



Kühlleistung von Böden

Leitfaden zur Einbindung in stadtklimatische Konzepte
in NRW

LANUV-Arbeitsblatt 29



Kühlleistung von Böden

Leitfaden zur Einbindung in stadtklimatische Konzepte in NRW

LANUV-Arbeitsblatt 29

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Recklinghausen 2015



IMPRESSUM

Herausgeber	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen Telefon 02361 305-0, Telefax 02361 305-3215 E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de
Autoren	Dr. Michael Kastler, Dipl.-Geogr. Charlotte Molt, Dipl.-Geogr. Carolin Kaufmann-Boll (ahu AG Wasser · Boden · Geomatik) Dr. Monika Steinrücke (Ruhr-Universität Bochum, Geographisches Institut, Klimatologie)
Redaktion	Dr. Heinz Neite, Dr. Silke Höke (LANUV)
Titelfoto	ArTo / fotolia.com
ISSN	2197-8336 (Print), 1864-8916 (Internet), LANUV-Arbeitsblätter
Informationsdienste	Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter • www.lanuv.nrw.de Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im • WDR-Videotext Tafeln 177 bis 179
Bereitschaftsdienst	Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV (24-Std.-Dienst) Telefon 0201 714488

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Vorwort

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

Nordrhein-Westfalen ist durch viele Großstädte und Ballungsräume mit hoher Einwohnerdichte geprägt. Gerade hier sind die Folgen des Klimawandels besonders deutlich zu spüren. So liegen schon heute die Temperaturen vor allem während längerer Hitzeperioden deutlich höher als im geringer bebauten Umland. Der dauerhafte Hitzestress kann vor allem bei älteren Menschen und Kindern zu gesundheitlicher Beeinträchtigung führen. Auch wird künftig zunehmend mit Problemen durch Starkregenereignisse gerechnet. Eine nachhaltige Stadt- und Siedlungsentwicklung muss sich deshalb mit den absehbaren Auswirkungen des Klimawandels auf den Siedlungsraum auseinandersetzen. In städtischen Klimaanpassungsmaßnahmen nehmen Freiräume bzw. Grünflächen eine zentrale Rolle ein. Sie erfüllen in urbanen Gebieten neben der Erholungsfunktion weitere wichtige Funktionen für die Bevölkerung, unter anderem für die Frischluft- und Kaltluftproduktion, und tragen damit zur Reduktion von Hitzestress bei.

Unversiegelte Böden haben als Wasserspeicher und Wasserlieferant für die Pflanze einen bedeutsamen Einfluss auf das Stadtklima, weil mit der Verdunstung von Wasser durch die Pflanze und von der Bodenoberfläche eine fühlbare Abkühlung der umgebenden Luft verbunden ist. In unseren Städten besteht ein oftmals ungenutztes Potenzial zur Nutzung und Optimierung der Bodenkühlleistung. Besonders leistungsfähige Böden sollten daher in stadtklimatisch geeigneter Lage (z.B. in Frischluftschneisen) von Bebauung und Versiegelung freigehalten werden. Durch geeignete Anpassungs- und Optimierungsmaßnahmen können Böden in der Stadt und in angrenzenden Bereichen zur Regulierung der städtischen Überhitzung beitragen.

Der vorliegende Leitfaden beschreibt, wie die Bodenkühlleistung in stadtklimatischen Konzepten genutzt und der Bodenwasserspeicher in der Stadt gezielt qualitativ und quantitativ verbessert werden kann. Der Leitfaden wendet sich insbesondere an die Kommunen. Darüber hinaus soll er aber auch weitere mit dem Thema befasste Personen aus Politik, Planungsbüros oder auch der interessierten Öffentlichkeit über das Potenzial der Böden zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels informieren.

Ich danke allen Fachleuten aus Wissenschaft und Verwaltung, die an der Erstellung des Leitfadens mitgewirkt haben, für ihre engagierte Mitarbeit.

Eine aufschlussreiche Lektüre wünscht Ihnen

Ihr



Dr. Thomas Delschen

Präsident des Landesamtes für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Inhalt

1	Einführung	9
2	Klimaanpassung in der Stadt	11
2.1	Strategien zur Bewältigung des Klimawandels	11
2.2	Klimaanpassung in den Kommunen	12
2.2.1	Flächenschutz durch nachhaltigen Raumentwicklung	12
2.2.2	Planungsrechtliche Verankerung der Klimaanpassung im Rahmen von stadtklimatischen Konzepten	14
2.2.3	Beispiele für Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel	16
3	Boden als Einflussgröße im Stadtklima unter besonderer Berücksichtigung der Bodenkühlleistung	21
3.1	Grundprinzip der potenziellen Bodenkühlleistung	22
3.2	Einflüsse auf die Verdunstung	24
3.3	Boden als „Ökosystemdienstleister“	28
3.3.1	Ökonomisches Potenzial der Bodenkühlleistung	28
3.3.2	Berücksichtigung der Bodenkühlleistung im Bebauungsplan der Kommune	29
4	Maßnahmen zum Erhalt und zur Verbesserung der Bodenkühlleistung	33
4.1	Maßnahmenpfad „Boden“	33
4.2	Maßnahmenpfad „Pflanze“	39
4.3	Maßnahmenpfad „Bewässerung“	41
4.4	Maßnahmenpfad „Urbane Landschaftsgestaltung“	43
5	Integration potenzieller Bodenkühlleistungen in kommunale Klimaanpassungskonzepte	45
6	Glossar	53
7	Literatur	54
	Anhang 1: Vorgehen zur Ermittlung der Verdunstungsleistung eines Bodens und Datengrundlagen	59
	Anhang 2: Wirkkette „Niederschlag – Boden – Luft“: Erkenntnisse aus stationären Messungen	64
	Anhang 3: Beschreibung der Böden an den Klima-messstationen nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (AD-HOC-AG BODEN 2005)	67

Abbildungen

Abb. 1:	Planungsrechtliche Instrumente für Klimafolgenanpassungsmaßnahmen auf den unterschiedlichen Ebenen der Verwaltung (AHU AG)	15
Abb. 2:	Anteil der durch Evapotranspiration von Wasser- und Landoberfläche umgewandelten Energie an der solaren Energieeinstrahlung auf die Erde (nach SCHMIDT 2011)	22
Abb. 3:	Weg des Wassers Atmosphäre – Boden – Pflanze	24
Abb. 5:	Speicherstände der nutzbaren Feldkapazität (nFKWe) bei einer effektiven Durchwurzelungstiefe von 60 cm in Abhängigkeit von der Bodenart im Extremjahr 1976 (aus: DAMM 2011)	27
Abb. 6:	Speicherstände der nutzbaren Feldkapazität (nFKWe) bei einer effektiven Durchwurzelungstiefe von 80 cm in Abhängigkeit von der Bodenart im Extremjahr 1976 (aus: DAMM 2011)	28
Abb. 7:	Einteilung der Teilflächen für den Ist-Zustand, Jörgensmannwiese in Bottrop (Luftbild: STADT BOTTROP 2008) (aus: DAMM 2011)	30
Abb. 8:	Reduzierung der Verdunstungsleistung der Flächen durch die geplante Bebauung der Jörgensmannwiese in Bottrop, links: Ist-Zustand, rechts: B-Plan (Luftbild: STADT BOTTROP 2008) (aus: DAMM 2011)	30
Abb. 9:	Anpassung des B-Plans nach Berücksichtigung verdunstungsstarker Böden und Erhalt dieser als Grünflächen. links: Ist-Zustand, rechts: angepasster B-Plan (Luftbild: STADT BOTTROP 2008) (aus: DAMM 2011; angepasst)	32
Abb. 10:	Kumulierte Auswirkungen der Optimierung von Bodeneigenschaften auf den Speicherfüllstand der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe), berechnet für das Referenzjahr 1974 (30 % aller Sommer des Referenzzeitraums 1960 bis 1990 sind trockener als der Sommer 1974; modifiziert nach DAMM 2011)	36
Abb. 11:	Ablaufschema zur Integration potenzieller Bodenkühlleistungen in stadtklimatische Konzepte	46
Abb. 12:	Planungshinweiskarte aus klimatologischer Sicht. Stadtklimakataster Neuss (STADT NEUSS 2014)	47
Abb. 13:	Thematische Karte zur Wasserspeicherkapazität. Bodenbelastungskataster Neuss (GD NRW 2008)	48
Abb. 14:	Verschneidung der Planungshinweiskarte aus klimatologischer Sicht mit der Karte zur Wasserspeicherkapazität. (STADT NEUSS 2014)	49

Abb. 15: Ergebniskarte zur Integration der Bodenkühlleistung in das Klimaanpassungskonzept der Stadt Neuss (STADT NEUSS 2014)	50
Abb. 16: Austauschprozesse im ENVI-met Modell (verändert nach BRUSE & FLEER 1998)	51

Tabellen

Tab. 1: Zuordnung geeigneter Anpassungslösungen für das Problemfeld „Hitzebelastung“, stadtklimatische Aspekte (MKULNV NRW 2011) erweitert um den neuen Baustein „Kühlungspotenzial des Bodens“ (fett kursiv)	18
Tab. 2: Tabellarische Übersicht der Zuordnung geeigneter Anpassungslösungen für das Problemfeld „Hitzebelastung“, siedlungswasserwirtschaftliche Aspekte (MKULNV NRW 2011) erweitert um den neuen Baustein „Kühlungspotenzial des Bodens“ (fett kursiv)	20
Tab. 5: Jährliche Verdunstung als Ökosystemdienstleistung im Vergleich von Ist- Zustand und B-Plan, Jörgensmannwiese in Bottrop (aus: DAMM 2011)	31
Tab. 6: Kumulierte Auswirkungen der Optimierung von Bodeneigenschaften auf die Höhe der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe, modifiziert nach DAMM 2011)	36
Tab. 7: Verbesserungsmaßnahmen für den Wirkungsweg Boden	37
Tab. 8: Mittlere jährliche Evapotranspirationsleistungen verschiedener Pflanzen (Zusammenstellung nach WOHLRAB et al. 1992; LARCHER 2001; DWA 2002 aus HARLAß 2008)	39
Tab. 9: Verbesserungsmaßnahmen für den Maßnahmenpfad „Pflanze“	40
Tab. 10: Verbesserungsmaßnahmen für den Maßnahmenpfad „Bewässerung“	42
Tab. 11: Verbesserungsmaßnahmen für den Maßnahmenpfad „Urbane Landschaftsgestaltung“	44

1 Einführung

Klimawandel ist schon lange kein Problem mehr, das sich nur auf schmelzende Gletscher, steigende Meeresspiegel oder die Ausbreitung der Wüsten beschränkt. Insbesondere in unseren Städten sind die Folgen des Klimawandels zu spüren. Hier liegen die durchschnittlichen Temperaturen bereits heute deutlich höher als im geringer bebauten Umland (ΔT bis zu 10 K) mit der Folge von Hitzestress insbesondere für ältere Menschen und Kinder (LANUV 2013).

Allein im August 2003 forderte eine anhaltende Hitzeperiode insgesamt 70.000 Tote¹ in Westeuropa, davon 7.000 in Deutschland. Am stärksten betroffen waren die über 70-Jährigen, insbesondere Frauen, sowie Menschen mit wenig Einkommen und solche mit chronischen Erkrankungen (HOFFMANN 2012).

Nach neueren Analysen wird sich die Klimaänderung aller Voraussicht nach in der Zukunft noch verschärfen. Mit Blick auf die zu erwartenden Klimaveränderungen in Nordrhein-Westfalen hat das LANUV in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst ein Ensemble von 19 verschiedenen regionalen Klimamodellen für das Treibhausgas-Emissionsszenario A1B ausgewertet. Folgende Veränderungen für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971-2000 wurden projiziert:

- Zunahme der mittleren Jahrestemperatur und der Mitteltemperatur für die meteorologischen Jahreszeiten,
- Zunahme von Sommertagen, heißen Tagen und Tropennächten,
- Abnahme von Frosttagen,
- Abnahme der Niederschlagssumme im meteorologischen Sommer und Zunahme im meteorologischen Winter.

Gerade in städtischen Bereichen wird künftig zunehmend mit Problemen durch Hitze und Starkregenereignisse gerechnet (MKULNV NRW 2011). Eine nachhaltige Stadt- und Siedlungsentwicklung muss sich deshalb mit den absehbaren Auswirkungen des Klimawandels auf den Siedlungsraum wie z.B. der zunehmenden städtischen Überhitzung auseinandersetzen. In städtischen Klimaanpassungsmaßnahmen nehmen Freiräume bzw. Grünflächen eine zentrale Rolle ein. Sie erfüllen in urbanen Gebieten neben der Erholungsfunktion weitere wichtige Funktionen für die Bevölkerung, u.a. für die Frischluft- und Kaltluftproduktion, die sich auch den sogenannten „Ökosystemdienstleistungen“ zuordnen lassen.

Weil mit der Verdunstung von Wasser durch die Pflanze und von der Bodenoberfläche eine fühlbare Abkühlung der umgebenden Luft verbunden ist, haben die Eigenschaften der Böden als Wasserspeicher und Wasserlieferant für die Pflanze einen bedeutsamen Einfluss auf das Stadtklima.

Insbesondere im urbanen Raum besteht ein oftmals ungenutztes Potenzial zur Nutzung und Optimierung der Bodenkühlleistung. Einerseits sollten besonders leistungsfähige Böden in stadtklimatisch geeigneter Lage (z.B. in Frischluftschneisen) erhalten, d.h. von Bebauung und Versiegelung freigehalten werden; andererseits können Böden in der Stadt und angren-

¹ Todesfälle, die zusätzlich zu den im statistischen Mittel des Jahresverlaufs zu erwartenden Todesfällen auftraten.

zenden Bereichen durch Anpassungs- und Optimierungsmaßnahmen zur Regulierung der städtischen Überhitzung beitragen.

Vor diesem Hintergrund hat das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) in Zusammenarbeit mit Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Verwaltung einen Leitfaden erarbeitet, in dem beschrieben ist, wie die potenzielle Bodenkühlleistung in stadtklimatischen Konzepten genutzt und der Bodenwasserspeicher in der Stadt gezielt qualitativ und quantitativ verbessert werden kann.

Entsprechende Maßnahmen können ggf. durch spezielle Förderprogramme von Land, Bund oder EU gefördert werden.

- Für Untersuchungen und vorbereitende Maßnahmen zum Erhalt und Verbesserung der Klimaschutzfunktion des Bodens können nach der „Richtlinien über die Gewährung von Zuwendungen für die Gefahrenermittlung und Sanierung von Altlasten sowie für weitere Maßnahmen des Bodenschutzes“ durch Kreise, kreisfreie Städte und Gemeinden Zuwendungen bei den Dezernaten 52 der regional zuständigen Bezirksregierungen beantragt werden.
- Im Rahmen der EFRE-Förderung (Prioritätenachse 4) können auf der Grundlage integrierter Handlungskonzepte für die Entwicklung benachteiligter Stadtteile und Quartiere im Zusammenhang mit der Flächenreaktivierung auch Maßnahmen zur Verbesserung stadtklimatischer Bedingungen durch Unterstützung der Bodenkühlleistung und Wiederherstellung der Bodenfunktionen durch Entsiegelungsmaßnahmen als förderfähig anerkannt werden.
- In Frage kommen hier des Weiteren Förderprogramme des Bundes im Rahmen des Klimaschutzes, z.B. „Klimaschutzinitiative – Klimaschutzprojekte in sozialen, kulturellen und öffentlichen Einrichtungen“ des BMUB oder zur Regenwasserversickerung. Aufgrund des innovativen Charakters des Themas können auch Forschungsprogramme eingebunden werden. Nicht zuletzt lassen sich Maßnahmen, z.B. im Rahmen der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung, auch gemeinsam mit Investoren tragen und umsetzen.

Der Leitfaden wendet sich insbesondere an die Kommunen. Darüber hinaus soll er aber auch weitere mit dem Thema befasste Personen aus Politik, Planungsbüros oder auch der interessierten Öffentlichkeit über das Potenzial der Böden zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels informieren.

2 Klimaanpassung in der Stadt

2.1 Strategien zur Bewältigung des Klimawandels

In Städten und Ballungszentren werden durch hohes Verkehrsaufkommen, eine dichte Bebauung und zahlreiche Industrieprozesse viele Treibhausgase emittiert, gleichzeitig sind sie vom Klimawandel besonders betroffen (KUTTLER 2004). Eine vorausschauende Stadtplanung und -entwicklung ist daher sowohl als Beitrag zum Klimaschutz als auch als Strategie zur Minderung bzw. Anpassung an unvermeidbare Folgen des Klimawandels erforderlich.

Zur Bewältigung des Klimawandels und dessen Folgen lassen sich zwei grundsätzliche Strategien unterscheiden:

1) Klimaschutz (Mitigation)

Klimaschutz beinhaltet die Vermeidung weiterer anthropogen bedingter Klimaänderungen durch Reduzierung von Treibhausgasemissionen sowie Erhalt oder Schaffung von Kohlenstoffsinken.

Der Klimaschutz ist seit Langem z.B. in Form von Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgase oder durch Programme zur Energie- und Ressourceneinsparung fester Bestandteil der Kommunalpolitik in Nordrhein-Westfalen.

2) Anpassung an die Folgen des Klimawandels (Adaptation)

Anpassung beinhaltet den Schutz der sozialen, ökonomischen und ökologischen Systeme vor den Auswirkungen des Klimawandels und die Verringerung der gesellschaftlichen Verwundbarkeit bzw. Erhöhung der gesellschaftlichen Belastbarkeit (Resilienz) gegenüber Klimafolgen (SUSTAINABILITY CENTER BREMEN 2009).

Den nicht mehr abwendbaren Folgen des Klimawandels stellt man sich auf kommunaler Ebene erst in den letzten Jahren. Durch Extremwetterereignisse – etwa die Hitzesommer des vergangenen Jahrzehnts mit Rekordtemperaturen in den Städten – sind die Folgen des Klimawandels stärker als bisher in das Bewusstsein der städtischen Bevölkerung gerückt. Immer mehr Kommunen beschäftigen sich mit Fragen der Klimawandelanpassung (z.B. LANUV 2013). Durch einen kontinuierlichen Wissensaustausch zwischen Forschung und Praxis sowie zwischen Politik und Bevölkerung muss das Risikobewusstsein gefördert und die Akzeptanz für Maßnahmen gesichert werden (MKULNV NRW 2011).

2.2 Klimaanpassung in den Kommunen

Warum ist Klimaanpassung eine wichtige Aufgabe der Kommunen?

In Städten wird der raumgreifende Charakter der Klimafolgen deutlich sichtbar: Sie vereinen in sich Räume der Entstehung und der Betroffenheit für klimatische Veränderungen (BPB 2007). Beispielhaft sei hier die erhöhte Belastung von Menschen, Tieren und Pflanzen genannt, die von der Ausbildung von Wärmeinseln in Kombination mit der Verschlechterung der Luftqualität aufgrund von Emissionen und des verminderten Luftaustauschs mit dem Stadtumland ausgeht. Dort wo Menschen eng zusammenleben und eine funktionierende Infrastruktur sehr wichtig ist, steigt die Anfälligkeit für Störungen durch Wetterereignisse. Unter dem Aspekt der Bodenkühlleistung sind hier vor allem steigende Temperaturen und häufigere Starkregenereignisse relevant.

Planerisches Handeln durch den gezielten Aufbau von Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen ist deshalb für die Reduzierung der Vulnerabilität von zentraler Bedeutung (BMVBS/BBSR 2009a).

