bodennächsten Atmosphärenschicht notwendig (Schaumberger et al. 2008). Für eine Berechnung der potenziellen Evapotranspiration müssen folglich verschiedene Klimafaktoren herangezogen und einberechnet werden. Hier finden unterschiedliche Verfahren (u.a. nach Haude, Schedel, Thornthwaite oder Turc) Anwendung, wobei es Anzeichen dafür gibt, dass diese Berechnungen unsicher sind. Als internationaler Standard wird die Gras-Referenzverdunstung verwendet (Hölting & Coldewey 2009).

In der Betrachtung der tatsächlichen (realen) Evapotranspiration eines Pflanzenbestandes zeigt sich, dass diese vom pflanzenverfügbaren Wasser des Bodens abhängt, dessen Menge wiederum durch den Grundwasserflurabstand und die Bodeneigenschaften (nutzbare Feldkapazität) bestimmt wird (Hölting & Coldewey 2009).

Um die tatsächliche Evapotranspiration zu ermitteln, wird das Prinzip zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration aus Klimadaten angewendet. Hier wird davon ausgegangen, dass zwar die Höhe der potenziellen Evapotranspiration aus Klimadaten an der Oberfläche errechnet wird, die tatsächliche Verdunstung jedoch von dem vorhandenen, begrenzten Wasserangebot abhängt. Dieses relativ einfache Konzept birgt komplizierte Zusammenhänge, denn die unterschiedlichen Luftbewegungen, die verschiedenen hohen Niederschläge und deren Intensitäten sowie lokale Klimaparameter beeinflussen sich wechselseitig und sind nur schwer zu kalkulieren. Um praktikable Werte zu erhalten werden hier deshalb größere Zeiträume zusammengefasst (Hölting & Coldewey 2009).

Für eine Berechnung der realen Evapotranspiration ist die Kenntnis der potenziellen Evapotranspiration eine wichtige Voraussetzung. Sie bildet die Basis vieler hydrologischer Modelle (Schaumberger et al. 2008). In Deutschland hat sich die Bestimmung der tatsächlichen Verdunstung nach der Bagrov-Methode als anwendbar erwiesen (Hölting & Coldewey 2009).

## **1.4 Einflussfaktoren**

### **1.4.1 Bodenfunktionen**

Der Boden verfügt über verschiedene Funktionen und Eigenschaften: Natürliche Funktionen (mit den dazugehörigen Teilfunktionen Lebensraumfunktionen, Regelungsfunktion und Puffer- und Filterfunktion), die Funktion des Bodens als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte und die Nutzungsfunktionen (Hartmann 2002).

Zu den Regelungsfunktionen werden die den Wasserhaushalt betreffenden Eigenschaften gezählt. Dazu gehören die Sickerwasserrate, die Grundwasserneubildung, die Abflussverzögerung, das Wasserspeichervermögen, die Wasseraufnahmekapazität und das Infiltrationsvermögen. Die stofflichen Eigenschaften wie die Filtereigenschaften, Nitrat, Schwermetalle und Organika fallen unter die Puffer- und Filterfunktionen des Bodens (Hartmann 2002). Die Kriterien zur Beschreibung und Messbarkeit dieser Teilfunktionen werden bei Hartmann (2002) verdeutlicht (Tabelle 1).

Es wird deutlich, dass das Wasserspeichervermögen und die Wasseraufnahmekapazität von den Eigenschaften der Bodenart, dem Humusgehalt, der Lagerungsdichte, der Feldkapazität, der Wasserleitfähigkeit und den Bodentypen abhängig sind.



Tabelle 1: Kriterien zur Beschreibung von Teilfunktionen der Wasserhaushalts- und Puffer- und Filterfunktion (nach Hartmann 2002)

Wasserhaushaltsfunktion		Puffer- und Filterfunktion	
Kriterium / Methode	Kennwerte/Parameter	Kriterium / Methode	Kennwerte/Parameter
- Sickerwasserrate	- Bodenart	- Filtereigenschaften	- Bodenart
- Grundwasserneubildung	- Humusgehalt	- Nitrat	- Humusgehalt
- Abflussverzögerung	- Lagerungsdichte	- Schwermetalle	- Kalkgehalt
- Wasserspeichervermögen	- Feldkapazität	- Organika	- pH-Wert
- Wasseraufnahmekapazität	- Nutzbare Feldkapazität (nFK)		- Lagerungsdichte
- Infiltrationsvermögen	- Wasserleitfähigkeit		- Feldkapazität (FK)
	- Bodentyp		- nutzbare Feldkapazität (nFK)
			- Kationenaustauschkapazität (KAK)
			- Pufferfähigkeit

#### 1.4.2 Faktoren für Verdunstung und Bodenkühlung

Die potenzielle Kühlleistung der Böden hängt von verschiedenen Faktoren ab. Der Boden, als Pufferzone im hydrologischen Kreislauf, hat die Fähigkeit Wasser aufzunehmen, zu speichern und zu halten. Er hat somit eine zentrale Stellung im Wasserkreislauf und damit auch großen Einfluss auf die Verdunstung. Entscheidend für die Transpiration sind Böden mit Grundwasseranschluss und die oberen Dezimeter des Bodens (der effektive Wurzelraum). Diese liegen in der ungesättigten Bodenzone und das Wasserspeicher- und Haltevermögen hängt von der Körnung, dem Gefüge, der Lagerungsdichte, dem Humusgehalt und dem daraus resultierendem Porenraum ab (Scheffer & Schachtschabel 2002).

#### 1.4.3 Wasserspeichervermögen des Bodens

Bodenwasser setzt sich aus den Niederschlägen, dem Grundwasser und im sehr kleinen Maßstab aus der Kondensation von Wasserdampf in Bodennähe (Tau) zusammen. Teile des Niederschlagswassers laufen an der Oberfläche als Oberflächenwasser ab und sammeln sich in unversiegelten Bereichen oder werden in die Vorflut abgeleitet und stehen nicht mehr zur Verfügung. Ein anderer Teil dringt in den Boden ein und kann als Sickerwasser den Boden durchdringen bis es auf wasserundurchlässige Materialien oder Schichten trifft, wo das Grundwasser entsteht. Ein weiterer Teil des Niederschlagswassers bleibt im Boden (Haftwasser). Dies dient vor allem dem Pflanzenwachstum. Zur Speicherung des Wassers im Boden ist aber auch der Humusgehalt ausschlaggebend. Ist dieser > 1 Masse-% trägt er in relativer Höhe zur Wasserspeicherung bei (Rotländer et al. 1997).

Der Bodenwasserhaushalt ist ein bestimmender Faktor bei der Grundwasserneubildung. Ausschlaggebend ist dabei, wie viel Wasser infiltriert und gespeichert wird. Ein Überschuss fließt zum Teil oberirdisch oder oberflächennah ab. Bei der Grundwasserneubildung sickert ein Anteil weiter vertikal bis in die wassergesättigte Zone und steht dann als Grundwasser zur Verfügung (Höke & Kaufmann-Boll 2012).

Entscheidend für die Speicherung von pflanzenverfügbarem Wasser im Boden ist, wie viel Wasser durch Kapillarität an der benetzbaren Oberfläche der Bodenmatrix gebunden wird. Inwiefern das Bodenwasser für Pflanzen verfügbar ist, variiert wiederum mit der Saugspannung, mit der das kapillare Wasser im Boden gebunden ist (Scheffer & Schachtschabel 2002).

#### 1.5 Allgemeine Bodeneigenschaften

Die Wasserspeicherung ist abhängig von den Eigenschaften des Bodens. Das Wasserspeicher- und Wasserhaltevermögen wird wesentlich von Bodenart (Körnung), Humusgehalt, Gefüge, Trockenrohdichte und dem daraus resultierenden Porenraum bestimmt.

##### Bodenart

Diese beschreibt die Größe einzelner Bodenpartikel und hat wesentlichen Einfluss auf die Bodeneigenschaften. Die Anteile an verschiedenen Korngrößen definieren die Bodenart. Je feinkörniger ein Boden ist, desto größer ist das Porenvolumen, da kleine Bodenteilchen mehr Zwischenräume aufweisen als größere Teilchen. Ein hoher Grobbodenanteil (> 2 mm) führt zu einer Verringerung des Porenanteils und damit der Wasserspeicherfähigkeit.

keit. Zudem besitzen gleichförmige Korngemische ein großes Porenvolumen, ungleichförmige Gemische ein geringeres, da die Poren durch feineres Korn aufgefüllt werden (LANUV 2015, 26).

### **Humusgehalt**

Ist der Humusgehalt eines Bodens > 1 Masse-% trägt er in relevanter Höhe zur Wasserspeicherung bei. Beispielsweise kann eine Erhöhung des Humusgehaltes bei Sand von 1 auf 4 % Humus zu einer Erhöhung des pflanzenverfügbaren Wassers um mehr als 10 % führen.

### **Bodengefüge und Trockenrohdichte**

Boden kann unterschiedlich dicht gelagert sein, je nach Ausrichtung der Bodenpartikel zueinander. Die Bodenpartikel können dicht oder locker, homogen oder lokal akkumuliert vorliegen. Die Hohlräume zwischen den Bodenpartikeln bilden den Porenraum, in dem Wasser gespeichert wird. Die Trockenrohdichte beschreibt die Masse an Festsubstanz, die in einem bestimmten Volumen enthalten ist. Geringe Trockenrohdichten zeigen einen geringen Anteil an Festsubstanz und damit ein hohes Porenvolumen an.

### **Poren und Feldkapazität**

Das Porenvolumen wird aufgrund der unterschiedlichen Porengrößen in die Kategorien Grobporen, Mittelporen und Feinporen aufgeteilt. Grobporen sind Sickerwasser führend und nach Abzug des Wassers mit Luft gefüllt. Mittelporen halten pflanzenverfügbares Haftwasser und sind nach Austrocknung luftgefüllt. Feinporen können nicht verfügbares Haftwasser halten und sind nur bei sehr starker Austrocknung luftgefüllt. Demnach hängt der Wasserhaushalt von Böden entscheidend vom Porenvolumen und dem Anteil der Poren bestimmter Größe ab. Im Verhältnis zueinander lässt sich feststellen, dass Sandböden über die meisten Grobporen verfügen. Schluff- und Lehmböden enthalten viele Mittelporen, Tonböden hingegen verfügen über den höchsten Anteil an Feinporen (Bodenstedt et al. 1997).

Das pflanzenverfügbare Bodenwasser, was in den Mittel- und Grobporen gespeichert wird, ist die nutzbare Feldkapazität. Das Zusammenspiel zwischen Bodeneigenschaften und dem für die Pflanzen erschließbaren Wurzelraum ist maßgeblich für die Höhe der potenziellen Verdunstungsleistung (Renger & Strebel 1982). Studien zeigen, dass im direkten Vergleich der Sickerwasserraten die naturnahen Böden gegenüber den urbanen Böden im Jahresmittel deutlich niedrigere Sickerwasserraten aufweisen. Dieses Ergebnis ist auf die speziellen Merkmale der Stadtböden, wie z.B. der hohe Grobbodenanteil zurückzuführen (Höke & Kaufmann-Boll 2012).

Zwischen 100 % und 70 % Füllstand der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum verdunsten die Pflanzen am meisten Wasser. Zwischen 69 % und 40 % ist die Verdunstung eingeschränkt.

### **Abfluss**

Für Bilanzen des Wasserhaushaltes ist eine genaue Berechnung bzw. Messung des Abflusses nötig. Der Abfluss kennzeichnet das Volumen, welches vom Niederschlag nach der Verdunstung übrig bleibt. Das Abflussregime wird durch verschiedene Regimefaktoren beeinflusst. Diese sind klimatischer, geologischer, geomorphologischer und vegetationsbedingter Herkunft. Auch die anthropogenen Gegebenheiten des dem Gewässer zugehörigen Einzugsgebietes nehmen Einfluss auf das Abflussregime. Der wichtigste Regimefaktor ist die Niederschlagsrate mit ihrer Verteilung im Raum und ihrer Höhe in einer bestimmten Zeit. Zur Berechnung des Abflusses sind die Größen Abflussrate, Abfluss und Abflussspende zu unterscheiden (Hölting & Coldewey 2009).

Der Abfluss setzt sich außerdem aus den Komponenten oberirdischer und unterirdischer Abfluss zusammen. Als oberirdischer Abfluss wird direkter Abfluss über Gräben, die Kanalisation oder über Dränagen bezeichnet (Meßner 2013). Das in den Boden versickernde Niederschlagswasser hingegen, gelangt unterirdisch zum Abfluss. Hierbei wird zwischen dem sogenannten Zwischenabfluss (Interflow) in der ungesättigten Bodenzone und dem grundwassergebürtigen Abfluss (Base Flow) in der gesättigten Grundwasserzone unterschieden (Meßner 2013). Der grundwassergebürtige Abfluss wird ohne Zuleitung oder Entnahme von Wasser eines Teileinzugsgebietes der Grundwasserneubildung gleichgesetzt

(Meißner 2013). Unterirdischer Abfluss entsteht in der Regel in den Wintermonaten (LANUV 2015, 22).

### **Flurabstand**

Der Flurabstand ist der Höhenunterschied zwischen einem Punkt der Erdoberfläche und des oberen Grundwasserstockwerkes der Grundwasseroberfläche. Grundwasserflurabstände bieten eine gute Orientierung bei Veränderungen des Grundwasserspiegels (Höltling & Coldewey 2009).

## **2 Fallbeispiele zur Bodenkühlleistung in Deutschland**

Vorreiter in der Nutzung und Implementierung von Bodenkühlleistungen in deutschen Städten sind vor allem Städte in Nordrhein-Westfalen sowie die Länder Nordrhein-Westfalen und Hamburg. Die Stadt Bottrop hat bereits im Jahr 2013 das Kühlungspotenzial von Böden ausgewählter Wohn- und Parkflächen untersucht. Weitere Städte sind Wuppertal, Oberhausen, Neuss und Düsseldorf. Für Nordrhein-Westfalen wurde 2015 zu dieser Thematik ein Leitfaden entwickelt, der die Einbindung von Bodenkühlleistungen in Stadtklimatische Konzepte beschreibt.

In Hamburg wurde 2011 eine Verdunstungspotenzialkarte entwickelt. Auf ihrer Basis wurde 2016 ein Konzept zur Quantifizierung der Kühlleistung von Böden und Vegetation entwickelt.

2.1 Fallbeispiel Bottrop

<p><b>Fallbeispiel Grunddaten</b></p> <p>Bundesland     Nordrhein-Westfalen</p> <p>Größe            100,61 km<sup>2</sup></p> <p>Lage              Auf den Ausläufern des Recklinghäuser Landrückens, nördlich der Emscher</p> <p>typ. nat. Boden    Auenboden/Gley aus lehmigen bis tonigen Auensedimenten</p> <p>Niederschlag (1981-2010)   820 mm/a</p>	<p><b>Ziel</b></p> <p>Herausstellen der Einflussmöglichkeiten der Funktionen des Bodens auf Verdunstung</p> <p>Neben den Verdunstungsleistungen soll auch das ökonomische Potenzial betrachtet werden</p>	
<p><b>Vorgehen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ermittlung des Bodenkühlleistungspotenzials für drei Untersuchungsbereiche im Stadtgebiet Bottrop</li> <li>- Erhebung von Parametern wie Bodeneigenschaften, Landnutzung, Grundwasserstand, Klima</li> <li>- Berechnung für Ist-Zustand, Planung (Bebauungsplan) und Optimierungsszenarien</li> </ul>		
<p><b>Methodik</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ermittlung der tatsächlichen jährlichen Verdunstung (Eta) durch Verdunstung = Niederschlag – Abfluss (Setzung ebenes Gelände ohne Oberflächenabfluss),</li> <li>- Ermittlung der jährlichen Sickerwasserrate (SWRj) über langjährigen Mittelwert Niederschlag, Verdunstung (Gras-Referenzverdunstung nach FAO), nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums nFKWe (mm), Nutzungsart inkl. Verknüpfungsregel, langjähriger Mittelwert der Niederschlagshöhe der Sommermonate,</li> <li>- Annahme: 100 % Speicherfüllung Ende März aufgrund humider Winter, ab nFKWe &lt; 70 % Wasserstreß für Pflanzen, ab nFKWe &lt; 40 % erhöhter Wasserstreß für Pflanzen im Erwerbsanbau, ab dann Bewässerung erforderlich,</li> <li>- Alle Berechnungen April - Sept 1960-1991,</li> <li>- Ermittlung des ökonomischen Potenzials durch eine Berechnung der benötigten Energiemenge für die Verdunstung des Wassers,</li> <li>- Ermittlung der Differenz der Verdunstungsleistung zwischen Ist-Zustand und Bebauungsplan (Annahme versiegelte Flächen verdunsten noch 18 % des Niederschlags).</li> </ul>	<p><b>Datenherkunft</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassung durch Feldarbeit: Rammkernsondierung bis 2 m Tiefe, 60 mm Durchmesser)</li> <li>- Untersuchung der Bohrprofile hinsichtlich Horizonte, Humusgehalt, Bodenfeuchte, Trockenraumdichte, Feinboden und Grobboden</li> <li>- Geodaten zu Grundwasserflurabständen, Gewässern, Klimatopen und Geländehöhen</li> <li>- Klimadaten der DWD Wetterstation: Jahres- und Monatssummen Niederschläge, Monatsmittel Temperatur und tatsächliche Sonnenscheindauer</li> <li>- DWWK Merkblatt 238: Daten zu Globalstrahlung, astronomisch mögliche Sonnenscheindauer zu 51° nördl. Breite,</li> <li>- Luftbilder 1952 bis heute: Vornutzung.</li> </ul>	
<p><b>Verwendete Parameter</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nutzung / Vegetation (Acker, Grünland, Laubwald, Nadelwald),</li> <li>- nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum,</li> <li>- Potenzielle Grasreferenzverdunstung,</li> <li>- Niederschlag (Jahr, Sommerhalbjahr),</li> <li>- Flurabstand,</li> <li>- kapillarer Aufstieg (aus Bodenart und Flurabstand),</li> <li>- Versiegelung und Belagsarten,</li> <li>- Hangneigung.</li> </ul>		

**Ergebnisse**

- Pflanzen stehen bei Böden mit guter Wasserspeicherung (Ton, Lehm) seltener unter Wasserstress als auf Böden mit schlechter Speicherefähigkeit (Sand). Daraus resultiert eine höhere Verdunstungsleistung und eine verbesserte Kühlleistung.
- Für alle Böden zeigen sich in Trockenjahren zu Beginn des Sommers niedrige Speicherfüllstände und nach 2-3 Monaten entleerte Speicherfüllstände (Optimierungspotenzial).
- Speichergröße sehr wichtig, die durch Durchwurzelungstiefe mitbestimmt wird. Feinkörnigere Böden, die durch ein höheres Porenvolumen mehr Wasser speichern können, können auch besser durchwurzelt werden.
- Untersuchung der drei Untersuchungsbereiche zeigt: Vorstellung von Optimierungsmaßnahmen, um die negativen Einflüsse der Verdunstungsänderung zu kompensieren oder aber eine weitere Erhöhung der Verdunstung über die Verdunstung der Gras-Referenzverdunstung zu erzielen.

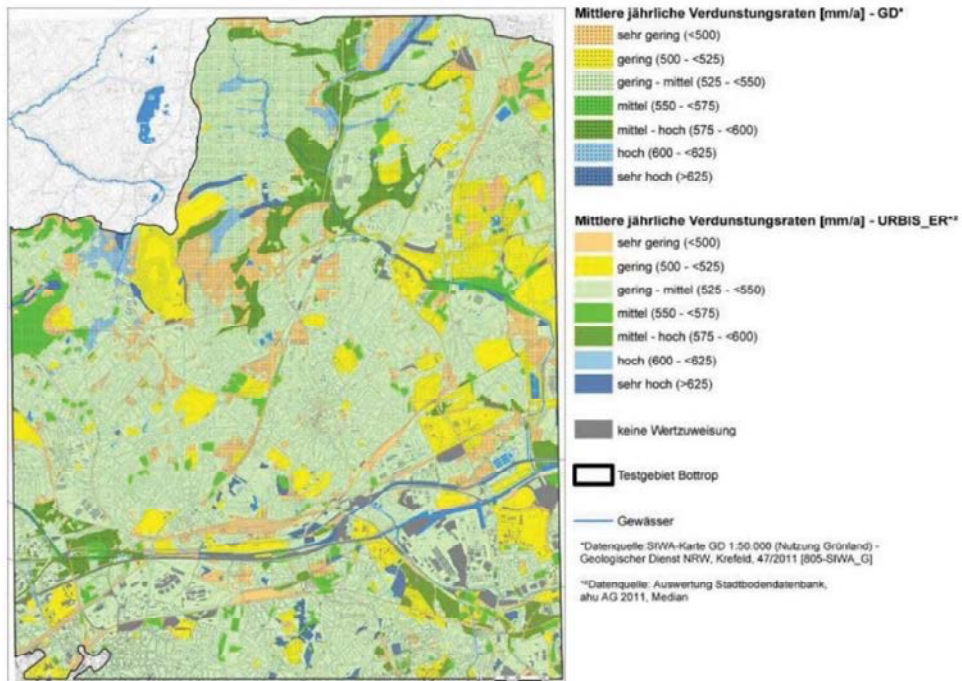


Abbildung 2: Mittlere jährliche Verdunstungsrate Testgebiet Botrop (Höke & Kaufmann-Boll 2012).

**Maßnahmen**

Optimierung des Bodenspeichers

- Verbesserung der Bodeneigenschaften, die zu einer höheren Speicherefähigkeit und damit einer Verbesserung der Verdunstungsleistung über die Sommermonate führt. Nicht für naturnahe Böden geeignet, da erheblicher Eingriff in den Bodenhaushalt,
- nur auf urban gestörten und überprägten Böden,
- natürliche Maßnahmen wie Nutzung des Laubs zur Humusakkumulation, tiefer wurzelnde Bepflanzung für lockeren Boden oder hohe Bioaktivität im Boden,
- Technische Maßnahmen wie Tiefenlockerung durch Grubber, Bodenauftrag und Humuseintrag.

Optimierung durch Bewässerung

- Versorgung der Pflanzen mit Wasser zur Verdunstung und Vermeidung, dass Pflanzen aufgrund von Wassermangel Verdunstung zurückfahren.
- Wurde vorher eine Optimierung des Bodens vorgenommen, verringert sich sowohl der Zeitraum als auch die Menge der Bewässerung.
- Sinnvoll wäre Regenwasserbewirtschaftung, am besten Unterflurbewässerung.
- Regelmäßige Bodenfeuchtemessung, damit auch bei > 70 % nFKWe die Bewässerung eingestellt wird.

Optimierung durch Bepflanzung

- Sinnvoll, wenn ausreichende Wasserversorgung durch gute Bodeneigenschaften, kapillarer Aufstieg oder Bewässerung sichergestellt ist.
- Pflanzen, die tiefe Wurzeln ausbilden und damit einen großem Bodenwasserspeicher zur Verfügung haben, oder Pflanzen mit großen Blattflächen.
- Empfehlung Typ Savannenbepflanzung, um Abtransport der gesättigten Luft nicht durch Bäume zu verhindern.
- Sehr gute Verdunstungsleistungen bieten Wasserpflanzen.

Optimierung durch Gestaltung

- Anlage von Wasserflächen wie Versickerungsmulden, Teiche und Feuchtgebiete, Gründächer Fassadenbegrünung.


**Stand**

- Projekt ist abgeschlossen.
- Ziel sollten Erprobungen von konkreten Optimierungen und deren Monitoring in Pilotprojekten sein.

**Literatur**

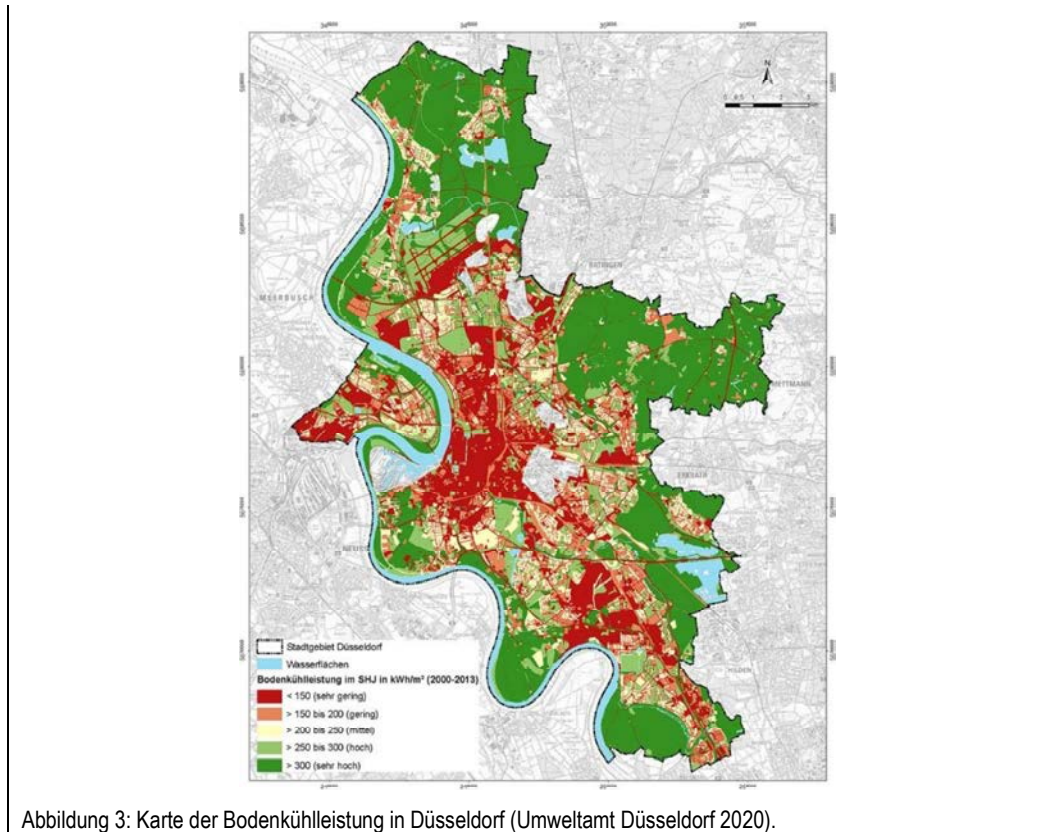
Damm 2013, LANUV 2015, Wessolek et al. 2009.

2.2 Fallbeispiel Düsseldorf

<p><b>Grunddaten</b></p> <p>Bundesland Nordrhein-Westfalen</p> <p>Größe 217,41 km<sup>2</sup></p> <p>Lage Im mittleren Teil des Niederrheinischen Tieflands auf einer Niederterrassenfläche und Übergang zum Bergisch-Sauerländischen Unterland.</p> <p>typ. nat. Boden Parabraunerde aus schluffig- lehmigen Deckschichten und Auenpararendzina aus kalkhaltigen, sandig lehmigen Hochflut- und Auenablagerungen, Podsol-Baunerde und Braunerde der sandigen Terrassen.</p> <p>Niederschlag (1991-2010) Zwischen 800 mm/a in der Rheinebene und &gt; 1.200 mm/a im östlich angrenzenden Bergischen Land.</p>	<p><b>Ziel</b></p> <p>Argumentationsstärkung des Bodenschutzes als Planungsgrundlage der Bauleitplanung</p> <p>Entfaltung der bodenbezogenen Maßnahmen des Klimaanpassungskonzeptes</p> <p>Instrument zur Vermittlung der Bedeutung der Böden in der Öffentlichkeit</p>	
<p><b>Vorgehen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Flächendeckende Berechnung der Bodenkühlleistung auf Basis der BK5 und BK50, der Bodenschätzung DGK5Bo, des Versiegelungsgrades und der für die Grundwassermodellierung mittels RUBINFLUX/SPRING (Zepp et al. 2017) vorliegenden und aufbereiteten Klimadaten (Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer) zur Berechnung der potenziellen Verdunstung. [Textanpassung SenMVKU, 10.10.2023]</li> <li>- Berechnung der Evapotranspiration auf Grundlage der empirischen Referenzverdunstung nach Turc-Wendling und anschließende Berechnung der Verdunstung für aufeinanderfolgende Einzeltage nach Wendling et al. 1984 (DVWK 1996). [Textanpassung SenMVKU, 10.10.2023]</li> </ul>		
<p><b>Methodik</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Daten zur nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes (nFKwe) und dem kapillaren Aufstieg wurden den Bodenkarten BK5, BK50 und der Bodenschätzung DGK5Bo entnommen. [Textanpassung SenMVKU, 10.10.2023]</li> <li>- Die Flächenversiegelungsgrade wurden aus der Realnutzungskarte der Stadt Düsseldorf berücksichtigt.</li> <li>- Zur Berechnung der potenziellen Verdunstung wurden die Bodendaten zusammen mit Daten zur Lufttemperatur und Globalstrahlung der für die Grundwassermodellierung (mittels RUBINFLUX/SPRING) vorliegenden und aufbereiteten Klimadaten verwendet. [Textanpassung SenMVKU, 10.10.2023]</li> <li>- Durch die Einbeziehung von Niederschlagsausgangsdaten für RUBINFLUX wurden die tatsächlichen Bodenwasservorräte berechnet und damit die tatsächliche Bodenkühlleistung. [Textanpassung SenMVKU, 10.10.2023]</li> <li>- Identifizierung geringer und hoher Bodenwasservorräte.</li> <li>- Rückschlüsse aus der Leerung der Bodenwasserspeicher im Sommerhalbjahr.</li> <li>- Die Bodenkühlleistung wird durch Aufsummieren der Tageswerte und durch die Einbeziehung des</li> </ul>	<p><b>Datenherkunft</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- BK5 für 20% des Stadtgebietes im Außenbereich, BK50 für den Innenbereich ohne anthropogenen Einfluss,</li> <li>- Versiegelungsgrade der Flächen aus der Realnutzungskarte der Stadt Düsseldorf,</li> <li>- Klimadaten zur Lufttemperatur, Globalstrahlung und dem Niederschlag aus den Ausgangsdaten für RUBINFLUX/SPRING. [Textanpassung SenMVKU, 10.10.2023]</li> </ul>	

<p>Versiegelungsgrades berechnet (Eschenbach et al. 2016).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalkulationen erfolgten für das Sommerhalbjahr des extremen Trockenjahres 2003. [Textanpassung SenMVKU, 10.10.2023]</li> <li>- Die Bodenkühlleistungskarte zeigt aufgrund der Vergleichbarkeit die Verdunstung von kurzem Gras und kann insbesondere auf Flächen mit Waldbestand die Verdunstungsleistung unterschätzen</li> <li>- Eine bestandspezifische Verdunstung kann durch Berücksichtigung jeweils von Bewuchs und dessen Entwicklungsstand abhängiger Bestandskoeffizienten ermittelt werden (DVWK 1996) [Textanpassung SenMVKU, 10.10.2023]</li> </ul>	
<p><b>Verwendete Parameter</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes [Textanpassung SenMVKU, 10.10.2023]</li> <li>- kapillarer Aufstieg,</li> <li>- Versiegelung,</li> <li>- Lufttemperatur,</li> <li>- Globalstrahlung (kWh/m<sup>2</sup>),</li> <li>- Niederschlag,</li> <li>- Summe aktuelle Evapotranspiration (mm),</li> <li>- Bodenkühlleistung (kWh/m<sup>2</sup>),</li> <li>- Anteil Bodenkühlleistung an der Globalstrahlung (%).</li> </ul>	
<p><b>Ergebnisse</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Böden mit hohen sommerlichen Wasservorräten haben bei gleichen klimatischen Bedingungen eine höhere Verdunstungs- und damit eine größere Kühlleistung als Böden mit geringem Bodenwasservorrat.</li> <li>- Der Höchstwert von 507 kWh/m<sup>2</sup> geht auf einen Gley-Boden zurück, dessen Pflanzenbestand ganzjährig durch kapillaren Aufstieg mit Wasser versorgt ist.</li> <li>- Im Durchschnittsjahr wurde auf dem Gley-Boden mehr als die Hälfte der Globalstrahlung in Verdunstungskälte umgewandelt.</li> <li>- Ein Gley mit Grundwasseranschluss kann auch im Extremjahr vergleichbare Kühlleistungen erbringen wie im Durchschnittsjahr.</li> <li>- Besonders natürliche Böden mit Grundwasseranschluss haben eine große Bedeutung für die Lebensqualität.</li> <li>- Vor allem unversiegelte Flächen der Land- und Forstwirtschaft weisen im Durchschnittsjahr eine sehr hohe Bodenkühlleistung von über 300 kWh/m<sup>2</sup> auf.</li> <li>- 37 % der Stadtfläche stellen kühlungsstarke Böden dar, 27 % der Stadtfläche zeigen eine sehr geringe Bodenkühlleistung (Eschenbach &amp; Gröngroft 2020).</li> <li>- Stark versiegelte Böden von Gewerbe- und Industrieflächen weisen sehr geringe Werte von unter 150 kWh/m<sup>2</sup> auf.</li> </ul>	





**Maßnahmen**

Integration der Bodenkühlleistung in den städtischen Planungsprozess

- Derzeitige Erarbeitung von Regelungen für die Anwendung der Ergebnisse,
- Erarbeitung eines Handlungsplans zum Erhalt und zur Verbesserung der Bodenkühlleistung und des Wasserhaushalts im Rahmen der „doppelten Innenentwicklung“ des Klimaanpassungskonzeptes KAKDUS (GEO-NET et al. 2017),
- Bodenschützende Maßnahmen könnten z.B. Pachtverträge sein, die die Festlegung humusmehrender Bewirtschaftungsverfahren ergänzen; im Innenbereich könnten Entsiegelungen oder das Freihalten besonders schützenswerter und verdunstungsstarker Böden sinnvoll sein;
- Anpassungsmaßnahmen, die auf die Nutzung der Bodenkühlleistung zielen, nennen sich i.d.R. No-Regret-Maßnahmen; diese Maßnahmen sollen auch unter veränderten Rahmenbedingungen keine negativen Auswirkungen haben und sind langfristig sinnvoll; hier geht es nicht nur um Klimaanpassung, sondern auch eine städtebauliche Verbesserungen nach §136 Abs. 2 und Abs. 3 S.1 Nr. 1h BauGB.

Handlungsfelder für die Anwendung der Bodenkühlleistungskarte

- Unterscheidung der Handlungsfelder „Planen“, „Bauen“ und „Bewirtschaften“,
- Einbeziehung weiterer Planungsgrundlagen wie die Karte der Hitzebelastung und die Planungshinweiskarte für Düsseldorf für die Identifizierung von Kühlleistungsflächen,
- Durch die gemeinsame Auswertung der Boden- und stadtklimatischen Informationen können mögliche Maßnahmenräume erkannt und passende Maßnahmen erarbeitet werden.

Tabelle 2: Beispiele der Zuordnung von Kriterien zur Identifikation von Maßnahmenräumen und Maßnahmen innerhalb der Handlungsfelder (Sperling et al. 2019).

Handlungsfeld	Ziel	Kriterien	Maßnahmen
Planen	Schutz und Erhalt	Regional bedeutsamer Ausgleichsraum und Luftaustausch ➤ Kapillarer Aufstieg hoch und sehr hoch ➤ Nutzbare Feldkapazität sehr hoch und extrem hoch ➤ Bodenkühlleistung hoch und sehr hoch	In der Bauleitplanung ➤ Flächen freihalten ➤ Freiflächen gestalten
Planen/Bewirtschaften	Verbesserung	➤ Hitzebelastung weniger günstig ➤ Bodenkühlleistung gering und sehr günstig ➤ Regional bedeutsamer Ausgleichsraum und Luftaustausch ➤ Stadtklimatisch relevante Grünzüge	In der Bauleitplanung und städtischen Grünpflege ➤ Boden verbessern ➤ Entsiegeln ➤ Freiflächen gestalten ➤ Kühlende Bepflanzung
Bauen	Schutz, Erhalt und Verbesserung	Ohne besondere Kriterien, da nicht nur in konkreten Maßnahmenräumen sinnvoll	In der Bauleitplanung und städtischen Grünpflege ➤ Boden schonen ➤ Boden verbessern ➤ Entsiegeln ➤ Freiflächen gestalten ➤ Kühlende Bepflanzung
Bewirtschaften	Erhalt und Verbesserung	Ohne besondere Kriterien, da nicht nur in konkreten Maßnahmenräumen sinnvoll	In der städtischen Grünpflege ➤ Boden schonen ➤ Extensiv pflegen ➤ Kühlende Bepflanzung ➤ Bewässern

- Als mögliches Förderprogramm könnte das Programm „Dach-, Fassaden- und Innenhofbegrünung (DAFIB)“ genutzt werden.
- Die Bodenkühlleistungskarte kann in der Planung der Flächenumwandlungen verwendet werden.
- Es ist eine Brachflächenkartierung in Düsseldorf geplant, die mit der Bodenkühlleistungskarte verschnitten werden soll; dadurch können besonders kühlungsstarke Freiflächen in stadtklimatisch relevanten Lagen identifiziert werden und als Freiflächen geschützt bzw. entsiegelt werden.

**Stand**

- Projekt abgeschlossen, die Maßnahmen sollen langfristig umgesetzt werden.

**Literatur**

Sperling et al. 2019, Eschenbach & Gröngroft 2020.

2.3 Fallbeispiel Neuss

<b>Grunddaten</b> Bundesland      Nordrhein-Westfalen Größe            99,52 km <sup>2</sup> Lage              Am Niederrhein, auf einer Niederterrasse, an der Mündung der Erft in den Rhein typ. nat. Boden    Parabraunerde aus lössbedeckten, lehmigen sandigen Terrassenablagerungen Niederschlag (1981-2010)    770 mm/a		<b>Ziel</b> Projekt StaKliBo (Stadt Klima Boden) zur Entwicklung von Werkzeugen für die Aktivierung der Bodenkühlleistung im städtischen Planungsprozess Entwicklung eines klimatischen Bodenkonzeptes und eines Bodenmanagementsystems Sicherstellung der Übertragbarkeit der Ergebnisse und Methodik auf andere Städte	
<b>Vorgehen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Empirische Erfassung (Messungen, Modellierungen, GIS-Analysen) der Zusammenhänge zwischen Bodenzustand, Wasserverfügbarkeit und Vegetationsbestand und Kaltluftbildungspotenzial als Grundlage für ein klimatisches Bodenkonzept und ein Bodenmanagementsystem,</li> <li>- Kategorisierung stadtklimatisch relevanter Flächen entsprechend ihrer Bodenparameter,</li> <li>- Ableitung von Schutzzonen zum Erhalt und Sanierungszonen zur Verbesserung der Kühlleistung im Stadtgebiet für die Planung,</li> <li>- Entwicklung eines Bodenmanagementsystems, das automatisch Verbesserungsmaßnahmen für Flächen anhand der Erkenntnisse aus Untersuchungen ermittelt.</li> </ul>			
<b>Methodik</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verschneidung von Thermalbildern, Bodenkarten, Grundwasserkarten und Nutzungskarten als erste Bewertung und darauf aufbauend detaillierte Betrachtung der Bodeneigenschaften für die Beurteilung der potenziellen Bodenkühlleistung,</li> <li>- Messungen der Luft-, Oberflächen- und Bodentemperaturen sowie der Bodenfeuchte auf sechs repräsentativen Standorten anhand der drei Einflussfaktoren „Klimarelevanz der Fläche“ (z.B. Belüftungsschneise), „Bodenprofil“ (z.B. natürlich oder anthropogen) und Vegetationsausstattung / Landnutzung,</li> <li>- Unterscheidung der Landnutzung in Grünland, Acker, Brache, Innerstädtische Grünanlage, RCL-Fläche, RCL-Fläche mit Bodenverbesserungsmaßnahmen,</li> <li>- Erfassung der standortspezifischen thermischen und hydrologischen Eigenschaften anhand von Feldkapazität, Wasserleitfähigkeit, Matrixpotenzial und Korngrößenanalyse,</li> <li>- Simulation der verschiedenen Wechselwirkungen Boden, Oberflächen, Pflanzen und Atmosphäre mit dem Klimamodell ENVI-met Modelldatenbank,</li> <li>- Darstellung der Effekte der Maßnahmen zur Verbesserung der Bodenkühlleistung durch die Variation von Bodenparametern.</li> </ul>		<b>Datenherkunft</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Boden-Atmosphäre-Messstationen auf den unterschiedlichen Bodenprofilen erfassen kontinuierlich Niederschlag, Wind (10 m Höhe), Lufttemperatur (5 cm und 2 m Höhe), Luftfeuchtigkeit, Bodentemperaturen und -feuchte (in drei Tiefen) in drei verschiedenen Bodenhorizonten</li> <li>- Ergänzend erfolgen Thermografische Aufnahmen der Oberflächentemperaturen während sommerlicher Hitzeperioden sowie Handmessungen und Messfahrten</li> <li>- Entnahme von Bodenproben</li> <li>- Laboruntersuchungen von Bodenproben zu Feldkapazität, Wasserleitfähigkeit, Matrixpotenzial und Korngrößenanalyse</li> </ul>	
<b>Verwendete Parameter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gebäudeoberflächen</li> <li>- Bodenversiegelungsgrad</li> <li>- Bodeneigenschaften (Feldkapazität, Wasserleitfähigkeit, Matrixpotenzial, Korngröße)</li> <li>- Grundwasseranschluss</li> <li>- Vegetation</li> <li>- Sonneneinstrahlung</li> <li>- Windfeld</li> </ul>			

**Ergebnisse**

- Der Standort Brache zeigt ein für anthropogen mit Bauschutt überformten Boden typisches Verhalten. Das Niederschlagswasser dringt ein und passiert alle drei Horizonte ungehindert. Die Bodenfeuchte sinkt nach dem Regenereignis sofort wieder ab. Die Bodenfeuchtwerte der Brache sind mit Werten um 5 % niedriger als auf anderen Testflächen. Bewässerungsmaßnahmen wären für solche Standorte demnach wirkungslos.
- Die Wasserleitfähigkeit spielt eine entscheidene Rolle für die Verdunstungsfähigkeit und damit dem Kühlleistungspotenzial.
- Lehmiger Sand (Loamy Sand) zeigte deutlich bessere Kühlleistungen als Schluffiger Ton (Silty Clay).

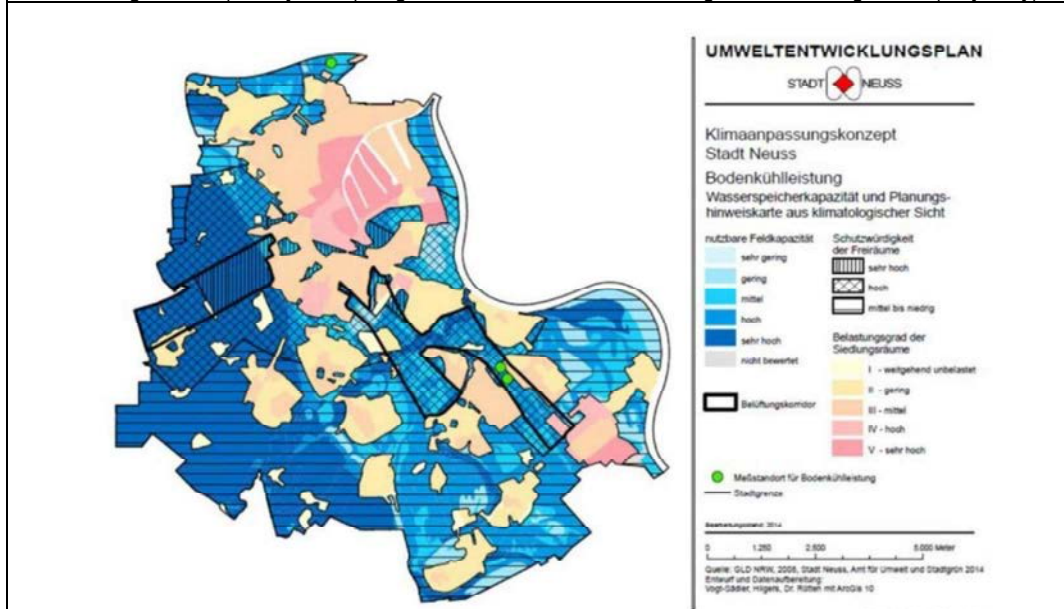


Abbildung 4: Verschneidung der Planungshinweiskarte aus klimatologischer Sicht mit der Karte zur Wasserspeicherkapazität (LANUV 2015, 49).

**Maßnahmen**

- Bodenstrukturverbesserung durch Aufbringen von natürlichen Böden, Verbesserung der Durchwurzelung, Bewässerungsmaßnahmen,
- Freihaltung von Böden mit hohen pflanzenverfügbaren Wasserspeicherleistungen und / oder Grundwasseranschluss in stadtklimatisch relevanten Frischluftschneisen.


**Stand**

- Projekt abgeschlossen,
- Langzeitbeobachtung der Bodenkühlleistung durch Erhalt einiger Messstationen,
- Forschungsbedarf wird in weiteren Kombinationsmöglichkeiten der Parameter gesehen.

**Literatur**

- LANUV 2015, Ruhr-Universität Bochum, Stadt Neuss 2017.

**2.4 Fallbeispiel Wuppertal**

<p><b>Grunddaten</b></p> <p>Bundesland Nordrhein-Westfalen          Größe 168,39 km<sup>2</sup>          Lage Wuppertal liegt in einem Bogen der Wupper entlang der Grenze zum Niederbergischen Hochflächen im Norden und den oberbergischen Hochflächen im Süden. Ein Teil des Stadtgebietes gehört zu den Bergischen Hochflächen, ein anderer zum Niederbergisch-Märkischen Hügelland.          typ. nat. Boden Überwiegend Braunerden, vereinzelt Pseudo-Braunerden          Niederschlag (1981-2010) 1.200 mm/a</p>	<p><b>Ziel</b></p> <p>Fortschreibung der Bodenfunktionskarten u.a. unter dem Aspekt der Bodenkühlleistung</p>																																				
<p><b>Vorgehen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Für Wuppertal existiert eine stadtweite Klimaanalysekarte mit Klimatopen und Kaltluftströmungen / Luftleitbahnen.</li> <li>- Mit der Bodenfunktionskarte wurde der Zusammenhang zwischen Bodenversiegelung und Lokalklima untersucht. Dabei wurde ein Zusammenhang zwischen zunehmender Oberflächentemperatur und dem Versiegelungsgrad festgestellt.</li> </ul>																																					
<p><b>Methodik</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Auswertung der BK50 zur potenziellen Bodenkühlleistung durch die Bodenkennwerte Nutzbare Feldkapazität des Wurzelraumes (nFKwe) und ökologische Feuchtestufe (FEU),</li> <li>- Abschläge der nFK um 20 % bei siedlungsbedingter verringerter Wasserspeicherefähigkeit.</li> </ul> <table border="1" data-bbox="260 1305 743 1554"> <thead> <tr> <th>Klasse</th> <th>nFK</th> <th>FEU</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>sehr gering</td> <td>sehr gering</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>gering</td> <td>gering</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>mittel</td> <td>mittel</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>hoch</td> <td>hoch</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>sehr hoch</td> <td>sehr hoch</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" data-bbox="260 1585 743 1910"> <thead> <tr> <th colspan="3">Bewertung des Kühlungspotenzials (Verknüpfungsregel UND)</th> </tr> <tr> <th>Klasse</th> <th>nFK</th> <th>FEU</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sehr hoch</td> <td>≤ 5</td> <td>= 5<sup>1)</sup></td> </tr> <tr> <td>Hoch</td> <td>4 bis 5</td> <td>3 bis 4</td> </tr> <tr> <td>Mittel</td> <td>= 3</td> <td>2 bis 4</td> </tr> <tr> <td>Gering<sup>2)</sup></td> <td>3 ≤ 2</td> <td>1 ≤ 2</td> </tr> </tbody> </table>	Klasse	nFK	FEU	1	sehr gering	sehr gering	2	gering	gering	3	mittel	mittel	4	hoch	hoch	5	sehr hoch	sehr hoch	Bewertung des Kühlungspotenzials (Verknüpfungsregel UND)			Klasse	nFK	FEU	Sehr hoch	≤ 5	= 5 <sup>1)</sup>	Hoch	4 bis 5	3 bis 4	Mittel	= 3	2 bis 4	Gering <sup>2)</sup>	3 ≤ 2	1 ≤ 2	<p><b>Datenherkunft</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- BK50</li> <li>- GIS Analyse</li> </ul>
Klasse	nFK	FEU																																			
1	sehr gering	sehr gering																																			
2	gering	gering																																			
3	mittel	mittel																																			
4	hoch	hoch																																			
5	sehr hoch	sehr hoch																																			
Bewertung des Kühlungspotenzials (Verknüpfungsregel UND)																																					
Klasse	nFK	FEU																																			
Sehr hoch	≤ 5	= 5 <sup>1)</sup>																																			
Hoch	4 bis 5	3 bis 4																																			
Mittel	= 3	2 bis 4																																			
Gering <sup>2)</sup>	3 ≤ 2	1 ≤ 2																																			
<p><b>Verwendete Parameter</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- nutzbare Feldkapazität des Wurzelraumes</li> <li>- ökologische Feuchtestufe</li> <li>- Nutzung</li> </ul>																																					

**Ergebnisse**

- Alle auentypischen Böden bzw. Böden mit Grundwasseranschluss sowie Gewässer erhalten das Attribut sehr hohes Bodenkühlungspotenzial.
- Siedlungsböden und flachgründige natürliche Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität haben ein geringes Kühlungsvermögen.

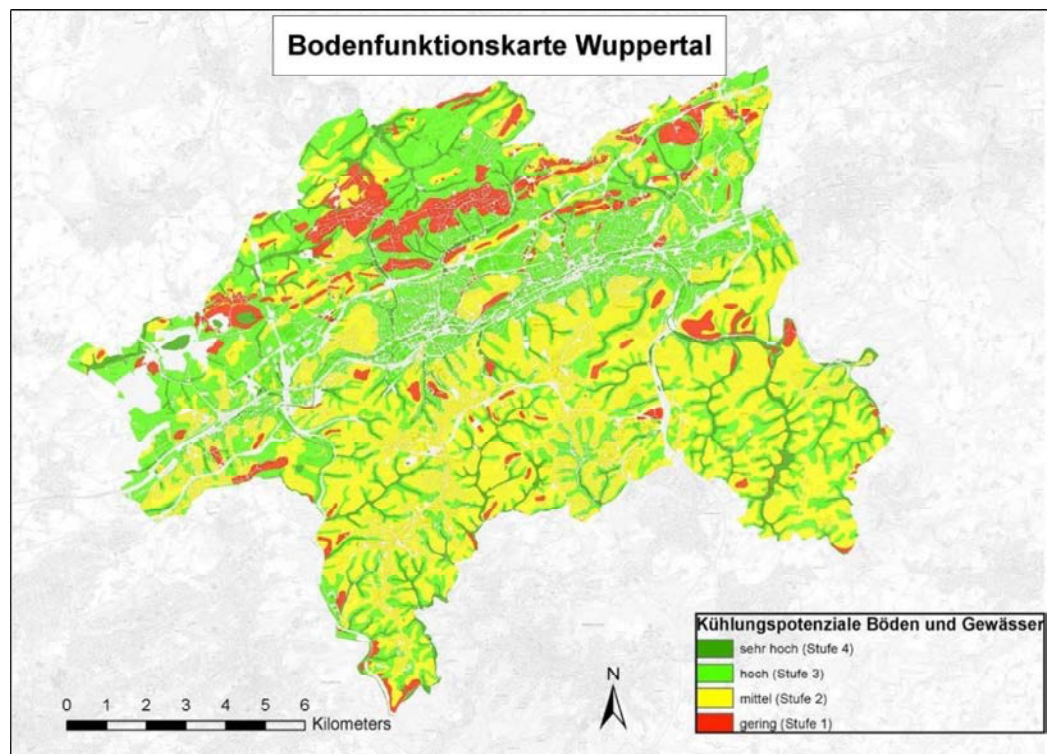


Abbildung 5: Kühlungspotenziale in Wuppertal auf Grundlage der Bodenkennwerte gemäß BK50, angepasst für offene Wasserflächen. Versiegelungsgrade auf Baublockebene mit Stand 2007 (Ingenieurbüro Feldwisch 2017).

**Maßnahmen**

- Möglichst Erhaltung von Böden mit hohen Kühlungspotenzialen im Innenbereich.


**Stand**

- Projekt abgeschlossen.