Die klimatischen Veränderungen werden einen erheblichen Einfluss auf die Raumnutzung haben. Deshalb muss sich die Raumplanung zukünftig grundsätzlich in der Klimaanpassung engagieren (SUSTAINABILITY CENTER BREMEN 2009). Insbesondere in den Städten und Stadtregionen kommt der vorsorgenden Planung und der Durchführung von präventiven Maßnahmen eine große Bedeutung zu. Im Mittelpunkt muss dabei stehen, die zu erwartenden Folgen des Klimawandels in ihren Wirkungen abzumildern (MUNLV NRW 2009).

2.2.1 Flächenschutz durch nachhaltigen Raumentwicklung

Der Klimawandel ist in seiner Bedeutsamkeit für die Raumordnung und Stadtplanung nicht immer automatisch zu erkennen. Natürlich hat jedes Ereignis eine räumliche Dimension des Auftretens und breitet sich über bestimmte Verbreitungspfade (Boden, Wasser, Luft) im Raum aus, aber nicht jede Klimafolge ist hier unmittelbar relevant für die Raumplanung (BMVBS/BBSR 2009d).

Eine **Raumbedeutsamkeit** nach dem Raumordnungsgesetz (ROG) ist gegeben, wenn durch Pläne, Maßnahmen oder Vorhaben

- Raum in Anspruch genommen wird oder
- die Entwicklung eines Gebietes oder
- die Funktion eines Gebietes beeinflusst wird (§ 3 Abs. 1. S. 1. Nr. 6 ROG).

Vermeidungs- und/oder Bewältigungsstrategien, die mindestens eines dieser Kriterien erfüllen, sind damit der überörtlichen und überfachlichen Steuerung durch die **Raumordnung auf Ebene der Regional- und Landesplanung** zugänglich.

Es wird erwartet, dass die räumlichen Auswirkungen des Klimawandels die bauliche und sonstige Nutzung des Bodens einschränken und/oder Flächen für besondere Vorkehrungen gegenüber den Einwirkungen des Klimawandels benötigt werden (BMVBS/BBSR 2009a). Auf **kommunaler Ebene** müssen daher Anpassungsmaßnahmen im Rahmen der **Bauleitplanung** berücksichtigt werden. (§ 1 Abs. 5 BauGB).

Eine wichtige Funktion für die Anpassung an den Klimawandel erfüllen räumliche Leitbilder, da sie vor dem Hintergrund der Komplexität und Unsicherheit in den Aussagen zum Klimawandel Orientierung bieten und dabei helfen können, Prioritäten zu setzen (BMVBS/BBSR 2009d).

Die Stellung dieses Aspekts wird auch mit der vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossenen „Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ deutlich (BMVBS/BBSR 2009d). Dort heißt es:

„Räumliche Planung kann mit den bereits bestehenden rechtlichen und planerischen Instrumenten sowohl Klimaschutz als auch Anpassung unterstützen. Möglicherweise häufiger auftretende Naturgefahren können dazu führen, dass natürliche Ressourcen nur noch eingeschränkt genutzt werden können. Gleichzeitig besteht ein hoher Nutzungsdruck, da Anpassungsmaßnahmen oft ebenfalls Raum beanspruchen. Die Raumplanung kann mit der Entwicklung von **Leitbildern** für anpassungsfähige und belastbare (resiliente) Raumstrukturen eine Vorreiterrolle übernehmen, die gegenüber den Auswirkungen aller gesellschaftlichen Veränderungsprozesse auf die Raumstruktur robust und flexibel reagiert (BUNDESREGIERUNG 2008).“

Das Raumordnungsgesetz definiert den **Aufgabenbereich und die Leitvorstellung der Raumordnung**. Sie erstrecken sich von der Abstimmung unterschiedlicher Anforderungen an den Raum, über den Ausgleich von Konflikten der jeweiligen Planungsebenen bis hin zur Vorsorge für einzelne Nutzungen und Funktionen des Raums (§§ 1 und 2 ROG).

Maßgabe dafür ist die **Leitvorstellung der nachhaltigen Raumentwicklung**. Sie bringt die sozialen und wirtschaftlichen Ansprüche an den Raum mit seinen ökologischen Funktionen in Einklang und führt zu einer dauerhaften, großräumig ausgewogenen Ordnung mit gleichwertigen Lebensverhältnissen in den Teilräumen (§ 1 Abs. 2 ROG).

Bezogen auf die Wirkungen des Klimawandels soll die Raumordnung den räumlichen Erfordernissen des Klimaschutzes mittels Maßnahmen der Anpassung Rechnung tragen (§ 2 Abs. 2, Nr. 6 ROG).

Das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung ist mit der Einsicht verbunden, dass auch moderne Gesellschaften vom Aufrechterhalten ökologischer Systeme abhängen und nachhaltig nur funktionieren können, wenn sie die Systemressourcen nicht über Gebühr belasten (SUSTAINABILITY CENTER BREMEN 2009). Aufgrund der elementaren Bedeutung des Klimas und dessen Auswirkungen für Gesellschaft, Ökonomie und Umwelt kann die Anpassung der Raumstruktur an die Folgen des Klimawandels als wesentlicher Bestandteil des Leitbilds einer nachhaltigen raum- bzw. städtebaulichen Entwicklung interpretiert werden (BMVBS/BBSR 2009d).

2.2.2 Planungsrechtliche Verankerung der Klimaanpassung im Rahmen von stadtklimatischen Konzepten

Alle Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel bedürfen einer planerischen Vorbereitung sowie einer auf Instrumenten der räumlichen Planung basierenden Umsetzung (STADT BAD LIEBENWERDA 2013). Förmliche, d.h. auf gesetzlicher Regelung basierende Instrumente bestehen von der Landesebene bis hin zur kommunalen Ebene (vgl. Abb. 1).

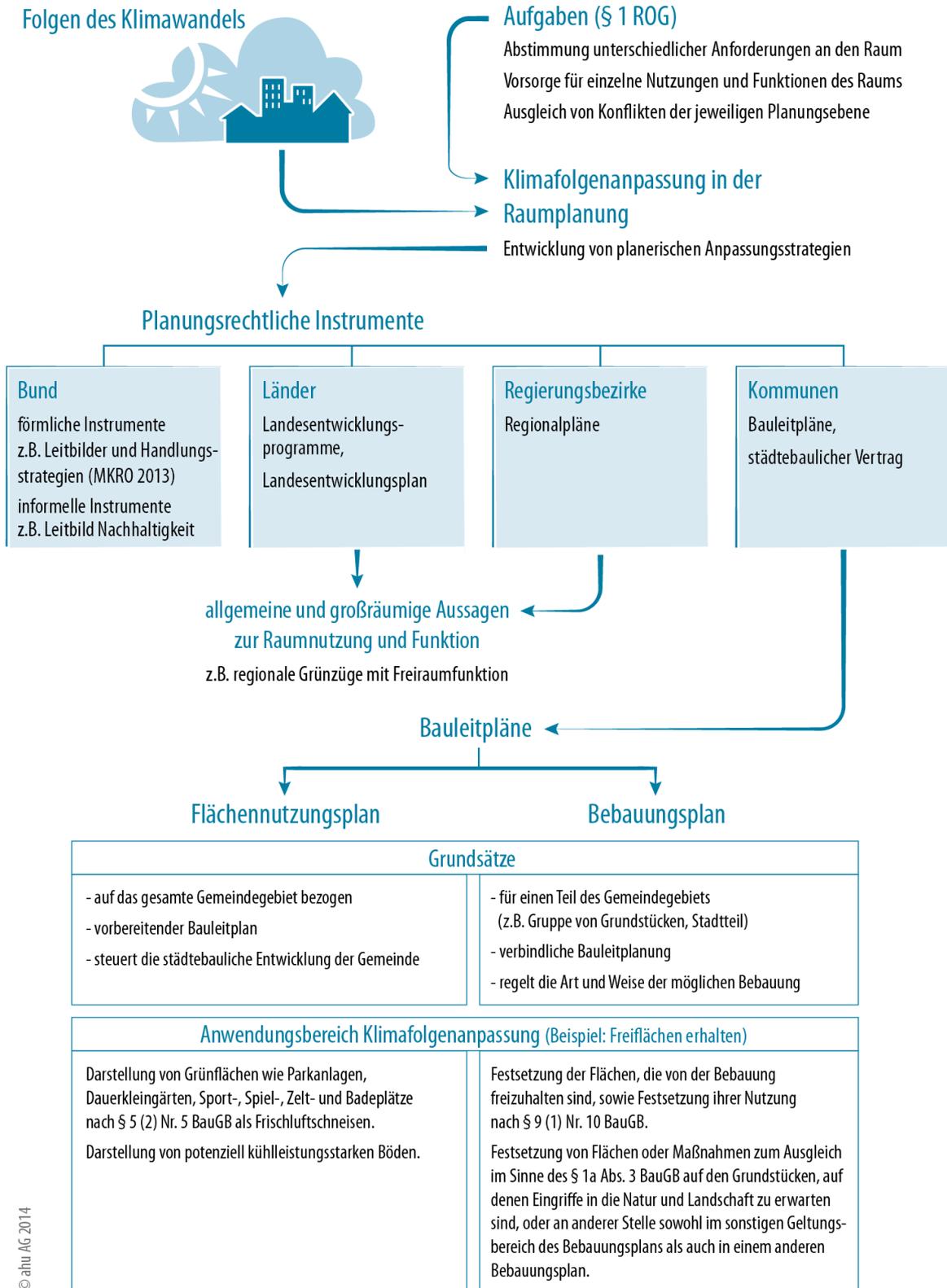
Auf der **Ebene des Landesentwicklungsplans** (LEP) Nordrhein-Westfalens werden die mittel- und langfristig strategischen Ziele zur räumlichen Entwicklung des Landes formuliert. Sie geben den Rahmen für die Entwicklung der Raumordnungspläne der Landes- und Regionalplanung vor und greifen Klimaschutz und -anpassung auf. In einem eigenen Kapitel des LEP sollen verschiedene Maßnahmen aufgelistet werden, die zur Milderung von Hitzefolgen in Siedlungsbereichen und damit zur Klimaanpassung beitragen (Stand 25.06.2013: Kap. 4 LEP-Entwurf NRW).

In den **Raumordnungsplänen** Nordrhein-Westfalens soll daher festgelegt werden, welche räumlichen Erfordernisse der Klimaschutz und die Anpassung an den Klimawandel haben (§ 12 Abs. (6) LPIG NRW). Dahinter steht u.a. die Absicht, die in §§ 3 und 6 des Nordrhein-Westfälischen Klimaschutzgesetzes genannten Klimaschutzziele als raumbezogene Ziele umzusetzen. Die kommunale Planungsebene erhält damit den Auftrag, diese Ziele zu konkretisieren (§ 12 Abs. (6) LPIG NRW).

Für die **kommunale Ebene** fordert deshalb das Baugesetzbuch eine nachhaltige städtebauliche Entwicklung mit dem Ziel, „den Klimaschutz und die Klimaanpassung, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern“ (§ 1 Abs. 5 BauGB).

Das BauGB zählt zu den im Flächennutzungsplan darstellbaren Flächen insbesondere „Anlagen, Einrichtungen und sonstigen Maßnahmen, die der Anpassung an den Klimawandel dienen“ (§ 5 Abs. 2 S. 1 Nr. 2c) BauGB). Nicht zuletzt geht das BauGB bereits bei der Aufstellung von Bauleitplänen (§ 1 Abs. 6 S. 1 Nr. 1 BauGB) sowie bei den Vorschriften zu städtebaulichen Sanierungsmaßnahmen auf Gebiete mit Missständen bezüglich der „Anforderungen an gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse“ ... „auch unter Berücksichtigung der Belange des Klimaschutzes und der Klimaanpassung“ ein (§ 136 Abs. 2 sowie Abs. 3 S. 1 Nr. 1h) BauGB).

Raumplanung



© ahw AG 2014

Abb. 1: Planungsrechtliche Instrumente für Klimafolgenanpassungsmaßnahmen auf den unterschiedlichen Ebenen der Verwaltung (AHU AG)

Auf kommunaler Ebene stellt der Flächennutzungsplan einen vorbereitenden Bauleitplan dar und ermöglicht, bezogen auf das gesamte Gemeindegebiet, die Ausweisung von zukünftigen Nutzungen (BMVBS/BBSR 2009a). Insbesondere mit Blick auf die Erarbeitung von Konzepten von Klimaanpassungsmaßnahmen in Städten ist die Abstimmung des Flächennutzungsplans mit den Nachbarkommunen angebracht, um beispielsweise Frischluftschneisen koordiniert von zukünftiger Bebauung freihalten zu können.

Der Bebauungsplan ist das Instrument zur konkreten Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen, da hier Aussagen zur Art und zum Maß der baulichen Nutzung sowie zur Bauweise getroffen werden. Die Freihaltung von stadtklimatisch bedeutsamen Bereichen kann durch eine entsprechende Nutzungsdarstellung und Festsetzung, z.B. als Grünfläche, Wasserfläche, Sport- und Spielanlage oder Landwirtschaftsfläche, in den Bauleitplänen sichergestellt werden. Darüber hinaus können auch Festsetzungen zur Bauweise im Bebauungsplan, wie z.B. die Mindestgröße von Baugrundstücken oder Aussagen zum Maß der baulichen Nutzung, z.B. der Versiegelungsgrad, einen Beitrag zur Klimaanpassung in Form einer besseren Gebietsdurchlüftung führen (SUSTAINABILITY CENTER BREMEN 2009).

Bei der Realisierung einer im Sinne des Stadtklimas sinnvollen Zuordnung von bebauten und unbebauten Flächen ist ein abgestimmtes Ineinandergreifen von Raum- und Landschaftsplanung erforderlich (Landschaftsplan/Flächennutzungsplan und Grünordnungsplan/Bebauungsplan).

2.2.3 Beispiele für Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel

Das Land Nordrhein-Westfalen nimmt mit dem Klimaschutzgesetz und dem **Klimaschutzplan** eine Vorreiterrolle ein. Neben den formulierten Klimaschutzziele werden hier auch Grundlagen für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen gelegt.

Der Klimaschutzplan ist der Fahrplan für die Klimaschutzpolitik in Nordrhein-Westfalen. In ihm werden konkrete Strategien und Einzelmaßnahmen für den Klimaschutz und die Klimafolgenanpassung festgelegt. Der Klimaschutzplan wird auf fünf Jahre festgeschrieben. Anschließend wird die Umsetzung der Maßnahmen überprüft, angepasst und wenn nötig ergänzt:

<http://www.klimaschutz.nrw.de/klimaschutz-in-nrw/klimaschutzplan/>

Für die Städte zeigt bereits das **Handbuch Stadtklima – Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel**“ (MKULNV NRW 2011) praxiserprobte und konkrete Ansätze zur Klimaanpassung auf. Dieser Leitfaden des Umweltministeriums Nordrhein-Westfalen unterstützt die kommunalen Planungsämter darin, Problemfelder zu identifizieren, die sich aus den zu erwartenden klimatischen Änderungen ergeben. Das Handbuch hilft, die notwendigen Maßnahmen zur Klimawandelanpassung vor Ort zu treffen.

Als zentrale Felder für die Entwicklung von Anpassungsstrategien werden im „Handbuch Stadtklima“

- der vorsorgende Hochwasserschutz,
- Gebäudeschutz und Bauvorsorge,
- der Betrieb und Ausbau von Infrastrukturen sowie
- die Einrichtung und der Erhalt von Frischluftschneisen zur Sicherung der städtischen Belüftung und des Temperatúrausgleichs

beschrieben.

Neben der Darstellung der zu erwartenden Probleme durch den Klimawandel für Städte und Ballungsräume werden für die drei klimatischen Problemfelder *Hitze*, *Starkniederschläge* und *Trockenheit* unterschiedliche Anpassungsoptionen in Form von Handlungskatalogen systematisch und ausführlich erläutert. Aufbauend auf diesem Handlungskatalog werden mögliche Maßnahmen der Bauleitplanung in Form von Darstellungs- und Festsetzungsmöglichkeiten im Flächennutzungsplan und im Bebauungsplan aufgezeigt.

Um sich auf die Auswirkungen des Klimawandels vorzubereiten, müssen Kommunen daher viele Einzelmaßnahmen optimal aufeinander abstimmen. Grundlage einer erfolgversprechenden Klimapolitik ist in jedem Fall die Ausarbeitung eines Klimaanpassungskonzepts.

Dabei gilt es aufzuzeigen, **was** zu tun ist und **wer** die Verantwortung für die erforderliche Handlung trägt. In der Kommune besteht ein hoher Abstimmungsbedarf, weil immer ein Bündel von Maßnahmen situationsabhängig zu entwickeln und umzusetzen ist. Die Darstellung und Festsetzung einzelner isolierter Anpassungsmaßnahmen können den klimatischen Erfordernissen nicht gerecht werden (MKULNV NRW 2011).



In der Stadt Neuss wurde zum Beispiel ein stadtklimatisches Konzept durch einen Ratsbeschluss eingeführt. Es weist Tabuzonen für Bebauung und Versiegelung anhand von Planungskarten aus. Bei der Neuaufstellung des Flächennutzungsplans wurden Flächen aufgrund des Konzepts nicht wie vorgesehen als Wohngebiete beplant, sondern als Freiflächen ausgewiesen. Erfolgsbestimmend waren dabei die frühzeitige Bereitstellung des Konzepts im Planungsamt und eine intensive Kommunikation über die betroffenen behördlichen Fachbereiche hinweg.

In Tabelle 1 werden mögliche Anpassungslösungen des „Handbuchs Stadtklima“ für das Problemfeld „Hitzebelastung“ unter stadtklimatischen Aspekten aufgeführt. Darin integriert ist der neue Baustein „Kühlungspotenzial des Bodens“.

Die Tabelle 2 zeigt mögliche Anpassungslösungen des „Handbuchs Stadtklima“ für das Problemfeld „Hitzebelastung“ unter siedlungswasserwirtschaftlichen Aspekten; ebenfalls mit dem Baustein „Kühlungspotenzial des Bodens“.

Tab. 1: Zuordnung geeigneter Anpassungslösungen für das Problemfeld „Hitzebelastung“, stadtklimatische Aspekte (MKULNV NRW 2011) erweitert um den neuen Baustein „Kühlungspotenzial des Bodens“ (**fett kursiv**)

Hitzebelastung und Stadtklima					
I	Rahmenbedingungen des Systems		Lösungen	Bemerkung	
	Getrennte Planung (Umweltamt, Planungsamt)	H1	Integrierte Zusammenarbeit verschiedener Planungsbereiche	immer notwendig	
	Bauliche, technische Voraussetzung	H2	Überprüfung der technischen Machbarkeit	immer notwendig	
	Fehlende Optimierung von Maßnahmen	H3	Einbeziehung von Modellierungen in die Planung	sinnvoll	
II	Belastungen	Sensitivitäten	Lösungen		
	Hitzequellen	Versiegelungsrate, Vegetationsanteil, Bodenqualität	H4	Festlegung von Bebauungsgrenzen	
			H5	Freiflächen erhalten, schaffen, Flächen entsiegeln	
			H6	Parkanlagen schaffen, erhalten, umgestalten	
			H7	Begrünung von Straßenzügen	Synergien zu „Siedlungswasserwirtschaftliche Aspekte“ und Problemfeld „Extremniederschläge“
				HX1 Böden mit hohen pflanzenverfügbaren Wasserspeicherleistungen oder Grundwasseranschluss erhalten	
			HX2 Anthropogen überprägte Böden in Freiflächen oder Parkanlagen mit schlechten Wasserspeicherkapazitäten verbessern		
			HX3 Böden in besonderen Hitzegebieten bewässern		
		Bevölkerungsdichte	H4	Festlegung von Bebauungsgrenzen	
III	Fehlfunktionen des Systems		Lösungen		
	Aufheizung von Bebauungsstrukturen Aufheizung von degradierten Böden		H6	Parkanlagen schaffen, erhalten, umgestalten	
			H7	Begrünung von Straßenzügen	Synergien zu "Siedlungswasserwirtschaftliche Aspekte" und Problemfeld „Extremniederschläge“
			H10	Fassadenbegrünung	nur bodengebundene Systeme
			H11	Erhalt, Schaffung von Frischluftflächen	
			H12	Offene Wasserflächen schaffen	temporäre Wasserflächen / Versickerungsbereiche als Gestaltungselemente von Parks
				HX2 Anthropogen überprägte Böden in Freiflächen oder Parkanlagen mit schlechten Wasserspeicherkapazitäten verbessern	
				HX3 Böden in besonderen Hitzegebieten bewässern	
	Mangelnde nächtliche Abkühlung		H4	Festlegung von Bebauungsgrenzen	
			H11	Erhalt, Schaffung von Frischluftflächen	
			H16	Erhalt, Schaffung von Luftleitbahnen	

Hitzebelastung und Stadtklima			
	Schlechte Durchlüftung	H4	Festlegung von Bebauungsgrenzen
		H11	Erhalt, Schaffung von Frischluftflächen
		H16	Erhalt, Schaffung von Luftleitbahnen
IV	Schadenspotenziale		Lösungen
	Herabgesetzte Aufenthaltsqualität, herabgesetzte Produktivität	H12	Offene Wasserflächen schaffen
		H6	Parkanlagen schaffen, erhalten, umgestalten
		HX2	<i>Anthropogen überprägte Böden in Freiflächen oder Parkanlagen mit schlechten Wasserspeicherkapazitäten verbessern</i>
		HX3	<i>Böden in besonderen Hitzegebieten bewässern</i>
	Beeinträchtigung der Gesundheit	H11	Erhalt, Schaffung von Frischluftflächen <i>mit leistungsfähigen Böden</i>
		H16	Erhalt, Schaffung von Luftleitbahnen

Tab. 2: Tabellarische Übersicht der Zuordnung geeigneter Anpassungslösungen für das Problemfeld „Hitzebelastung“, siedlungswasserwirtschaftliche Aspekte (MKULNV NRW 2011) erweitert um den neuen Baustein „Kühlungspotenzial des Bodens“ (*fett kursiv*)

Hitzebelastung und Siedlungswasserwirtschaft				
I	Rahmenbedingungen des Systems		Lösungen	Bemerkung
	Getrennte Planung (Umweltamt, Planungsamt)		H1 Integrierte Zusammenarbeit verschiedener Planungsbereiche	immer notwendig
	Bauliche, technische Voraussetzung		H2 Überprüfung der technischen Machbarkeit	immer notwendig
II	Belastungen	Sensitivitäten	Lösungen	
	Erhöhte Verdunstung	Urbane Vegetation mit artbedingt hohem Wasserbedarf	H19 Vermehrte Bewässerung urbaner Vegetation	
			HX3 <i>Böden in besonderen Hitzegebieten bewässern</i>	
			H20 Bepflanzung urbaner Räume mit geeigneten Pflanzenarten	
	Austrocknung nicht versiegelter Flächen	Bewachsene und unbewachsene Flächen und Böden mit begrenzt eigenem Schutz gegen Austrocknung	H19 Vermehrte Bewässerung urbaner Vegetation	Synergien zu H26, E4
			H21 Vermehrter Einsatz von bodenbedeckender Vegetation; Vermeidung oder künstliche Abdeckung unbewachsener Bodenflächen	
			H22 Beschattung relevanter Flächen	
			HX1 <i>Böden mit hohen pflanzenverfügbaren Wasserspeicherleistungen oder Grundwasseranschluss erhalten</i>	
			HX2 <i>Anthropogen überprägte Böden in Freiflächen oder Parkanlagen mit schlechten Wasserspeicherkapazitäten verbessern</i>	
III	Fehlfunktionen des Systems		Lösungen	
	Erhöhter Nutzwasserverbrauch (zur Bewässerung im öffentlichen Raum und auf Privatgrundstücken)		H26 Nutzung von Überschussmengen aus der örtlichen Grundwasserbewirtschaftung	
			E4 Schaffung von Niederschlagszwischen Speichern	
	Überflutungsrisiko durch erhöhten oberflächigen Niederschlagsabfluss (hart getrocknete Bodenoberflächen)		E1 Rückbau versiegelter Flächen	
			E3 Verbesserung bzw. Ermöglichung der Versickerung	
	<i>Deutlich verminderte pflanzenverfügbare Wasserspeicherfähigkeit der oft degradierten städtischen Böden</i>		HX2 <i>Anthropogen überprägte Böden in Freiflächen oder Parkanlagen mit schlechten Wasserspeicherkapazitäten verbessern</i>	

Allein anhand der hier dargestellten Anpassungsmaßnahmen für das Problemfeld „Hitzebelastung“ aus dem „Handbuch Stadtklima“ wird erkennbar, dass vielfältige Möglichkeiten bestehen, positiv auf die Anpassung an den Klimawandel hinzuwirken.

In den folgenden Kapiteln werden die Bodeneigenschaften als beeinflussbare Größen, d.h. Boden als Baustein für Anpassungsstrategien in den Städten, näher beleuchtet.

3 Boden als Einflussgröße im Stadtklima unter besonderer Berücksichtigung der Bodenkühlleistung

Das typische Stadtklima wird durch hohe Verkehrsaufkommen und die hohe Verdichtung in Städten und Ballungsräumen verursacht. Insbesondere in den Nachtstunden führt das zu höheren Temperaturen in den Zentren als in den Außenbezirken. Stadtklimatische Effekte werden spürbar, wenn Starkniederschläge zu Überflutungen führen, sich innerstädtische Hitzeinseln ausbilden, die Qualität der aufgeheizten Luft aufgrund zahlreicher Emittenten abnimmt und Bebauung den notwendigen Luftaustausch zwischen Stadt und Umland einschränkt.

Insbesondere die Bebauungsstruktur, der Grad der Flächenversiegelung und die Grünflächenanteile beeinflussen die städtische Luftzirkulation und den Temperaturgradienten zwischen Zentren und Randbezirken.

Deshalb sind alle Maßnahmen, welche die Entstehung von Wärmeinseln vermeiden helfen, städtische Temperaturmaxima vermindern und die Durchlüftung der Siedlungsstruktur verbessern, sinnvoll zur Anpassung an den Klimawandel (BMVBS/BBSR 2009a).

Eine gute Belüftungssituation verbessert die Qualität des Mikroklimas. Durch einen guten Luftaustausch können überwärmte Luftmassen aus dem Stadtgebiet abgeführt und durch kühlere aus dem Umland ersetzt werden. Frischluftschneisen und Luftleitbahnen spielen daher eine wichtige Rolle für das Stadtklima. Ausbau, Erhalt, Wiederherstellung und Vernetzung von Grünflächen sind deshalb entscheidende Punkte bei der Planung und Umsetzung von Anpassungsstrategien.

Aber auch innerstädtische Grünflächen können bei optimaler Gestaltung einen positiven Einfluss auf das Stadtklima haben. Durch den von der Bepflanzung erzeugten Schattenwurf und die von ihr ausgehende Verdunstung sorgen sie tagsüber für einen thermischen Ausgleich gegenüber der bebauten Umgebung. Nachts kühlt die Luft auf Freiflächen stärker ab. Der durch die Temperaturunterschiede zur aufgeheizten Umgebung angeregte Luftaustausch führt dort zur Temperaturabsenkung. Ein Effekt, der in den immer häufiger auftretenden tropischen Sommernächten besonders aus bioklimatischer Sicht von Bedeutung ist.

Die abkühlende Wirkung innerstädtischer Freiflächen variiert dabei in Abhängigkeit von der Flächengröße, ihrer Ausgestaltung sowie ihrer Anbindung an die Bebauung. Untersuchungen haben gezeigt, dass Kühlungseffekte der Umgebung ab einer Parkgröße von ca. 2,5 ha relevant sind und die Reichweite der kühlenden Wirkung eines innerstädtischen Parks etwa dem Durchmesser des Parks entspricht (z.B. UPMANIS et al. 1998; CHOI et al. 2012). Aber auch kleinere Flächen können relevante Effekte zeigen.

Im Detail lässt sich das Aufheizungs- und Rückstrahlungsverhalten der Oberflächen in die Atmosphäre auf die Art der Flächennutzung, die Bepflanzung und den Zustand der Böden zurückführen (LABO 2010).

Besonders der Wasserhaushalt des Bodens und die darüber beeinflusste Verdunstung der Pflanzen sind wesentliche Stellschrauben für die Nutzung der potenziellen Bodenkühlleistung auf Freiflächen in stadtklimatischen Anpassungskonzepten.

3.1 Grundprinzip der potenziellen Bodenkühlleistung

Das Grundprinzip der potenziellen Kühlleistung des Bodens besteht darin, dass der Boden Wasser, welches in ihm gespeichert ist, zur Verdunstung bereitstellt.

Die Verdunstung kann direkt über die Bodenoberfläche erfolgen (Evaporation) oder – in weit größerem Ausmaß – über die Transpiration durch die Pflanzen, welche das Wasser zuvor für ihre Stoffwechselprozesse aus dem Boden aufnehmen.

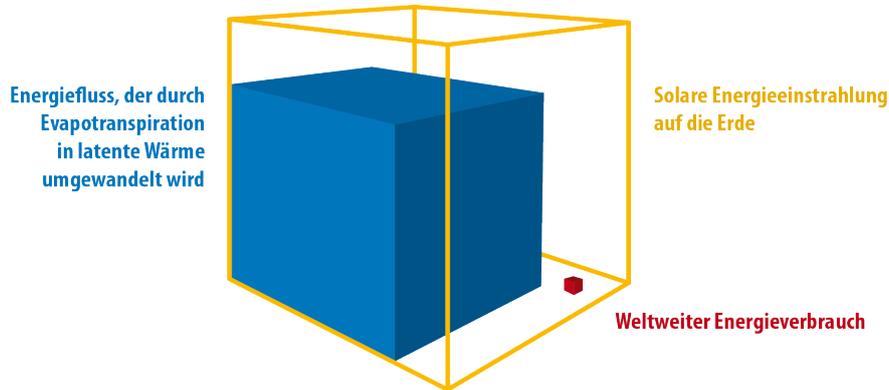


Abb. 2: Anteil der durch Evapotranspiration von Wasser- und Landoberfläche umgewandelten Energie an der solaren Energieeinstrahlung auf die Erde (nach SCHMIDT 2011)

Um Wasser vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand zu überführen, ist viel Energie nötig. Für die Verdunstung von Wasser von der Landoberfläche wird fast die Hälfte der eingestrahelten Sonnenenergie verbraucht (vgl. Abb. 2 nach SCHMIDT 2011; JASECHKO et al. 2013).

Geht bei der Verdunstung Wasser von der flüssigen in die gasförmige Phase über, wird die dabei genutzte Energie in sogenannte latente, nicht fühlbare Wärme umgewandelt. Zugeführte Sonnenenergie wird im gasförmigen Aggregatzustand der Wassermoleküle „gespeichert“ und trägt somit nicht mehr zu einer Erwärmung der Luft bei.

Wetterbedingungen, Art und Dichte der Vegetation sowie der Anteil der versiegelten Flächen und die **Bodeneigenschaften** werden als Haupteinflüsse auf die Verdunstung verstanden.

Die Verdunstung in Deutschland und in Nordrhein-Westfalen ist im langjährigen Mittel deutlich höher als der Abfluss. In der Tabelle 3 sind die Wasserbilanzen für Deutschland und für Nordrhein-Westfalen dargestellt. In der Regel kommt es zu einem unterirdischen Abfluss nur in den Wintermonaten.

Tab. 3: Klimatische Wasserbilanzen für Deutschland und Nordrhein-Westfalen (1961-1990) (nach HÖLTING & COLDEWEY 2008 und LANUV 2010)

Größe	BRD gesamt 1961-1990 [mm/a]	Nordrhein-Westfalen Mittlere Werte für 1961-1990 [mm/a]
Niederschlag	790	800
Verdunstung	492	430
Abfluss gesamt	298	370
Abfluss oberirdisch	65	220
Abfluss unterirdisch (Grundwasserneubildung)	233	150

Rolle des Klimas

Die für Verdunstung verfügbare Energie- und Wassermenge wird von den klimatischen Bedingungen bestimmt.

Die wichtigsten Wirkfaktoren sind die Strahlungsenergie, die Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre für Wasserdampf und die Windverhältnisse am Untersuchungsstandort (ATV-DVWK M504 2002). Die Verdunstung ist abhängig von der Sonneneinstrahlung, die die Oberflächentemperatur bestimmt und von der Albedo, d.h. dem Rückstrahlungsvermögen der Oberfläche. In den gemäßigten Breiten werden die höchsten Verdunstungsraten im Sommerhalbjahr erreicht, die niedrigsten im Winterhalbjahr. Im Winterhalbjahr ist die Sonneneinstrahlung geringer, sodass die Verdunstungsmenge kleiner ist als die des Niederschlags. In dieser Jahreshälfte wird auch der Bodenwasserspeicher aufgefüllt. Liegt im Sommerhalbjahr die Verdunstungsmenge höher als der Niederschlag, werden die Bodenwasserspeicher entleert, wenn keine Nachlieferung durch kapillar aufsteigendes oberflächennah anstehendes Grundwasser erfolgt (DAMM 2011).

Im Hinblick auf die Nutzung der potenziellen Bodenkühlleistung sind die klimatischen Bedingungen als gegeben und nicht beeinflussbar anzusehen (DAMM 2011).

Rolle der Pflanzen

90 % der Verdunstung ergeben sich in Deutschland aus der Transpiration (Wasserabgabe über die Spaltöffnungen) und Interzeption (Zurückhalten von Niederschlägen auf der Oberfläche) der Pflanzen. Pflanzen nehmen das zur Transpiration benötigte Wasser mit ihren Wurzeln aus dem Boden auf und geben es über die Stomata der Blätter als Wasserdampf an die Atmosphäre wieder ab. Sinkt der pflanzenverfügbare Wassergehalt im Boden, reagieren die Pflanzen mit dem Schließen der Stomata, um einen zu starken Wasserentzug zu vermeiden. Dies wirkt sich mindernd auf die Verdunstungsmenge und die CO₂-Speicherung aus (ROWELL 1997). Dadurch hat die Vegetation einen großen Einfluss auf die Verdunstungsmenge eines Gebietes. Die Höhe der Transpiration und der Interzeption ist je nach Bestand unterschiedlich. Sie sind von der Wachstumsphase, dem Bedeckungsgrad, der Blattfläche eines Pflanzenbestandes und davon abhängig, wie tief die Pflanzen in Trockenjahren ihre Wurzeln im Boden ausbreiten können (effektiver Wurzelraum).

Rolle des Bodens

Pflanzen können nur die Wassermenge verdunsten, die für sie verfügbar im Boden gespeichert ist. Bei Böden mit hohem Grundwasserstand ist außerdem die Menge Wasser hinzuzurechnen, die den effektiven Wurzelraum über den kapillaren Aufstieg erreicht. Allerdings ist das Nachlieferungsvermögen aus dem Grundwasser zeitlich begrenzt, da die Tiefenlage des Grundwasserspiegels im Lauf der Vegetationsperiode Schwankungen unterliegen kann.

In den von der menschlichen Tätigkeit überprägten Böden der Städte schränken oft Verdichtungen und grobe Bestandteile beispielsweise aus Bauschutt oder Schlacken den Speicherraum für pflanzenverfügbare gespeichertes Wasser ein. Sie stellen außerdem für die Pflanzenwurzeln physiologische Barrieren dar, begrenzen also die Durchwurzelbarkeit und damit die effektive Durchwurzelungstiefe. Der während des Winterhalbjahrs aufgefüllte Bodenwasservorrat ist deshalb oft schon nach den ersten Sommertagen oder -wochen aufgebraucht, und die Vegetation reduziert aktiv ihre Verdunstungsleistung. Die Größe der Bodenwasserspeicherkapazität ist daher trotz der hohen mittleren Jahresniederschläge in Deutschland sehr wichtig für die Klimawirksamkeit der Böden (HÖKE et al. 2011).

3.2 Einflüsse auf die Verdunstung

Als Haupteinflüsse auf die Verdunstung gelten die Luftfeuchtigkeit, die Lufttemperatur, die Sonneneinstrahlung, Wind, Art und Dichte der Vegetation sowie Eigenschaften und Aufbau des Bodens.

Der Boden wird, da er Hauptbetrachtungsgegenstand dieses Leitfadens ist, im Folgenden insbesondere bezüglich der die Wasserspeicherung beeinflussenden Parameter ausführlicher beschrieben.

Boden als Wasserspeicher für die Verdunstung

Durch seine Fähigkeiten, Wasser aufzunehmen, zu speichern und den Pflanzen zur Verfügung zu stellen, nimmt der Boden eine zentrale Stellung im Wasserkreislauf ein und hat einen großen Einfluss auf die Verdunstung (vgl. Abb. 3). Der Hauptteil des Niederschlags, den der Boden durch seine Bindungskräfte gegen die Schwerkraft hält, steht der Vegetation zur Verdunstung zur Verfügung. Der Boden stellt somit eine Pufferzone im hydrologischen Kreislauf dar.

Wie viel Wasser den Pflanzen zur Verdunstung zur Verfügung steht, ist vom Aufbau und den Eigenschaften eines Bodens abhängig. Das Wasserspeicher- und Wasserhaltevermögen wird wesentlich von Bodenart (Körnung), Humusgehalt, Gefüge, Trockenrohdichte und dem daraus resultierenden Porenraum bestimmt (SCHEFFER 2002).