**Literatur**

Ingenieurbüro Feldwisch 2017

2.5 Fallbeispiel Oberhausen

<p><b>Grunddaten</b></p> <p>Bundesland    Nordrhein-Westfalen</p> <p>Größe            77,09 km<sup>2</sup></p> <p>Lage             In der Niederrheinischen Tiefebene an den von Ost nach West in den Rhein mündenden Flüssen Ruhr und Emscher</p> <p>typ. nat.Boden    Parabraunerde aus lössbedeckten, lehmigen sandigen Terrassenablagerungen</p> <p>Niederschlag    850 mm/a (1981-2010)</p>	<p><b>Ziel</b></p> <p>Untersuchung des Bodenklimas in Abhängigkeit verschiedener Bodentiefen und Klimatopen</p> <p>Untersuchung der Auswirkungen auf das Wasserleitungssystem und damit auf die Trinkwasserqualität</p> <p>Quantifizierung des positiven Beitrags des Bodens zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung</p>	
<p><b>Vorgehen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Auf acht Standorten, die auf sieben Klimatope verteilt sind und sich in unmittelbarer Nähe von Trinkwasserschächten befinden, werden bodenklimatische Parameter aufgenommen.</li> <li>- Klimatope sind Gebiete, die auf Grund ihrer Flächennutzungs-, Relief- und Bebauungsstruktur, Vegetationsbedeckung und Bodenart im mikro- bis mesoklimatischen Bereich ein relativ einheitliches, charakteristisches Klima ausbilden.</li> </ul>		
<p><b>Methodik</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassung der Temperatur an allen Standorten von der Oberfläche bis zum Trinkwasserleitungsniveau (max. Tiefe 1,9 m) unter Berücksichtigung der Bodenhorizonte (insgesamt 50 Temperatursonden), der Bodenfeuchte (bis in maximal 100 cm Tiefe) sowie dem Bodenwärmestrom (in 7,5 cm und 30 cm Tiefe) an ausgewählten Standorten.</li> <li>- Die Untersuchungsstandorte sind insgesamt vier verschiedenen Bodeneinheiten zuzuordnen, die etwa 40 % der Gesamtfläche von Oberhausen einnehmen: Regosol, Regosol und Gley, Regosol über Gleyl, pseudovergleyte podsolige Braunerde sowie keine Bodeneinheit, da ehemalige Industriestandorte.</li> </ul>	<p><b>Datenherkunft</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Messungen mit einer Sonde,</li> <li>- Oberirdisches Klimamessnetz an den gleichen Standorten für die Parameter Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung, standortabhängig in drei bis vier Metern ü. Grund,</li> <li>- Messung der Evapotranspiration (Gebietsverdunstung),</li> <li>- Erfassung der Bodenhorizonte durch Rammkernsondierungen.</li> </ul>	
<p><b>Verwendete Parameter</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Oberflächen- und Bodentemperaturen</li> <li>- Bodenfeuchte</li> <li>- Bodenwärmestrom</li> </ul>		
<p><b>Ergebnisse</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Unterschiedliches thermisches Verhalten von anthropogenen Standorten (Innenstadt (hochversiegelt), Innenstadt, Gewerbe) sowie weniger stark versiegelten Standorten (Park, Stadtrand, Gewässer, Wald, Freiland).</li> <li>- Ursachen sind hoher Versiegelungsgrad, die verwendeten Baumaterialien, schlechte Wasserversorgung der Standorte sowie in der Innenstadt die Nähe zu einer Fernwärmeleitung.</li> <li>- Die wichtigsten Faktoren, die an den Untersuchungsstandorten den Bodenwärmestrom bestimmen, sind die Beschattung und der Bodenaufbau.</li> <li>- Bodenfeuchte: In der Innenstadt sind die oberen Schichten deutlich feuchter als die tieferen, da nur oberflächlich eine wasserspeichernde Humusaufgabe vorhanden ist, darunter jedoch Sand besteht. Am Freilandstandort ist der Wassergehalt deutlich höher und nimmt mit der Tiefe zu.</li> <li>- Unterirdische Wärmeinsel: Der Boden in der Stadt ist deutlich wärmer als das Umland in gleicher Tiefe aufgrund anthropogener Einflüsse.</li> <li>- Oberflächennaher Energiegehalt: die gespeicherte Wärme stellt einen Energiespeicher dar, der durch Wärmepumpen genutzt werden könnte.</li> <li>- Trotz der Heterogenität von Böden im urbanen Raum kann von einer Beeinflussung der Bodentemperaturen durch die Klimatope ausgegangen werden.</li> </ul>		

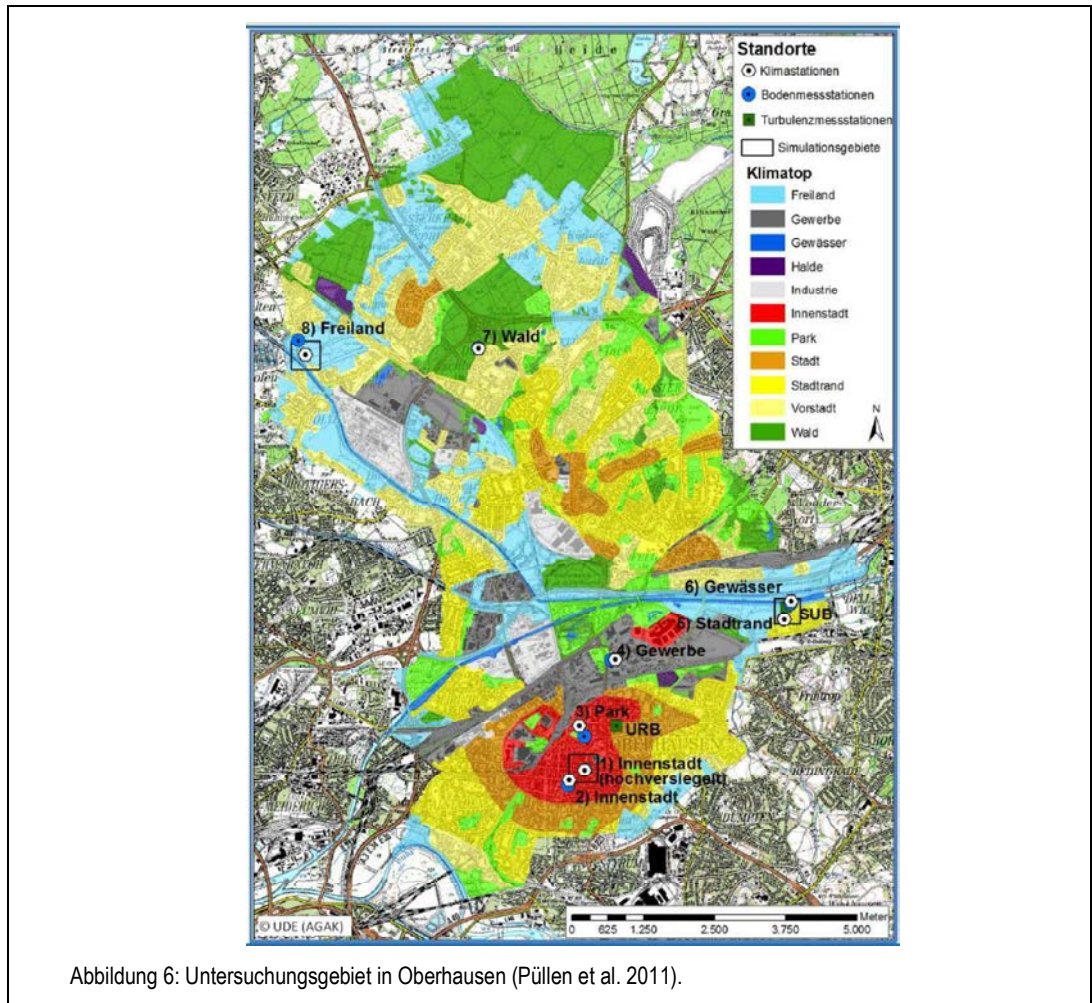



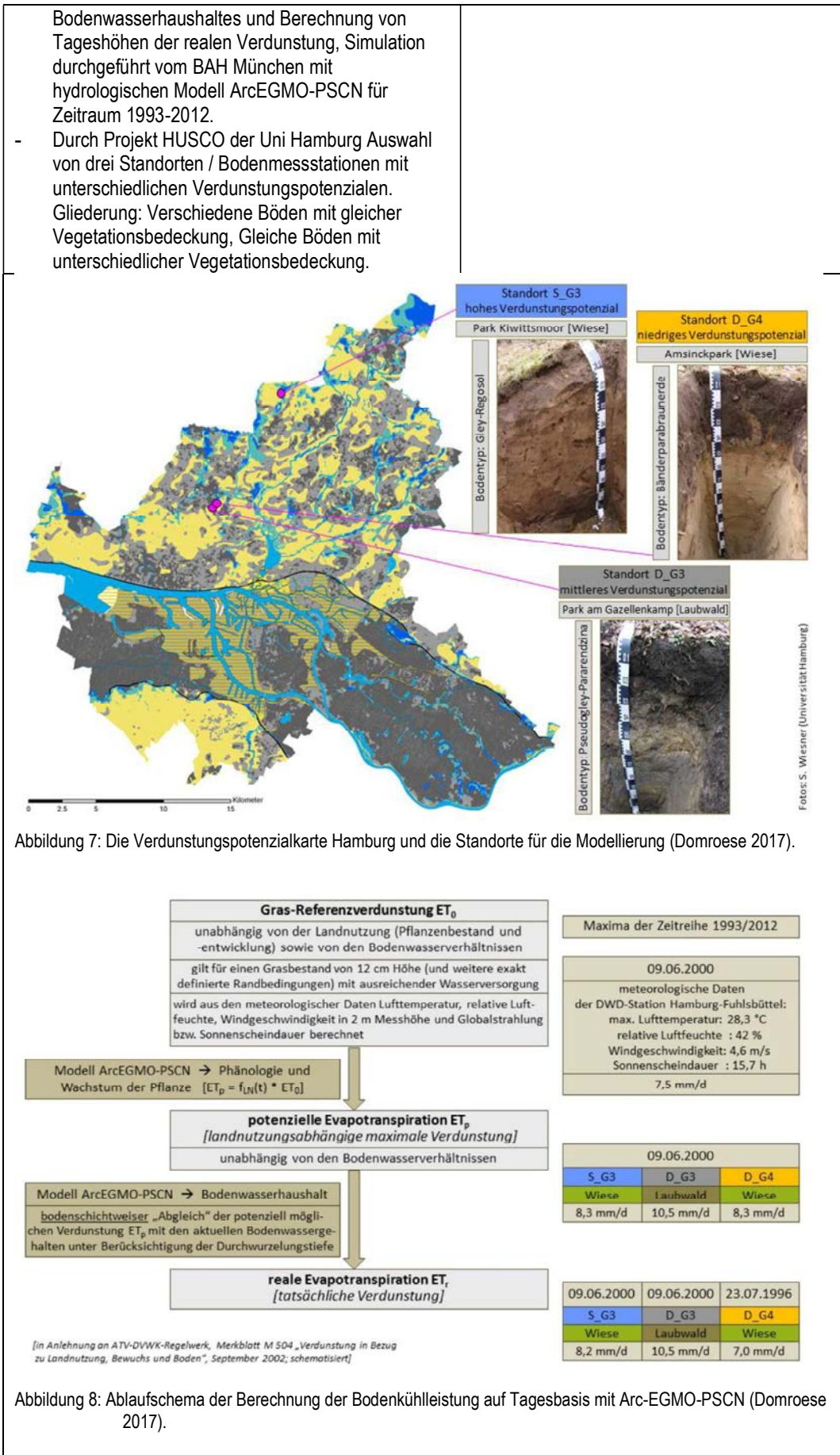
Abbildung 6: Untersuchungsgebiet in Oberhausen (Püllen et al. 2011).

<b>Maßnahmen</b>	-
<b>Stand</b>	- Projekt abgeschlossen.
<b>Literatur</b>	Püllen et al. 2011



2.6 Fallbeispiel Hamburg

<p><b>Grunddaten</b></p> <p>Bundesland Hamburg</p> <p>Größe 755,22 km<sup>2</sup></p> <p>Lage An der Elbe, 110 Kilometer von der Nordsee entfernt; in der norddeutschen Tiefebene</p> <p>typ. nat. Boden Natürliche Böden der Hohen Geest wie Parabraunerden, Pseudogleye, Braunerden, Podsole; im tiefer liegenden eingedeichten Marschen Flusskalk- und Flusskleimarschen, Flussrohmarschen</p> <p>Niederschlag 770 mm/a (1981-2010)</p>		<p><b>Ziel</b></p> <p>Lücke bei Bewertung der Schutzwürdigkeit der hamburgischen Böden soll mit Klassifizierung der potenziellen Verdunstungsleistung geschlossen werden, Erhebung/Quantifizierung der Unterschiede in der Verdunstungsleistung und somit Kühlleistung an Sommertagen / Monaten auf Böden mit unterschiedlichen Verdunstungspotenzialen (Behörde für Umwelt und Energie).</p> <p>Forschung zur Abkühlungsfunktion von Böden (CEN, Universität Hamburg).</p>	
<p><b>Vorgehen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erstellung einer Verdunstungspotenzialkarte für die zu erwartenden Kühlleistungen in den Sommermonaten.</li> <li>- Auf Basis der Verdunstungspotenzialkarte -&gt; Quantifizierung der Bodenkühlleistung und Darstellung, wie groß die Unterschiede der Verdunstungsleistung an Sommer- bzw. Hitzetagen auf Böden mit unterschiedlichen Verdunstungspotenzialen an unterschiedlichen Standorten sind.</li> <li>- Forschung zur Abkühlungsfunktion von Stadtböden.</li> </ul>			
<p><b>Methodik</b></p> <p><u>Für die Ableitung der Verdunstungspotenzialkarte:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Übersicht über die Herkunft des potenziell für die Verdunstung im Boden zur Verfügung stehenden Wassers und über die bodenphysikalischen Kennwerte, die die Verfügbarkeit für die Verdunstung beeinflussen,</li> <li>- Betrachtung der Speicherung von Niederschlagswasser im Boden und des Grundwasseranschlusses von Böden,</li> <li>- Verschneidung der Profiltypenkarte und der Grundwasserflurabstandskarte im GIS.</li> </ul> <p><u>Für die Quantifizierung der Kühlleistung von Böden:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Umfassendes Konzept für den Vergleich verschiedener Böden an verschiedenen Standorten. Hier wurden Parameter, die Einfluss auf die Kühlleistung haben, überprüft wie: Grundwasserflurabstand mit Grundwasseranschluss; die nutzbare Feldkapazität der maximalen Wurzelzone an den Standorten ohne Grundwasseranschluss.</li> <li>- Art der Vegetationsbedeckung + dazugehörige maximale Durchwurzelungstiefe. Für Modellberechnungen: Ges. Porenvolumen, Feldkapazität, permanenter Welkepunkt, gesättigte Wasserleitfähigkeit; Modellierung des</li> </ul>		<p><b>Datenherkunft</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Für die Verdunstungspotenzialkarte: Hydrogeologische Profiltypenkarte (nach ÖKO DATA) für die Bilanzierung der Grundwasserneubildung; Grundwasserflurabstandskarte;</li> <li>- Für die Quantifizierung der Bodenkühlleistung: Kooperation mit der Uni Hamburg (Projekt HUSCO) Meteorolog.Daten: Zeitreihen vom DWD; Modellvalidierung: Nutzung von Bodenfeuchtemesswerten aus Projekt HUSCO, Validierung durch BAH München; Für komplexe Berechnung des Bodenwasserhaushaltes an Standorten, Modell ArcEGMO-PSCN.</li> </ul>	



### **Verwendete Klassen/Parameter**

#### 1. Verdunstungspotenzialkarte

##### Klassen

Böden mit hohem Verdunstungspotenzial aufgrund von Grundwasseranschluss (grundwasserbeeinflusste Böden)

1. Niedrigster Grundwasserflurabstand im Nassjahr 0 bis 1 m unter GOK
2. Niedrigster Grundwasserflurabstand im Nassjahr 1 bis 2,5 m unter GOK

Böden mit mittlerem Verdunstungspotenzial aufgrund hoher Speicherkapazität für Niederschlagswasser sowie Stauwasser nach Starkregenereignissen

3. Oberkante des Nichtleiters / der obersten bindigen Bodenschicht 0 bis 1 m u. GOK
4. Oberkante des Nichtleiters / der obersten bindigen Bodenschicht 1 bis 2 m u. GOK

Böden mit niedrigem Verdunstungspotenzial aufgrund geringer Speicherkapazität für Niederschlagswasser und des fehlenden Grundwasseranschlusses

5. Oberkante des Nichtleiters grösser 2 m unter GOK
6. Künstliche Aufhöhungsflächen in der Marsch

##### Parameter

- niedrigster Flurabstand im Nassjahr
- Tiefe der Stauschicht / gesättigte Wasserleitfähigkeit

#### 2. Modell ArcEGMO-PSCN

- Kurzzeitmodellierung (Tage) über die Jahre 1993 bis 2012
- nur drei Standorte (da aufwändig)
- detaillierte, schichtweise Beschreibung des Bodenprofils (Porenvolumen, Feldkapazität, permanenter Welkepunkt, gesättigte Wasserleitfähigkeit)
- meteorologische Daten, Tageswerte (Temperaturen, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer, Niederschlag)
- Wachstum verschiedener Vegetationsbedeckungen

##### Wichtigste Einflussfaktoren

- 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

Um den Einfluss der unterschiedlichen Vegetationsbedeckung zu eliminieren und nur den Einfluss des Bodens auf die Verdunstungsleistung zu erfassen, wurden die 20-Jahre-Simulationen sowohl mit Wiese als auch mit Laubwald als Vegetation durchgeführt.

Bei ungleicher Vegetation und ungleichen Klimaverhältnissen der Standorte, bietet es sich an, die reale Evapotranspiration  $E_{Tr}$  ins Verhältnis zur potenziellen Evapotranspiration  $E_{Tp}$  zu setzen (Normierung) und Tageswerte des Quotienten  $E_{Tr}/E_{Tp}$  zu berechnen. Diese Quotienten erlauben, die Kühlleistung von Böden an verschiedenen Standorten mit jeweils unterschiedlichen Klima- und Vegetationsbedingungen vergleichend zu bewerten.

##### **Ergebnisse**

###### Ergebnisse für verschiedene Böden mit gleicher Vegetationsbedeckung

- Bodenwasservorrat in der Wurzelzone am Ende des Monats Mai und dazugekommenen Niederschlagsmengen reichen an allen drei Standorten aus, um in der ersten Juni-Dekade eine tatsächliche Verdunstung auf dem Niveau der potenziellen Evapotranspiration zu erreichen.
- Standort Kwittsmoor: Durch hoch anstehendes Grundwasser in die Wurzelzone über gesamten Zeitraum reißt kapillarer Aufstieg nicht ab (also starke Kühlleistung am Standort mit Grundwasseranschluss) > Hohe Evapotranspiration und dadurch hohe Kühlleistung auch in Hitzeperiode.
- Standort Amsickpark: Durch einsetzende Trockenheit sinkt pflanzenverfügbarer Bodenwasserhaushalt in der Wurzelzone, dadurch in zweiter Juni Dekade Senkung der tatsächlichen Verdunstung unter potenzielle Evapotranspiration; Bodenwasserhaushalt bis Ende der Hitzeperiode ausgeschöpft, Kühlleistung tendiert gegen Null.
- Standort Gazellenkamp: Hat mittleres Verdunstungspotenzial; tatsächliche Verdunstung hat über gesamten Juni Niveau der potenziellen Evapotranspiration; Boden kann in erster Junidekade zur

- Kühlung beitragen, später aufgebraucht.
- Zusammenfassung alle drei Standorte: Überlegene Kühlleistung am Standort Kwittsmoor mit Grundwasseranschluss. Der Boden am Standort Gazellenkamp mit mittlerem Verdunstungspotenzial kann noch bis zum Ende der ersten Juli-Dekade zum Kühlen seiner Umgebung beitragen, während am Standort Amsickpark bereits am 24.06. erstmalig nahezu keine Kühlleistung mehr festzustellen ist.

#### Ergebnisse für gleiche Böden mit unterschiedlicher Vegetationsbedeckung

- Standort Gazellenkamp: Laubwald, der mit ausreichend Wasser versorgt ist, führt zu höherer Kühlleistung (10 Tage länger als Parkwiese).
- Standort Amsickpark: Durch niedriges Verdunstungspotenzial sinkt hier die Kühlleistung im Vergleich zum Standort mit mittlerem Verdunstungspotenzial (Gazellenkamp), bei beiden Vegetationsbedeckungen sehr deutlich. Unterschiede in den Kühlleistungen von Parkwiese und Laubwald an diesem Standort deutlich geringer als am Standort Gazellenkamp. 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.

#### Schlussfolgerung

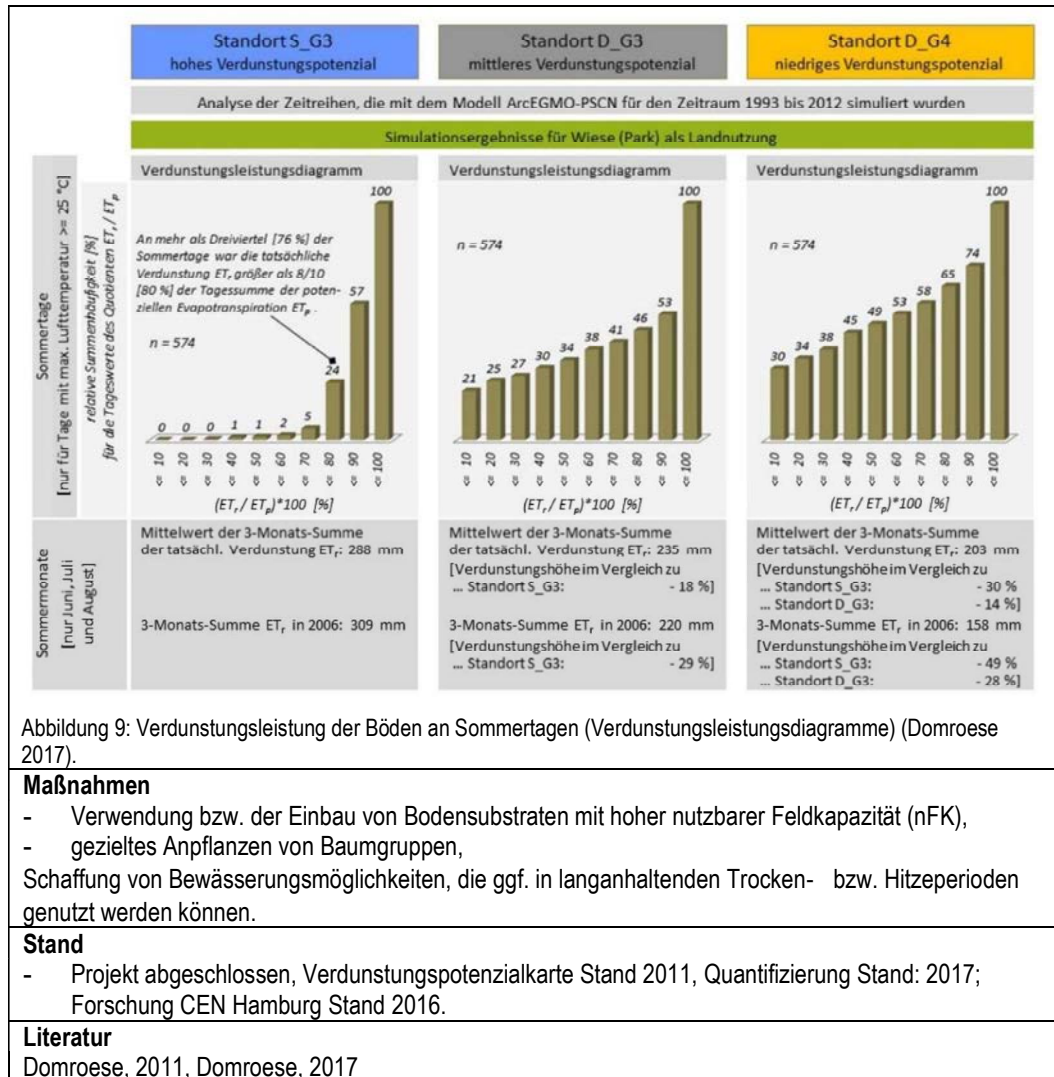
- Aus stadtklimatischer Sicht sind besonders schützenswerte Flächen mit hoher Kühlleistung an Sommertagen nicht nur Böden mit Grundwasseranschluss, sondern auch Böden mit ausgewiesenem mittlerem Verdunstungspotenzial und der Vegetationsbedeckung Laubwald. Voraussetzung für eine hohe Kühlleistung im erstgenannten 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 Modellierungsergebnisse geben auch Hinweise darauf, wie bei der Neuanlage von Parks in Hamburg - zum Beispiel in der Hafen City - die Kühlleistung von Boden und Vegetation gezielt optimiert werden kann, um maximal positive Effekte für das Stadtklima zu erreichen.

#### Ranking aller Ergebnisse

- Die Untersuchungen haben gezeigt, dass nicht nur am grundwasserbeeinflussten Standort Kwittsmoor mit der Vegetationsbedeckung Wiese, sondern auch am Standort Gazellenkamp ohne Grundwasseranschluss und mit der Vegetationsbedeckung Laubwald die besten Kühlleistungen erzielt werden. Dabei zeichnet sich der Standort mit Grundwasseranschluss Kwittsmoor durch eine kontinuierlich hohe Kühlleistung an allen Sommertagen aus, während sich am Standort Gazellenkamp diese Kontinuität leicht verschlechtert, dafür jedoch - bedingt durch die Vegetationsbedeckung Laubwald - im Mittel höhere Tagessummen der tatsächlichen Verdunstung  $E_{Tr}$  erreicht werden. Der Standort Gazellenkamp mit der Vegetationsbedeckung Wiese hat ein mittleres Verdunstungspotenzial. Am sehr sandigen Standort Amsickpark unterscheiden sich die Kühlleistungen zwischen den Vegetationsbedeckungen Wiese und Laubwald dagegen bei beiden angewandten Ranking-Kriterien kaum. Am Standort Amsickpark mit der Vegetationsbedeckung Wiese ist die Kühlleistung an Sommertagen im Mittel nur noch halb so groß wie am Standort Gazellenkamp mit Vegetationsbedeckung Laubwald.

#### Ergebnisse aus Forschung (CEN, Universität Hamburg)

- Die Kühlfunktion ist zweifellos eine für Stadtökosysteme wichtige Funktion, die über die eigentliche Bodenfläche hinaus wirkt, die aber nur für begrenzte Zeiten (01.06.-31.07.) benötigt wird.
- Ob Schätzverfahren, die auf Jahreswerten beruhen, die Kühlfunktion für die kritischen Zeiten adäquat einstufen, ist bisher nicht nachgewiesen.
- Eine direkte Quantifizierung der Verdunstungsrate von Stadtstandorten ist methodisch praktisch unmöglich, daher müssen indirekte Verfahren eingesetzt werden.
- Zu Beginn der Vegetationsperiode sind viele Standorte feuchter, sie können mithin mehr Wasser zur Verdunstung zur Verfügung stellen.
- An Hitzetagen verlieren die untersuchten Böden messbar Wasser. Das Tagesmaximum der Kühlleistung liegt meist zwischen 13 und 15 Uhr, an einem Gartenstandort bereits um 11 Uhr. 7-9 % der Kühlleistung findet zwischen 19 und 23 Uhr MEZ statt.
- Die Wasserverfügbarkeit steuert die aktuelle Verdunstung signifikant, mit zunehmender Austrocknung der Böden nimmt die Kühlleistung ab. Bei mittleren Wasserspannungen über  $pF_{2.5}$  reduzierte sich die Kühlleistung auf weniger als 60 % der potenziellen Verdunstung.
- Durch Grundwassernähe können auch an Hitzetagen hohe Kühlleistungen erzielt werden.