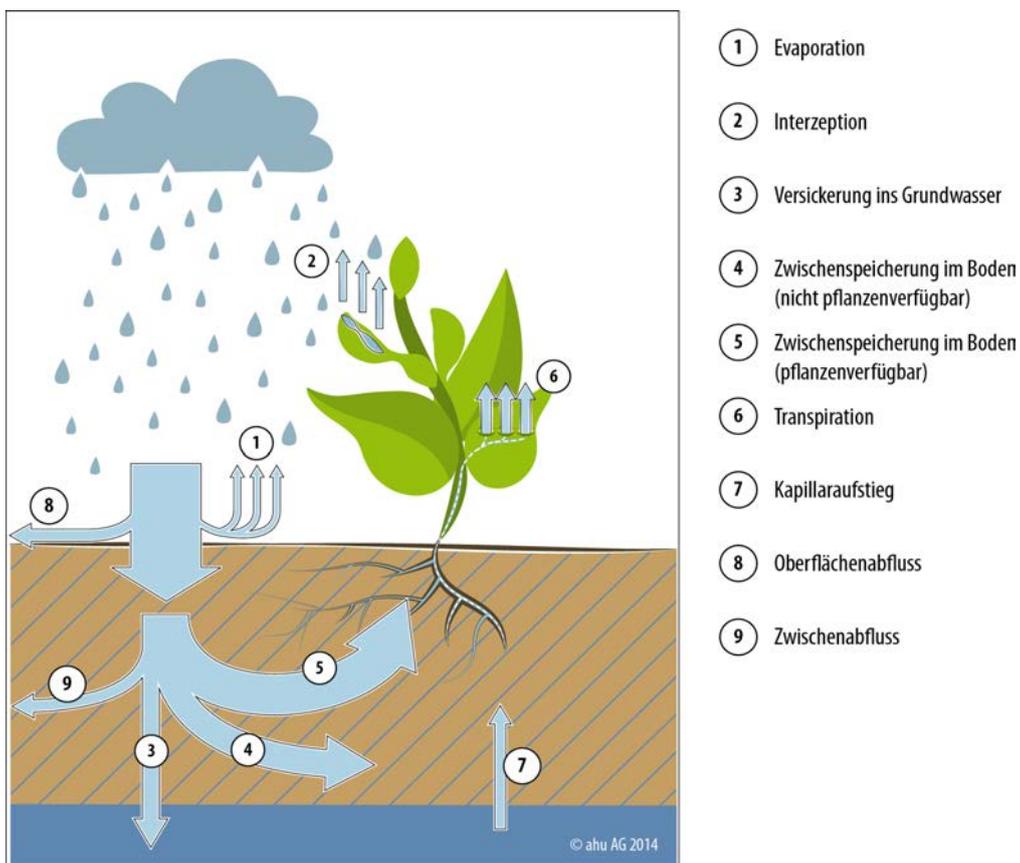


Abb. 3: Weg des Wassers Atmosphäre – Boden – Pflanze

Bodenaufbau

Boden besteht aus Mineralien unterschiedlicher Art und Größe, aus organischer Substanz (Humus, Pflanzenwurzeln und Bodenorganismen), aus Wasser und aus Luft. Die festen Bodenpartikel sind in bestimmter Weise im Raum angeordnet und bilden einen strukturierten Bodenkörper mit einem charakteristischen Gefüge. Zwischen den Bodenpartikeln befinden sich Hohlräume, die Bodenporen, die teils mit Wasser, teils mit Luft gefüllt sind. Die Bodenporen beeinflussen die Aufnahmefähigkeit und Speicherfähigkeit von Wasser in den Boden.

Das Porenvolumen, in dem das Wasser gespeichert werden kann, ist von Anzahl, Größe und Form der Poren abhängig und wird im Wesentlichen von den nachfolgend beschriebenen Bodeneigenschaften reguliert.

Wieviel Wasser kann ein Boden speichern?



Abb. 4: Wasserspeichervermögen verschiedener Böden (MUNLV NRW 2007)

Bodenart: Die Bodenart – oder Korngrößenzusammensetzung – beschreibt die Größe einzelner Bodenpartikel und hat wesentlichen Einfluss auf die Bodeneigenschaften. Über die Gemengeanteile der verschiedenen Korngrößen wird die Bodenart definiert. Die Größe des Porenvolumens hängt von der Bodenart ab. Je feinkörniger ein Boden ist, desto größer ist sein Porenvolumen, da kleine Bodenteilchen nicht so dicht gelagert sind wie größere Teilchen. Ein hoher Grobbodenanteil (> 2 mm Korndurchmesser) führt zu einer Verringerung des Porenanteils und damit der Wasserspeicherfähigkeit. Zudem besitzen gleichförmige Korngemische ein großes Porenvolumen, ungleichförmige Gemische ein geringeres, da die Poren durch feineres Korn ausgefüllt werden (HÖLTING & COLDEWEY 2009).

Humusgehalt: Der Humusgehalt wird bestimmt durch den Anteil an im Boden befindlichen abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Substanzen und deren organischen Umwandlungsprodukten. Aber auch durch menschliche Tätigkeit eingebrachte organische Stoffe werden dazugezählt (AD-HOC-AG BODEN 2005). Ist der Humusgehalt eines Bodens > 1 Masse-%, trägt er in relevanter Höhe zur Wasserspeicherung bei. Dieser Effekt kommt beispielsweise bei Sandböden zum Tragen, wo die Anhebung von 1 auf 4 Masse-% Humus zu einer Erhöhung des pflanzenverfügbaren Wasser im durchwurzelten Bodenraum um mehr als 10 % führen kann.

Bodengefüge und Trockenrohdichte: Das Gefüge eines Bodens beschreibt die Ausrichtung der Bodenpartikel zueinander und gibt Auskunft darüber, wie dicht sie gelagert sind. In einem festen Raumausschnitt können Bodenpartikel dicht oder locker, homogen oder lokal akkumuliert, d.h. aggregiert, vorliegen (SCHEFFER 2002). Die Hohlräume zwischen den Bodenpartikeln bilden den Porenraum, in dem Wasser gespeichert wird. Um den Lagerungszustand eines Bodens auch numerisch zu charakterisieren, wird die Trockenrohdichte ermittelt. Sie gibt die Masse der Bodenfestschubstanz wieder, die in einem bestimmten Volumen enthalten ist. Unter der Annahme, dass die Substanzdichte der Bodenpartikel nahe der ihres Hauptbestandteils Quarz liegt ($2,65 \text{ g/cm}^3$), lassen sich aus der Trockenrohdichte Schlüsse auf den Porenanteil im untersuchten Volumen ziehen. Geringe Trockenrohdichten lassen auf ein hohes Porenvolumen schließen; hohe Trockenrohdichten deuten auf einen hohen Anteil von Festschubstanz in der Probe und dementsprechend auf wenige Hohlräume.

Porenraum: Je kleiner die Hohlräume, d.h. je feiner die Poren sind, desto höher sind die Spannkraften, die das Wasser in den Poren halten und so für die Wasserspeicherung sorgen. Die verschiedenen Porengrößen lassen sich in drei funktionale Gruppen unterteilen: „grob“, „mittel“ und „fein“. Sandböden enthalten besonders viele Grobporen, Schluff- und Lehmböden viele Mittelporen und Tonböden viele Feinporen.

Das pflanzenverfügbare Bodenwasser, auch nutzbare Feldkapazität (nFK) genannt, wird in den Mittel- und engeren Grobporen gespeichert. Daher weisen Schluff- und Lehmböden im Vergleich zu Sand- und Tonböden eine hohe nutzbare Feldkapazität auf.

Die Höhe der potenziellen Verdunstungsleistung wird im Zusammenspiel zwischen den Bodeneigenschaften und den Pflanzen mit dem für sie erschließbaren Wurzelraum bestimmt. Dies wird bei einem Vergleich der Abbildungen 4 und 5 erkennbar. Das Sommerhalbjahr 1976 war das trockenste Sommerhalbjahr des Klimareferenzzeitraums von 1961 bis 1990.

Zwischen 100 und 70 % Füllstand der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) verdunsteten die Pflanzen am meisten Wasser. Zwischen 70 und 40 % ist die Verdunstung eingeschränkt. Unterhalb eines Speicherfüllstandes von 40 % der nFKWe wird in der Regel in der Landwirtschaft bewässert, um Ertragseinbußen zu verhindern (RENGER &

STREBEL 1982). Die Höhe der Verdunstung berechnet sich nach dem in Anlage 1 beschriebenen Verfahren.

Für eine erste Beurteilung des Kühlungspotenzials eines **Bodens** kann die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe, [mm]) herangezogen werden. Hier bietet sich der Bewertungsmaßstab der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AD-HOC-AG BODEN 2005) zur Orientierung an (s. Tab. 4). Wie die nFKWe eines Bodens bestimmt wird, ist in Abschnitt 1 des Anhang 1 dargestellt.

Tab. 4: Einstufung der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN 2005)

Bezeichnung	Stufe	nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) [mm]
sehr gering	1	< 50
gering	2	50 bis < 90
mittel	3	90 bis < 140
hoch	4	140 bis < 200
sehr hoch	5	200 bis < 270
extrem hoch	6	≥ 270

Das Kühlleistungspotenzial von Böden, auf denen hohe Grundwasserstände bis in niederschlagsarme Sommerperioden hinein für die Nachlieferung von Wasser durch kapillaren Aufstieg sorgen, ist grundsätzlich mindestens als hoch einzustufen.

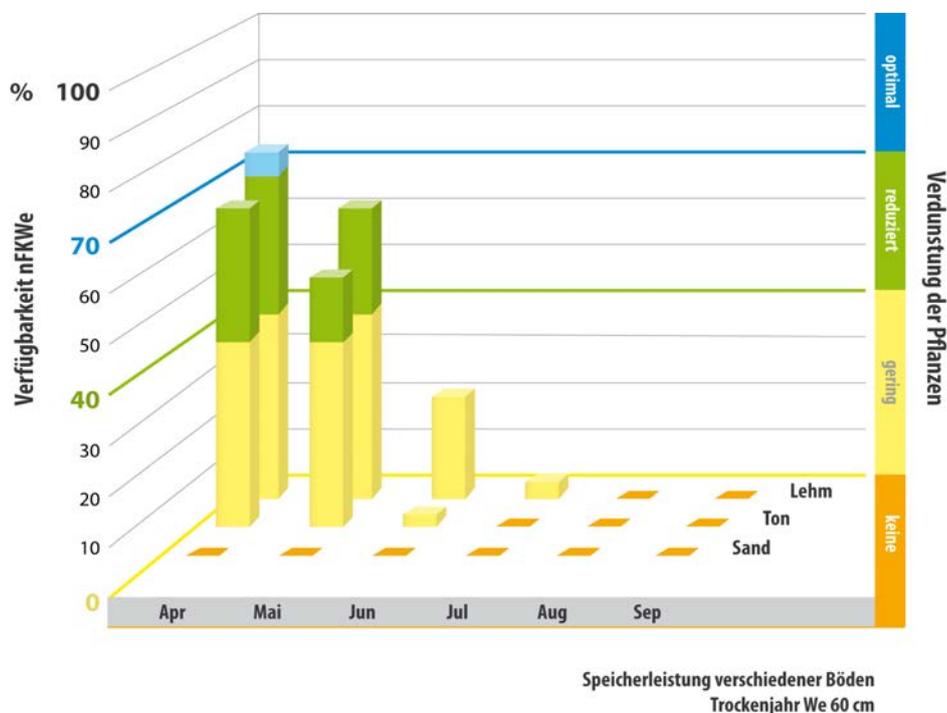


Abb. 5: Speicherstände der nutzbaren Feldkapazität (nFKWe) bei einer effektiven Durchwurzelungstiefe von 60 cm in Abhängigkeit von der Bodenart im Extremjahr 1976 (aus: DAMM 2011)

Die Abbildung 5 zeigt, dass auf Sandböden mit einem effektiven Wurzelraum bis 60 cm bereits im April kein Wasser mehr für die Verdunstung bereitstand. Bei Lehm Böden reicht dort der Wasservorrat bis Ende Mai. Können die Pflanzen bis in 80 cm Tiefe statt 60 cm Tiefe wurzeln, steht ihnen auf dem Lehm Boden noch bis Juni Wasser zur Verfügung (vgl. Abb. 6).

Mit Hilfe bodenkundlicher Karten bzw. Kartierungen und Klimadaten können Potenzialkarten der Bodenkühlleistung für Städte erstellt werden. Die dafür erforderlichen Methoden und Datengrundlagen und die jeweiligen datenführenden Stellen sind im Abschnitt 3 des Anhang 1 aufgeführt. Eine entsprechende Karte des Kühlungspotentials wurde im Forschungsvorhaben dynaklim-URBIS-ER für einen Modellraum im Ruhrgebiet entwickelt (HÖKE et al. 2012).

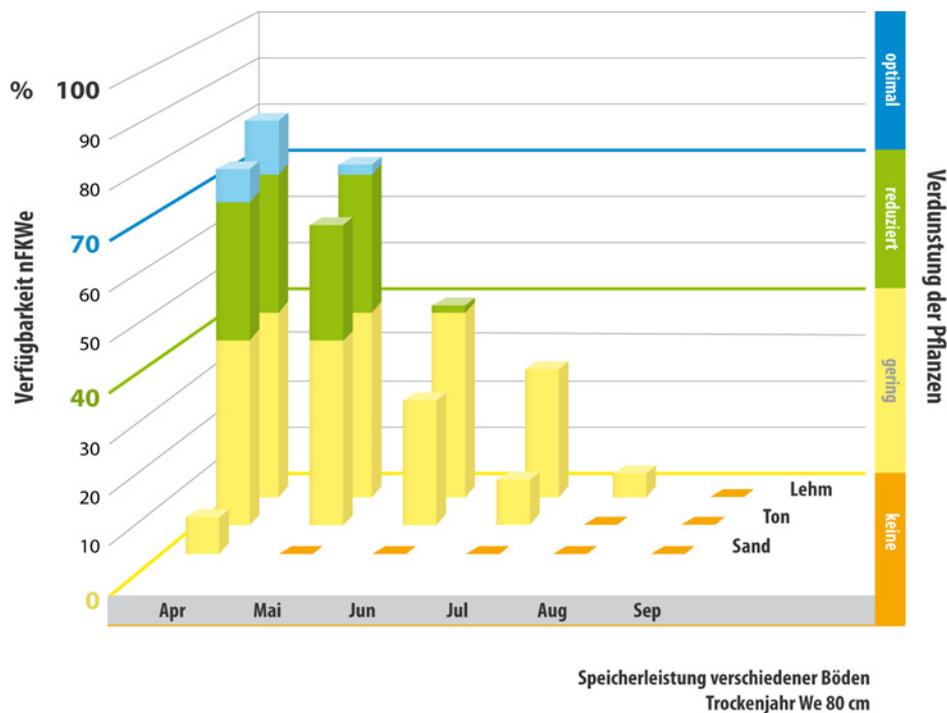


Abb. 6: Speicherstände der nutzbaren Feldkapazität (nFKWe) bei einer effektiven Durchwurzelungstiefe von 80 cm in Abhängigkeit von der Bodenart im Extremjahr 1976 (aus: DAMM 2011)

3.3 Boden als „Ökosystemdienstleister“

3.3.1 Ökonomisches Potenzial der Bodenkühlleistung

Die Bodenkühlleistung ist eine von der Natur erbrachte sogenannte „Ökosystemdienstleistung“. Sie lässt sich wirtschaftlich bemessen, indem die Verdunstungskälte, die bei der Verdunstung des Bodenwassers über die Pflanzen frei wird, als ihr Ertrag angesehen wird.

Um die Kosten zu berechnen, die durch die Bodenkühlleistung eingespart werden, kann die zur Verdunstung benötigte Energie monetär dargestellt werden:

Welche Energiemenge zur Verdunstung einer bestimmten Menge Wasser benötigt wird, gibt die Verdampfungsenergie bzw. Verdampfungswärme an. Sie liegt für 1 Liter 20 °C warmes Wasser bei rund 2.500 kJ (= 0,694 kWh). Wird ein Strompreis von 0,20 €/kWh angesetzt,

kostet die Verdunstung von 1 Liter 20 °C warmem Wasser mit Hilfe elektrischer Energie also 14 ct. Das klingt zunächst nach nicht viel.

Wird der Wert auf einen Boden hochgerechnet, der gute Wasserspeichereigenschaften hat und die Fläche von 1 ha einnimmt – beispielsweise eine Parabraunerde aus Lösslehm – ergibt sich Folgendes: Der Beispiel-Boden verdunstet in Nordrhein-Westfalen zusammen mit den Pflanzen, die auf ihm wachsen, über das Jahr im Mittel rund 430 Liter/m² (vgl. Tab 3). Das sind auf den Hektar (= 10.000 m²) bezogen 4.300 m³/a! Der Strom, der nötig ist, um so viel Wasser zu verdunsten, kostet 597.184 €

Wird 1 ha dieser Parabraunerde versiegelt, geht also eine Ökosystemdienstleistung von fast 600.000 € verloren!

Bei der natürlichen Verdunstung im Ökosystem wird die benötigte Energiemenge von der Sonne bereitgestellt. Der Boden liefert die Dienstleistung „Verdunstung“ zusammen mit den auf ihm wachsenden Pflanzen jedes Jahr kostenfrei.

3.3.2 Berücksichtigung der Bodenkühlleistung im Bebauungsplan der Kommune

Das nachfolgende Beispiel aus DAMM (2011) verdeutlicht den ökonomischen Effekt, wenn eine bislang offene Fläche mit kühlleistungstarken Böden überbaut werden soll.

Die 31.400 m² große Fläche auf dem Gebiet der Stadt Bottrop wurde nach ihren Eigenschaften, die für die Verdunstung, und damit die Kühlleistung relevant sind, in Teilflächen gegliedert (vgl. Abb. 7). Diese Eigenschaften sind Bodenart, Landnutzung und Grundwasserflurabstand.

Die verdunstungsstärksten Flächen mit 650 mm/a lagen in dem Bereich, der überbaut werden sollte. Es handelt sich dabei um einen Gley-Plaggenesch mit Grundwasseranschluss (kapillarer Aufstieg!) und hohem Humusgehalt (hohes Wasserspeichervermögen!).

Neben der geplanten Bebauung, d.h. Versiegelung von Teilflächen, sollte auch Boden aufgeschüttet werden, um den für die Gebäude nötigen Abstand zum Grundwasser zu erreichen. Damit wäre der verdunstungsfördernde kapillare Aufstieg auch auf den nicht versiegelten Flächen nicht mehr gegeben. Die sich aus der geplanten Bebauung ergebenden Änderungen der Verdunstungsleistung sind in Tabelle 5 aufgestellt.



Abb. 7: Einteilung der Teilflächen für den Ist-Zustand, Jörgensmannwiese in Bottrop (Luftbild: STADT BOTTROP 2008) (aus: DAMM 2011)

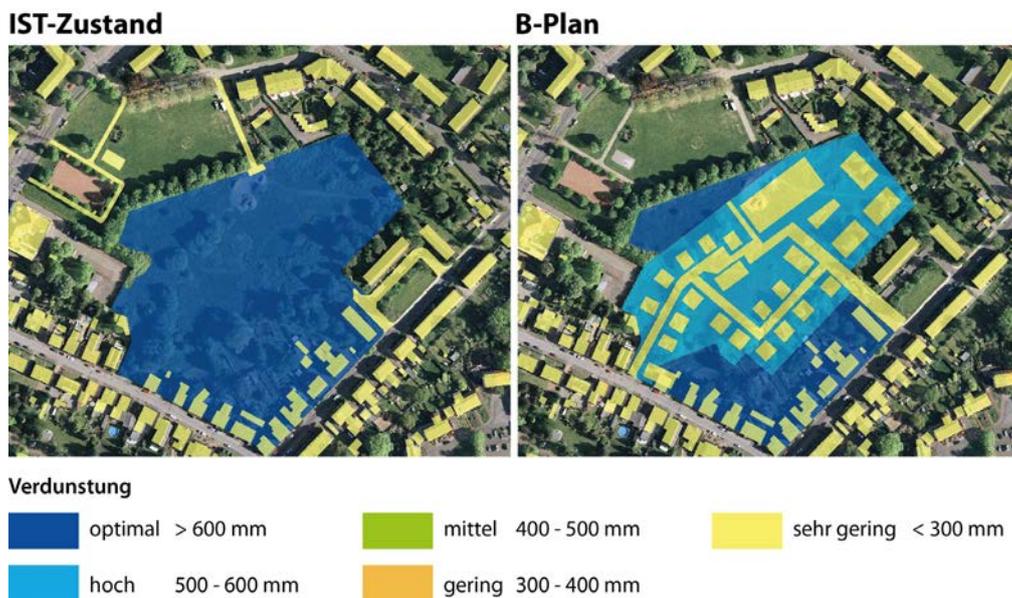


Abb. 8: Reduzierung der Verdunstungsleistung der Flächen durch die geplante Bebauung der Jörgensmannwiese in Bottrop, links: Ist-Zustand, rechts: B-Plan (Luftbild: STADT BOTTROP 2008) (aus: DAMM 2011)

Die Umsetzung des B-Plans (GRZ 0,8) würde die Verdunstungsleistung der Fläche halbieren (vgl. Abb. 8). Dies entspricht einer Wassermenge von 9.206 m³/a, die nicht zur Grundwasserneubildung oder Transpiration beiträgt, sondern oberirdisch abfließt. Infolge der Nutzungsänderung würde eine Energiemenge von 23.051 GJ nicht mehr über Verdunstung in latente Wärme umgewandelt. Sie trägt vielmehr als fühlbare Wärme zur Aufheizung der Umgebung bei.

Der Verlust der Ökosystemdienstleistung beläuft sich auf fast 1.300.000 € pro Jahr. Dies entspricht beispielsweise dem durchschnittlichen Jahresverbrauch an Energie (Heizung und Warmwasser) von 251 Haushalten oder an Strom von 23.000 Kühlschränken (DAMM 2011).

Tab. 5: Jährliche Verdunstung als Ökosystemdienstleistung im Vergleich von Ist-Zustand und B-Plan, Jörgensmannwiese in Bottrop (aus: DAMM 2011)

Teilfl.-Nr.	Landnutzung	Mittlere jährliche Verdunstung [mm]	Ist-Zustand		B-Plan	
			Fläche [m ²]	Verdunstung [m ³ /a]	Fläche [m ²]	Verdunstung [m ³ /a]
1	Dächer	145	2.079	301	7.663	1.111
2	Straße und Wege	145	366	53	3.448	500
	Terrasse, Stellplatz	145	0	0	9.414	1.365
	Lärmschutzwall	632	0	0	2.269	1.434
3	Gärten ohne GW	573	0	0	2.358	1.351
4	Gärten mit GW	603	9.212	5.555	6.248	3.768
5	Gley-Plaggenesch GW: 0-0,5 m	650	1.423	925	0	0
6	Gley-Plaggenesch GW: 0,5-1 m	650	3.899	2.534	0	0
7	Plaggenesch	650	6.464	4.202	0	0
8	Plaggenesch mit Bäumen	650	2.449	1.592	0	0
9	Braunerde-Gley	650	5.508	3.580	0	0
Summe			31.400	18.742	31.400	9.529
Ist-Zustand			100 %		51 %	
Ökosystemleistung der Kühlfunktion						
Dienstleistung der Gesamtfläche pro Jahr				2.603.055 €		1.324.444 €
Dienstleistung pro m² und Jahr				83 €		42 €
Saldo pro Jahr			-1.278.611 €			



Im Rahmen des Bebauungsplanverfahrens wurde im Jahr 2012 im Plangebiet durch das Umweltamt Bottrop eine weitere Orientierende Untersuchung zu Bodenbeschaffenheit und Grundflurwasserabstand durchgeführt. Im Ergebnis schlug die Verwaltung vor, den westlichen Teilbereich des Planungsgebietes mit dem verdunstungsstarken Plaggenesch und Gley-Plaggenesch aus der Entwicklungsabsicht herauszunehmen. Die Grünflächen bleiben bestehen und werden planungsrechtlich gesichert (vgl. Abb. 9).

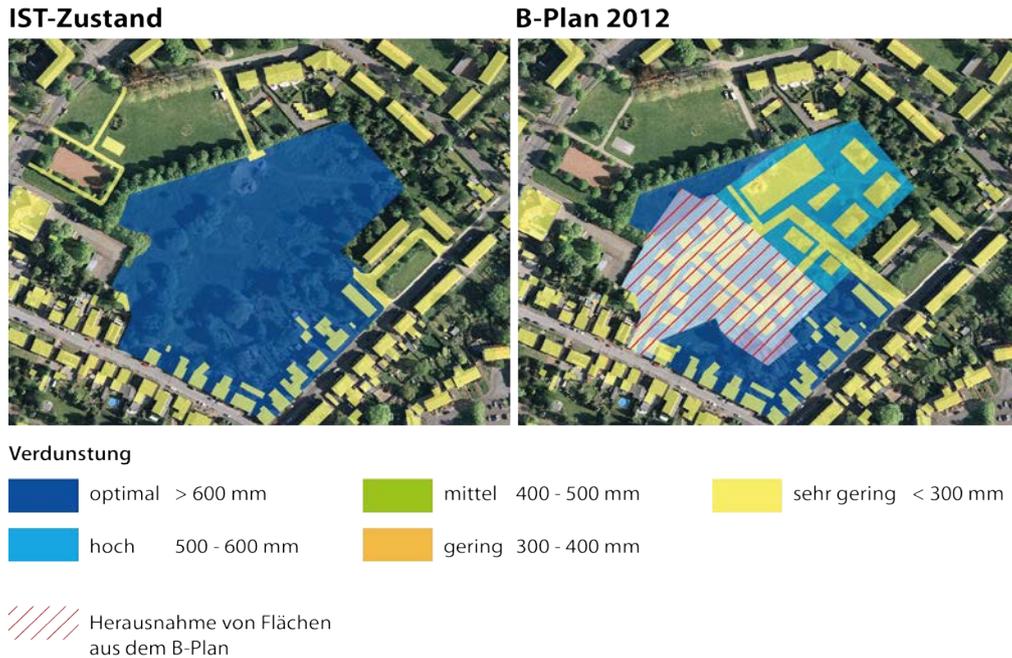


Abb. 9: Anpassung des B-Plans nach Berücksichtigung verdunstungsstarker Böden und Erhalt dieser als Grünflächen. links: Ist-Zustand, rechts: angepasster B-Plan (Luftbild: STADT BOTTROP 2008) (aus: DAMM 2011; angepasst)

4 Maßnahmen zum Erhalt und zur Verbesserung der Bodenkühlleistung

Im folgenden Kapitel werden Maßnahmen aufgezeigt, mit denen sich die Bodenkühlleistung in Städten nutzen und verbessern lässt.

Entscheidend für eine hohe Verdunstungsrate und den einhergehenden Kühlungseffekt ist die Wasserverfügbarkeit, die in Städten durch Versiegelung, Grundwasserabsenkung und urbane Böden mit nur geringer Wasserspeicherfähigkeit, deutlich reduziert ist (DAMM 2011). Die Wasserverfügbarkeit könnte in Zukunft durch eine prognostizierte Überlagerung von zunehmenden Temperaturen und rückläufigen Niederschlagssummen im Sommerhalbjahr weiter abnehmen (KROPP et al. 2009).

Um die Kühlleistung der Böden in einem stadtklimatischen Kontext zu nutzen und zu verbessern, sind verschiedene Wege möglich:

- 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
- Maßnahmenpfad „Urbane Landschaftsgestaltung“:
 - gezielte Gestaltung der urbanen Landschaft um zwischen den Anpassungslösungen zwischen den Problemfeldern „Hitze“, „Extremniederschläge“ und „Trockenperioden“ des „Handbuch Stadtklima“ (MKULNV 2011) zu vermitteln

Die Maßnahmenpfade lassen sich in Einzelmaßnahmen aufgliedern und bezüglich ihrer Effizienz einordnen (vgl. nachfolgende Kapitel 4.1 bis 4.4).

4.1 Maßnahmenpfad „Boden“

Die Rolle des Bodens für die Verdunstung wurde in Kapitel 3 ausführlich beleuchtet. Bodeneigenschaften, die einen Einfluss auf die Bodenkühlung haben, sind: Bodenart, Skelettgehalt, Humusgehalt sowie das Bodengefüge und die Trockenrohdichte. Zu berücksichtigen sind auch Barrieren im Untergrund, die das Wurzelwachstum der Pflanzen und damit den effektiven Wurzelraum einschränken können.

Prüfung der rechtlichen Rahmenbedingungen

Im Maßnahmenpfad „Boden“ sind besonders die bodenschutzrechtlichen Belange zu beachten.

Ein Eingriff in einen **naturnahen** Boden zur Verbesserung seiner Wasserspeicherefähigkeit sollte i.d.R. unterbleiben und ist grundsätzlich sehr sorgsam mit den Zielen des Bodenschutzes abzuwägen. Böden, welche die natürlichen Bodenfunktionen sowie Archivfunktionen nach Bundesbodenschutzgesetz im besonderen Maße erfüllen, sind besonders zu schützen (§ 1 Abs. 1 Satz 2 LBodSchG). Dagegen ist ein erneuter Eingriff in bereits deutlich überprägte urban-industrielle Böden diesbezüglich überwiegend unproblematisch. In Einzelfällen können auch urban-industrielle Böden wertvolle Archivfunktionen aufweisen.

Die natürlichen Böden in Städten sind durch intensive Überprägung oft degradiert. In diesen **urban-industriellen** Böden spiegelt sich das durch Abgrabung und Aufschüttung, Versiegelung, stoffliche Einträge und Bodenverdichtung wider (HÖKE 2013, HÖKE et. al. 2011). Insbesondere die Einbringung grober Bestandteile wie Bauschutt, Schlacken, Bergematerial, Kies und Schotter aus diversen Gesteinen sowie die allgegenwärtige Sandeinbringung durch die Bausande in die durchwurzelte Bodenzone und die Bodenverdichtung vermindern die Speicherefähigkeit der Böden für pflanzenverfügbares Wasser.

Eine Bodenverbesserung mit dem Ziel einer deutlichen Erhöhung der pflanzenverfügbaren Wasserspeicherung durch das Auf- oder Einbringen von Bodenmaterial und/oder geeigneten (qualitätsgesicherten) Bodenzusatzstoffen (z.B. Kompost) oder auch eine Tiefenlockerung sind Vorhaben, die eine **fachkompetente bodenkundliche Planung** sowie eine **sorgsame praktische Umsetzung** erfordern.

Bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Bodenverbesserung sind also häufig sorgsam abgewogene Einzelfallentscheidungen zu treffen und die rechtlichen Regelwerke zu beachten.

Es ist zu beachten, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen mit der in Arbeit befindlichen Zusammenführung von novelliertem Bodenschutz- und Abfallrecht mit den zu erlassenden Grundwasser- und Ersatzbaustoffverordnungen in der Mantelverordnung zurzeit neu gefasst werden.

Daher sollten die jeweils aktuellen Erlasse, Leitfäden und Handlungsempfehlungen sowie Forschungserkenntnisse Berücksichtigung finden. Hier sind zu nennen:

- LUA-Merkblatt 44 „Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden gemäß § 12 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung“,
- Handlungsempfehlung zur Umlagerung von Böden mit naturbedingten TOC-Gehalten größer 1-Masse-% innerhalb des Emscher-Lippe-Gebietes. Verfügung der Bezirksregierungen Arnsberg – Düsseldorf – Arnsberg (wesentliche Inhalte sind übertragbar auf viele (ehemalige) Auen- und Niederterrassenlandschaften) (AHU AG 2012),
- Erlass des MKULNV vom 17.09.2014, IV-4-547-02-05, „Materialeinbringung unterhalb und außerhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht“.

Die **Handlungsempfehlungen und Vollzugshinweise sollten unter Berücksichtigung der Gegebenheiten des Einzelfalls** zur Anwendung kommen. Im Falle von Materialaufbringungen sind dabei die jeweiligen Anforderungen

- des Abfallrechts im Hinblick auf eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung (§ 3 Abs. 23 KrWG und § 7 Abs. 3 KrWG) bzw. gemeinwohlverträgliche Beseitigung (§ 7 Abs. 2 und § 15 Abs. 1 KrWG) (aus § 6 Abs. 1 Nr. 4 ergibt sich, dass auch die Verfüllung zur Verwertung zählt),
- des Bodenschutzes im Hinblick auf die Sicherung und Wiederherstellung von Bodenfunktionen sowie die Besorgnis des Entstehens schädlicher Bodenveränderungen nach §§ 1 und 7 BBodSchG und 9 BBodSchV (Vorsorgender Bodenschutz) sowie
- des Wasserrechts (u.a. Erlaubnispflicht) im Hinblick auf die Besorgnis einer Verunreinigung des Grundwassers nach § 48 Abs. 2 WHG (vorsorgender Grundwasserschutz)

zu beachten. Auch ggf. erforderliche naturschutzrechtliche Anforderungen müssen berücksichtigt werden.

Möglichkeiten zur Verbesserung eines Bodens

Anhand eines Beispiel-Bodens (Tab. 6) sollen nachfolgend mögliche Verbesserungsmaßnahmen und deren Wirkung aufgezeigt werden.

Dazu zeigt Abbildung 10 auf, wie sich die Verbesserungsmaßnahmen kumuliert auf die Verfügbarkeit von Wasser für die Pflanze auswirken. Der Boden enthält im Ist-Zustand bereits im Mai des Referenzjahres 1974 nicht mehr genügend Wasser für die Verdunstung. Eine Verbesserung der Bodenart von Sand zu Lehm führt dazu, dass der Bodenwasserspeicher nun bis Juli ausreicht.

Werden weitere Maßnahmen bis hin zur Nutzungsänderung angewendet, z.B. Anpflanzung von tiefwurzelnden Bäumen, kommt der Bodenwasserspeicher über das Sommerhalbjahr, ohne unter die kritische Grenze von 40 % Füllstand der nFKWe zu fallen.

Tab. 6: Kumulierte Auswirkungen der Optimierung von Bodeneigenschaften auf die Höhe der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe, modifiziert nach DAMM 2011)

	Ist-Zustand	Maßnahme	nFKWe [mm]
	Ist-Zustand		70
+	Bodenart: Su2	Aufbringen von Mineralboden mit höherem Feinbodenanteil: Bodenart: Ls2	110
+	TRD im Unterboden: pt5	Lockern durch Tiefpflügen des Unterbodens TRD im Unterboden: pt3	140
+	Humusstufe im OB: h3 Humusstufe im UB: h1	Erhöhen des Humusgehaltes im Oberboden (OB) und Unterboden (UB) durch Belassen von Mähgut und Laubfall auf dem Boden, verbunden mit Verbesserung des Boden-pH und der damit verbundenen Erhöhung des mikrobiellen Umsatzes und der Regenwurmaktivität Humusstufe im OB: h4 Humusstufe im UB: h2	141
+	effektiver Wurzelraum: 100 cm	Etablierung tiefer wurzelnder Pflanzen effektiver Wurzelraum: 100 cm	154

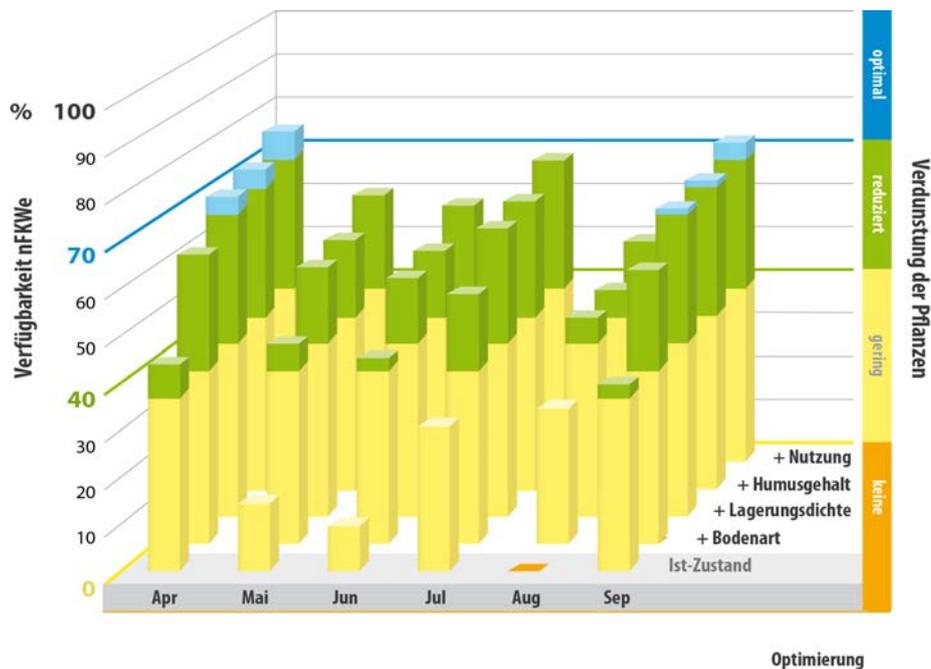


Abb. 10: Kumulierte Auswirkungen der Optimierung von Bodeneigenschaften auf den Speicherfüllstand der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe), berechnet für das Referenzjahr 1974 (30 % aller Sommer des Referenzzeitraums 1960 bis 1990 sind trockener als der Sommer 1974; modifiziert nach DAMM 2011)

In der Tabelle 7 wurden Optimierungsmaßnahmen und deren Wirkung zusammengestellt sowie um Beispiele zur praktischen Umsetzung ergänzt.

Tab. 7: Verbesserungsmaßnahmen für den Wirkungsweg Boden

Maßnahmenpfad „Boden“			
Maßnahmen	Wirkung	Beispiel	Wirkungspotenzial (pfadübergreifend)
Optimierungsziel: Erhalt des Bodenwasserspeichers			
Freihalten von Böden mit hoher Wasserspeicherkapazität von Versiegelung und Verdichtung insbes. in klimastrategisch wichtigen Bereichen (z.B. Frischluftschneisen, siedlungsnahen Flächen)	Verringerung der Aufheizung Vergrößerung der Fläche, die für Versickerung und Speicherung von Wasser zur Verfügung steht	Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen z.B. im Rahmen der Eingriffs-/ Ausgleichsregelung Optimierung der Flächennutzung und des Anteils versiegelter Flächen im B-Plan	+++ (vgl. Beispiel in Kap.3.3.1 und 3.3.2)
Freihalten von Böden mit Grundwasseranschluss von Versiegelung und Verdichtung, insbes. in klimastrategisch wichtigen Bereichen (z.B. Frischluftschneisen, siedlungsnahen Flächen)	längeres Nachlieferungsvermögen von Wasser über kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser	Berücksichtigung von grundwassernahen Böden im B-Plan	+++ (vgl. Beispiel in Kap. 3.3.2)
Vermeidung von Bodenschadverdichtung bei der Gestaltung und Nutzung von Freiflächen	Erhalt des für die Wasserspeicherung zur Verfügung stehenden Porenraums	kein Befahren bei ungünstigen Bodenfeuchten bodenkundliche Baubegleitung verdichtungsfördernde Bodennutzung vermeiden	++
Optimierungsziel: Erhöhung des Bodenwasserspeichers			
Aufbringen von Mineralboden mit gleichen oder besseren Wasserspeichereigenschaften	Vergrößerung des effektiven Wurzelraums	Auftrag von Oberboden aus anderen Baumaßnahmen	+++
Aufbringen von Mineralboden mit höherem Feinbodenanteil	Vergrößerung des effektiven Wurzelraums + Erhöhung der bodenartbedingten Wasserspeicherfähigkeit	Auftrag von bindigerem Oberboden, z.B. Überschuss aus anderen Baumaßnahmen	+++
Aufbringen von Mineralboden mit höherem Humusgehalt*)	Vergrößerung des effektiven Wurzelraums + Erhöhung der humusbedingten Wasserspeicherfähigkeit	Auftrag von humusreichem Oberboden, z.B. Überschuss aus anderen Baumaßnahmen	+++
Erhöhung des Humusgehalts im Boden durch Bewirtschaftungsmaßnahmen*)	Erhöhung der humusbedingten Wasserspeicherfähigkeit	Belassen von Mähgut und Laubfall auf dem Boden Erhöhung des mikrobiellen Umsatzes z.B. durch Erhöhung des Boden-pH Bewässerungsmaßnahmen	+
Bodenlockerung	Optimierung der Trockenrohdichte (TRD)	mechanisches Lockern z.B. Grubbern des Oberbodens oder Tiefpflügen zur Lockerung des Unterbodens Verbesserung der Lebensbedingungen für Bodenorganismen, z.B. Regenwürmer Etablierung tief wurzelnder Pflanzenarten und Pflanzen mit stark verzweigtem Wurzelsystem	++

*) hier sind die bodenschutzrechtlichen Vorgaben zur Auf- und Einbringung von Bodenmaterial mit (naturbedingten) TOC-Gehalten > 1-M.-% zu beachten, vgl. LUA Merkblatt 44 (2004) bzw. AHU AG 2012

Ob eine Optimierungsmaßnahme den gewünschten Effekt erzielt, ist vom Ist-Zustand des Bodens abhängig. In Abhängigkeit von den vorliegenden Bodeneigenschaften kann man abschätzen,

- ob die Bodeneigenschaften zu erhalten und im Planungsvorhaben zu schützen (z.B. Böden mit hohen nutzbaren Wasserspeicherkapazitäten, Böden mit Grundwasseranschluss) oder
- die Bodeneigenschaften zu verbessern sind, und wenn ja, mit welchen Maßnahmen die größten Effekte erzielt werden können.