**Maßnahmen**

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

**Stand**

- Projekt abgeschlossen, Verdunstungspotenzialkarte Stand 2011, Quantifizierung Stand: 2017; Forschung CEN Hamburg Stand 2016.

**Literatur**

Domroese, 2011, Domroese, 2017

**2.7 Zusammenfassung der Fallbeispiele und Übertragbarkeit auf Berlin**

Sechs Fallbeispielstädte mit Bodenkühlleistungskarten wurden anhand ihrer geographischen und klimatischen Lage, der Ziele der Karte, der verwendeten Vorgehensweise und Methode, der Herkunft der Daten, der verwendeten Parameter, der Ergebnisse und abgeleiteter Maßnahmen sowie dem Stand des Projekts ausgewertet.

Alle Städte haben zum Ziel, die Einflussmöglichkeiten der Funktionen des Bodens auf die Verdunstung herauszustellen sowie den positiven Beitrag des Bodens zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung zu quantifizieren. In Neuss liegt der Schwerpunkt auch auf dem ökonomischen Potenzial sowie der Entwicklung von Werkzeugen für die Aktivierung der Bodenkühlleistung im städtischen Planungsprozess.

Die Fallbeispielstädte liegen in Gebieten mit deutlich höheren Niederschlägen als in Berlin. In einer gemäßigten Klimazone wie Berlin ist der Verdunstungs-Unterschied zwischen Vegetationstypen (z. B. Gras / Wald) geringer, als in einem humiden Gebiet.

Aus den Fallbeispielen wird deutlich, dass mit Hilfe bodenkundlicher Karten, Erfassungen und Klimadaten Potenzialkarten der Bodenkühlleistung für Städte erstellt werden können.

Für eine erste Beurteilung des Kühlspotenzials eines Bodens wurde in den meisten Fallbeispielen die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum herangezogen. Daher wurden bodenkundliche Daten sowie eigene Kartierungen eine wesentliche Grundlage in den Untersuchungen.

Innerhalb von Nordrhein-Westfalen werden verschiedene Vorgehensweisen zur Ermittlung der Bodenkühlleistung herangezogen. Die Stadt **Boitrop** verwendet mit dem TUB-BGR-

Modell ein Wasserhaushaltsmodell. Das TUB-BGR-Modell arbeitet mit dem Parameter nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) und ist damit vegetationsabhängig. Außerdem werden Niederschlag (Winter- / Sommerhalbjahr), die potenzielle Grasreferenzverdunstung, der Kapillaraufstieg, die Wasserverfügbarkeit im Sommerhalbjahr, die Versiegelungsart sowie die Hangneigung berücksichtigt (Höke & Kaufmann-Boll 2012). Auffällig ist, dass für eine Skalierung von 125 mm/a sieben Bewertungsklassen verwendet werden (sehr gering – sehr hoch). Dies vermittelt eine Scheingenauigkeit. Das TUB-BGR-Verfahren ist auf langjährige Mittel ausgelegt und kann für Berlin angewendet werden.

Die Modellierung der Bodenkühlleistungskarte in **Düsseldorf** basiert auf der Datenauswertung der Karte der schutzwürdigen Böden in NRW im Maßstab 1:50.000 (BK50) und der Bodenkarte 1:5.000 (BK5), aufgenommen mittels verschiedener land- und forstwirtschaftlicher Kartierverfahren. Bodenkundliche Kartierungen in diesen Maßstäben liegen für Berlin nicht vor. Ansonsten werden klimatische Ausgangsdaten der Erweiterung RUBINFLUX des für das Stadtgebiet Düsseldorf entwickelten Grundwasserströmungsmodells SPRING (Zepp et al. 2017) des Sommerhalbjahres 2003 verwendet. Die potenzielle Bodenkühlleistung wurde auf Grundlage der empirischen Referenzverdunstung nach Turc-Wendling und nach Wendling et al. 1984 berechnet (DVWK 1996). Aufgrund des Fehlens entsprechender Parameter ist das Vorgehen nicht übertragbar auf Berlin [Textanpassung SenMVKU, 10.10.2023].

Das in **Neuss** verwendete mikroskalige Klimamodell ENVI-met geht auf einzelne Lysimetermessungen verschiedenerer Klimatope zurück und ist daher nicht übertragbar auf Berlin. Hierbei wurden die Luft- und Oberflächentemperaturen, die Bodentemperaturen und die Bodenfeuchte ermittelt (Ruhr-Universität Bochum, Stadt Neuss 2017). Die Bodenkühlleistungskarte der Stadt Neuss basiert auf der Verschneidung der Planungshinweiskarte aus klimatologischer Sicht mit der Karte zur Wasserspeicherkapazität. Die Bodenkühlleistungskarte wurde anschließend in das Klimaanpassungskonzept der Stadt Neuss integriert.

In **Wuppertal** wurden im Rahmen der Klimafolgenanpassung die lokalen Windsysteme anhand eines Kaltluftabflussmodells betrachtet (Stadt Wuppertal 2020). Außerdem wurde auf Grundlage der Bodenkarte BK50 mit einer Klassifizierung der nutzbaren Feldkapazität und der ökologischen Feuchtestufe des Bodens eine Karte zur Bodenkühlleistung erarbeitet (Ingenieurbüro Feldwisch 2017). Dadurch, dass die BK50 für Berlin nicht vorliegt, kann das Modell nicht direkt auf Berlin übertragen werden. Ein möglicher Weg stellt die Auswertung des Schichtverzeichnisses der Berliner Bodendatenbank dar, was jedoch nur von Experten kostenpflichtig ausgeführt werden kann.

Aus der Auswertung für die Stadt **Oberhausen** ist kein Modell erkennbar, sondern es handelt sich um eine Messreihenauswertung. Daher ist dieses Verfahren für kleinere Räume sinnvoll, jedoch für die Anwendung in ganz Berlin nur beschränkt geeignet. Es wurden Untersuchungsstandorte mit unterschiedlichen thermischen Verhalten gegenübergestellt: anthropogene Standorte (Innenstadt (hochversiegelt), Innenstadt und Gewerbe) und weniger stark versiegelte Standorte (Park, Stadtrand, Gewässer, Wald, Freiland) (Püllen et al. 2011).

In **Hamburg** werden zwei Methoden verwendet. Die Methode der Verdunstungspotenzialkarte Hamburg ließe sich auf Berlin übertragen. Die Karte zeigt eine Übersicht der Wasserleitfähigkeit der Böden ohne Versiegelung, Vegetation und Flächennutzung. Hierfür sind nur ähnliche Parameter für Berlin verfügbar (z. B. statt niedrigster Grundwasserflurabstand im Nassjahr 1995 der Flurabstand Mai 2009). Grundsätzlich kann dieses Verfahren trotzdem durchgeführt werden. Die Verdunstungspotenzialkarte Hamburg wurde für die erste Einschätzung der Wasserleitfähigkeit der Böden erstellt, als Grundlage für die anschließende Berechnung der Bodenkühlleistung mit Tageswerten anhand des Modells ArcEGMO (Domroese 2011, 2017).

Das Modell ArcEGMO-PSCN basiert auf Stunden- bis Tageswerten. Kurze Wetterereignisse wie z. B. Starkregen oder trockene Sommer können so simuliert werden. Wichtig ist eine solche Simulation für die Ermittlung der Bodenkühlleistung in den Sommermonaten, die Bemessung von Kanalisation, Rückhaltebecken und Vorflutern. Die Aussagen werden auf der Basis von Grundwasserständen getroffen. Neben dem Flurabstand wird die nutzbare Feldkapazität betrachtet. Allerdings müssen Eingangsdaten wie der Niederschlag auch in

entsprechender zeitlicher Auflösung vorhanden sein. Für Berlin liegen solche Daten bisher nicht im Umweltatlas blockbezogen vor.

Hinsichtlich der Ergebnisse zeigen die Untersuchungen in den verschiedenen Städten, dass Sandböden mit einem effektiven Wurzelraum bis 60 cm bereits im April kein Wasser mehr für die Verdunstung aufgewiesen haben (z. B. Stadt Bottrop). Bei Lehmböden reichte der Wasservorrat bis Ende Mai. Konnten die Pflanzen bis in 80 cm Tiefe statt 60 cm Tiefe wurzeln, stand ihnen noch bis Juni Wasser zur Verfügung.

Auf der Grundlage der Ergebnisse formulieren die Städte, dass die besonders leistungsfähigen Böden in stadtklimatisch geeigneter Lage (z. B. in Frischluftschneisen) unversiegelt erhalten werden müssen. Daher ist die Integration der Bodenkühlleistung in den städtischen Planungsprozess notwendig. Dazu soll beispielsweise in Düsseldorf ein Handlungsplan zum Erhalt und zur Verbesserung der Bodenkühlleistung und des Wasserhaushalts im Rahmen der „doppelten Innenentwicklung“ des Klimaanpassungskonzeptes KAKDUS erarbeitet werden (GEO-NET et al. 2017).

In Düsseldorf werden in landwirtschaftlich genutzten Bereichen bodenschützende Maßnahmen wie humusmehrende Bewirtschaftungsverfahren durch Pachtverträge gesichert. Im Innenstadtbereich werden Entsiegelungen oder das Freihalten besonders schützenswerter und verdunstungsstarker Böden angestrebt. Durch die Anwendung sogenannter No-Regret-Maßnahmen sollen auch unter veränderten Rahmenbedingungen keine negativen Auswirkungen auftreten. Die Maßnahmen sollen nicht nur der Klimaanpassung dienen, sondern auch eine städtebauliche Verbesserung nach § 136 Abs. 2 und Abs. 3 S.1 Nr. 1h BauGB erbringen (Sperling et al. 2019).

Andererseits werden Maßnahmen aufgezeigt, wie Böden in der Stadt durch Anpassungs- und Optimierungsmaßnahmen zur Regulierung der städtischen Überhitzung beitragen können. Dabei wurden aus den Ergebnissen der Stadt Bottrop mögliche Maßnahmenstränge, die zu einer Verbesserung der Bodenkühlleistung beitragen, aufgezeigt:

#### Maßnahmenpfad Boden

- Erhalt von Böden mit hohen nutzbaren Wasserspeicherkapazitäten und von Böden mit Grundwasseranschluss,
- Verbesserung der Eigenschaften des Bodens als Wasserspeicher und Wiederherstellung ehemals bestehender Grundwasseranschlüsse,

#### Maßnahmenpfad Pflanze

- Etablierung standortangepasster Pflanzenarten mit höheren Verdunstungsleistungen,

#### Maßnahmenpfad Bewässerung

- Gezielte Auffüllung des Bodenwasserspeichers in Trockenzeiten durch Bewässerung.

#### Boden

In den Fallbeispielen wird deutlich, dass ein Eingriff in einen naturnahen Boden zur Verbesserung seiner Wasserspeicherefähigkeit unterbleiben sollte. Es sind die Belange des Bundesbodenschutzgesetzes zu berücksichtigen. In anthropogen überformte Böden sind erneute Eingriffe dagegen unproblematischer. Die degradierten Böden sind durch Aufschüttungen, Abgrabungen, Versiegelung, stoffliche Einträge und Bodenverdichtung geprägt. Im urbanen Kontext wird die Speicherefähigkeit der Böden für pflanzenverfügbares Wasser durch grobe Bestandteile wie Bauschutt, Schlacken, Bergematerial, Kies und Schotter aus diversen Gesteinen sowie die Einbringung durch Bausande in die durchwurzeltete Bodenzone und die Bodenverdichtung gemindert.

Der pflanzenverfügbare Wasserspeicher kann durch das Auf- oder Einbringen von Bodenmaterial und / oder geeigneten (qualitätsgesicherten) Bodenzusatzstoffen (z.B. Kompost) oder eine Tiefenlockerung erfolgen. Hierfür bedarf es eine fachkompetente bodenkundliche Planung sowie eine sorgsame praktische Umsetzung.

Untersuchungen in Nordrhein-Westfalen (LANUV 2015, 35) zeigen, wie sich die Maßnahmen zur Bodenverbesserung auf die Verfügbarkeit von Wasser für die Pflanzen auswirken.

Ein untersuchter Boden in Bottrop hat im Bestand im Referenzjahr 1974 nicht mehr genügend Wasser für die Verdunstung zur Verfügung. Eine Verbesserung der Bodenart von Sand zu Lehm durch Aufbringen von Mineralboden mit höherem Feinbodenanteil führt dazu, dass der Bodenwasserspeicher bis Juli ausreicht. Werden weitere Maßnahmen bis hin zur Nutzungsänderung angewendet, z.B. Anpflanzung von tiefwurzelnden Bäumen, reicht der Bodenwasserspeicher über das Sommerhalbjahr, ohne unter die kritische Grenze von 40 % Füllstand der nFKWe zu fallen.

Die Maßnahmen wirken auch positiv auf den Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre, den Sauerstoffgehalt im Boden, die Erwärmung des Bodens, eine hohe Bodenlebewesenaktivität und ein gutes Wurzelwachstum. Diese Maßnahmen begünstigen das Pflanzenwachstum und führen zusätzlich zu einer Verbesserung der Verdunstungsleistung.

Grundsätzlich sollten bei Maßnahmen wie dem Bodenaustausch Extremwetterereignisse wie Starkregen mitbedacht werden, da insbesondere bindige Böden einer höheren Gefahr von Wassererosion unterliegen.

### **Pflanze**

Als weiterer Maßnahmenstrang wurde die Pflanze benannt. Die Vegetation bestimmt die Ausnutzung des Bodenwasserspeichers. Ist eine ausreichende Wasserversorgung vorhanden, kann durch eine Optimierung der Bepflanzung die Verdunstung gesteigert werden. Pflanzen decken etwa 90 % ihres Jahreswasserbedarfs aus dem Bodenraum. Die Größe dieses Raums ist abhängig von den Bodeneigenschaften und der Pflanzenart (LANUV 2015, 39). Die Verdunstungsleistung von Pflanzen ist auch von der Wachstumsphase der Pflanze abhängig. Ungünstige Bodeneigenschaften und flach wurzelnde Vegetation reduzieren die Bodenkühlleistung deutlich. Durch eine Etablierung von Pflanzen mit einer hohen standortangepassten Verdunstungsleistung kann die Bodenkühlleistung deutlich gesteigert werden.

### **Bewässerung**

Der Bewässerungsbedarf zur Erhöhung der Kühlleistung hängt zunächst von der Speichergröße für pflanzenverfügbares Bodenwasser ab. Je größer dieser ist, desto später muss in einer Trockenperiode Wasser zugeführt werden. Besteht kein Grundwasseranschluss kann in heißen und niederschlagsarmen Perioden die Evaporation und insbesondere die Evapotranspiration gestützt und im besten Fall der Bodenwasserspeicher durch Bewässerung (zumindest oberflächennah) wieder aufgefüllt werden. Durch die Bewässerung wird vermieden, dass die Pflanze aufgrund von Wassermangel die Verdunstungsleistung reduziert. Grünflächen sollten in diesem Sinne mit automatischen Bewässerungsanlagen ausgestattet werden, die sich aus Regenwasserdepots, aus lokalen Brauchwasserbrunnen oder Gewässern 1. Ordnung speisen. Obwohl Bewässerungsmaßnahmen gute Maßnahmen zur Erhöhung der Bodenkühlleistung darstellen können, ist eine Bewässerung zu überprüfen, wenn die Bodeneigenschaften nicht ausreichen, das Wasser zu halten (Beispiel Hamburg).

## **3 Wasserhaushaltsmodell im Land Berlin – ABIMO**

Das Abflussbildungsmodell ABIMO wird in Berlin als stadtweites Berechnungsmodell für die Wasserhaushaltsgrößen verwendet. Die Daten werden im Berliner Informationssystem Stadt und Umwelt (ISU) bzw. im Umweltatlas für ca. 25.000 Einzelflächen zur Verfügung gestellt. Es kann die derzeitige Situation blockbezogen dargestellt werden, jedoch sind auch Simulationen möglich. Das Modell verwendet langjährige Mittelwerte der Eingangsparmeter und ermöglicht präzise Aussagen zu den Indikatoren Verdunstung, Versickerung und Oberflächenabfluss. Durch die Verwendung langjähriger Mittelwerte sind Vergleichsbeurteilungen von langen Zeiträumen sinnvoll.

Die Niederschlagswerte basieren auf Messwerten zwischen 1961 und 1990. Die Messwerte entstammen 97 Messstationen der FU Berlin und des DWD. Die potenzielle Verdunstung basiert auf langjährigen Mittelwerten der um 10 % erhöhten TURC-Verdunstung (Lufttemperatur, Globalstrahlung, relative Luftfeuchte), die aus Beobachtungen an Klimastationen im Berliner Raum berechnet wurden. Sie wird pauschal bezirksweise nach den alten Bezirksnummern (Bezirke bis zum 01.01.2001) den Blockteilflächen zugewiesen (siehe Kap. 6.2). Das bedeutet, dass jeder Bezirk mit einer Nummer versehen ist, beispielsweise hat



Berlin-Mitte die Nummer 1 und Hellersdorf die Nummer 23 (siehe Anhang 10). Die Versiegelungsdaten der Blockteilmflächen beruhen u. a. auf der Auswertung von Luft- und multispektralen Satellitenbildern und ALKIS, wobei zwischen bebaut versiegelten Flächen (Dachflächen) und unbebaut versiegelten Flächen (Parkplätze, Wege etc.) unterschieden wird. Im ABIMO-Modell werden 22 Nutzungen und 52 Typen (Baustrukturtypen) differenziert betrachtet. Diese Daten stammen von Luftbildauswertungen, bezirklichen Flächennutzungskarten und weiteren Unterlagen aus dem Umweltatlas.

Die Versiegelung der Straßenflächen und deren Belagsarten entstammen einer Statistik der Senatsbauverwaltung über Fahrbahnen und deren Beläge, die wie die potenzielle Verdunstung nach alten Bezirksnummern einbezogen wird.

Grundlage der Daten zur nutzbaren Feldkapazität (Flachwurzelraum 0-30 cm und Tiefwurzelraum 0-150 cm) bildet die Bodendatenbank zur Bodengesellschaftskarte (Bodengesellschaftskarte Berlin - Nutzbare Feldkapazität). Für die Flurabstände wurde ein digitales Geländemodell mit 5 m Rasterweite verwendet. Die Flächengröße der Blockteilmflächen und der Straßenflächen sind in der Blockteilmflächenkarte ISU5 vorhanden.

Daten zum Anschlussgrad an die Kanalisation stammen aus der Umweltatlaskarte "Entsorgung von Regen- und Abwasser". Dachbegrünungsdaten wurden aus der vorhandenen Umweltatlaskarte 06.11 „Gründächer“ gewonnen.

### **Variation der Verdunstung bei dem Modell ABIMO**

Die Verdunstung ist abhängig von der Vegetationsart, dem Grundwasserflurabstand sowie der nutzbaren Feldkapazität. Indem diese Parameter variiert werden, während die Parameter Niederschlag, potenzielle Evapotranspiration und Versiegelung für alle Flächen konstant gehalten werden, können Unterschiede der Verdunstung durch das Modell ABIMO simuliert werden. Die konstanten Parameter werden wie folgt im Modell berücksichtigt:

Tabelle 3: Eingangsgroßen konstante Parameter

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>
Niederschlag Jahr	621 mm
Niederschlag Sommer	354 mm
Potenzielle Evapotranspiration Jahr	660 mm
Potenzielle Evapotranspiration Sommer	530 mm
Versiegelung	0 %

Die Modellierung zeigt, dass bei der Nutzung Wald die Verdunstung bis zu einem Flurabstand von ca. 1,7 m gleich der potenziellen Evapotranspiration (660 mm/a) ist. Ab einem Flurabstand von 1,7 m bis zu einem Flurabstand von 2,7 m sinkt die Verdunstung in Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität (nFK). Bei großem Flurabstand beträgt der durch die nFK bewirkte Unterschied der Verdunstung nur 65 mm/a. Die gesamte Variation der Verdunstung beträgt 140 mm/a.

Bei der Nutzung Grünland ist die Verdunstung bei einem Flurabstand von 0 m gleich der potenziellen Evapotranspiration. Eine geringe Abnahme der Verdunstung findet bereits bei Flurabständen bis 1,0 m statt. Ab einem Flurabstand von 1,0 - 1,4 m bis zu einem Flurabstand von 1,5 - 2,0 m sinkt die Verdunstung in Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität. Bei großem Flurabstand beträgt der durch die nFK bewirkte Unterschied der Verdunstung 130 mm/a. Die gesamte Variation der Verdunstung beträgt 235 mm/a.

Bei der Nutzung vegetationsarme Brache variiert die Verdunstung bei einem Flurabstand von 0 m bereits um 140 mm/a. Eine Verringerung der Verdunstung findet bereits bei Flurabständen bis 0,5 m statt. Bei Flurabständen größer als 1,1 - 1,3 m beträgt der durch die nFK bewirkte Unterschied der Verdunstung 215 mm/a. Die gesamte Variation der Verdunstung beträgt 415 mm/a. Die große Variation der Verdunstung bei dieser Nutzung und niedrigen Flurabständen ist vermutlich ein Modellierungsmangel von ABIMO. Allerdings treten in der Realität bei niedrigen Flurabständen vegetationsarme Brachen nur kurzfristig auf.

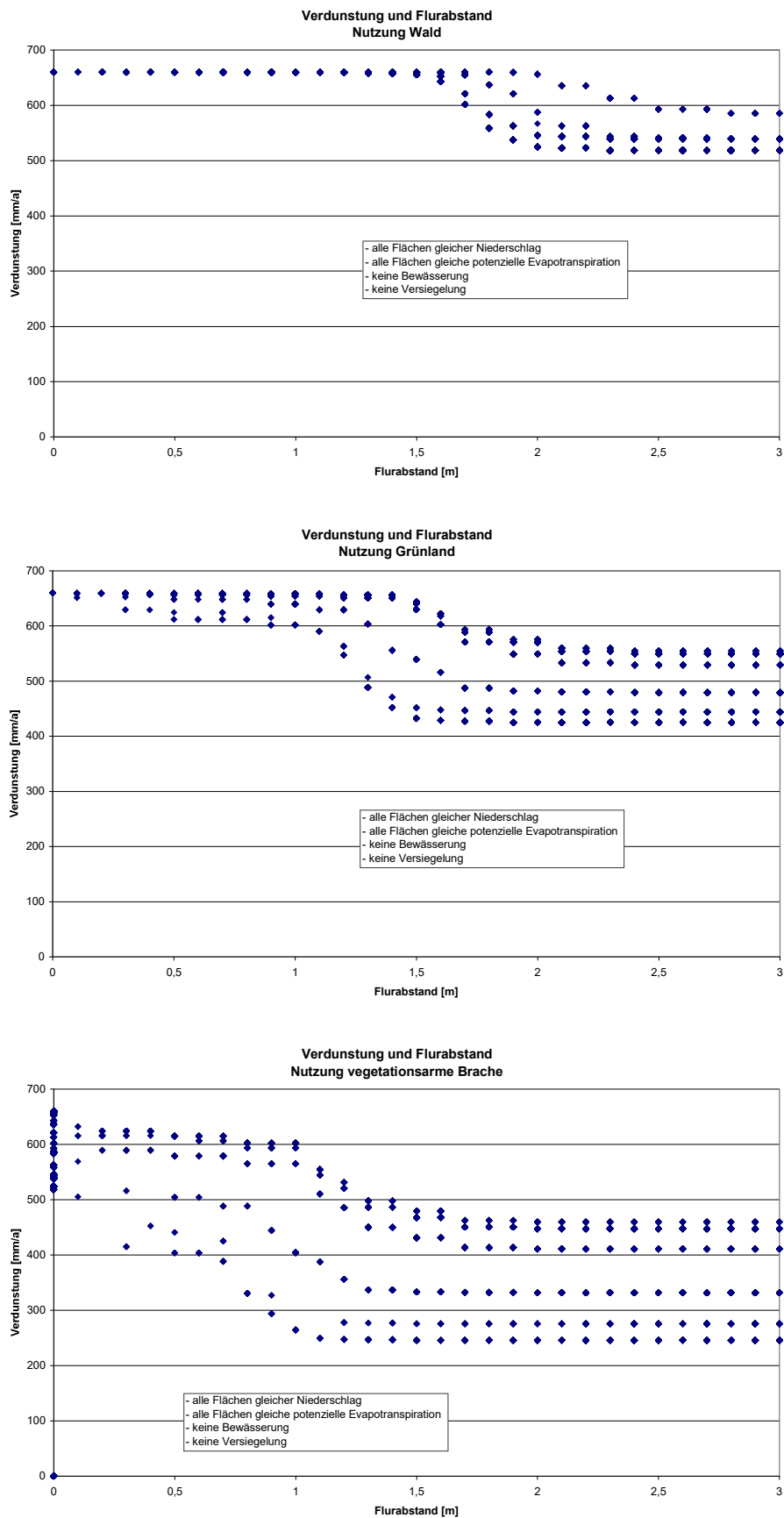


Abbildung 10: Verdunstung und Flurabstand verschiedener Nutzungen

## 4 Ermittlung und Priorisierung bestehender Daten in Berlin

Aus der Literaturrecherche und der Analyse der Fallbeispiele wurden Parameter ersichtlich, die für eine Ermittlung der Bodenkühlleistung verwendet werden können. Gleichzeitig verfügt Berlin mit dem Umweltatlas und mit dem ABIMO-Modell über Daten, die hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit betrachtet werden sollen. Im Umweltatlas liegen unterschiedliche Daten vor, die für die Ermittlung der Bodenkühlleistung herangezogen werden könnten.

Für Berlin sind flächendeckend die Bodengesellschaften erfasst und in der Karte:

[01.01 Bodengesellschaften \(Ausgabe 2018\)](#) dargestellt.

Es gibt neun Teilkarten zu der Karte 01.06 „Bodenkundliche Kennwerte“ (Ausgabe 2013):

[1.06.1 Bodenarten](#)

[1.06.2 Nutzbare Feldkapazität für Flachwurzler](#)

[1.06.4 Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes](#)

[1.06.5 Humusmenge](#)

[1.06.6 Organischer Kohlenstoffvorrat](#)

[1.06.7 pH-Werte im Oberboden](#)

[1.06.8 Summe austauschbarer basischer Kationen \(S-Wert\)](#)

[1.06.9 Mittlere effektive Kationenaustauschkapazität \(KAK<sub>eff</sub>\)](#)

[1.06.10 Wasserdurchlässigkeit \(kf\)](#).