Beispielsweise ist es effizient, feuchte, kühlleistungsstarke Böden von Bebauung freizuhalten, während trockene, urban-industriell überprägte Böden eher durch aktive Maßnahmen zur Vergrößerung der Wasserspeicherfähigkeit in ihrem Kühlleistungspotenzial verbessert werden können.

Die aufgezählten Maßnahmen wirken dabei nicht nur auf das Wasserspeichervermögen, sondern auch positiv auf den Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre, den Sauerstoffgehalt im Boden, die Erwärmung des Bodens, eine hohe Bodenlebewesenaktivität und ein gutes Wurzelwachstum (BLE 2006). Dies begünstigt das Pflanzenwachstum und führt zusätzlich zu einer besseren Verdunstungsleistung (DAMM 2011).

Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserspeichereigenschaften sind sogenannte „no-regret“-Maßnahmen, da deren positive Effekte auch unabhängig vom Klimawandel langfristig von Nutzen sind.

4.2 Maßnahmenpfad „Pflanze“

Durch die Vegetation wird die Ausnutzung des Bodenwasserspeichers bestimmt. Eine Optimierung der Bepflanzung ist vor allem dann sinnvoll, wenn auf den Flächen eine ausreichende Wasserversorgung entweder durch gute Bodeneigenschaften, kapillaren Aufstieg oder Bewässerung sichergestellt ist. Denn nur bei unbegrenzter Wasserverfügbarkeit erreichen Pflanzen ihr Verdunstungsmaximum.

Ist genügend Wasser vorhanden, kann durch eine geeignete Bepflanzung die Verdunstung deutlich ansteigen.

Bei der Bepflanzung muss zudem darauf geachtet werden, dass der Abtransport der mit Wasserdampf gesättigten Luft durch Windbewegung nicht durch größere Pflanzen, z.B. Bäume mit ihren Kronen, verhindert wird.

Wie viel Wasser verdunsten Pflanzen im Vergleich zu Gewässern?

Pflanzen decken etwa 90 % ihres Jahreswasserbedarfs aus dem Bodenraum, den sie sich mit ihren Wurzeln erschließen können (effektiver Wurzelraum). Die Größe dieses Raums ist abhängig von den Bodeneigenschaften (vgl. Kapitel 3.2) und der Pflanzenart.

Die Summe der Verdunstung von freien Wasseroberflächen liegt nach DWD (1996-2014) um 700 mm/a. So wurde für ein Beispielgewässer im Landschaftsraum „Sächsische Mittelgebirge“ ein Wert von 650 mm/a (mittlere E_{pot} 540 mm/a) festgestellt, für Berliner Gewässer ein Wert von rund 730 mm/a.

Tab. 8: Mittlere jährliche Evapotranspirationsleistungen verschiedener Pflanzen (Zusammenstellung nach WOHLRAB et al. 1992; LARCHER 2001; DWA 2002 aus HARLAß 2008)

Pflanzenart	mittlere Evapotranspiration [mm/a]
Schwimmpflanzen	1.000-1.500
Hochstauden in Flussauen	800-1.500
Sumpfpflanzen	ca. 1. 100
Nadelwälder	500-700
Laubwälder	500-600
Grasflächen	400-500
Ackerflächen	300-400
Heideflächen	ca. 200

Nur in Regionen mit stark negativer klimatischer Wasserbilanz und hier besonders in sehr trockenen Sommern kann die Verdunstung von der Wasserfläche höher sein als vom umgebenden Naturraum (DVWK 1996). Dann reduzieren auch tiefwurzelnde Pflanzen ihren Wasserverbrauch und ihre Transpiration, während die freie Wasserfläche weiterhin verdunstet. In Gebieten mit ausgeglichener oder positiver Wasserbilanz verdunstet die bewachsene Fläche in der Jahressumme mehr als die freie Wasserfläche.

Ursachen sind die Bestandshöhe (Rauhigkeit) und die zusätzliche Interzeptionsverdunstung von Pflanzen nach Niederschlägen.

Nach Messungen von TUSCHL (1970) am Neusiedler See beträgt die Evapotranspiration eines geschlossenen Schilfbestandes in den Monaten April bis Oktober 950 bis 1.100 mm. Die Verdunstung der offenen Seefläche schwankt in der gleichen Zeit zwischen 400 und 700 mm, d.h. die Transpiration der Schilfbestände beträgt im Mittel das 1,9-Fache der Wasserverdunstung.

Ein Vergleich mit Tabelle 8 zeigt, in welcher Höhe die Verdunstungsmenge freier Wasserflächen durch Wasserpflanzen (keine Teichrosen, sondern Schilf, Binsen, Röhricht), Bäume und Sträucher in Feuchtgebieten übertroffen werden kann. Den Pflanzen steht über die umfangreiche Blattmasse eine größere Verdunstungsfläche bei gleichzeitig unbegrenzter Wasserversorgung zur Verfügung (HARLAß 2008).

Der überwiegende Anteil des von den Pflanzen aufgenommenen Wassers wird für die Transpiration und damit für die Transportprozesse in den Pflanzen benötigt. Das Verhältnis der Transpirationsmenge zur Menge des beim Biomasseaufbau umgesetzten Wassers ist abhängig von der Pflanzenart und liegt zwischen 100:1 und 1.000:1 (HELLIE 2004).

Die Verdunstungsleistung von Pflanzen ist deshalb auch von der Wachstumsphase (d.h. Blattform und -fläche) abhängig, in der sich die Pflanze gerade befindet. Voll entwickelte landwirtschaftliche Bestände können im Sommer nach Regenfällen bis zu 14 mm pro Tag verdunsten.

Tab. 9: Verbesserungsmaßnahmen für den Maßnahmenpfad „Pflanze“

Maßnahmenpfad „Pflanze“			
Optimierungsziel: Etablierung von Pflanzen mit standortsangepassten hohen Verdunstungsleistungen			
Maßnahmen	Wirkung	Beispiel	Wirkungspotenzial (pfadübergreifend)
Anpassung von Pflegemaßnahmen, um die Etablierung eines großen Wurzelsystems fördern Auswahl von Pflanzen mit großem / tief reichendem Wurzelsystem	Vergrößerung des effektiven Wurzelraums und damit des pflanzenverfügbaren gespeicherten Wassers	extensive Pflege, z.B. durch vergrößerte Mahdabstände auf Rasenflächen Ansiedlung von tief wurzelnden Gehölzen	++
gezielte Auswahl geeigneter Pflanzen mit hoher Transpirationsleistung für Standorte mit ausreichender Wassernachlieferung	Erhöhung der Luftfeuchtigkeit und der Kühlwirkung verbesserte Ausnutzung des Bodenwasserspeichers	Etablierung von Pflanzen mit großer Phytomasseproduktion (z.B. Sumpfpflanzen) Etablierung von Pflanzenarten mit vielen Stomata bezogen auf die Blattfläche	+++

Auf Böden mit ungünstigen Bodeneigenschaften und flach wurzelndem Bewuchs kann die Kühlleistung aufgrund des geringen Rückhaltevermögens schon während kurzer Trockenperioden in durchschnittlichen Jahren reduziert werden. In Jahren, in denen längere und häufiger wiederkehrende Trockenperioden herrschen, reicht auch die Nachlieferung aus tief durchwurzelbaren Böden mit gutem Wasserspeichervermögen nicht aus, um die Vegetation optimal mit Wasser zu versorgen. Fällt der Wassergehalt unter 70 % der nFKWe, leidet die

Vegetation unter Wasserstress und reduziert zur Anpassung an die trockeneren Bedingungen ihre Verdunstungsleistung. Damit sinkt die Kühlleistung des Standortes. Auf grundwassernahen Standorten ist ein Ausgleich über längere Zeit über Wasser aus dem kapillaren Aufstieg möglich. Verbesserungsmaßnahmen für den Maßnahmenpfad „Pflanze“ zielen auf die Etablierung von Pflanzen mit standortangepassten hohen Verdunstungsleistungen (vgl. Tab. 9). Eine weitere Möglichkeit Wassermangel auszugleichen, sind Bewässerungsmaßnahmen.

4.3 Maßnahmenpfad „Bewässerung“

Betrachtet man die vor allem für das Problemfeld „Hitze“ relevanten Sommermonate, zeigt sich gerade in Trockenjahren, dass es ein großes Potenzial zur Verbesserung der Verdunstungsleistung gibt. (DAMM 2011)

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, um zu vermeiden, dass die Pflanzen Trockenstress leiden.

Die Speicherfüllstände im Verlauf über den Sommer werden dabei maßgeblich von den Standortfaktoren Boden, Vegetation und deren Wasserversorgung durch Niederschläge oder kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser beeinflusst.

Liegt kein Grundwasseranschluss vor, kann in heißen und niederschlagsarmen Perioden der Bodenwasserspeicher durch Bewässerung wieder aufgefüllt werden. Damit würde vermieden, dass die Pflanze aufgrund von Wassermangel ihre Verdunstungsleistung zurückfährt.

Durch eine Bewässerung

- kann ein geringes Wasserrückhaltevermögen im Boden ausgeglichen,
- können Trockenperioden überbrückt,
- kann der erhöhte Wasserbedarf von verdunstungsstarker Vegetation gedeckt und
- kann Boden gezielt als Zwischenspeicher von Überschusswasser aus der Siedlungswasserwirtschaft genutzt werden (vgl. Tab. 10).

Eine aktive Bodenkühlung mittels Bewässerung kann die Kühlleistung der Flächen in extrem trockenen Sommern in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften und Vegetation um rund 75 bis 140 % steigern (DAMM 2014).

Tab. 10: Verbesserungsmaßnahmen für den Maßnahmenpfad „Bewässerung“

Maßnahmenpfad „Bewässerung“			
Optimierungsziel: Auffüllen und Halten des Bodenwasserspeichers in Trockenzeiten durch Bewässerung, um die Verdunstung und damit die Bodenkühlleistung aufrechtzuerhalten			
Maßnahmen	Wirkung	Beispiel	Wirkungspotenzial (pfadübergreifend)
standortangepasste Bewässerung	Erhalt einer optimalen Füllung der Bodenwasserspeicher, um Trockenstress zu vermeiden (nFKWe-Füllstand > 70 %) Erhalt einer maximalen Füllung der Bodenwasserspeicher	Aufrechterhaltung der Bodenkühlleistung in Trockenperioden Erhalt/Etablierung von Feuchtstandorten mit hoher Verdunstungsleistung	+++ +++
Abschätzung des für die Kühlleistung notwendigen Wasserbedarfs	Ausrichtung der Bewässerungsmenge an einen für Pflanzen und Boden optimalen Füllstand	Bedarfsermittlung für extreme Trockenjahre auf Grundlage vorhandener oder einfach im Feld zu erfassender Daten über die klimatische Wasserbilanz	Teil der Vorplanung für standortangepasste Bewässerung
Abschätzung der zur Verfügung stehenden Wasserressourcen	ermöglicht die standortangepasste Auswahl der für Bewässerung verwendeten Wasserressourcen und die Planung der für die Bewässerung geeigneten Infrastruktur	Regenwasser Grundwasser Leitungswasser	Teil der Vorplanung für standortangepasste Bewässerung
Identifizierung des Verfahrens für standortangepasste Bewässerung	ermöglicht die Planung der für die Bewässerung geeigneten Infrastruktur	Bewässerung von oben (z.B. Flächenstau nach Starkregen; Beregnung mittels mobiler Anlagen) Bewässerung von unten (z.B. unterirdische Tröpfchenbewässerung)	Teil der Vorplanung für standortangepasste Bewässerung

Mehr Wasser in die Grünanlagen!

Um die Vegetation der Frei- und Grünflächen vor Trockenschäden zu bewahren, ist es notwendig, effektive und kostengünstige Möglichkeiten zur Bewässerung zu schaffen.

Daher bietet es sich an, Bodenkühlung in die Regenwasserbewirtschaftung der Kommunen zu integrieren. In deren Rahmen werden versiegelte Flächen von der Mischkanalisation abgekoppelt und das anfallende Regenwasser direkt in den Vorfluter oder auch oberflächlich auf Verdunstungs- oder Versickerungsflächen abgeleitet. Wird dagegen das anfallende Regenwasser gezielt gesammelt und zwischengespeichert, kann es in heißen trockenen Wetterperioden zur Beregnung von Grünanlagen und damit für die Bodenkühlleistung zur Verfügung stehen.

In Grünanlagen mit starker Erholungsnutzung, besonders repräsentativer Gestaltung oder trockenheitsempfindlichem Artenbestand sollten automatische Bewässerungsanlagen nachgerüstet werden, die aus Regenwasserdepots gespeist werden. Der Aufwand für eine manu-

elle Bewässerung ist gerade in Trockenperioden sehr hoch und kann i.d.R. durch die Grünflächenämter kaum geleistet werden (SENATSV ERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT 2012).

Wird nur der wirtschaftliche Aufwand betrachtet, bietet sich für die Bewässerung von Grünflächen zum Zweck der Bodenkühlung auch die gezielte Förderung von Grundwasser an. Dies lässt sich aufgrund der geringen benötigten Wassermengen z.B. dezentral mit Hilfe solarbetriebener Pumpen umsetzen. Die Bewässerung aus lokal gewonnenem Grundwasser bleibt dennoch ein Abwägungsproblem: Insbesondere unter Siedlungsgebieten ist bei der Umsetzung dieser Maßnahme eine kontinuierliche Kontrolle der Qualität des Beregnungswassers notwendig.

Wo Kostengründe eine automatische Bewässerung verbieten, bietet es sich auch an, Hydranten und Anschlussstellen für die Bewässerung mit Regnern und Schläuchen bereitzustellen (SENATSV ERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT 2012).

Besonders die Randbereiche von Grünflächen sollen ausreichend versickerungsfähig sein, um das im Umfeld anfallende Wasser aufnehmen zu können. Das stellt neue Anforderungen an die Topographie, Bodenbeschaffenheit und Bepflanzung dieser Übergangszonen und die Gestaltung der urbanen Landschaft.

4.4 Maßnahmenpfad „Urbane Landschaftsgestaltung“

Neben den drei natürlichen Faktoren Boden, Pflanzen und Wasser auf den Flächen selbst, kann auch durch gestalterische Maßnahmen eine Verbesserung der Bodenkühlleistung erzielt werden. Hierzu zählen angelegte temporäre Wasserflächen, wie z.B. Versickerungsmulden, Feuchtgebiete und die Vergrößerung der verdunstenden Oberfläche durch entsprechende Landschaftsmodellierungen. Versickerungsmulden und Feuchtgebiete bieten zusätzlichen Speicherraum und z.T. auch Rückhaltungsmöglichkeiten für Starkniederschläge. Dies ist insbesondere im Kontext des verstärkten Auftretens von Starkregenereignissen (Handbuch Stadtklima: Problemfeld „Extremniederschläge“) von großer Bedeutung. Regenrückhaltebecken oder unterirdische Zisternen bieten einen großen Speicherraum für Niederschläge. Das dort zurückgehaltene Wasser kann wiederum zur Bewässerung von Flächen verwendet werden (vgl. Tab. 11).

Die Wiederherstellung, Erhaltung oder Anlage von mulden- oder talartigen Stadträumen bietet insbesondere in Zusammenhang mit einem ergänzendem Bodenaufbau und/oder Bodenverbesserungsmaßnahmen vielfältige Möglichkeiten zur Entwicklung und Nutzung kühlleistungsstarker Böden (WILLAND et al. 2014).

Tab. 11: Verbesserungsmaßnahmen für den Maßnahmenpfad „Urbane Landschaftsgestaltung“

Maßnahmenpfad „Urbane Landschaftsgestaltung“			
Optimierungsziel: Gestaltung der urbanen Landschaft und Grünanlagen, um Wasser für die Verdunstung zu sammeln und bereitzustellen und Vermittlung zwischen den Problemfeldern „Hitze“, „Extremniederschläge“ und „Trockenperioden“ des „Handbuchs Stadtklima“			
Maßnahmen	Wirkung	Beispiel	Wirkungspotenzial (pfadübergreifend)
Anlegen von temporären Wasserflächen	Speicherraum für Wasser / Überschusswasser	Versickerungsmulden Versickerungsgräben entlang von Straßen	+++
Anlage von dauernassen Standorten	Speicherraum für Wasser / Überschusswasser Nutzung oberflächennah anstehenden Grundwassers Ort für die Etablierung von Pflanzen mit hoher Transpirationsleistung	Feuchtgebiete	+++
Oberflächenvergrößerung durch kleinflächige Landschaftsmodellierung z.B. innerhalb von Grünanlagen)	Vergrößerung der verdunstungsaktiven Bodenoberfläche und Vegetationsdecke, ggf. positive Wirkung auf Versickerung oder Naturschutz	Modellierung durch Ab-/Auftrag bzw. Umlagerung von zur Wasserspeicherung gut geeignetem Mineralboden (unter Berücksichtigung der stofflichen Vorsorgeanforderungen nach BBodSchV)	++
Anlage von technischen Einrichtungen zur Speicherung von Überschusswasser	Speicherraum für Beregnungswasser	Bau von Zisternen Bau von Regenwasserrückhaltebecken	++
Vermeiden der Notwendigkeit einer Absenkung des Grundwasserspiegels	Ermöglichung kapillaren Aufstiegs von Wasser für Pflanzen	Vermeidung von Kellerbauten	+++
Vermeidung von Flächenversiegelung	Erhalt von Freiflächen zur Zwischenspeicherung von Wasser	Festsetzung der Fläche, die von der Bebauung freizuhalten ist, und ihrer Nutzung Festsetzung der öffentlichen und privaten Grünflächen wie Parkanlagen Verringerung der Versiegelung durch Festlegung von Baugrenzen	+++
Planerische Festsetzung von Bindungen für Bepflanzungen und für die Erhaltung von Bäumen, Sträuchern und sonstiger Bepflanzung	Sicherung des Erhalts von Flächen zur Integration in stadtklimatische Konzepte	Erhalt der Bepflanzung Erhalt von Freiflächen zur Vernetzung von Grünanlagen und Frischluftschneisen	+++

5 Integration potenzieller Bodenkühlleistungen in kommunale Klimaanpassungskonzepte

Anhand von Beispielen aus der Praxis wird in diesem Kapitel erläutert, welche Wirkketten berücksichtigt werden müssen, um den Baustein „Bodenkühlung“ in ein städtisches Konzept zur Anpassung an den Klimawandel zu integrieren. Hierbei geht es in erster Linie darum, der städtischen Überhitzung während sommerlicher Hitzeperioden entgegenzuwirken. Von zentraler Bedeutung sind daher die unversiegelten städtischen Ausgleichsräume und deren Anbindung an die innerstädtischen Wärmeinseln durch Frischluftschneisen und Luftleitbahnen.