Außerdem liegen die Grundwasserflurabstände in der Karte [02.07 Flurabstand des Grundwassers \(Ausgabe 2020\)](#) vor.

Weitere hydrologische Karten, die zur Interpretation der Bodenkühlleistung herangezogen werden können, sind folgende: [02.13 Oberflächenabfluss, Versickerung und Gesamtabfluss aus Niederschlägen \(Ausgabe 2017\)](#). Diese bestehen aus fünf Teilkarten:

[02.13.1 Oberflächenabfluss aus Niederschlägen](#)

[02.13.2 Versickerung aus Niederschlägen](#)

[02.13.3 Gesamtabfluss aus Niederschlägen](#)

[02.13.4 Versickerung aus Niederschlägen ohne Berücksichtigung der Versiegelung](#)

[02.13.5 Verdunstung aus Niederschlägen](#).

Auch Daten zur Grundwasserneubildung in Berlin liegen mit der Karte [02.17 Grundwasserneubildung \(Ausgabe 2017\)](#) vor.

Die Karte [01.13 Planungshinweise zum Bodenschutz \(Ausgabe 2018\)](#) basiert unter anderem auf der Bewertung der Umweltatlaskarten „Bodenfunktionen“:

[01.12.1 Lebensraumfunktion für naturnahe und seltene Pflanzengesellschaften](#)

[01.12.2 Ertragsfunktion für Kulturpflanzen](#)

[01.12.3 Puffer- und Filterfunktion](#)

[01.12.4 Regelungsfunktion für den Wasserhaushalt](#)

[01.12.5 Archivfunktion für die Naturgeschichte](#)

[01.12.6 Leistungsfähigkeit der Böden zur Erfüllung der natürlichen Bodenfunktionen und der Archivfunktion](#).

Außerdem wurden die Bodengesellschaften mit der Ausnahme stofflicher Belastungen (Trümmerbodengesellschaften, solche der Rieselfelder und der Bahngleise) verwendet:

[01.01 Bodengesellschaften \(2018\)](#).

Die Versiegelungsklassen wurden anhand der Daten der folgenden Umweltatlaskarte:

[01.02 Versiegelung \(Ausgabe 2021\)](#) berücksichtigt.

Zu den klimatologischen Parametern liegt die Karte [04.02 Langjähriges Mittel der Lufttemperatur 1961-1990 \(Ausgabe 2001\)](#) vor.

Eine Weiterentwicklung bietet die Karte [04.10 Klimamodell Berlin – Analysekarten \(Ausgabe 2014\)](#) mit folgenden Teilkarten basierend auf Momentaufnahmen von zwei speziellen Wetterlagen:

[04.10.01 Bodennahes Windfeld und Kaltluftvolumenstrom \(22:00 Uhr und 04:00 Uhr\)](#)

[04.10.02 Lufttemperatur \(14:00 Uhr und 04:00 Uhr\)](#)

[04.10.03 Strahlungstemperatur \(14:00 Uhr und 04:00 Uhr\)](#)

[04.10.04 Nächtliche Abkühlung zwischen 22:00 Uhr und 04:00 Uhr](#)

[04.10.05 Bewertungsindex Physiologisch Äquivalente Temperatur \(PET\) \(14:00 Uhr und 04:00 Uhr\)](#)

[04.10.06 Anzahl meteorologischer Kennwerte im Mittel der Jahre 2001-2010](#)

[04.10.07 Klimaanalysekarte.](#)

Das Klimamodell zeigt die thermische Situation des Siedlungsraumes mittels eines komplexen Modells FITNAH 3D. Das Stadtklima wird in die Klassen sehr günstig, günstig, weniger günstig und ungünstig eingeteilt. Die Schutzwürdigkeit der Grün- und Freiflächen wird ebenfalls in vier Klassen bewertet.

Eine Simulation der thermischen Situation des Siedlungsraumes (Wohngebiete und Gewerbeflächen) und der Verdunstung zeigt einen statistischen Zusammenhang (Abb. 11). Bei 50 % der Siedlungsraumflächen mit ungünstigem Stadtklima liegt eine geringe Verdunstung zwischen 150 - < 200 mm/a vor. Bei einer sehr günstigen Einschätzung des Stadtklimas liegt die Verdunstung bei 50 % der Siedlungsflächen deutlich höher, nämlich bei 350 - < 400 mm/a. Dieser Zusammenhang beruht vermutlich stark auf dem Versiegelungsgrad bzw. der Vegetationsbedeckung. Auf die Bodenkühlleistung einer Blockfläche kann nur mit einer statistischen Wahrscheinlichkeit geschlossen werden. Hierfür wurden folgende Datengrundlagen verwendet:

[04.11.1 Klimamodell Berlin - Planungshinweise Stadtklima – Hauptkarte \(2016\)](#)

[02.13.5 Verdunstung aus Niederschlägen, variiert: ohne Straßen und Gründächer \(2019\).](#)

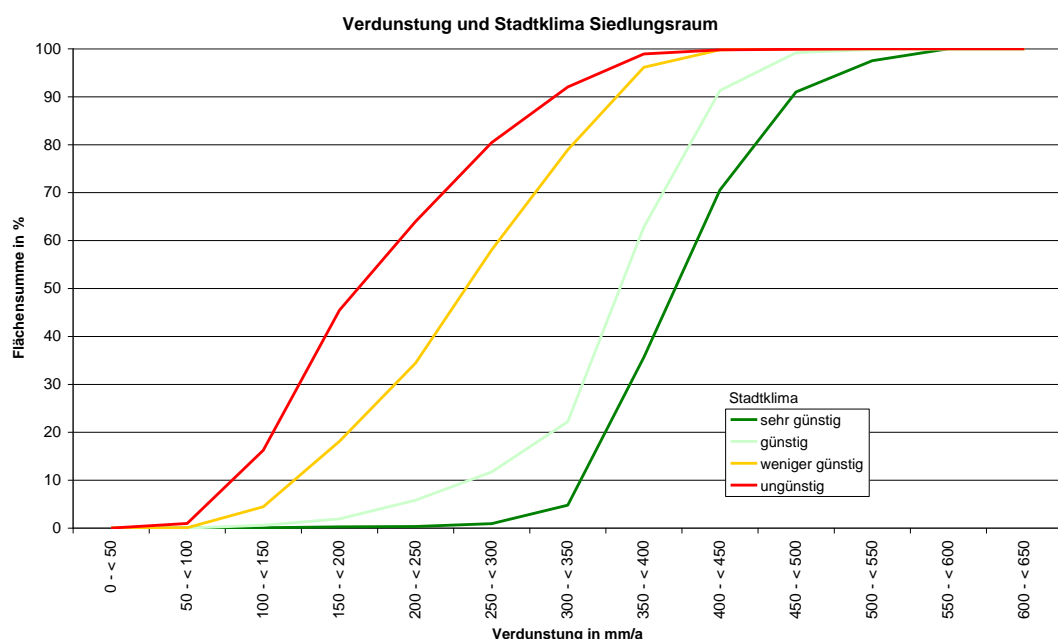


Abbildung 11: Zusammenhang zwischen der Bewertung des Stadtklimas und der Verdunstung (Gerstenberg 2020, eigene Simulation).

### Untersuchung und Priorisierung von Parametern

Primär sollte der Fokus der Daten, die für die Ermittlung der Bodenkühlleistung in Berlin verwendet werden, auf dem Umweltatlas Berlin liegen, da diese Daten gut verfügbar sind und in gleicher Weise aufbereitet vorliegen. Neben dem Umweltatlas liegen aber auch weitere Daten frei verfügbar vor z.B. über den Deutschen Wetter Dienst (Open Data DWD). Auch diese Daten sind in die Betrachtung einzubeziehen.

Im Umweltatlas sind bei einigen Parametern zwar eine Karte als Bild oder als PDF vorhanden, jedoch keine Sachdaten. Weitere Daten des Umweltatlas sind nicht blockbezogen, sondern liegen als Isoflächen vor. Isoflächen sind Flächen mit gleichen Merkmalen im Raum wie zum Beispiel Temperatur oder Dichte. Zur Berechnung der Bodenkühlleistung wären diese Quellen nicht direkt nutzbar und müssten vor der Verwendung zunächst auf die Blockstruktur Berlins übertragen werden.

Seit dem 25.07.2017 wurde der Deutsche Wetterdienst gesetzlich beauftragt, seine Wetter- und Klimainformationen weitgehend entgeltfrei zur Verfügung zu stellen. In den folgenden Jahren wurden in einem großen Umfang Daten auf dem DWD-Server <https://opendata.dwd.de> veröffentlicht. Es handelt sich dabei überwiegend um Daten, die flächendeckend für Deutschland in einem 1\*1 km-Raster und für mehrere Zeiträume (Tages- bis 30-Jahres-Werte) vorliegen. Die Daten müssten z. T. aufwendig dekodiert (z. B. Niederschlag), in das Koordinatensystem ETR89-33N transformiert und auf die Blöcke der ISU5 übertragen werden.

Es wurden 24 verschiedene Parameter untersucht. Die Parameter wurden überwiegend der Literatur und den Fallbeispielen entnommen. Es wurde zum einen bewertet, welche Bedeutung diese Parameter bei der Ermittlung der Bodenkühlleistung haben. Hierfür wurden die Parameter nach der Priorität sortiert und farblich gekennzeichnet. Hohe Prioritäten sind rot hinterlegt, mittlere orange und niedrige grün. Keine farbliche Kennzeichnung bedeutet, dass kein Zusammenhang des Parameters mit der Bodenkühlleistung in der Literatur festgestellt werden konnte. Zum anderen wurde die Verfügbarkeit der Daten für Berlin dargestellt.

Es wurde elf Parametern eine **hohe Priorität** zugeordnet, da sie in den Modellen, die zur Bewertung der Bodenkühlleistung in Deutschland verwendet wurden, die Grundlage bilden. Davon sind der Grundwasserflurabstand, die nutzbare Feldkapazität, die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum, die Versiegelung und die Nutzung als direkt nutzbare blockbezogene Daten vorhanden. Wichtige meteorologische Parameter wie der Niederschlag, die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Globalstrahlung und die Windgeschwindigkeit liegen meistens als Rasterdaten vor und müssten aufbereitet werden.

Drei Parametern wurde eine **mittlere Bedeutung** zugeordnet: der Bodenart, dem kapillaren Aufstieg und der ökologischen Feuchtestufe. Diese Parameter wurden nur in einzelnen Modellen angewendet (TUB-BGR und in Wuppertal). Von den Parametern der mittleren Bedeutung liegen die Daten der Bodenart blockbezogen im Umweltatlas vor, die anderen Daten müssten aufbereitet werden. Fünf Parameter haben eine niedrige Priorität: Bodentemperatur, Humusgehalt und -menge, gesättigte Wasserdurchlässigkeit, Wasserversorgung und Wasserspeicher. Davon liegen alle Daten bis auf die Bodentemperatur und den Wasserspeicher blockbezogen vor.

Weitere fünf Parameter haben eine **untergeordnete Priorität**, da für diese in der Literatur und in den Fallbeispielen keine hohe Relevanz für die Bodenkühlleistung erkennbar ist.

Berlin verfügt damit über eine sehr gute Datenbasis, um die Bodenkühlleistung zu ermitteln.

Tabelle 4: Bewertung allgemeiner Parameter zur Bestimmung der Bodenkühlleistung in Berlin.

Parameter	Bewertung	Verfügbarkeit
Niederschlag	Eine Primäre Quelle der Verdunstung (Wessolek et al. 2009, Rachimov & Rachimov 2009, Goedecke et al. 2019).	Im UA (Karte 02.13) liegen blockbezogene Daten vor.
Potenzielle Evapotranspiration	Primärer Parameter in allen komplexeren Wasserhaushaltsmodellen, meist für das Sommerhalbjahr und Jahr benötigt (Wessolek et al. 2009, Rachimov & Rachimov 2009, Goedecke et al. 2019).	ABIMO-Parameter-Datei (je alter Bezirk) nach Turc-Verfahren und Rasterdaten des DWD (FAO-Grasreferenzverdunstung).
Grundwasserflurabstand	Das Grundwasser ist eine primäre Quelle der Verdunstung, wenn der Grundwasserflurabstand kleiner als die Summe von Durchwurzelungstiefe und kapillarer Aufstiegshöhe ist (Wessolek et al. 2009, Rachimov & Rachimov 2009, Domroese 2011, Domroese 2017, Goedecke et al. 2019).	Die Daten liegen im UA (Karte 02.13) blockbezogen vor.
Nutzbare Feldkapazität	Ein wichtiger Parameter für die Einschätzung des potenziellen Wasservorrates im Boden, wenn die Durchwurzelungstiefe in einem Modell separat ermittelt wird. Im Modell ABIMO wird u. a. die nFK auch zur Berechnung der kapillaren Aufstiegshöhe verwendet (Rachimov & Rachimov 2009, Goedecke et al. 2019).	Im UA (Karte 01.06.2) ist die nFK der Flachwurzelzone (0 – 30 cm) und der Tiefwurzelzone (0 – 150 cm) blockbezogen verfügbar.
Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes	Ein wichtiger Parameter für die Einschätzung des potenziellen Wasservorrates im Boden, wenn die Durchwurzelungstiefe in einem Modell <b>nicht</b> separat bestimmt wird (Wessolek et al. 2009, Ingenieurbüro Feldwisch 2017, Domroese 2011, Domroese 2017).	Im UA (Karte 01.06.4) ist die nFK der Flachwurzelzone (0 – 30 cm) und der Tiefwurzelzone (0 – 150 cm) blockbezogen verfügbar.
Versiegelung	Der Versiegelungsgrad ist der primäre Parameter, um die Verdunstung der unversiegelten Blockfläche auf die gesamte Blockfläche zu beziehen (Wessolek et al. 2009, Rachimov & Rachimov 2009, Goedecke et al. 2019).	Der Versiegelungsgrad der bebaut und unbebauten Flächen liegt im UA (Karte 01.02) blockbezogen vor. Die Daten werden ca. alle 5 Jahre aktualisiert.
Lufttemperatur	Im Modell ArcEGMO ist die Lufttemperatur ein meteorologischer Eingangsparameter (Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt, Gewässerkundlicher Landesdienst 2015).	Im UA (Karte 04.02) sind keine Sachdaten vorhanden. Rasterdaten (1 * 1 km) sind beim DWD für verschiedene Zeiträume (Tage bis 30 Jahre) verfügbar.
Relative Luftfeuchte	Im Modell ArcEGMO ist die relative Luftfeuchte ein meteorologischer Eingangsparameter (Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt, Gewässerkundlicher Landesdienst 2015).	Im UA sind keine Daten vorhanden. Rasterdaten (1 * 1 km) sind beim DWD für verschiedene Zeiträume (Tage bis 30 Jahre) verfügbar.
Globalstrahlung	Im Modell ArcEGMO ist die Globalstrahlung ein meteorologischer Eingangsparameter (Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt, Gewässerkundli-	Im UA sind keine Daten vorhanden. Rasterdaten (1 * 1 km) sind beim DWD für

Parameter	Bewertung	Verfügbarkeit
	cher Landesdienst 2015).	verschiedene Zeiträume (Tage bis 30 Jahre) verfügbar.
Windgeschwindigkeit	Es besteht ein kurzzeitiger Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit und der potenziellen Evapotranspiration. Da Daten der potenziellen Evapotranspiration zur Verfügung stehen, muss diese nicht berechnet werden. Im Modell ArcEGMO ist die Windgeschwindigkeit ein meteorologischer Eingangsparameter (Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt, Gewässerkundlicher Landesdienst 2015).	Im UA (Karte 04.03) sind keine Sachdaten vorhanden. Rasterdaten (1 * 1 km) der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe sind beim DWD für verschiedene Zeiträume in den Jahren 1995 bis 2012 verfügbar.
Nutzung / Flächentyp	Ein wichtiger Parameter für die Einschätzung der Vegetation, der Vegetationsdauer, Durchwurzelungstiefe und Transpiration. (Wessolek et al. 2009, Rachimov & Rachimov 2009, Goedecke et al. 2019, Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt, Gewässerkundlicher Landesdienst 2015).	Im UA (Karten 06.01 und 06.02) werden blockbezogen 22 Nutzungen und 52 Typen ausgewiesen.
Bodenart	Ein Parameter zur Bestimmung der kapillaren Aufstiegshöhe und der Wasserleitfähigkeit (Wessolek et al. 2009 Kap. 5.1).	Die Daten liegen blockbezogen im UA (Karte 01.06.1) vor.
Kapillarer Aufstieg	Der kapillare Aufstieg ist eine wichtige Quelle für die Verdunstung, wenn der Aufstieg bis in den Wurzelraum reicht (Wessolek et al. 2009 Kap. 5.1 Rachimov & Rachimov 2009, Kap. 2).	Im UA sind keine Daten vorhanden.
Ökologische Feuchte- stufe	Anhand der ökologischen Feuchtestufe und der nutzbaren Feldkapazität des Wurzelraumes kann die potenzielle Bodenkühlleistung bestimmt werden (Ingenieurbüro Feldwisch 2017 und persönliche Mitteilung).	Im UA sind keine Daten vorhanden. Die BK50 ist für Berlin nicht verfügbar.
Bodenlufttemperatur Bodentemperatur	Hypothetisch denkbar ist ein Modell, das aus Luft-, Oberflächen-, Bodenlufttemperatur, Strahlung und Windgeschwindigkeit die Kühlleistung schätzt (Ruhr-Universität Bochum, Stadt Neuss 2017).	Im UA sind keine Daten vorhanden. Rasterdaten (1 * 1 km) der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe sind beim DWD für verschiedene Zeiträume (Tage bis 30 Jahre) verfügbar.
Humusgehalt und - menge	Mittels Bodenart, Lagerungsdichte und Humusmenge kann die nFK geschätzt werden, falls diese nicht verfügbar ist (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005).	Die Daten liegen blockbezogen im UA (Karte 01.06.5) vor.
Gesättigte Wasser- durchlässigkeit	Die gesättigte Wasserdurchlässigkeit ist wichtig für die Beurteilung von Staunässe, der Filtereigenschaften, Erosionsanfälligkeit und Drainwirksamkeit von Böden. Die gesättigte Wasserdurchlässigkeit kann als ein Parameter zur Abschätzung der Bodenkühlleistung verwendet werden. I.d.R. wird stattdessen die nFK verwendet (Ruhr-Universität Bochum, Stadt Neuss 2017).	Die Daten liegen blockbezogen im UA (Karte 01.06.19) vor.

Parameter	Bewertung	Verfügbarkeit
Wasserversorgung	Die Herleitung der Wasserversorgung aus der mittleren nutzbaren Feldkapazität der Flachwurzelzone durch eine Klassifizierung bringt keinen Vorteil gegenüber der nutzbaren Feldkapazität und der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes.	Die Daten liegen blockbezogen im UA (Karte 01.11) vor.
Wasserspeicher	Ein Parameter, mit dem sich zeitlich ändernde (Stunden, Tage) Bodenkühlleistung einschätzen lässt. Berechenbar mit ArcEGMO (Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt, Gewässerkundlicher Landesdienst 2015, Domroese 2017).	Im UA sind keine Daten vorhanden.
Oberflächenabfluss	Wird die Kühlleistung der unversiegelten Böden ermittelt, hat der Oberflächenabfluss der versiegelten Böden keine Auswirkung auf die Kühlleistung der unversiegelten Böden.	Die Daten liegen blockbezogen im UA (Karte 02.13.1) vor.
Oberflächentemperatur	Im UA sind nur zwei nicht repräsentative Karten (zwei Zeitpunkte: 13.08.2000 21.45 Uhr und 14.08.2000 10.30 Uhr) enthalten. Versiegelte und unversiegelte Blockflächenanteile sind nicht getrennt erfasst worden.	Im UA (Karte 04.06) sind keine Sachdaten vorhanden.
Grundwassertemperatur in 20 bis 100 m Tiefe	Es ist ein lockerer, großräumiger Zusammenhang zwischen der Grundwassertemperatur und der Siedlungsstruktur erkennbar. Als Parameter zur Bestimmung der Bodenkühlleistung auf der Blockstruktur scheidet dieser Parameter aus.	Die Daten liegen als ISO-Flächen im UA (Karte 02.14) vor.
Feuchteklasse des Bodentyps / Standortfeuchte	Keine Differenzierung zwischen gegenwärtiger und reliktscher Vernässung. Nur zwei Klassen (nass/feucht und trocken). Mit dem Grundwasserflurabstand liegt ein konkreterer Parameter für die Wasserversorgung vor.	Die Daten liegen blockbezogen im UA (Bodendatenbank) vor.
Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone	Dieser Parameter ist ein Indikator für die Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers.	Die Daten liegen blockbezogen im UA (Karte 02.16) vor.

## 5 Modellvergleich

Anhand der Fallbeispiele wurden vier Modelle zur Bewertung der Bodenkühlleistung ersichtlich, die grundsätzlich in Berlin anwendbar wären. Der Modellvergleich von Verfahren erfolgt auf der Basis der Literaturrecherche und persönlichen Telefonaten mit Herrn Dr. Steffen Trinks zum TUB-BGR-Modell und Herrn Dr. Domroese zur Verdunstungspotenzialkarte Hamburg und zu ArcEGMO. Zusätzlich wird das ABIMO-Modell in den Vergleich einbezogen, da diese Wasserhaushaltsmodell in Berlin bereits besteht.

Im Folgenden werden die vier anwendbaren Verfahren, die zur Berechnung / Darstellung der Bodenkühlleistung in Berlin geeignet sind, tabellarisch gegenübergestellt und anschließend näher beschrieben und bewertet.



Entwicklung eines Konzeptes zur Abschätzung / Quantifizierung der Bodenkühlleistung in Berlin

Tabelle 5: Gegenüberstellung des ABIMO-TUB-BGR-Modells, ArcEGMO und der Hamburger Verdunstungspotenzialkarte.

<b>ABIMO</b> (Abflussbildungsmodell) Bundesanstalt für Gewässerkunde	<b>TUB-BGR-Verfahren</b> TU Berlin und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	<b>ArcEGMO</b> Büro für Angewandte Hydrologie	<b>Hamburg</b> Verdunstungspotenzialkarte
<b>Entwicklungsjahr:</b>			
1996 und 2003 Software 1997, 2006, 2008, 2009	2003 (Weiterentwicklung des Ver- fahrens nach Renger & Wessolek 1990)	1975 bis 2005	2011
<b>Kosten:</b>			
kostenfrei geringe Kosten für Berechnung (ca. 10 Arbeitsstunden für die Datenzusam- menstellung)	Methode kostenfrei mittlere Kosten für Softwareent- wicklung (ca. 80 Arbeitsstunden für die Berechnung und ca. 10 Arbeits- stunden für die Datenzusammen- stellung)	Software-Lizenzkosten <sup>1</sup> hohe Kosten für Berechnung (die Kosten können erst ermittelt werden, wenn die Software verfügbar ist)	Methode kostenfrei geringe Kosten für Kartenerstellung (1 Arbeitsstunde)
<b>Nutzungen u. a.:</b>			
22 Nutzungen (z.B. Wald - keine Un- terscheidung zwischen Laub- und Na- delwald, dafür 3 Brachflächentypen), 52 Flächentypen	4 Nutzungen (Acker, Grünland, Nadelwald, Laubwald; enthält z.B. keine Brachflächen), urbane Flä- chen mit Versiegelung	24 Nutzungen, 3 Ertragsklassen	keine
<b>Eingangsdaten:</b>			
Langjährige Mittel: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potenzielle Verdunstung nach Turc + 10 %</li> <li>• Niederschlag (Sommer- und Jah- resniederschlag)</li> <li>• nutzbare Feldkapazität (0-30 cm, 0-150 cm)</li> <li>• Flurabstand</li> <li>• Nutzung + Typ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzung (4 Klassen)</li> <li>• nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum</li> <li>• potenzielle Grasreferenzver- dunstung</li> <li>• Niederschlag (Sommer- und Jahresniederschlag)</li> <li>• Flurabstand</li> <li>• kapillarer Aufstieg (aus Boden-</li> </ul>	Tageswerte (bis Jahreswerte): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potenzielle Grasreferenzver- dunstung</li> <li>• Lufttemperatur</li> <li>• Niederschlag</li> <li>• Luftfeuchte</li> <li>• Windgeschwindigkeit</li> <li>• Globalstrahlung</li> <li>• Bodendaten (horizontweise)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydrogeologische Bodenprofil- karte</li> <li>• Grundwasserflurabstandskarte</li> </ul>

<sup>1</sup> Um die Lizenzkosten zu ermitteln müsste eine ausführliche Anfrage an das Büro für Angewandte Hydrologie gerichtet werden mit der Bitte um Erstellung eines Angebotes.  
<http://www.arcegmo.de/html/vertrieb.html>, Letzter Abruf: 18.11.2020

<b>ABIMO</b> (Abflussbildungsmodell) Bundesanstalt für Gewässerkunde	<b>TUB-BGR-Verfahren</b> TU Berlin und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	<b>ArcEGMO</b> Büro für Angewandte Hydrologie	<b>Hamburg</b> Verdunstungspotenzialkarte
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Versiegelungsgrad</li> <li>• Beläge</li> <li>• Kanalisierung</li> </ul>	art und Flurabstand) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Versiegelung und Belagsarten</li> <li>• Hangneigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bodenfeuchte</li> <li>• Gesamtporenvolumen (GPV)</li> <li>• Feldkapazität (FK),</li> <li>• Permanenter Welkepunkt (PWP)</li> <li>• Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)</li> <li>• Landnutzung (Vegetationsbedeckung Wiese (Park) und junger Laubwald)</li> <li>• Durchwurzelungstiefe</li> <li>• Grundwasserflurabstand</li> </ul>	
<b>Eingangsdaten Aufwand Beschaffung:</b>			
gering	mittel	hoch	gering
<b>Software:</b>			
existiert; nutzbar mit Windows	Keine, anwendbar mit Excel und GIS	existiert; nutzbar mit Windows	keine
<b>Zeitliche Auflösung:</b>			
langjährig (30 Jahre)	langjährig	Tage bis Stunden (Monate, Jahre), langjährig möglich durch die Berechnung der Tageswerte von z. B. 30 Jahren	langjährig
<b>Bewertung:</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Alle Eingangsdaten für Berlin vorhanden</li> <li>+ Software vorhanden</li> <li>- bezirkswise Zuordnung der potenziellen Evapotranspiration und des Versiegelungsgrades (Fehler derzeit max. 3 %)</li> <li>- Keine Unterscheidung zwischen Laub- / Nadelwald</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Eingangsdaten für Berlin weitgehend vorhanden</li> <li>+ Genauigkeit liegt mit dem Versiegelungsgrad auf der Skala des Umweltatlas</li> <li>- Nur 4 Nutzungen</li> <li>- Keine Software vorhanden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Hohe zeitliche Auflösung</li> <li>- Eingangsdaten für Berlin nur z. T. vorhanden</li> <li>- Softwarekosten</li> <li>- Sehr aufwändige Berechnung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Einfaches Verfahren</li> <li>- Eingangsdaten für Berlin nur z. T. bzw. ähnlich vorhanden</li> <li>- Keine Berücksichtigung der Vegetation</li> </ul>

<b>ABIMO</b> (Abflussbildungsmodell) Bundesanstalt für Gewässerkunde	<b>TUB-BGR-Verfahren</b> TU Berlin und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	<b>ArcEGMO</b> Büro für Angewandte Hydrologie	<b>Hamburg</b> Verdunstungspotenzialkarte
Deutliche Mängel der Eingangsdaten entfallen, wenn nur der unversiegelte Flächenanteil berücksichtigt wird.			