Die Integration des Bausteins „Bodenkühlung“ in kommunale Anpassungskonzepte erfordert eine dreistufige Vorgehensweise:

- Zunächst müssen die Freiflächen im Stadtgebiet bezüglich ihrer Bedeutung für die Abschwächung der städtischen Überwärmung beurteilt werden. Hierbei spielt das übergeordnete Windsystem während austauscharmer Strahlungswetterlagen mit hohen Lufttemperaturen eine Rolle. Ebenso ist die Lage und damit Anbindung der Freiflächen über Luftleitbahnen von großer Bedeutung. Eine wirksame Abschwächung der Hitzebelastung in Städten durch das Kühlungspotenzial von Freiflächen kann nur entstehen, wenn der Luftaustausch zwischen den bebauten und den unversiegelten Stadtgebieten gewährleistet ist.
- Das Kühlungspotenzial der für die Abschwächung der städtischen Überwärmung relevanten Freiflächen kann auf Grundlage der Ausstattung der Freifläche mit Vegetation, des Wasserangebotes sowie der Bodenparameter abgeschätzt werden. Um die Wirkkette „Niederschlag – Bodenparameter – Luft“ beispielhaft zu erfassen, wurden an drei unterschiedlichen Freilandstandorten in Neuss Klimastationen aufgestellt und die jeweiligen Bodenprofile erfasst. Ein Beispiel zu ersten Erkenntnissen aus diesen Messungen ist im Anhang 2 dargestellt.
- In einem dritten Schritt kann die jeweilige Beurteilung des Kühlungspotenzials einer Freifläche dazu führen, dass die Fläche bei guter Beurteilung im Rahmen des Anpassungskonzeptes als Schutzzone ausgewiesen wird. Eine Veränderung, insbesondere Versiegelung sollte in diesem Fall unbedingt vermieden werden. Stadtklimatisch relevante Freiflächen mit einem aktuell geringen Kühlungspotenzial können im Rahmen eines Klimaanpassungskonzeptes mit Verbesserungsmaßnahmen belegt werden. Die kann sowohl die Bodenparameter wie auch die Vegetationsausstattung oder die Wasserversorgung betreffen. Eine Möglichkeit der Überprüfung von Verbesserungsmaßnahmen ist durch die Anwendung eines mikroklimatischen Modells gegeben. Beispielhaft wird die Anwendung des Modells ENVI-met (www.ENVI-met.com) für diesen Zweck vorgestellt.

In der Abbildung 11 ist dieses schrittweise Vorgehen zur Integration von potenziellen Bodenkühlleistungen in städtische Klimaanpassungskonzepte schematisch zusammengefasst. Zunächst muss die Relevanz einer Fläche für das Anpassungspotenzial bezüglich des Klimawandels ermittelt werden. Dazu gehört neben der Bodenkühlleistung auch die Lage der Fläche im Stadtgebiet. Falls notwendig, kann zwischen verschiedenen, im Leitfaden erläuterten Optimierungsmaßnahmen gewählt werden. Zur Überprüfung möglicher Maßnahmen zur Optimierung der Bodenkühlleistung an einem Standort kann das Modell ENVI-met herangezogen werden.

Die Anwendung der mikroskaligen Modellierung zur Überprüfung verschiedener Bodenverbesserungs- und Planungsvarianten ist sehr komplex und setzt einen erfahrenen Benutzer voraus, da auch interne Modellparameter verändert werden müssen. Deshalb wird den Kommunen an dieser Stelle das Einholen eines externen Gutachtens empfohlen.

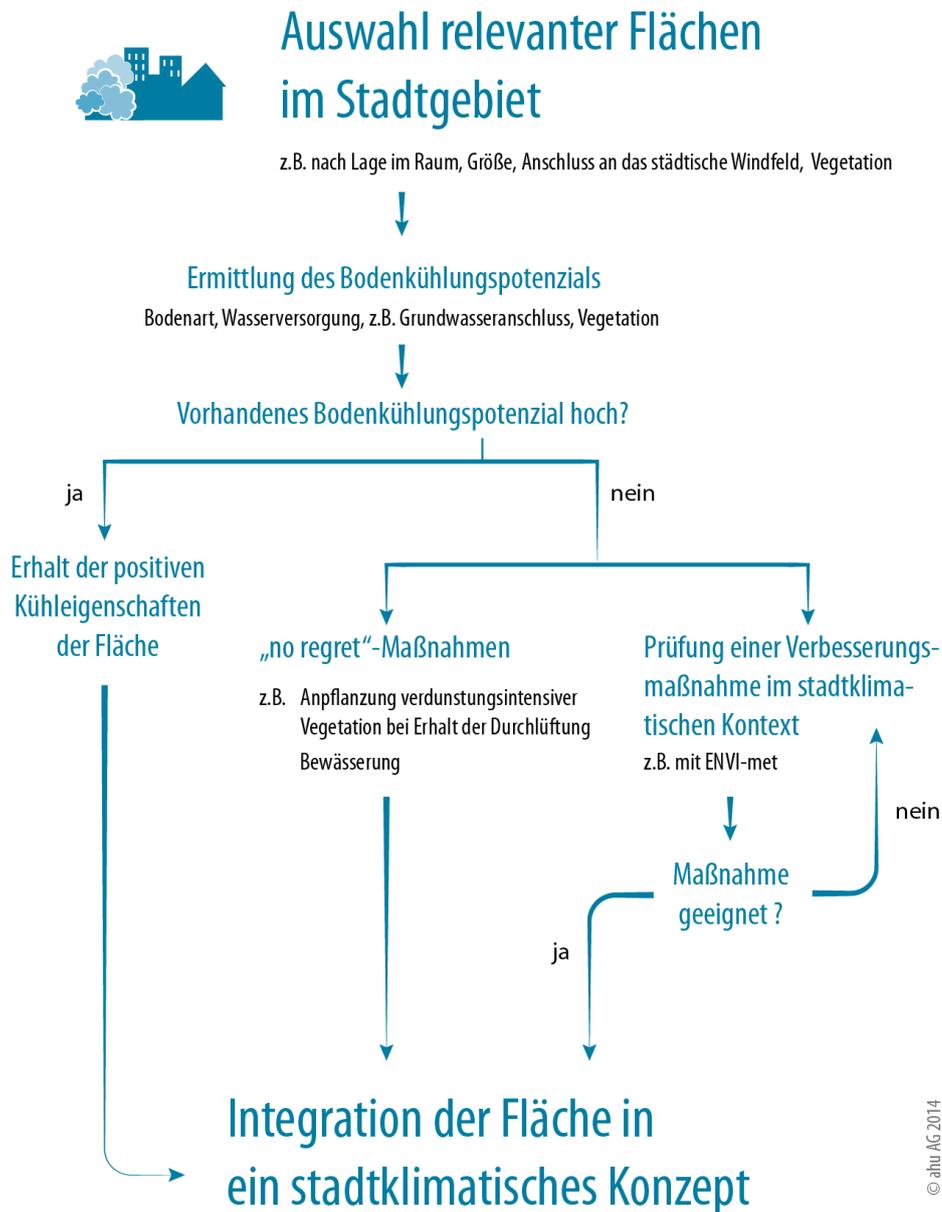


Abb. 11: Ablaufschema zur Integration potenzieller Bodenkühlleistungen in stadtklimatische Konzepte

Integration der Bodenkühlleistung in das Klimaanpassungskonzept und stadtklimatische Zielsystem der Stadt Neuss

Im Ergebnis der langjährigen Stadtklimauntersuchungen und der Einrichtung eines Stadtklimakatasters seit Ende der 1980er Jahre bis heute, liegen für die Stadt Neuss Klimafunktionskarten vor. Sie enthalten z.B. Informationen zu Lokalwindsystemen, zur Abgrenzung von städtischen Wärmeinseln, zur Identifikation von Kaltluftentstehungsgebieten und Ventilations-schneisen.

Diese Informationen sind Grundlage für klimatologische Planungshinweiskarten (vgl. Abb. 12) die sich unter anderem an folgenden stadtklimatischen Leitbildern ausrichten:

- Frühzeitige abendliche Abkühlung von Wohngebieten während hochsommerlicher Strahlungswetterlagen
- Sicherung von relevanten Ventilationsschneisen und Kaltluftentstehungsgebieten (ausreichender Kalt- und Frischlufttransport, Verbesserung ihrer Kühlwirkung) durch Vermeidung von Strömungshindernissen (Bebauung und Vegetation insbes. Wald), Bepflanzung mit Dauergrünland
- Erhalt von gliedernden Grünstrukturen zwischen den Stadtteilen
- Optimierung von Planungen durch Lokalklimagutachten (Simulationsrechnungen)
- Berücksichtigung von Extremwetterereignissen aufgrund des Klimawandels
- Berücksichtigung der Bodenkühlleistung (Verdunstung)

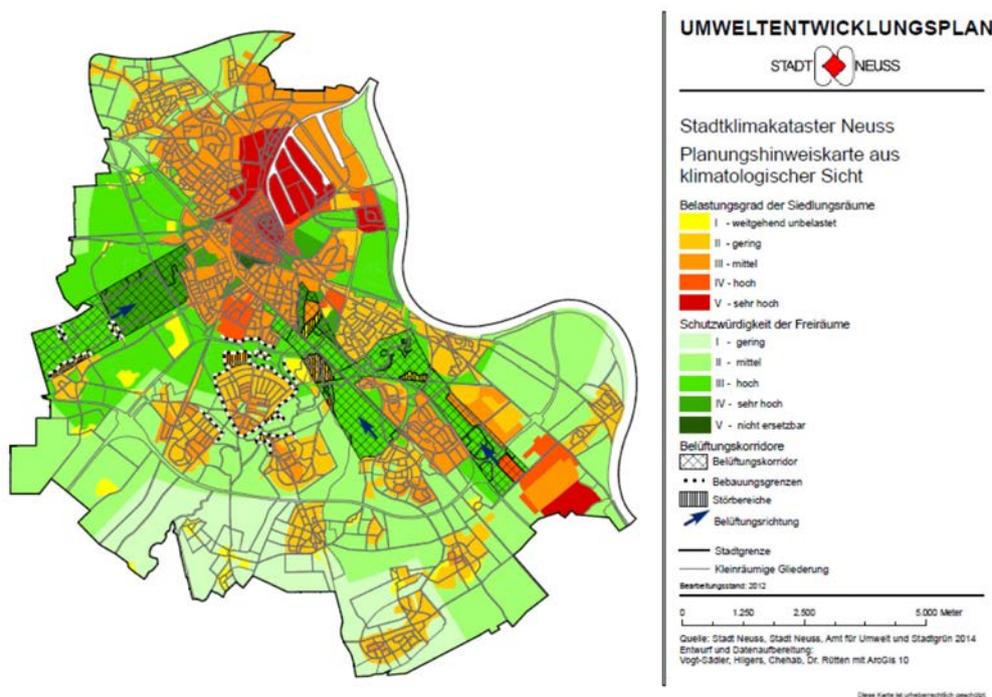


Abb. 12: Planungshinweiskarte aus klimatologischer Sicht. Stadtklimakataster Neuss (STADT NEUSS 2014)

Die klimatologische Planungskarte zeigt Freiflächen im Stadtgebiet, die für die Abschwächung der städtischen Überwärmung von Bedeutung sind. Um das Kühlungspotenzial dieser Freiflächen einzuschätzen, wird deren Ausstattung bezüglich Vegetation, Wasserangebot und Boden näher betrachtet. Bezüglich der Bodenparameter ist das Speichervermögen für pflanzenverfügbares Wasser (nutzbare Feldkapazität) die relevante Größe (vgl. Kapitel 3.2 und 4.1).

Informationen darüber stehen aus dem Bodenbelastungskataster der Stadt Neuss in Form der Karte der Wasserspeicherkapazität zur Verfügung (Abb. 13). Diese Karte basiert auf der Auswertung der Bodenkarte 1:50.000 des Geologischen Dienstes NRW (GD NRW 2008). Sie ist aufgrund ihres Maßstabs und ihrer Inhalte (ohne urban-industriell überprägte Böden) für die Ableitung von Suchräumen geeignet.

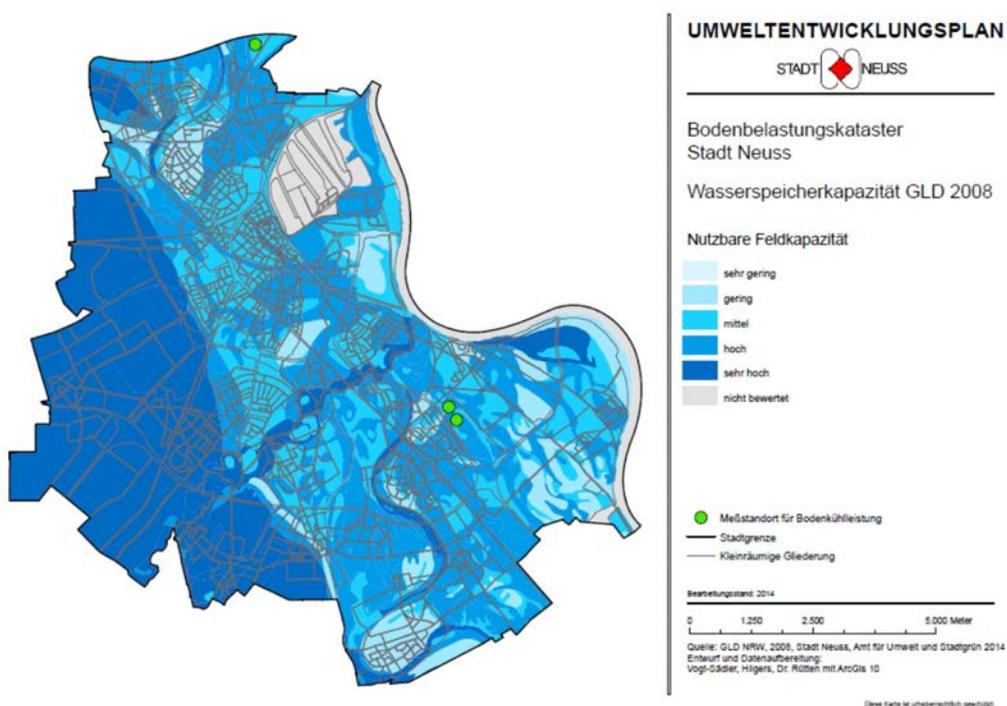


Abb. 13: Thematische Karte zur Wasserspeicherkapazität. Bodenbelastungskataster Neuss (GD NRW 2008)

Durch Verschneidung der Planungshinweiskarte mit ihren Informationen zur Schutzwürdigkeit von Freiräumen und der Karte zur Wasserspeicherkapazität der Böden können schließlich die Flächen mit dem größten Kühlungspotenzial herausgearbeitet werden (Abb. 14).

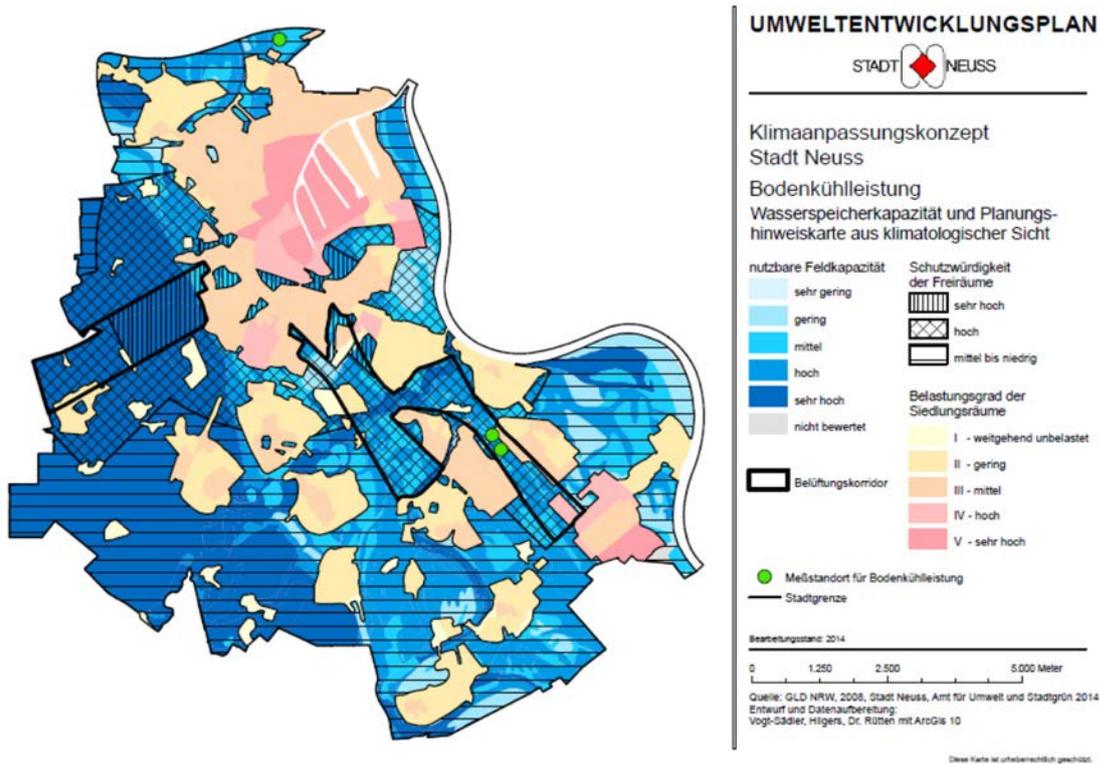


Abb. 14: Verschneidung der Planungshinweiskarte aus klimatologischer Sicht mit der Karte zur Wasserspeicherkapazität. (STADT NEUSS 2014)

Deutlich erkennbar sind die speicherstarken Böden aus Löss mit sehr hoher nutzbarer Feldkapazität im Westen des Stadtgebietes. Dieser wird im Nordwesten von einem ein Freiraum mit hoher bzw. sehr hoher Schutzwürdigkeit überlagert. Südöstlich des Siedlungsgebietes liegen Freiräume mit hoher Schutzwürdigkeit. Die dort anstehenden Böden besitzen eine mittlere bis hohe, z.T. sehr hohe, nutzbare Feldkapazität.

Beide Areale bieten ein hohes Kühlungspotenzial seitens der Böden und sind Kaltluftentstehungsgebiete. Sie sind aber auch wichtige Belüftungskorridore. Das Ergebnis der Zusammenführung dieser Informationen ist in Abbildung 15 dargestellt.

Im vorliegenden Beispiel sind die verdunstungsstarken Böden bereits als schutzwürdige Freiräume ausgewiesen. Im Rahmen eines Klimaanpassungskonzeptes können jedoch durch diese Vorgehensweise weitere stadtklimatisch relevante Freiflächen mit aktuell geringem Kühlungspotenzial herausgefunden werden. Diese lassen sich dann bei Eignung der Böden gezielt mit Verbesserungsmaßnahmen belegen. Im nachfolgenden Kapitel wird skizziert, wie die Anwendung eines mikroklimatischen Modells zur Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Optimierung der Bodenkühlleistung beitragen kann.