In Berlin wird das Abflussbildungsmodell ABIMO für die Erstellung von Umweltatlaskarten verwendet. Das ABIMO-Modell wurde in der Version 3.2 für Berlin entwickelt und alle Eingangsparameter liegen für Berlin vor. Bei der Betrachtung, welches Modell sich für die Entwicklung eines Konzeptes zur Abschätzung / Quantifizierung der Bodenkühlleistung in Berlin eignet, steht aufgrund der guten Datenlage das ABIMO-Modell im Fokus. Daher wird das ABIMO-Modell mit dem TUB-BGR-Modell, ArcEGMO und dem Verfahren der Verdunstungspotenzialkarte Hamburg verglichen.

Die Wasserhaushaltsmodelle ABIMO und TUB-BGR sind vergleichbare Verfahren, da beide Modelle die Verdunstung für ein Gesamtjahr ermitteln können und somit für die Berechnung langjähriger Mittel geeignet sind. Für die Berechnung von kurzzeitigen Starkregenereignissen sind beide Modelle nicht geeignet. Bei der Gegenüberstellung sind Trocken- und Feuchtjahre jeweils zu vergleichen. Beide Verfahren wurden nicht zur Ermittlung der Verdunstungsberechnung erstellt, sondern das ABIMO-Modell für die Abflussberechnung und das TUB-BGR-Modell für die Berechnung der Sickerwasserrate. Trotzdem können beide Verfahren für die Verdunstungsberechnung angewendet werden.

Die Eingangsparameter beider Verfahren sind ähnlich, wobei das ABIMO-Modell die potenzielle Evapotranspiration nach Turc (zzgl. eines 10 %-Zuschlags) verwendet und das TUB-BGR-Verfahren die internationale Grasreferenzverdunstung. Da die ursprünglichen Verfahren einschließlich der Berechnung nach Turc mit Unsicherheiten belastet sind, greift man mittlerweile hauptsächlich auf den internationalen Standard der FAO Grasreferenzverdunstung zurück. Die Weiterentwicklung des Wessolek- und Renger-Verfahrens zum TUB-BGR-Verfahren 2003 basierte neben der Niederschlagskorrektur des DWD auf der Umstellung der früheren Berechnung der potenziellen Evapotranspiration nach Haude auf die FAO-Grasreferenzverdunstung.

Bei ABIMO werden die potenzielle Evapotranspiration und der Versiegelungsgrad der Straßen nach alten Bezirksnummern in die Software eingepflegt, was zu geringen Fehlern führt. Bei der Betrachtung von unversiegelten Flächen entfallen bei ABIMO deutliche Mängel der Eingangsdaten. ABIMO basiert auf 22 Nutzungen (z.B. Wald, Wohngebiet) und 52 Flächentypen (z.B. dichte Blockbebauung) und das TUB-BGR-Verfahren auf vier Nutzungen mit der Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelwald und einer Erweiterung für den urbanen Raum. Das ABIMO Modell ist demnach genauer in Bezug auf die Flächentypen. Der wichtige Vergleich zwischen Laub- und Nadelwald fehlt hingegen. Im Modell ABIMO wird der kapillare Aufstieg mittels der Nutzung, der nFK und des Flurabstandes geschätzt; im Modell TUB-BGR mittels nutzungsspezifischer Vegetationsdauer, Flurabstand, der Bodenart und klimatischer Rahmenbedingungen.

ABIMO berücksichtigt den Anschlussgrad an die Kanalisation. Dabei führen mangelnde Daten über den Kanalisationsanschluss einiger hochversiegelter Flächen zur Versickerungsdarstellung von Regenwasser. Aus diesem Fehler resultieren eine Unterschätzung des Oberflächenabflusses und eine Überschätzung der Versickerung. Bei der Betrachtung der unversiegelten Flächen werden keine Kanalisationsdaten benötigt. Das TUB-BGR-Verfahren berücksichtigt den kapillaren Wasseraufstieg sowie die Hangneigung. Das Modell kann dennoch für die überwiegend flach geneigte Region Berlins verwendet werden, da die Hangneigung auch entfallen kann. Die aktuelle Version der ABIMO-Software 3.2 wurde speziell für Berlin entwickelt und die Eingangsdaten sind verfügbar. Das TUB-BGR-Verfahren basiert auf Regressionsgleichungen, die mit verknüpften Tabellen mit Microsoft Excel und GIS-Programmen verwendet werden können. Diese müssten jedoch erst aufbereitet werden. Die meisten notwendigen Eingangsdaten für Berlin für die Anwendung des TUB-BGR-Verfahrens sind vorhanden. Die Übertragung der Umweltatlas-Nutzung auf die wenigen Nutzungen dieses Verfahrens ist aufwendig. Es können sich Schwierigkeiten in der Zuordnung ergeben.

Das Modell ArcEGMO basiert auf Tageswerten und ermittelt daher eine deutlich höhere zeitliche Auflösung als ABIMO und das TUB-BGR-Verfahren. Daher berücksichtigt es auch aktuelle Wetterbedingungen, wie die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Globalstrahlung und die Windstärke. Das Modell ArcEGMO hat gegenüber ABIMO den großen Vorteil, dass Kurzzeitereignisse wie z. B. Starkregen in hoher zeitlicher Auflösung (Minuten, Stunden) simuliert werden können. Wichtig ist eine solche Simulation für das Aufzeigen von Ext-

remwetterereignissen sowie die Bemessung von Versickerungsanlagen, Kanalisation, Rückhaltebecken und Vorflutern. Allerdings müssen Eingangsdaten wie der Niederschlag auf Tagesbasis für Berlin aufbereitet werden, was zeitaufwändig ist. Es können bestimmte Eingangsparameter variiert werden, zum Beispiel kann das Geländemodell oder die Trenn- und Mischkanalisation ausgewählt oder weggelassen werden. In Hamburg wurden diese Parameter nicht betrachtet, jedoch in Sachsen-Anhalt wurden sie einbezogen. Die Kosten für die Software von ArcEGMO werden jedoch als hoch eingestuft und die Berechnung ist relativ kompliziert.

Für Sachsen-Anhalt liegt ein flächendeckender Vergleich der Modelle ABIMO und ArcEGMO vor, da die Wasserhaushaltsgrößen für den Zeitraum 1961 – 1990 mit dem Modell ABIMO und für den Zeitraum 1971 – 2000 mit dem Modell ArcEGMO ermittelt wurden. Der Vergleich zeigt, dass die berechnete Verdunstung im Mittel bei fast gleichen Niederschlägen einen Unterschied von nur 2 % aufweist (LHW Sachsen-Anhalt 2015). Dies zeigt, dass sowohl die Anwendung des ABIMO-Modells als auch des ArcEGMO-Modells zielführende Darstellungen ermitteln.

Tabelle 6: Charakterisierung und Ergebnisse der Modelle ABIMO und ArcEGMO

WH-Modelle	ABIMO	ArcEGMO
Bezugszeitraum	1961-1990	1971-2000
Modellgebiet	Sachsen-Anhalt	Größer als Sachsen-Anhalt
Zeitliche Auflösung	gering	hoch
Niederschlag [mm/a]	603 (100%)	604 (100%)
Verdunstung [mm/a]	497 (82%)	505 (84%)

Das Hamburger Verfahren zur Verdunstungspotenzialkarte basiert auf der Verschneidung der hydrogeologischen Bodenprofilkarte und der Grundwasserflurabstandskarte. Die Karte zeigt einen Überblick über Bodenstandorte mit niedrigen kf-Werten in Tiefen bis zu 2 m (Stauschichten) und geringen Flurabständen. Insgesamt stellt das Hamburger Verfahren dadurch ein einfaches Verfahren dar, welches die Wasserleitfähigkeit der Böden ohne Versiegelung, Nutzung und Vegetation darstellt. Die Darstellung soll einen Eindruck über wertvolle Böden geben, ist jedoch nicht sehr realitätsnah. Aus der Wasserleitfähigkeit können Rückschlüsse auf die nutzbare Feldkapazität gezogen werden. Der niedrigste Flurabstand im Nassjahr liegt für Berlin nicht vor. Die Verwendung des Flurabstandes wird empfohlen (UA-Karte 02.07).

Für Berlin ist keine hydrogeologische Bodenprofiltypenkarte vorhanden. Die geologischen Bohrdaten sind für Berlin als Bilddateien der Schichtverzeichnisse (als WMS und WFS) verfügbar. Sie enthalten jedoch keine Informationen über Bodendaten, wie die Wasserleitfähigkeit. Zudem ist die Aufbereitung nur von Experten mit einem hohen Zeitaufwand umsetzbar.

Die Kühlleistung des Verdunstungspotenzials und die mit dem Modell ArcEGMO ermittelte Kühlleistung stimmen tendenziell überein (Domroese 2011, 2017).

#### **Grenzen des ABIMO- und TUB-BGR-Verfahrens**

Da die Eingangsdaten von ABIMO und dem TUB-BGR-Verfahren auf langjährigen Mittelwerten basieren, werden kurzfristige Trocken- oder Starkregenereignisse in der Auswertung kaum berücksichtigt.

In der Modellberechnung von ABIMO und dem TUB-BGR-Verfahren ist es nicht möglich, nur die Sommermonate darzustellen, welche jedoch in der Darstellung der Bodenkühlleistung eine sehr wichtige Rolle spielen, da eine Bodenkühlleistung zur Reduzierung der urbanen Hitzeinseln in der Stadt im Sommer beitragen soll und nicht im Frühling, Herbst oder Winter. Bei langjähriger Betrachtung sind die für das ganze Jahr berechneten Verdunstungswerte proportional zu denen der Sommermonate. Letztere betragen grob geschätzt ca. 80 - 90 % der jährlichen Gesamtverdunstung.

Ausdrücklich soll hier darauf hingewiesen werden, dass mit keinem Wasserhaushaltsmodell verlässlich ausschließlich die Verdunstung in einem Sommer berechnet werden kann. Wegen der z. T. langsamen Veränderungen im Wasserhaushalt (z. B. Bodenwasserspeicher) ist immer eine Berechnung über mehrere Jahre nötig (auch bei dem Verfahren Arc-EGMO).

Die aktuelle Berechnung der tatsächlichen Verdunstung in Berlin beinhaltet die Niederschlagsdaten von 1961 bis 1990 und berücksichtigt daher nicht die vergangenen Jahre mit geringen Niederschlägen. Die Gründe liegen darin, dass die Niederschlagsdaten von 1991 bis 2020 erst im kommenden Jahr 2021 für Berlin vorliegen. Man könnte die aktuelleren Niederschlagsdaten zukünftig verwenden, jedoch weisen die Daten erstaunlich geringe Unterschiede im Vergleich zum Datensatz von 1961 – 1990 auf. Das hängt u.a. damit zusammen, dass die Winterniederschläge im Gegensatz zu den Sommerniederschlägen zunehmen. Die Implementierung aktuellerer Niederschlagsreihen (z. B. 1981 – 2010) in ABIMO ist grundsätzlich möglich, jedoch mit einigem Zeit- und damit Kostenaufwand verbunden.

Der bei ABIMO verwendete potenzielle Evapotranspiration liegt bisher nicht der internationale Standard der FAO-Grasreferenzverdunstung zugrunde, sondern das Turc-Verfahren (+ 10 %). Das Turc-Verfahren lässt sich jedoch durch einen Umrechnungsfaktor (+ 10 %) näherungsweise in die FAO-Grasreferenzverdunstung umrechnen. Dieser Parameter fließt über alte Bezirksnummern in das Modell ein und ist somit nicht sehr realitätsnah.

Ebenfalls über die Bezirksnummer werden der Versiegelungsgrad der Straßen und die Belagsart der Straßen zugewiesen. Diese Mängel würden bei einer Betrachtung der unversiegelten Flächen wegfallen.

## **6 Methodische Ansätze und erste Simulation**

### **6.1 Berechnung des Verdunstungspotenzials aus Bodendaten**

In Anlehnung an das Verfahren der Hamburger Verdunstungspotenzialkarte kann eine Berechnung des Verdunstungspotenzials aus Bodendaten erfolgen. Da eine hydrogeologische Bodenprofiltypenkarte für Berlin nicht vorliegt, können vorhandene Umweltatlaskarten der nutzbaren Feldkapazität der Flach- und Tiefwurzelzone oder der nutzbaren Feldkapazität der effektiven Wurzelzone ( $nFK_{we}$ ) und des Grundwasserflurabstandes für die Kartenerstellung verwendet werden. Diese Datengrundlagen ermöglichen eine Kartendarstellung der potenziellen Bodenkühlleistung aus den wichtigsten Parametern für die Bodenkühlleistung. Durch die Verwendung der nutzbaren Feldkapazität ist die Karte aussagekräftiger als die Hamburger Verdunstungspotenzialkarte, da aus der Hamburger Verdunstungspotenzialkarte erst die  $nFK$  abgeleitet wurde. Die erstellte Karte (Anhang 10.2.1) bezieht die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums und den Grundwasserflurabstand ein. Für genauere Kartenansichten liegen die ersten Simulationen im A0-Format als PDF-Dateien im Dateianhang vor.

Für die Bewertung wurden sechs Klassen gewählt (siehe Tab. 7). Die höchste Klasse wird ausschließlich durch einen niedrigen Flurabstand von kleiner 0,5 Meter gebildet. Dabei wird davon ausgegangen, dass fast alle Pflanzen bei einem so niedrigen Flurabstand Grundwasseranschluss haben. Zur weiteren Klassifizierung wurden die Klassen der  $nFK_{we}$  aus Gerstenberg 2017 (Tabelle 4.3.2) übernommen. Bei einem Flurabstand von 0,5 bis kleiner 2 Meter erhöht sich die Klasse um eine Stufe, weil davon ausgegangen werden kann, dass tiefwurzelnde Pflanzen zumindest über den kapillaren Aufstieg Grundwasseranschluss haben.

Tabelle 7: Klassifizierung der Verdunstungspotenzialkarte

Flurabstand in m	nFKwe in mm	nFKwe Bewertung	Bewertung
< 0,5	-	-	extrem hoch
≥ 0,5 - < 2	220 - < 300	hoch	sehr hoch
	140 - < 220	mittel	hoch
	60 - < 140	gering	mittel
	< 60	sehr gering	niedrig
≥ 2	220 - < 300	hoch	hoch
	140 - < 220	mittel	mittel
	60 - < 140	gering	niedrig
	< 60	sehr gering	sehr niedrig

Kartenberechnungen, die auf wenigen, jedoch den wichtigsten Parametern basieren, können sehr gute Ergebnisse erzielen. Eine extrem hohe potenzielle Bodenkühlleistung in Berlin stellen demnach das Tegeler Fließ, Teile des LSG Bogenseekette und Lietzengraben-niederung in Buch, das Neuenhagener Mühlenfließ (Erpe), die Müggelspreewiese sowie das LSG Gosener Wiesen und Seddinsee in Treptow-Köpenick dar. Eine hohe potenzielle Bodenkühlleistung liegt im Spandauer Forst, in Teilflächen von Tegel, Zehlendorf und Treptow-Köpenick vor. Schwerpunkte der mittleren potenziellen Bodenkühlleistung bilden Flächen um den Müggelsee, den Spandauer und Tegeler Forst sowie östliche und südliche Außenbereiche der Stadt. Das Tempelhofer Feld, der Tiergarten, der Flughafen Tegel sowie der Grunewald weisen durch größere Flurabstände als 2 m und eine niedrige nFK eine niedrige potenzielle Bodenkühlleistung auf. Sehr niedrige potenzielle Bodenkühlleistungswerte stellen die dicht bebauten Stadtbereiche mit größeren Flurabständen dar.

Alternativ könnten für Berlin die notwendigen Daten aus der öffentlichen Bohrdatenbank entnommen werden. Die Bohrdatenbank basiert auf Schichtenverzeichnissen. Dies wäre jedoch mit erhöhten Kosten verbunden und die Interpretation wäre sehr zeitaufwändig. Da die Bohrdatenbank keine hydrologischen Daten enthält, würden sich zudem Einschränkungen der möglichen Aussagen ergeben.

## 6.2 Berechnung mit dem ABIMO-Modell

Normalerweise wird mit dem ABIMO-Modell der Wasserhaushalt von Blockflächen inklusive der bebaut und unbebaut versiegelten Flächenanteile und den Straßenflächenanteilen mit deren Versiegelung unter Berücksichtigung der Kanalisation berechnet.

Bei der Ermittlung der Bodenkühlleistung soll der Boden von Blockflächen bewertet werden und keine technischen Bauwerke. Deswegen ist es beispielsweise nicht sinnvoll, die Verdunstung von Dächern oder asphaltierten Straßen einzubeziehen. Daher wird im Folgenden nur die Verdunstung der unversiegelten Blockflächenanteile ermittelt.

Dies hat zur Folge, dass fast alle Eingangsdaten der versiegelten Flächenanteile (bebauter und unbebauter Versiegelungsgrad, Beläge, Straßenbeläge und Versiegelungsgrad der Straßen) und die Straßenflächen nicht benötigt werden. Da im ABIMO-Modell davon ausgegangen wird, dass unversiegelte Flächen keinen Oberflächenabfluss haben, werden auch keine Daten zur Kanalisation benötigt.

Benötigt werden Daten zum Niederschlag (primäre Quelle), zur Feldkapazität (Wasserspeicher), zum Flurabstand (potenziell sekundäre Quelle), zur Nutzung und zum Typ (u. a. Vegetationstyp und Bewässerung), zum Bezirk (Zuordnung der potenziellen Evapotranspiration) und zum Blockflächenschlüssel (Zuordnung zur Fläche). Zur manuellen Umrechnung der Verdunstung auf die gesamte Blockfläche wird noch der Versiegelungsgrad benötigt.

Es wurden bereits zwei erste Entwürfe von Karten der mittleren langjährigen Bodenkühlleistung für Berlin angefertigt. Zuerst wurde die Verdunstung mit ABIMO ohne Versiegelung, d. h. die Verdunstung der unversiegelten Blockflächenanteile unter Einbeziehung der Bewässerung gerechnet (Karte Anhang 10.2.2). Anschließend wurde die so berechnete Verdunstung mittels des Versiegelungsgrades auf die gesamte Blockfläche bezogen (Karte Anhang 10.2.3).

Unter Versiegelung ist hier nicht die Einbeziehung der Verdunstung der versiegelten Blockflächenanteile zu verstehen. Der Versiegelungsgrad der Blockflächen wird nur dazu genutzt, die mit ABIMO berechnete Verdunstung der unversiegelten Blockflächenanteile auf die gesamte Blockfläche nachträglich manuell umzurechnen.

Das Modell ordnet weitgehend die Eingangsparameter den Blockteilflächen zu. In das Modell fließen 22 Nutzungen und 52 Flächentypen und die Niederschlagsdaten von 1961-1990 ein. Außerdem wird der Flurabstand und die nutzbare Feldkapazität der Flach- und Tiefwurzler verwendet. Die potenzielle Evapotranspiration fließt nach dem Turc-Verfahren mit einer Korrektur von + 10 % ein und wird nicht den einzelnen Blockteilflächen zugeordnet, sondern nach Bezirken pauschal zugewiesen. Die Zuschläge für Bewässerung fließen pauschal für bestimmte Nutzungen und Typen in ABIMO ein. Zu diesen zählen u. a. Parks, Friedhöfe, Baumschulen und Kleingärten, aber auch bspw. Wohn-, Misch- Gemeinbedarfs- und Sondernutzungen. Die angenommenen Werte für die Bewässerung liegen zwischen 50 und 100 mm/a und basieren auf vereinfachten Ansätzen zum Zeitpunkt der Entwicklung der Modellsoftware. Durch die pauschale Einbeziehung entstehen durchaus Diskrepanzen zur realen Situation. ABIMO bietet allgemein die Möglichkeit, die Bewässerung grundsätzlich nicht zu berücksichtigen. Um der Realität möglichst nahe zu kommen, wurde jedoch das Modell mit Bewässerung gerechnet. Zu Details der Methodik siehe Anhang 10.

Die zwei Karten zeigen die Bodenkühlleistung wesentlich differenzierter auf, als die Karte, die ausschließlich aus den Bodendaten generiert wurde. Es wurden 14 Klassen gewählt, um die Differenzierung der potenziellen Kühlleistung so detailliert wie möglich darzustellen. Die Spannweite reicht von 0 - < 50 mm/a Verdunstung bis zur maximal möglichen Rate von 650 – 700 mm/a. Zum Vergleich wurden in Bottrop Verdunstungsraten von < 500 mm/a als sehr gering eingestuft und nicht mehr dargestellt.

Eine Zusammenfassung der 14 Klassen in Bewertungsstufen sollte weitgehend linear erfolgen, weil die Kühlleistung proportional der Verdunstung ist. Eine Ausnahme ist der Bereich von 600 bis 700 mm/a Verdunstung. Dieser Bereich liegt in der Größenordnung der potenziellen Evapotranspiration (620 bis 660 mm/a) und ist deshalb als sehr hoch zu bewerten (Tabelle 8).

Tabelle 8: Verdunstung und Bewertung der Kühlleistung

Verdunstung in mm/a	Kühlleistung Bewertung
600 – 700	sehr hoch
400 - < 600	hoch
200 - < 400	mittel
0 - < 200	niedrig

Die Karte ohne Versiegelung und mit Bewässerung zeigt nur die Verdunstung der **unversiegelten Blockflächenanteile**<sup>2</sup>. Diese Verdunstung ist, abgesehen von fast vegetationsfreien Brachflächen, als hoch bis sehr hoch einzustufen. Dieser überraschende Umstand ist auf die klimatischen Bedingungen in Berlin zurückzuführen. Im Sommerhalbjahr fallen in Berlin im Mittel nur 325 mm Niederschlag, die potenzielle Evapotranspiration beträgt hingegen im Mittel 510 mm (0,64 / 1,0). Bei einem so geringen Verhältnis von Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration verdunsten alle Vegetationstypen einen großen Teil des Niederschlages. Eine Simulation mit ABIMO für ganz Berlin ergab für den Vegetationstyp Grünland eine mittlere Verdunstung von 465 mm/a und für den Vegetationstyp Wald eine mittlere Verdunstung von 525 mm/a (0,89 / 1,0) (siehe auch Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen 2019, Abb. 3).

Da der unversiegelte Anteil einer Blockfläche 0 bis 100 Prozent betragen kann, verringert sich die auf die **gesamte Blockfläche** bezogene Verdunstung proportional mit dem Ver-

<sup>2</sup> Das Modell wurde bereits im Jahr 2017 einmal prozessiert. Die Daten sind im Datensatz der Umwelatlaskarte 02.13.4, „Versickerung aus Niederschlägen ohne Versiegelung 2017“ im Geoportal Berlin veröffentlicht.



siegelungsgrad. Die Karte mit Versiegelung und mit Bewässerung zeigt entsprechend in den hoch versiegelten Bereichen Berlins eine niedrige Verdunstung.

Da die Kühlleistung eines Bodens annähernd proportional der Verdunstung ist, kann mit einer Konstanten aus der Verdunstung die Kühlenergie (in Wattstunden) bzw. die Kühlleistung (in Watt) berechnet werden (siehe Anhang 10).

## 7 Fazit

Im Kontext der weltweit steigenden Jahresmitteltemperaturen ist es wichtig die urbanen Hitzeinseln in Berlin zu reduzieren. Dafür kann das bisher weithin unbeachtete Potenzial der Bodenkühlleistung genutzt werden. Für Berlin sollten im Rahmen einer Studie daher Vorschläge entwickelt werden, wie die Bodenkühlleistung Eingang in die Planungspraxis finden kann. Dafür wurden zunächst Einflussfaktoren der Bodenkühlleistung ermittelt und Fallstudien in Deutschland untersucht. Nordrhein-Westfalen spielt bisher bei der Untersuchung der Bodenkühlleistung eine Vorreiterrolle, gefolgt von Hamburg. Es werden drei Verfahren zur Ermittlung der Bodenkühlleistung in Deutschland angewendet, die auf Berlin aufgrund bestehender Daten anwendbar wären. In Berlin liegt mit dem ABIMO-Modell ein Wasserhaushaltsverfahren vor, das auf seine Eignung für die Ermittlung der Bodenkühlleistung untersucht wurde. Damit wurden vier Modelle betrachtet: ABIMO, ArcEGMO, TUB-BGR und das Hamburger Verfahren.

Der Frage, welches Verfahren oder Modell für eine Darstellung oder Berechnung der Bodenkühlleistung in Berlin angewendet werden könnte, liegt zugrunde, welche Aussagen mit der Karte getroffen werden sollen.

Da bereits viele Wasserhaushalts- und Bodendaten für Berlin vorliegen, muss nicht zwingend ein Berechnungsmodell der tatsächlichen Verdunstung verwendet werden. In Wuppertal wurde auf Basis der wichtigsten Parameter für die Bodenkühlleistung, nämlich der nutzbaren Feldkapazität und der ökologischen Feuchtestufe des Bodens, eine Karte über die Bodenkühlleistung erstellt. Allerdings wurden die Daten zur Ökologischen Feuchtestufe aus der Bodenkarte BK50 entnommen, welche für den Osten Deutschlands und damit auch für Berlin nicht vorliegt. Diese Vorgehensweise lässt sich demnach nicht übertragen.

In Hamburg wurde zuerst eine Verdunstungspotenzialkarte erstellt und anschließend für drei Standorte die Bodenkühlleistung mit ArcEGMO berechnet.

Wenn ein Überblick über Böden mit niedriger Wasserleitfähigkeit dargestellt werden soll, ist das Hamburger Verfahren der Verdunstungspotenzialkarte empfehlenswert. Erste geografische Verschneidungen bestehender Datensätze zeigten sehr gute Ergebnisse und auch eine mögliche Kompatibilität mit der bestehenden Umweltatlaskarte Planungshinweise zum Bodenschutz.

Bei einer allgemeinen Einschätzung der Bodenkühlleistung auf der Grundlage von langjährigen Mittelwerten können das ABIMO oder TUB-BGR-Modell verwendet werden. Kurzzeitige Wetterereignisse, wie z.B. Starkregen können mit diesen Modellen nicht berücksichtigt werden. Die beiden Modelle verfügen über ähnliche Eingangsparameter und beziehen die Flächennutzung (ABIMO) bzw. die Vegetation (TUB-BGR und ABIMO) sowie die Versiegelung mit ein. Die Eingangsparameter sind die potenzielle Verdunstung, der Niederschlag (Sommer- und Jahresniederschlag), die nutzbare Feldkapazität (0-30 cm, 0-150 cm bei ABIMO und nFKWe bei TUB-BGR), der Flurabstand, die Flächennutzung (Nutzung + Typ bei ABIMO, vier Nutzungen bei TUB-BGR) und die Versiegelung. Da Berlin überwiegend eine flache Morphologie hat, kann die Hangneigung beim TUB-BGR-Modell entfallen. Wird nur die Verdunstung der unversiegelten Flächenanteile ermittelt, entfallen spezielle Versiegelungsdaten wie die Belagsarten- und die Kanalisationsdaten bei ABIMO.

Mängel des ABIMO-Modells bezüglich der bezirksweisen Zuordnung der Versiegelung der Straßen sowie mangelhafte Daten zur Kanalisation entfallen bei der ausschließlichen Betrachtung von unversiegelten Flächen. Mängel der Berechnung der potenziellen Evapotranspiration nach Turc können durch einen Umrechnungsfaktor an den internationalen FAO-Grasreferenzstandard angepasst werden oder manuell verändert und simuliert werden.

Beide Verfahren können langjährige mittlere Tendenzen für ein Bodenkühlleistungspotenzial gut darstellen. ABIMO hat gegenüber dem TUB-BGR-Verfahren den Vorteil, dass die Software verfügbar ist und alle notwendigen Eingangsparameter blockbezogen vorliegen. Dadurch kann ABIMO direkt und kostengünstig verwendet werden. Die vier Nutzungen des TUB-BGR-Verfahrens müssten bei einer blockbezogenen Darstellung auf den Umweltatlas übertragen werden und die Regressionsgleichungen müssten erstellt und berechnet werden. Simulationen der Klimaparameter wie der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit können über die potenzielle Verdunstung in beiden Verfahren verändert werden.

Ein weiteres Verfahren, das in Hamburg zur Berechnung der Bodenkühlleistung verwendet wurde und theoretisch auch für Berlin angewendet werden könnte, nennt sich ArcEGMO. Es handelt sich dabei um eine Software, die Kurzzeit-Modellierungen erstellen kann. Das ArcEGMO-Modell verwendet Tageswerte der meteorologischen Eingangsparameter und ist somit sehr genau. Es können zum Beispiel singuläre Regenereignisse berücksichtigt werden. In Hamburg wurden Datenreihen von drei Standorten über einen Zeitraum von 20 Jahren gemittelt berechnet. Die damit erstellten Verdunstungsleistungsdiagramme stellen die Unterschiede an den verschiedenen Standorten in den Sommermonaten deutlich dar, jedoch wurde keine Bodenkühlleistungskarte mit ArcEGMO erstellt. Eine flächendeckende Berechnung mit ArcEGMO ist allerdings sehr aufwändig und kostspielig, daher wurden in Hamburg nur drei Standorte betrachtet.

Für die Anwendung des Modells ArcEGMO in Berlin müsste die Datenvollständigkeit und Datenverfügbarkeit für den angestrebten Zeitraum geprüft werden und eine Auftragsvergabe an ein Büro mit ArcEGMO-Erfahrung gerichtet werden. Der Aufwand ArcEGMO für Berlin zu nutzen, lohnt sich bei der Verwendung langjähriger Mittelwerte kaum, sondern eher für Berechnungen von Kurzzeitereignissen. Der Vergleich zwischen den Wasserhaushaltsberechnungen mit den Anwendungen ABIMO und ArcEGMO in Sachsen-Anhalt über jeweilige Zeiträume von fast 30 Jahren deutet zudem auf keinen signifikanten Unterschied der Ergebnisse hin, da der Verdunstungsunterschied nur bei 2 % lag (LHW Sachsen-Anhalt 2015).

Insgesamt hat sich herausgestellt, dass sich zwei Verfahren am besten für die Darstellung der Bodenkühlleistung in Berlin eignen würden. Das einfachste, jedoch trotzdem valide Verfahren stellt die Verschneidung der Umweltatlaskarten nutzbare Feldkapazität für Flach- und Tiefwurzler / nutzbare Feldkapazität in der effektiven Wurzelzone mit der Grundwasserflurabstandskarte dar. Diese beiden Parameter mit Priorität der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraums vor der nutzbaren Feldkapazität für Flach- und Tiefwurzler stellen die wichtigsten Größen in der Berechnung der Bodenkühlleistung dar. Zudem liegen beide Parameter bereits blockweise im Umweltatlas vor.

Das zweite Verfahren, das für Berlin einfach und kostengünstig umzusetzen wäre, ist die Berechnung der langjährigen mittleren Verdunstung mit ABIMO. Bei der verfügbaren Software können diverse Eingangsparameter verwendet und variiert werden. Bei der Alternative zu ABIMO, dem TUB-BGR-Modell handelt es sich auch um die Ermittlung langjähriger Mittelwerte von Wasserhaushaltsgrößen. Die Software zur Berechnung der Verdunstung müsste jedoch noch erstellt werden. Daher bietet das TUB-BGR-Verfahren keinen echten Vorteil gegenüber ABIMO. Die Erstellung einer flächendeckenden Bodenkühlleistungskarte für Berlin mit ArcEGMO wäre sehr kostspielig und aufwändig. Die tatsächlichen Vorteile von ArcEGMO beruhen auf der Kurzzeit-Modellierung mit der Verwendung von Tageswerten und der Möglichkeit, genaue Daten für die jeweiligen Standorte in den Sommermonaten anzugeben und zu vergleichen.

Für planerische Aussagen, wo bestimmte Flächen erhalten bleiben sollten, oder in der Abschätzung konkreter Bau- oder Planungsprojekte soll die Karte der Bodenkühlleistung in Berlin Anwendung finden. Daher wäre insgesamt die Integration der Bodenkühlleistung in die Planungshinweiskarte zum Bodenschutz strategisch sehr wünschenswert.

## 8 Ausblick

Die konzeptionellen Überlegungen zur Einführung einer Bewertung der Bodenkühlleistung in Berlin erfolgten weitgehend nach fachlichen Kriterien, aber auch nach Aspekten der Datenverfügbarkeit. In Berlin liegt mit ABIMO ein eingeführtes Modell vor, das für die Erstellung von vielen Umweltatlaskarten verwendet wird. Das Modell ist sehr gut für planerische Fragestellungen geeignet, die sich zum Beispiel im Rahmen der Eingriffsregelung und Umweltprüfung zu Bebauungsplänen oder Planfeststellungen ergeben.

### **Wasserhaushaltsmodelle in der Anwendung im Hause SenUVK**

Die Wasserwirtschaft der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz diskutiert derzeit für ihren Zuständigkeitsbereich die Einführung des Arc-EGMO-Modells. Hier geht es insbesondere um die Modellierung von Niederschlagsmengen vor allem in Hinblick auf Starkregenereignisse. Für die Referate Vorsorgender Bodenschutz und Wasserwirtschaft sind demnach verschiedene Ansätze in der Betrachtung der Wasserhaushaltsgrößen relevant.

Die zukünftige Software-Nutzung zu Fragestellungen der Wasserhaushaltsmodellierung in Berlin sollte ausführlich kritisch analysiert und diskutiert werden. Die Landesgeologie der SenUVK (Referat II B 3) wird die Nutzung des Arc-EGMO-Ansatzes im kommenden Jahr verfolgen. Hierzu ist ein fachlicher Austausch zwischen den relevanten Referaten im Hause SenUVK wünschenswert.

Es wäre denkbar und vermutlich auch erforderlich, beide Wasserhaushaltsmodelle für unterschiedliche Fragestellungen der Wasserhaushaltsmodellierung zu verwenden. Da das ABIMO-Modell bereits für die Berechnungen der Umweltatlaskarten (u. a. Karte 01.12.4 Regelungsfunktion für den Wasserhaushalt) verwendet wird, ist die zukünftige Nutzung der Software auch für die Aktualisierungen dieser Karten erforderlich. Zudem sind kleinere Optimierungen in ABIMO ohne großen Aufwand möglich, wie die Einbindung der neuesten Niederschlagsreihen (von 1991 bis 2020), die im kommenden Jahr verfügbar sind. Ob eine umfangreichere Weiterentwicklung des ABIMO-Modells, die bereits vor einigen Jahren konzeptionell vorbereitet wurde, zielführend und verhältnismäßig ist, sollte im Rahmen der oben genannten Gesamtabwägung im Zuge der Einführung des ArcEGMO-Modells beleuchtet werden.

In diesem Zusammenhang ist grundsätzlich die Wichtigkeit der Open-Source-Karten für die freie (und künftige) Verwendung in Berlin und ihre essentielle Bedeutung insbesondere für die räumliche Planung auf allen Ebenen und die Umweltfolgenabschätzung im Rahmen förmlicher Planungsverfahren zu unterstreichen.

### **Identifizierung umsetzungsbezogener Aspekte**

Das Thema Bodenkühlleistung steht im großstädtischen Kontext Berlins im engen Zusammenhang mit der zunehmend wichtigen Aufgabe zur thermischen Abmilderung städtischer Wärmeinseln. Dabei spielt das städtische Freiraumsystem eine wichtige Rolle, insbesondere im räumlichen Zusammenhang mit hoch verdichteten Wohnquartieren. Um die notwendige Kühlfunktion bei autochthonen hochsommerlichen Wetterlagen erfüllen zu können, ist für städtische Grünflächen eine ausreichende Wasserversorgung über die kritischen Sommerphasen entscheidend. Diese ist in Berlin angesichts geringer Jahresniederschläge und weiter steigender Durchschnittstemperaturen nur durch zusätzliche Bewässerung zu sichern. Daher wäre es hilfreich zu wissen, welches Bewässerungsregime in Berlin auf öffentlichen Flächen erfolgt. Eine strukturierte Abfrage bei den Bezirksämtern könnte hier zu belastbaren Ergebnissen führen - ggf. auch unter Einbeziehung des Bewässerungsregimes vergangener Jahre. Hierdurch kann zum einen eine Abschätzung des weiteren Bedarfs für die kommenden Jahre abgeleitet werden. Zum anderen können die gewonnenen Daten genutzt werden, das eingesetzte Wasserhaushaltsmodell auf die realen Verhältnisse hin anzupassen und damit realitätsnäher zu gestalten.

### **Fachlicher Austausch über Berlin hinaus**

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Städte arbeiten zum Teil an ihren Konzepten und Plänen zum Thema Bodenkühlleistung weiter. So erstellt bspw. derzeit die Behörde für

Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft Hamburg eine überarbeitete und verbesserte Karte zur Kühlleistung der Böden. Dabei wurde auch das der Entwicklung der Verdunstungspotenzialkarte zugrundeliegende konzeptionelle Modell modifiziert. Bei der Entwicklung der neuen Boden-Kühlleistungskarte Hamburg wird nunmehr der Schwerpunkt darauf gelegt, aus vorhandenen Daten verbesserte Schätzungen für den Bodenparameter *nutzbare Feldkapazität der maximalen Wurzelzone* abzuleiten. Hier erscheint es lohnend, die weiteren Entwicklungen und Ableitungen aufmerksam zu verfolgen und einen fachlichen Austausch zu verstetigen.

## 9 Literaturverzeichnis

**Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005):** Bodenkundliche Kartieranleitung, Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, 5. Aufl., 438 S.; 41 Abb., 103 Tab., 31 Listen, Hannover.

**Al-Gretawee, H. (2018):** Estimating the effect of vegetation on urban temperatures. PhD thesis at Swinburne University of Technology. 259 p and appendix.

**Bodenstedt, A. A., S. P., Reinhard, P., Briesen, D., Bruckhaus, A., Rentschler, M., ... & Kaule, G. (1997):** Veränderung von Böden durch anthropogene Einflüsse. Ein interdisziplinäres Studienbuch. Springer-Verlag.

**Brandl, H. (2011):** Stadtentwicklungsplan Klima: Urbane Lebensqualität im Klimawandel sichern. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Kommunikation.

[https://digital.zlb.de/viewer/api/v1/records/15380021/files/images/STEP\\_Klima.pdf/full.pdf](https://digital.zlb.de/viewer/api/v1/records/15380021/files/images/STEP_Klima.pdf/full.pdf)

Letzter Abruf: 18.03.2024

**Damm, E. (2013):** Erfassungs- und Optimierungsmöglichkeiten des Kühlungspotenzials von Böden dargestellt an ausgewählten Wohn- und Parkflächen der Stadt Bottrop.

[https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/boden/bodenschutz\\_nrw/klima/pdf/Erfassungs-und\\_Optimierungsmoeglichkeiten\\_des\\_Kuehlungspotentials\\_von\\_Boeden.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/boden/bodenschutz_nrw/klima/pdf/Erfassungs-und_Optimierungsmoeglichkeiten_des_Kuehlungspotentials_von_Boeden.pdf)

Letzter Abruf: 18.03.2024

**Domroese, J., Behörde für Umwelt und Energie (2011):** Entwicklung der Verdunstungspotenzialkarte Hamburg. Erläuterungsbericht.

<https://www.hamburg.de/contentblob/8753702/5d4cb9855131f1d109e9092e2c530f32/data/d-verdunstungspotenzialkarte-%E2%80%93-methodik-der-entwicklung-und-erlaeuterungen-pdf.pdf>

Letzter Abruf: 20.07.2020

**Domroese, J., Behörde für Umwelt und Energie (2017):** Quantifizierung der Verdunstungsleistung (Kühlleistung) von Böden in Hamburg. Projektbericht.

<https://www.hamburg.de/contentblob/9441304/a42f7fe1dffae8e3f4f8c2755db0f2db/data/d-verdunstungspotenzialkarte-kuehleistung-projektbericht.pdf>

Letzter Abruf: 18.03.2024

**Domroese, J., Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft (BUKEA) (2020):** Schriftliche Mitteilungen, November 2020.

**DVWK (1996):** Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasseroberflächen, Merkblätter zur Wasserwirtschaft 238/1996, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (Hrsg.), Bonn.

**Eschenbach, A., Gröngroft, A. (2020):** Bodenschutz – Erhaltung, Nutzung und Wiederherstellung von Böden - Bodenschutz und Klimawandel - Kühlfunktion in Stadtgebieten.

Ausgabe 03.20. Leseprobe:

[https://issuu.com/esvmedien/docs/zbos\\_03-20\\_eschenbach-gr\\_ngr\\_ft](https://issuu.com/esvmedien/docs/zbos_03-20_eschenbach-gr_ngr_ft)

Letzter Abruf: 12.10.2020

**Eschenbach, A., Wiesner, S., Gröngroft, A. (2016):** Bedeutung der Bodenfeuchte für die Klimafunktion von Böden in einem urbanen Raum. Bodenschutz. 4/16:118-126.

**GEO-NET Umweltconsulting GmbH, MUST Städtebau, Dr. Pecher AG (2017):** Klimaanpassungskonzept für die Landeshauptstadt Düsseldorf. Landeshauptstadt Düsseldorf Umweltamt (Hrsg.).

**Gerstenberg, J. H. (2017):** Erstellung von Karten zur Bewertung der Bodenfunktionen, im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen, Berlin 2017

<https://www.berlin.de/umweltatlas/assets/literatur/gerstenberg2017.pdf>

Letzter Abruf: 18.03.2024

**Goedecke, M., Gerstenberg, J., Haag, L. (2019):** Wasserhaushaltsmodell Berlin ABIMO 3.2 – Handreichung für Anwendende, Technische Anleitung zur Aufbereitung von Datengrundlagen sowie Dokumentation von Methoden und Berechnungsergebnissen des auf Berliner Verhältnisse angepassten blockbezogenen Niederschlags - Abflussmodell ABIMO der Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2006 bis 2019, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Berlin, Stand 15.04.2020.

[https://www.berlin.de/umweltatlas/assets/literatur/goedecke\\_et\\_al\\_abimo2019\\_doku.pdf](https://www.berlin.de/umweltatlas/assets/literatur/goedecke_et_al_abimo2019_doku.pdf)

Letzter Abruf: 18.03.2020

**Hartmann, K. J. (2002):** Bereitstellung von Informationen der bodenkundlichen Landesaufnahme zur Bewertung von Bodenfunktionen. In: Möller, M.(Hg.): GIS-gestützte Bewertung von Bodenfunktionen–Datengrundlagen und Lösungsansätze. Wichmann, 2005, S.27-34.

**Höke, S., Denneborg, M., Kaufmann-Boll, C. (2012):** Urbanes Bodeninformationssystem Emscher. Planungshilfe für die Wasserwirtschaft im Klimawandel. dynaklim-Publikation 31, 2012.

[https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/boden/bodenschutz\\_nrw/klima/pdf/Urbanes\\_Bodeninformationssystem\\_Emscher.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/boden/bodenschutz_nrw/klima/pdf/Urbanes_Bodeninformationssystem_Emscher.pdf)

Letzter Abruf: 18.03.2024

**Höltig, B., Coldewey, W. G. (2009):** Hydrogeologie. Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. 7. Auflage. Springer-Verlag.

**Ingenieurbüro Feldwisch (2017):** Fortschreibung der Bodenbelastungskarten und Bodenfunktionskarten für die Stadt Wuppertal.

[https://www.wuppertal.de/rathaus-buergerservice/umweltschutz/pdfs/10602\\_BBKBOFUKA-Bericht.pdf](https://www.wuppertal.de/rathaus-buergerservice/umweltschutz/pdfs/10602_BBKBOFUKA-Bericht.pdf)

Letzter Abruf: 31.07.2020

**Jankiewicz, P, Neumann, J, Duijnsveld, W.H.M., Wessolek, G., Wycisk, P., Hennings, V. (2005):** Abflusshöhe – Sickerwasserrate – Grundwasserneubildung –Drei Themen im Hydrologischen Atlas von Deutschland. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung.

[https://www.researchgate.net/publication/288466811\\_Abflusshohe\\_-\\_Sickerwasserrate\\_-\\_Grundwasserneubildung\\_-\\_Drei\\_Themen\\_im\\_Hydrologischen\\_Atlas\\_von\\_Deutschland/link/56812f9608ae1975838f685a/download](https://www.researchgate.net/publication/288466811_Abflusshohe_-_Sickerwasserrate_-_Grundwasserneubildung_-_Drei_Themen_im_Hydrologischen_Atlas_von_Deutschland/link/56812f9608ae1975838f685a/download)

[5a/download](https://www.researchgate.net/publication/288466811_Abflusshohe_-_Sickerwasserrate_-_Grundwasserneubildung_-_Drei_Themen_im_Hydrologischen_Atlas_von_Deutschland/link/56812f9608ae1975838f685a/download)

Letzter Abruf: 20.10.2020

**Kowarik, I., Bartz, R., Brenck, M. (2016):** Naturkapital Deutschland – TEEB DE (2016): Ökosystemleistungen in der Stadt – Gesundheit schützen und Lebensqualität erhöhen. Technische Universität Berlin, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Berlin – Leipzig, p. 300.

**Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) (2015):** Kühlleistung von Böden, Leitfaden zur Einbindung in stadtklimatische Konzepte in NRW. LANUV-Arbeitsblatt 29.

[https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4\\_arbeitsblaetter/arbla29/LANUV-Arbeitsblatt%2029\\_web.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/arbla29/LANUV-Arbeitsblatt%2029_web.pdf)

Letzter Abruf: 31.02.2020

**Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt, Gewässerkundlicher Landesdienst (2015):** Ermittlung hydrologischer Bemessungs- und Bewirtschaftungsgrundlagen für das Land Sachsen-Anhalt auf der Basis des Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO.

[https://lhw.sachsen-](https://lhw.sachsen-an-)  
[an-](https://lhw.sachsen-an-)

[https://fileadmin/Bibliothek/Politik\\_und\\_Verwaltung/Landesbetriebe/LHW/neu\\_PDF/5.0\\_GLD/Dokumente\\_GLD/Wasserhaushalt\\_Bio\\_Gew-Struktur/ArcEGMO/ArcEGMO\\_hydrolog\\_Grundlagen\\_ST.pdf](https://fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/Landesbetriebe/LHW/neu_PDF/5.0_GLD/Dokumente_GLD/Wasserhaushalt_Bio_Gew-Struktur/ArcEGMO/ArcEGMO_hydrolog_Grundlagen_ST.pdf)

Letzter Abruf: 18.03.2024

**Meßner, J. (2013):** Ein vereinfachtes Verfahren zur Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung in Mitteleuropa. Emscher Lippe Wassertechnik GmbH.

[http://www.gwneu.de/pdf/Verfahren\\_GWneu\\_2014.pdf](http://www.gwneu.de/pdf/Verfahren_GWneu_2014.pdf)

Letzter Abruf: 17.11.2020

**Püllen, H., Kuttler, D., Düttemeyer, Barlag, A-B. (2011):** Bodenklimatische Untersuchungen in der strukturgewandelten Industriestadt Oberhausen (A 4.1.3).

[https://www.uni-due.de/imperia/md/content/geographie/klimatologie/pullen\\_poster\\_30.6.11\\_creator.pdf](https://www.uni-due.de/imperia/md/content/geographie/klimatologie/pullen_poster_30.6.11_creator.pdf)

Letzter Abruf: 20.20.2020

**Rachimov, C., Rachimov, M. (pro data consulting) (2009):** ABIMO 3.2, Abflußbildungsmodell, Algorithmus zum BAGROV-GLUGLA-Verfahren für die Berechnung langjähriger Mittelwerte des Wasserhaushalts, Programmbeschreibung; im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, unveröffentlicht.

**Renger, M., Strebel, O. (1982):** Berechnungsbedürftigkeit der landwirtschaftlichen Nutzflächen in Niedersachsen. – Geol. Jb. F13: 3–66, 43 Abb., 26 Tab.; Hannover.

**Rottländer, E., Reinhard, P., Rentschler, M., & Bodenstedt, A. A. (1997):** Veränderungen von Böden durch anthropogene Einflüsse. Deutsche Institut für Fernstudienforschung an der Universität Tübingen (Hrsg.). Springer-Verlag.

**Ruhr-Universität Bochum, Stadt Neuss (2017):** Aktivierung der Bodenkühlleistung für stadtklimatische Konzepte zur Klima-anpassung am Beispiel der Stadt Neuss.

<https://www.neuss.de/leben/umwelt-und-gruen/klima-und-energie/Service/downloads/staklibo-flyer>

Letzter Abruf: 31.7.2020

<http://staklibo.net/aktuelles/5-poster-staklibo.html>

Letzter Abruf: 31.07.2020

<https://www.neuss.de/leben/umwelt-und-gruen/klima-und-energie/Service/downloads/staklibo-broschuere>

Letzter Abruf: 31.07.2020

**Schaumberger, A., Eitzinger, J., & Formayer, H. (2008):** Räumliche Modellierung der potenziellen Evapotranspiration. In Paper presented at the AGIT-Symposium, Salzburg.

[https://www.researchgate.net/profile/Andreas\\_Schaumberger/publication/262107784\\_Raumliche-Modellierung-der-potenziellen-Evapotranspiration/links/0c960536b25ab64e3d000000/Raumliche-Modellierung-der-potenziellen-Evapotranspiration.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Andreas_Schaumberger/publication/262107784_Raumliche-Modellierung-der-potenziellen-Evapotranspiration/links/0c960536b25ab64e3d000000/Raumliche-Modellierung-der-potenziellen-Evapotranspiration.pdf)

Letzter Abruf: 11.9.2020

**Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (2002):** Lehrbuch der Bodenkunde, 15. Auflage Heidelberg, 2002. In: Damm, E. (2013): Erfassungs- und Optimierungsmöglichkeiten des Kühlungspotenzials von Böden dargestellt an ausgewählten Wohn- und Parkflächen der Stadt Bottrop. Abschlussarbeit. Dynaklim-Publikation Nr.35/ Februar 2013.

[https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/boden/bodenschutz\\_nrw/klima/pdf/Erfassungs-und-Optimierungsmoeglichkeiten-des-Kuehlungspotentials-von-Boeden.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/boden/bodenschutz_nrw/klima/pdf/Erfassungs-und-Optimierungsmoeglichkeiten-des-Kuehlungspotentials-von-Boeden.pdf)

Letzter Abruf: 23.7.2020

**Schrödter, H. (1985):** Verdunstung; Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden, Springer-Verlage, Berlin.

**Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen (2015):** 04.13 Langjährige Entwicklung ausgewählter Klimaparameter.

[https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/d413\\_12.htm](https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/d413_12.htm)

Letzter Abruf: 20.10.2020

**Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen (2019):** 02.13 Oberflächenabfluss, Versickerung, Gesamtabfluss und Verdunstung aus Niederschlägen.

[https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e\\_text/kd213.pdf](https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e_text/kd213.pdf)

Letzter Abruf: 20.11.2020

**Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (2019):** Monitoringbericht zur Umsetzung des Berliner Energie- und Klimaschutzprogramms (BEK 2030) Berichtsjahr 2019.

[https://www.berlin.de/sen/uvk/\\_assets/klimaschutz/klimaschutz-in-der-umsetzung/das-berliner-energie-und-klimaschutzprogramm-bek/bek\\_monitoringbericht\\_2019.pdf](https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/klimaschutz/klimaschutz-in-der-umsetzung/das-berliner-energie-und-klimaschutzprogramm-bek/bek_monitoringbericht_2019.pdf)

Letzter Abruf: 17.11.2020

**Sperling, C., Valentin, I., Kastler, M. (2019):** Die Karte der Bodenkühlleistung in der Stadt Düsseldorf – ein Instrument für Bodenschutz und Klimaanpassung. Bodenschutz. 2/19:57-65.

**Stadt Neuss (2014):** Planungshinweiskarte aus klimatologischer Sicht. Stadtklimakataster Neuss, Amt für Umwelt und Stadtgrün.

**Stadt Wuppertal (2020):** Klimaschutzkonzept mit integriertem Handlungsfeld Klimafolgenanpassung.

[https://www.wuppertal.de/microsite/klimaschutz/dokumente\\_downloads/20200519\\_IKSK\\_Wuppertal\\_Endbericht.pdf](https://www.wuppertal.de/microsite/klimaschutz/dokumente_downloads/20200519_IKSK_Wuppertal_Endbericht.pdf)

Letzter Abruf: 21.10.2020

**Umweltamt Düsseldorf (2020):** Bodenkühlleistung.

<https://www.duesseldorf.de/umweltamt/umweltthemen-von-a-z/boden/bodenschutz.html>

Letzter Abruf: 20.10.2020

**Umweltbundesamt (2020):** Trends der Niederschlagshöhe.

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-niederschlagshoehe>

Letzter Abruf: 25.09.2020

**Wessolek, G., Duijnsveld, W.H.M., Trinks, S. (2009):** Hydro-Pedotransferfunktionen zur Berechnung der Sickerwasserrate aus dem Boden: das TUB-BGR-Verfahren. In: Wessolek, G., Kaupenjohann, M., Renger, M. (Hrsg.): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis, Bodenökologie und Bodengenese H. 40, Technische Universität Berlin (Selbstverlag), Berlin, S. 66-80.

[https://www.boden.tu-berlin.de/fileadmin/fq77/pdf/Rote\\_Liste/Rote\\_Reihe\\_Heft\\_40.pdf](https://www.boden.tu-berlin.de/fileadmin/fq77/pdf/Rote_Liste/Rote_Reihe_Heft_40.pdf)

Letzter Abruf: 21.08.2020

**Wessolek, G., Kluge, B., Toland, A., Nehls, T., Klingelmann, E., Rim, Y.N., Mekiffer, B., Trinks, S. (2011):** Urban soils in the vadose zone, Perspectives in Urban Ecology. Springer, pp. 89-133.

[https://www.researchgate.net/publication/251879260\\_Urban\\_Soils\\_in\\_the\\_Vadose\\_Zone/links/56f6e3bc08ae38d710a1c012/download](https://www.researchgate.net/publication/251879260_Urban_Soils_in_the_Vadose_Zone/links/56f6e3bc08ae38d710a1c012/download)

Letzter Abruf 09.10.2020

**Wikipedia, Die freie Enzyklopädie (2020a):** Wattstunde, Bearbeitungsstand 10.09.2020

<https://de.wikipedia.org/wiki/Wattstunde>

Letzter Abruf: 20.11.2020

**Wikipedia, Die freie Enzyklopädie (2020b):** Mol, Bearbeitungsstand 09.10.2020

<https://de.wikipedia.org/wiki/Mol>

Letzter Abruf: 20.11.2020



**Wikipedia, Die freie Enzyklopädie (2020c):** Verdampfungswärme, Bearbeitungsstand 02.11.2020

[https://de.wikipedia.org/wiki/Verdampfungsw%C3%A4rme#Verdampfungsw%C3%A4rme\\_und\\_Verdampfungsenthalpie](https://de.wikipedia.org/wiki/Verdampfungsw%C3%A4rme#Verdampfungsw%C3%A4rme_und_Verdampfungsenthalpie)

Letzter Abruf: 20.11.2020

**Zepp, H., König, C., Kranl, J., Becker, M., Werth, B., Rathje, M. (2017):** Implizite Berechnung der Grundwasserneubildung (RUBINFLUX) im instationären Grundwasserströmungsmodell SPRING. Eine neue Methodik für regionale, räumlich hoch aufgelöste Anwendungen. Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 22:113-126.

[https://www.researchgate.net/publication/316078253\\_Implicite\\_Berechnung\\_der\\_Grundwasserneubildung\\_RUBINFLUX\\_im\\_instationaren\\_Grundwasserstromungsmodell\\_SPRING\\_Eine\\_neue\\_Methodik\\_fur\\_regionale\\_raumlich\\_hochaufgeloste\\_Anwendungen/fulltext/58ef30cc458515c4aa52e7d1/Implicite-Berechnung-der-Grundwasserneubildung-RUBINFLUX-im-instationaeren-Grundwasserstroemungsmodell-SPRING-Eine-neue-Methodik-fuer-regionale-raeumlich-hochaufgeloeste-Anwendungen.pdf](https://www.researchgate.net/publication/316078253_Implicite_Berechnung_der_Grundwasserneubildung_RUBINFLUX_im_instationaren_Grundwasserstromungsmodell_SPRING_Eine_neue_Methodik_fur_regionale_raumlich_hochaufgeloste_Anwendungen/fulltext/58ef30cc458515c4aa52e7d1/Implicite-Berechnung-der-Grundwasserneubildung-RUBINFLUX-im-instationaeren-Grundwasserstroemungsmodell-SPRING-Eine-neue-Methodik-fuer-regionale-raeumlich-hochaufgeloeste-Anwendungen.pdf)

Letzter Abruf: 30.10.2020

## 10 Anhang

### 10.1 Erläuterungen zur Anwendung des Modells ABIMO

Grundlagen zum Modell ABIMO und eine umfangreiche Beschreibung der Parameter sind in Rachimov et al. 2009 und Goedecke et al. 2019 zu finden. Da zur Ermittlung der Bodenkühlleistung nur die Verdunstung der unversiegelten Blockflächenanteile berechnet wird, werden nicht alle dort beschriebenen Eingangsparameter benötigt. Es entfallen weitgehend die Daten zur Versiegelung und alle Daten zu den Belägen, den Straßen und der Kanalisation. Allerdings müssen in der ABIMO Eingangstabelle weiterhin alle Felder enthalten sein und leere Felder einen „Leerwert“ enthalten. Nur die in der Tabelle 9 fett dargestellten Felder der ABIMO-Eingangstabelle werden verwendet und müssen aktuelle Werte enthalten.

Tabelle 9: Felder und Quellen der Feldinhalte der ABIMO Eingangstabelle

Feldname	Beschreibung	Feldtyp	Feldbreite	Dez.-Stellen	Quelle, Feldname, Leerwert
<b>CODE</b>	<b>Flächenschlüssel</b>	<b>Zeichen</b>	<b>16</b>		<b>1) SCHLUESSEL</b>
<b>BEZIRK</b>	<b>alte Bezirksnummer</b>	<b>nat. Zahl</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>berechnet aus Feld CODE</b>
<b>NUTZUNG</b>	<b>Flächennutzung</b>	<b>nat. Zahl</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1) NUTZ</b>
<b>TYP</b>	<b>Baustrukturtyp</b>	<b>nat. Zahl</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1) TYP</b>
<b>FLGES</b>	<b>Fläche der Block- / Blockteilfläche ohne Straßenfläche</b>	<b>Dez.-Zahl</b>	<b>9</b>	<b>1</b>	<b>1) FLALLE</b>
<b>VG</b>	<b>Versiegelungsgrad in %</b>	<b>Dez.-Zahl</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>1) VG</b>
PROBAU	bebaute versiegelte Fläche in %	Dez.-Zahl	5	1	0
PROVGU	unbebaute versiegelte Fläche in %	Dez.-Zahl	5	1	0
<b>REGENJA</b>	<b>Niederschlag Jahresmittel in mm</b>	<b>nat. Zahl</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>2)</b>
<b>REGENSO</b>	<b>Niederschlag Sommerhalbjahresmittel in mm</b>	<b>nat. Zahl</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>2)</b>
BELAG1	Unbebaut versiegelte Fläche, Belagsklasse 1	nat. Zahl	3	0	100
BELAG2	Unbebaut versiegelte Fläche, Belagsklasse 2	nat. Zahl	3	0	0
BELAG3	Unbebaut versiegelte Fläche, Belagsklasse 3	nat. Zahl	3	0	0
BELAG4	Unbebaut versiegelte Fläche, Belagsklasse 4	nat. Zahl	3	0	0
VGSTRASSE	Versiegelung der Straßenfläche	Dez.-Zahl	5	1	0
STR_BELAG1	Versiegelung der Straßenfläche, Belagsklasse 1	Dez.-Zahl	5	1	100
STR_BELAG2	Versiegelung der Straßenfläche, Belagsklasse 2	Dez.-Zahl	5	1	0
STR_BELAG3	Versiegelung der Straßenfläche, Belagsklasse 3	Dez.-Zahl	5	1	0
STR_BELAG4	Versiegelung der Straßenfläche, Belagsklasse 4	Dez.-Zahl	5	1	0
KAN_BEB	Tatsächlicher Anschlussgrad an die Kanalisation der bebauten Fläche	nat. Zahl	3	0	0
KAN_VGU	Tatsächlicher Anschlussgrad an die Kanalisation der unbebauten Fläche	nat. Zahl	3	0	0
KAN_STR	Tatsächlicher Anschlussgrad an die Kanalisation der Straßenfläche	nat. Zahl	3	0	0
<b>FELD_30</b>	<b>Nutzbare Feldkapazität 0- 30 cm in mm/dm (Vol-%)</b>	<b>nat. Zahl</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>3) Nfk30_dm</b>
<b>FELD_150</b>	<b>Nutzbare Feldkapazität 0- 150 cm in mm/dm (Vol-%)</b>	<b>nat. Zahl</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>3) Nfk150_dm</b>
<b>FLUR</b>	<b>Flurabstand in Meter</b>	<b>Dez.-Zahl</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>4) FLUR</b>
STR_FLGES	Straßenfläche der Block- / Blockteilfläche	Dez.-Zahl	9	1	0

Die Bezirksnummer eines Blocks ist in den ersten beiden Zeichen des Flächenschlüssels enthalten (Feld CODE).

Der Versiegelungsgrad VG wird von ABIMO nicht genutzt und wird nur für die nachträgliche Umrechnung der Verdunstung der unversiegelten Flächenanteils einer Blockfläche auf die gesamte Blockfläche benötigt.

Quellen der Daten in Tabelle 9:

- 1) Flächennutzung 2015 (Karten 06.01, 06.02, Ausgabe 2016)
- 2) Niederschlag (langj. Mittel 1961 - 1990) (Karten 04.08.2, 04.08.3, Ausgabe 1994)
- 3) Nutzbare Feldkapazität 2015 (Karte 01.06.2, Ausgabe 2018)
- 4) Flurabstand des Grundwassers 2009 (Karte 02.07, Ausgabe 2010)

Daten zur potenzielle Evapotranspiration sind nicht in der Eingangstabelle enthalten, sondern werden in der ABIMO-Konfigurationsdatei über die Nummern der alten Bezirke (Bezirke bis zum 01.01.2001) zugewiesen (Rachimov et al. 2009). In der Tabelle 10 sind die alten Bezirke und die bisher verwendete potenzielle Evapotranspiration aufgeführt. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 12 die Gebiete der alten Bezirke dargestellt.

Der entsprechende Abschnitt der ABIMO-Konfigurationsdatei hat die folgende Struktur:

```
<section name="PotentielleVerdunstung">
<item bezirke="15,16,18,19,20" etp="620" etps="500" />
<item bezirke="8,9,10,12,21,22,23" etp="630" etps="505" />
<item bezirke="13,14,17" etp="640" etps="515" />
<item bezirke="2,3,4" etp="650" etps="520" />
<item bezirke="1,5,6,7,11" etp="660" etps="530" />
```

Etp ist der Jahreswert, etps der Wert des hydrologischen Sommerhalbjahres (Mai bis Oktober).

Tabelle 10: Alte Bezirke und potenzielle Evapotranspiration

Bezirk Nummer	Bezirk Name	Potenzielle Evapotranspiration Jahr in mm	Potenzielle Evapotranspiration Sommerhalbjahr in mm
1	Mitte	660	530
2	Tiergarten	650	520
3	Wedding	650	520
4	Prenzlauer Berg	650	520
5	Friedrichshain	660	530
6	Kreuzberg	660	530
7	Charlottenburg	660	530
8	Spandau	630	505
9	Wilmerdorf	630	505
10	Zehlendorf	630	505
11	Schöneberg	660	530
12	Steglitz	630	505
13	Tempelhof	640	515
14	Neukölln	640	515
15	Treptow	620	500
16	Köpenick	620	500
17	Lichtenberg	640	515
18	Weißensee	620	500
19	Pankow	620	500
20	Reinickendorf	620	500
21	Marzahn	630	505
22	Hohenschönhausen	630	505
23	Hellersdorf	630	505



Abbildung 12: Karte der alten Bezirke mit Bezirksnummern und -namen

Daten zur Bewässerung sind ebenfalls nicht in der Eingangstabelle enthalten, sondern sind in der Software ABIMO intern mittels Nutzung und Typ festgelegt (Tabelle 11). Soll die Bewässerung geändert werden, ist eine Änderung und Neukompilierung des ABIMO-Quellcodes notwendig.

Tabelle 11: ABIMO Nutzung, Typ und Bewässerung

Nutzung	Typ	Bewässerung in mm/a
Wohnnutzung Mischnutzungen	Reihen- und Doppelhäuser mit Garten	75
	Freistehende Einfamilienhäuser mit Garten	75
	Villen und Mietvillen mit parkartigem Garten	75
	Verdichtung in Einzelhausgebieten, Mischbebauung mit Gärten und halbprivater Umgrünung	75
Gemeinbedarfs- und Sondernutzungen	Hochschule und Forschung	50
	Krankenhaus	50
	Kirche	50
Wochenendhäuser und kleingartenähnliche Nutzungen		75
Park, Grünfläche		50
Friedhof		100
Kleingarten		75
Baumschule/ Gartenbau		50

Die benötigten Daten zur Nutzung und Versiegelung werden bisher in einem Zyklus von ca. 5 Jahren SenSW aktualisiert, die Daten zur nutzbaren Feldkapazität von SenUVK. Die Aktualisierung der Daten zum Flurabstand ist ungewiss.

Der DWD stellt kostenfrei für ganz Deutschland u. a. Daten zum Niederschlag und zur potentiellen Evapotranspiration zur Verfügung. Für den nächsten 30-Jahreszeitraum 1991 bis 2020 sollten diese Daten Mitte 2021 zur Verfügung stehen. Die Daten müssen z. T. aufwendig dekodiert (z. B. Niederschlag), in das Koordinatensystem ETR89-33N transformiert und auf die Blöcke der ISU5 übertragen werden. Soweit bekannt, werden DWD-Niederschlagsdaten für die Jahre 1981 bis 2010 im Auftrag von SenSW derzeit für die Blockkarte ISU5 erarbeitet.

Für die Umrechnung der Verdunstung der unversiegelten Flächenanteile einer Blockfläche auf die gesamte Blockfläche wird der Versiegelungsgrad (Eingangstabelle Feld VG) benötigt. Die Verdunstung bezogen auf die gesamte Blockfläche berechnet sich nach der folgenden Formel:

Verdunstung gesamt [mm / a] = Verdunstung unversiegelt [mm / a] \* (1 - Versiegelungsgrad [%] / 100).

Die Kühlleistung eines Bodens ist annähernd proportional der Verdunstung. Die zur Verdunstung von Wasser benötigte Energie ist im relevanten Temperaturbereich etwas von der Temperatur abhängig (Tabelle 12).

Tabelle 12: Temperatur und Verdunstungsenergie je Liter Wasser <sup>3</sup>

Temperatur in °C	Verdunstungsenergie in Wh / l
10	688
20	682
25	647

Die Kühlenergie pro Jahr und Quadratmeter berechnet sich nach der folgenden Formel:

Kühlenergie [Wh / a / m<sup>2</sup>] = Verdunstung [mm / a / m<sup>2</sup>] \* Verdunstungsenergie [Wh / l] <sup>4</sup>

Da die Verdunstung stark von der Temperatur abhängig ist, kann als Referenztemperatur nicht die mittlere Jahrestemperatur (Berlin ca. 9,2 °C) verwendet werden. Auch die sommerliche Tagesmitteltemperatur ist nicht repräsentativ, da in der Nacht, vor allem durch die Vegetation, nur wenig Wasser verdunstet. Für die Karten (Anhang 10.2.2 und 10.2.3) wurde deshalb die Verdunstungsenergie / Kühlenergie bei einer Temperatur von 20 °C berechnet.

Aus der mittleren Kühlenergie in Wattstunden pro Jahr und Quadratmeter lässt sich die mittlere Kühlleistung in Watt pro Quadratmeter berechnen, indem die Energie durch die Anzahl der Stunden eines Jahres dividiert wird:

Kühlleistung [W / m<sup>2</sup>] = Kühlenergie [Wh / a / m<sup>2</sup>] / (365 \* 24 [h]).

Die Ergebnistabelle 13 wird z. T. von ABIMO erzeugt, z. T. müssen die Felder nach den oben genannten Formeln manuell berechnet werden.

---

<sup>3</sup> Die Formel für die Verdampfungsenthalpie H ist bei der Temperatur T in Kelvin  
 $H = 50,09 - 0,9298 * T / 1000 - 65,19 * (T / 1000)^2$  in kJ/mol (siehe Wikipedia 2020c)  
(zur Umrechnung der Einheiten siehe Wikipedia 2020a und 2020b)

<sup>4</sup> Eine Verdunstung von 1 mm / a entspricht einer Verdunstung von 1 l/m<sup>2</sup>/a.

Tabelle 13: ABIMO Felder der Ergebnistabelle

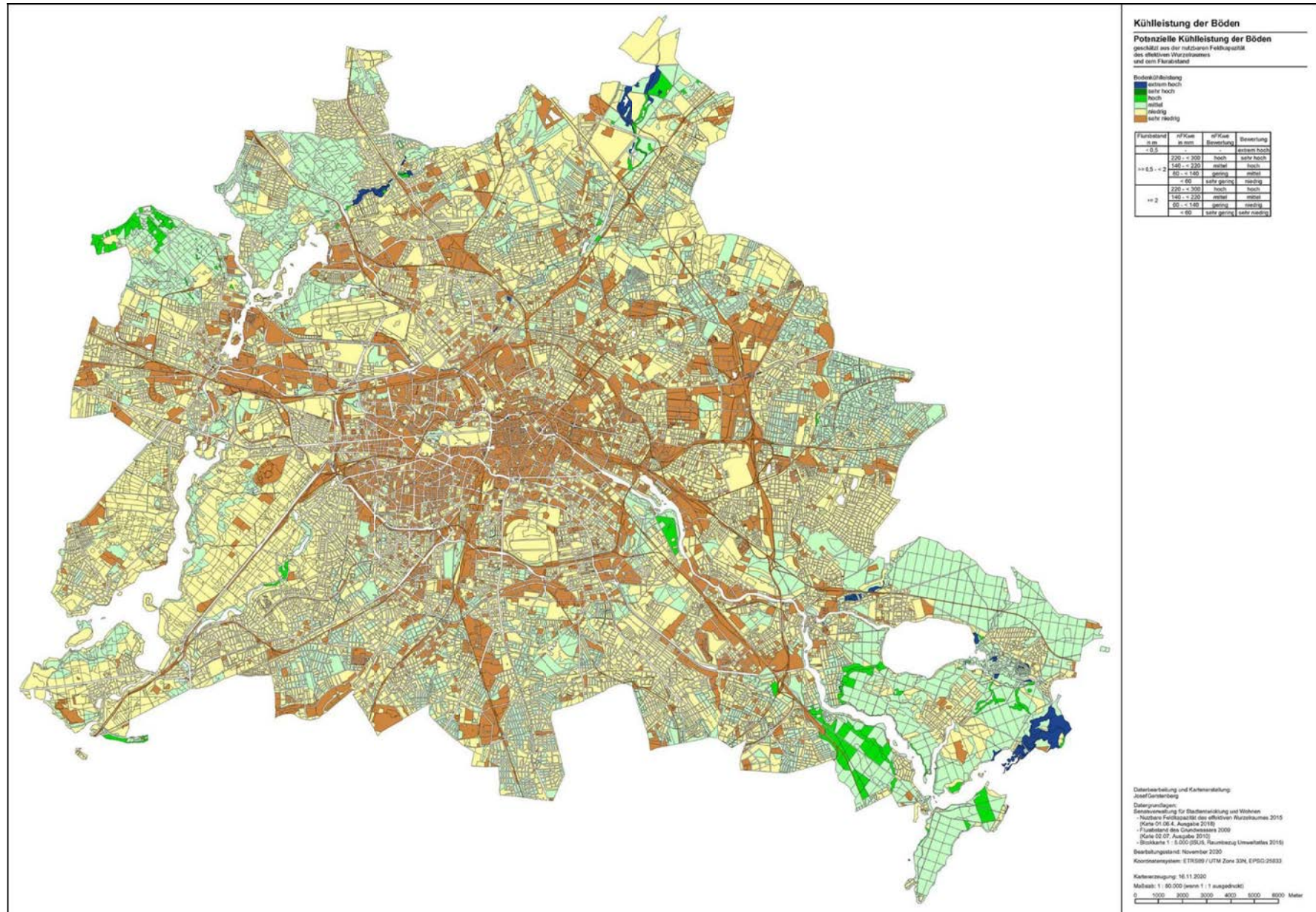
Feldname	Beschreibung	Feldtyp	Feldbreite	Dez.-Stellen	Hinweise
R	Gesamtabfluss in mm/a	Dez.-Zahl	8	3	Ergebnis ABIMO
Row	Oberflächenabfluss in mm/a	Dez.-Zahl	5	3	
Ri	Versickerung in mm/a	Dez.-Zahl	8	3	
Rvol	Gesamtabfluss Volumen in cm <sup>3</sup> /s/a	Dez.-Zahl	10	3	
Rowvol	Oberflächenabfluss Volumen in cm <sup>3</sup> /s/a	Dez. Zahl	5	3	
Rivol	Versickerung Volumen in cm <sup>3</sup> /s/a	Dez.-Zahl	10	3	
Flaeche	Gesamtfläche in m <sup>2</sup>	Dez.-Zahl	7	0	
Verdunstun	Verdunstung des unversiegelten Flächenanteils in mm/a	Dez.-Zahl	7	3	manuell berechnet
Verd_flg	Verdunstung der Gesamtfläche in mm/a	Dez.-Zahl	7	3	
Kwh	Bodenkühlenergie des unversiegelten Flächenanteils in kWh/m <sup>2</sup> /a	Dez.-Zahl	7	3	
Kwh_flg	Bodenkühlenergie der Gesamtfläche in kWh/m <sup>2</sup> /a	Dez.-Zahl	7	3	

Das Ergebnis der Berechnung der Verdunstung mittels ABIMO mit den aktuell verfügbaren Daten und die Berechnung der Bodenkühlenergie aus der Verdunstung nach dem o. g. Verfahren kann so zusammengefasst werden:

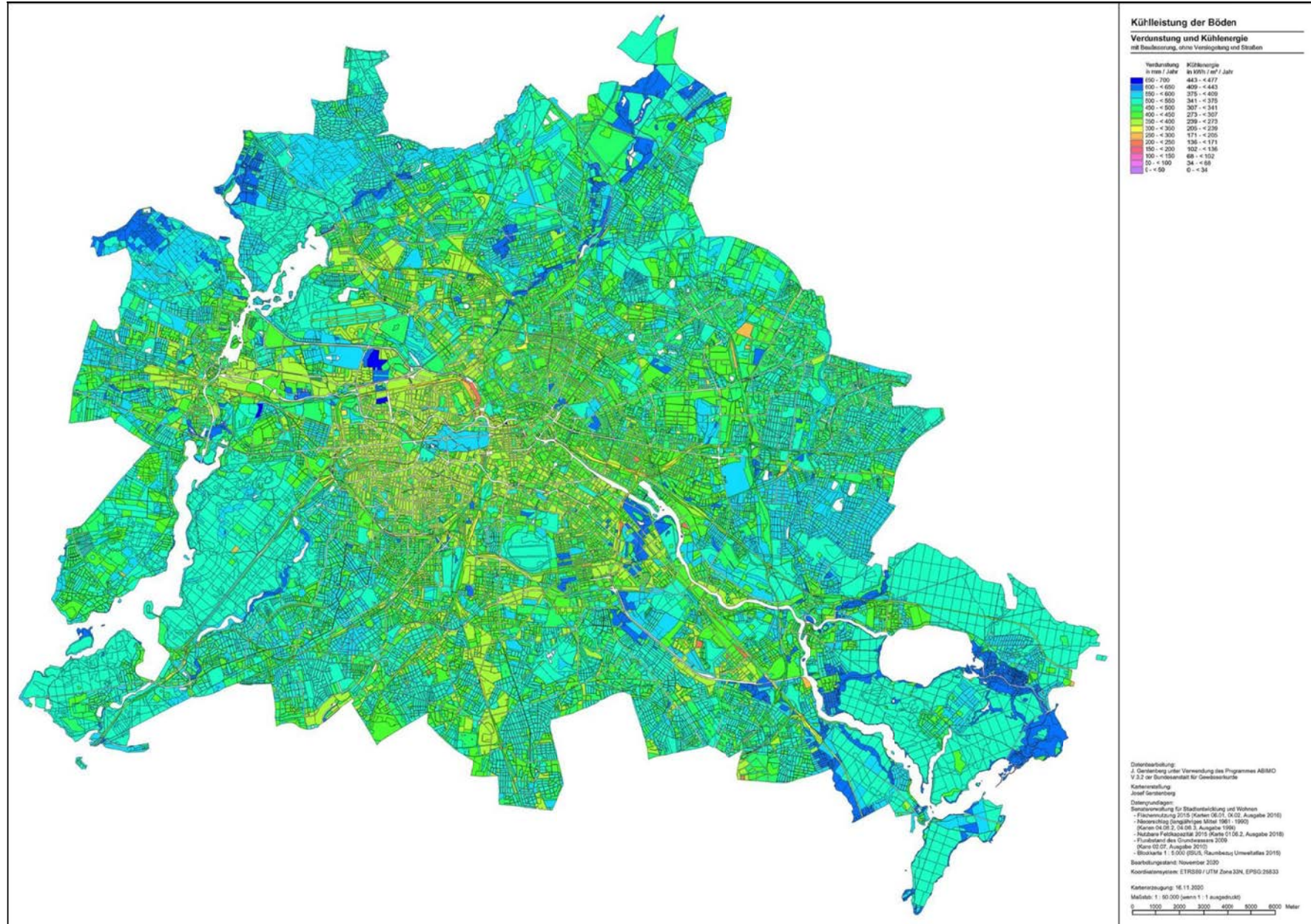
Die mittlere Verdunstung der unversiegelten Flächenanteile der Blockflächen (ohne Straßen und Gewässer, d. h. der Freiflächen ohne Gewässer) beträgt für Berlin im Mittel 365 mm/a. Dies entspricht einer mittleren Kühlenergie von 249 kWh/m<sup>2</sup>/a bzw. 28,4 W/m<sup>2</sup> und für ganz Berlin 184,4 TWh/a und damit einer mittleren permanenten Kühlleistung von 21 GW.

## 10.2 Erste Bodenkühlleistungskarten für Berlin

10.2.1 Potenzielle Bodenkühlleistungskarte der Böden auf Basis der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes und des Flurabstandes



10.2.2 Bodenkühlleistungskarte des ABIMO-Modells ohne Versiegelung und mit Bewässerung unter Einbeziehung der Vegetation





10.2.3 Bodenkühlleistungskarte des ABIMO-Modells mit Versiegelung und mit Bewässerung unter Einbeziehung der Vegetation