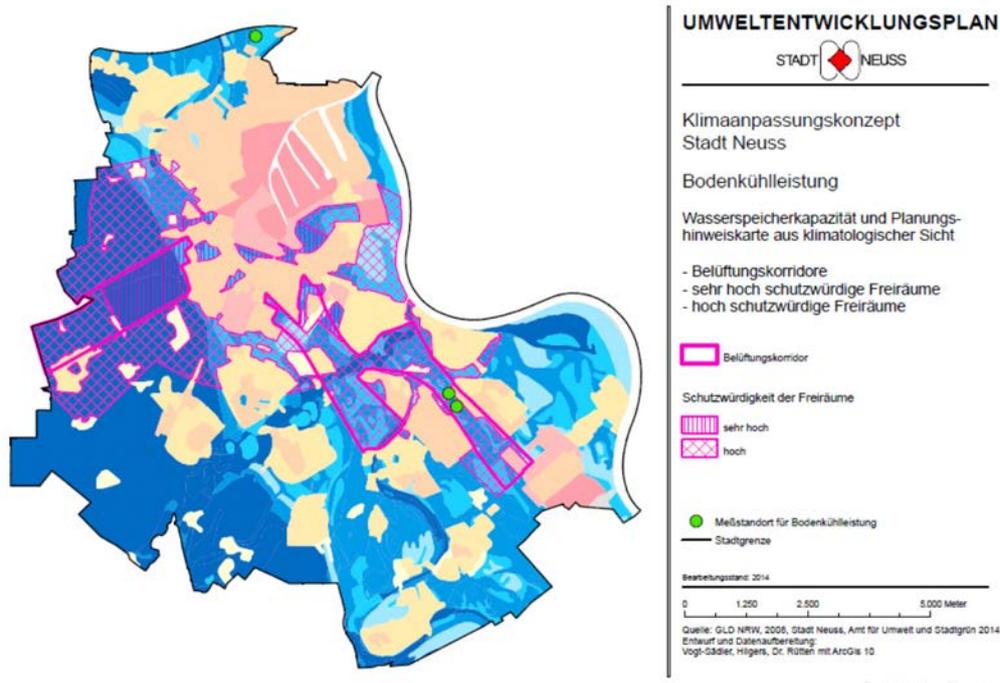


Abb. 15: Ergebniskarte zur Integration der Bodenkühlleistung in das Klimaanpassungskonzept der Stadt Neuss (STADT NEUSS 2014)

ENVI-met – Modellrechnungen

Da das Stadtklima in einem direkten Zusammenhang zur Gestaltung der Bebauung steht, kann durch Veränderungen der Stadtstruktur das lokale Klima sowohl zum Positiven als auch zum Negativen verändert werden. Die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Klimaelementen und der Stadt sind jedoch zu komplex, als dass man sie ohne weiteres abschätzen könnte. Sollen die Auswirkungen einer beabsichtigten Veränderung der Stadtstruktur vorhergesagt werden, so ist der Einsatz von numerischen Simulationsmodellen unumgänglich.

Um einen Vergleich zwischen verschiedenen Bodenzuständen zu ermöglichen wird das in der AG Klimaforschung der Ruhr-Universität Bochum und an der Universität Mainz entwickelte Modell ENVI-met eingesetzt (www.ENVI-met.com). ENVI-met ist ein dreidimensionales prognostisches numerisches Strömungs-Energiebilanzmodell. Die physikalischen Grundlagen basieren auf den Gesetzen der Strömungsmechanik, der Thermodynamik und der Atmosphärenphysik. Das Modell dient zur Simulation der Wind-, Temperatur- und Feuchteverteilung in städtischen Strukturen. Mit diesem mikroskaligen Modell werden die Wechselwirkungen zwischen Boden, Oberflächen, Pflanzen und der Atmosphäre in einer städtischen Umgebung simuliert. Es werden Parameter wie Gebäudeoberflächen, Bodenversiegelungsgrad, Bodeneigenschaften, Vegetation und Sonneneinstrahlung einbezogen. Durch die Wechselwirkungen von Sonne und Schatten sowie die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Materialien (z.B. spezifische Wärme, Feuchtegehalt, Reflexionseigenschaften) entwickeln sich im Lauf eines simulierten Tages unterschiedliche Oberflächentemperaturen, die ihrerseits in Abhängigkeit vom Windfeld ihre Wärme mehr oder minder stark an die Luft abgeben.

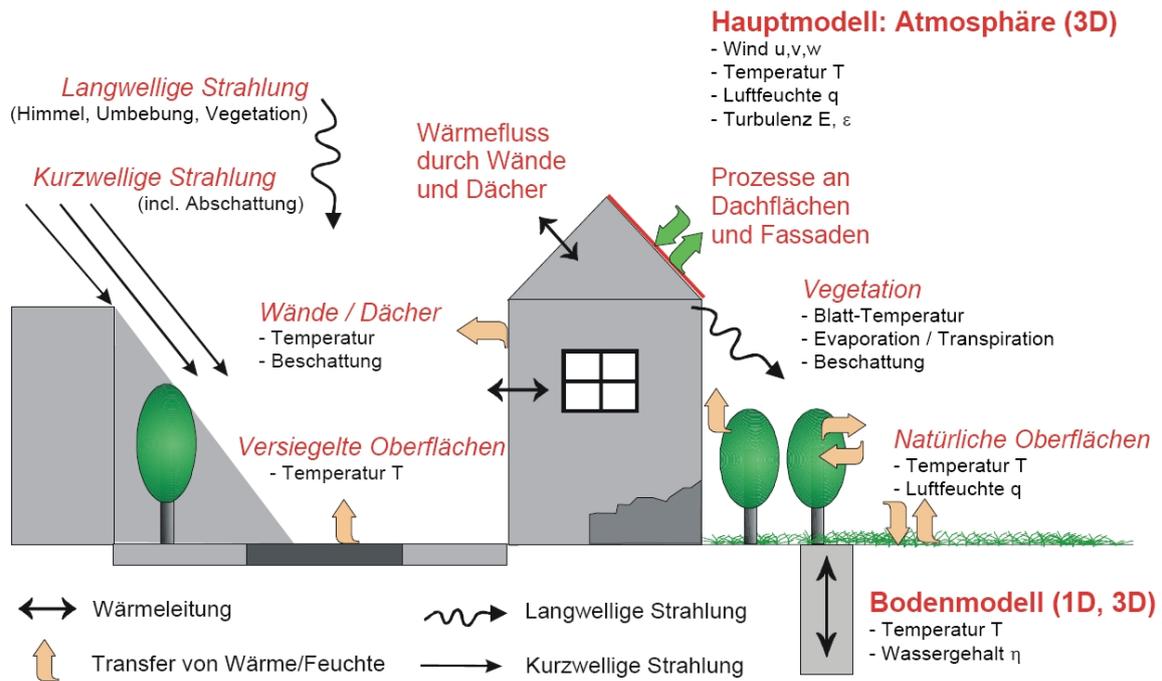


Abb. 16: Austauschprozesse im ENVI-met Modell (verändert nach BRUSE & FLEER 1998)

Um Wechselwirkungen zwischen der Vegetation und der Atmosphäre simulieren zu können, wird das physiologische Verhalten der Pflanzen nachgebildet. Hierzu zählt das Öffnen und Schließen der Spaltöffnungen zur Steuerung des Wasserdampfaustausches mit der Umwelt, die Aufnahme von Wasser über die Wurzeln oder die Änderung der Blatttemperatur im Laufe des Tages. In der Abbildung 16 sind die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Komponenten eines Modellgebietes und der Atmosphäre dargestellt.

Das mikroskalige Klimamodell ENVI-met verwendet Datenbankdateien, in welchen die grundlegenden Informationen über die Materialeigenschaften, Profilaufbau sowie physiologische Parameter der Vegetation hinterlegt sind. Diese Datenbanken müssen vor der Anwendung des Modells durch die aus den Untersuchungen der Bodenprofile hervorgegangenen Informationen und Erkenntnisse erweitert.

- 1) Den Bodenartenuntergruppen der Feinfraktion können die bekannten hydrologischen und thermodynamischen Parameter zugeordnet werden. Hierzu muss die Datei *Soils.dat* erweitert werden.
- 2) Der Profilaufbau kann in der Datei *Profils.dat* vorgenommen werden. Die in den realen Profilen vorhandenen vertikalen Horizontmächtigkeiten wurden annähernd in den konfigurierbaren Tiefen des Klimamodelles nachgebildet.
- 3) Die Erweiterungen der Vegetationsdatenbank erfolgen in der Datei *Plants.dat*.

Durch eine sukzessive Anpassung der Bodenparameter in der ENVI-met-Bodendaten-Datei und der Pflanzenparameter in der ENVI-met-Pflanzendaten-Datei mit entsprechenden Änderungen im Aufbau des Modellgebietes kann eine Annäherung der simulierten Tagesgänge an die gemessenen Tagesgänge erreicht werden. Damit wird es in Zukunft auch möglich sein, das klimatische Verhalten von stark anthropogen überformten Böden zu simulieren.

Um die Auswirkung von Boden Anpassungsmaßnahmen im Zusammenhang mit städtischer Anpassung an den Klimawandel zu simulieren, sind die folgenden Schritte notwendig:

- Schritt 1: Erfassung des Bodenaufbaus im Gelände
Mindestanforderung: Zusammensetzung der Korngrößenverteilung in den verschiedenen Horizonten bis ca. 1 m Tiefe
- Schritt 2: Bestimmung der Bodenparameter im Labor oder Herleitung der Bodenparameter aus der Korngrößenverteilung für jeden Bodenhorizont (Wassergehalt bei Sättigung, Wassergehalt bei Feldkapazität, Wärmekapazität etc.)
- Schritt 3: Anpassung der ENVI-met-Parameterdateien an die Gegebenheiten im Gelände
- Schritt 4: Erstellen des Modellgebietes für die Simulationen: Im Modellgebiet muss die zu simulierende Freifläche mit ihren Bodeneigenschaften, dem Pflanzenbewuchs und eventuell vorhandenen Gebäuden im Zusammenhang mit der Umgebung, die von der Bodenkühlung profitieren soll, dargestellt werden.
- Schritt 5: Die klimatologischen Eingangsparameter müssen entsprechend einer Wetterlage mit Relevanz für die Klimaanpassung in der Kommune initialisiert werden.
- Schritt 6: Modellrechnungen für den Ist-Zustand und für Anpassungsvarianten
- Schritt 7: Interpretation der Ergebnisse

Für die Einrichtung des Modells zur Bodenkühlpotenzial-Berechnung ist es empfehlenswert, einen Experten zu Rate zu ziehen. Die eigentlichen Berechnungen könnten bei entsprechender Erfahrung mit dem ENVI-met-Modell selbst durchgeführt werden.

6 Glossar

Begriff	Bedeutung
Evaporation	Verdunstung von Wasser auf unbewachsenen Land- oder freien Wasseroberflächen
Evapotranspiration	Summe aus Evaporation und Transpiration
Interzeption	Zurückhalten von Niederschlägen auf der Blattoberfläche. Das Wasser gelangt entweder über Stammabfluss und/oder Kronendurchlass in den Boden oder wird von den Blattoberflächen verdunstet (= Interzeptionsverlust)
Klimareferenzzeitraum	Zeitraum, auf den sich durch Klimamodelle für die Zukunft projizierte Änderungen (z.B. Temperatur, Niederschlag) beziehen. Bsp.: „Die Durchschnittstemperatur wird sich für den Zeitraum der ‚nahen Zukunft‘ um 1 K gegenüber dem Referenzzeitraum 1971 bis 2000 erhöhen“
Zeitraum „nahe Zukunft“	in der regionalen Klimamodellprojektion NRW: Zeitraum von 2021 bis 2050 (LANUV NRW 2014)
Zeitraum „ferne Zukunft“	in der regionalen Klimamodellprojektion NRW: Zeitraum von 2071 bis 2100 (LANUV NRW 2014)
Raumordnung	Teil des Systems der Raumplanung auf Regional- und Landesebene
Raumplanung	Begriff zur Subsummierung aller planerischen Vorgänge, in der Regel bezogen auf ein bestimmtes Verwaltungsgebiet
Resilienz	Anpassungskapazität/-fähigkeit
Sensitivität	Empfindlichkeit
Stadtplanung	Teil des Systems der Raumplanung auf kommunaler Ebene
Transpiration	Verdunstung von Wasser über die Spaltöffnungen der Pflanze
Vulnerabilität	Verletzbarkeit

7 Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. BGR in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.). 5. Aufl. Hannover 2005.
- AHU AG (2012): Grundlagenuntersuchung zur Umlagerung von Böden mit naturbedingten TOC-Gehalten > 1 Masse-% im Unterboden und Untergrund im Emscher-Lippe-Gebiet (Abschlussbericht). Bearbeitet von: Höke, S., Lazar, S., Kaufmann-Boll, C. und Denneborg, M.
- ATV-DVWK (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. Merkblatt M 504. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.) Hennef.
- BMVBS/BBSR (2009a): Ursachen und Folgen des Klimawandels durch urbane Konzepte begegnen. Skizzierung einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.) BBSR-Online-Publikation 22/2009.
- BMVBS/BBSR (2009b): Klimawandelgerechte Stadtentwicklung. Wirkfolgen des Klimawandels. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.). BBSR-Online-Publikation 23/2009.
- BMVBS/BBSR (2009c): Klimawandelgerechte Stadtentwicklung. Rolle der bestehenden städtebaulichen Leitbilder und Instrumente. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.). BBSR-Publikation 24/2009.
- BMVBS/BBSR (2009d): Klimawandelgerechte Stadtentwicklung – Planungspraxis – aktualisierte Fassung der BBSR-Online_Publikation, Nr. 25/2009. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.). BMVBS-Online-Publikation 11/2010.
- BPB (2007): Städte machen sich ihr Klima selbst. Wetterbericht. Interview D. Schönlebe mit Prof. W. Kuttler. fluter.de – Bundeszentrale für politische Bildung (Hrsg.). URL: <http://www.fluter.de/de/megacities/heft/6291/> (letzter Aufruf: 24.08.2014).
- BRUSE, M. & FLEER, H. (1998): Simulating Surface-Plant-Air Interactions Inside Urban Environments with a Three Dimensional Numerical Model, Environmental Modelling and Software, Vol. 13.
- BUNDESREGIERUNG (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. URL: <http://www.bmub.bund.de/N42783/> (letzter Aufruf: 09.04.2014)
- DAMM, E. (2011): Erfassungs- und Optimierungsmöglichkeiten des Kühlpotenzials von Böden, dargestellt an ausgewählten Wohn- und Parkflächen der Stadt Bottrop. Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science (B.Sc.) an der RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Abfallwirtschaft. Aachen Veröffentlicht in: dynaklim-Publikation 32.
- DAMM, E. (2014): Verfügbare Wasserressourcen in der Emscherregion für eine aktive Kühlung durch Böden während Trockenperioden. Abschlussarbeit zur Erlangung des aka-

- demischen Grades Master of Science (M.Sc.) an der RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Abfallwirtschaft. Aachen.
- DWA (2007): Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser. Merkblatt DWA-M 153. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.) Hennef.
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasseroberflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft 238/1996. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (Hrsg.) Bonn.
- DVWK (1998): Feuchtgebiete. Wasserhaushalt und wasserwirtschaftliche Entwicklungskonzepte. DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft 248/1998. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (Hrsg.) Bonn.
- GD NRW (2008): Karte der schutzwürdigen Böden in NRW 1 : 50.000 - Nutzbare Feldkapazität. Bodenbelastungskataster Stadt Neuss, Amt für Umwelt und Stadtgrün.
- HARLAß (2008): Verdunstung in bebauten Gebieten. Dissertation. Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität. Dresden.
- HELLIE, F. (2004): Experimentelle Untersuchung und Modellierung des Interzeptions- und Stammspeichers von landwirtschaftlichen Kulturen und Fichtenwald und Charakterisierung ihres Einflusses auf den Gebietswasserhaushalt. (Experimental investigations and modelling of interception and trunk water storage in agricultural crops and spruce stands and characterization of the effects on the catchment water balance). Dissertation, Internationales Hochschulinstitut Zittau, 131 S.
- HYUN-AH CHOI, WOO-KYUN LEE & WOO-HYUK BYUN (2012): Determining the Effect of Green Spaces on Urban Heat Distribution Using Satellite Imagery. Asian Journal of Atmospheric Environment. Vol. 6(2):127-135.
- HOFFMANN, A. (2012): Folgen des Klimawandels im urbanen Kontext. In: Public Health Form 20, Heft 75, Bonn.
- HÖKE, S., DAVID, S. & SCHNEIDER, J. (2009): Weiterentwicklung und Validierung der Funktionsbewertung für urbane Böden. In: Rück, F., von Dressler, H., Rolf, M., Höke, S. & David, S. (2009): Stadtboden: Funktionsbewertung urbaner Böden und planerische Umsetzung im Rahmen kommunaler Flächenschutzkonzeptionen. Endbericht. BMBF REFINA-Forschungsvorhaben, FKZ 0330728, Osnabrück.
- HÖKE, S., DENNEBORG, M. & KAUFMANN-BOLL, C. (2011): Klimabedingte Veränderung des Bodenwasser- und Stoffhaushaltes und der Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Emscher. dynaklim-Publikation Nr. 11./September 2011.
- HÖKE, S., DENNEBORG, M. & KAUFMANN-BOLL, C. (2012): Urbanes Bodeninformationssystem Emscher. dynaklim-Publikation Nr. 31./Dezember 2012.
- HÖKE, S. (2013): Urban-industrielle Bodenlandschaften. Geographische Rundschau. Jahrgang 65, Heft 4: 44-50.
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W.G. (2008): Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 7. Aufl. Spektrum, Heidelberg.

- JASECHKO, S., SHARP, Z. D., GIBSON, J. J., BIRKS, S. J., YI, Y., FAWCETT, P. J.: Terrestrial water fluxes dominated by transpiration, *Nature* 2013/04/03/online, advance online publication, 2013.
- JONAS, M., STAEGER, T. & C.-D. SCHÖNWIESE (2005): Berechnung der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen – Schwerpunkt Deutschland. Umweltbundesamt (Hrsg.), Forschungsbericht: 201 41 254. Dessau
- KROPP, J., HOLSTEN, A., LISSNER, T., ROITHMEIER, O., HATTEMANN, F., HUANG, S., ROCK, J., WECHSUNG, F. LÜTTGER, A., POMPE, S., KÜHN, I., COSTA, L., STEINHÄUSER, M., WALTHER, C., KLAUS, M., RITCHIE, S. & METZGER, M. (2009): Klimawandel in Nordrhein-Westfalen: Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren. Abschlussbericht der Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV). Potsdam.
- KUTTLER, W. (2004): Stadtklima, Teil 1: Grundzüge und Ursachen. *Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung - Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie* 16(3):187–199.
- LABO (2010): LABO-Positionspapier – Klimawandel – Betroffenheit und Handlungsempfehlungen des Bodenschutzes . 74. Umweltministerkonferenz am 11. Juni 2010 in Bad Schandau in der Fassung vom 09.06.2010. URL: https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO_Positionspapier_Boden_und_Klimawandel_090610_aa8_bf5.pdf (letzter Aufruf: 07.04.2014)
- LANUV (2010): Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen. Daten und Hintergründe. Fachbericht 27. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV). Recklinghausen.
- LANUV (2013): Klimawandelgerechte Metropole Köln. Abschlussbericht. LANUV-Fachbericht 50. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). Recklinghausen
- LANUV (2014): Ergebnisse der regionalen Klimamodellprojektionen für Nordrhein-Westfalen. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.).
- LARCHER, W. (2001): Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Streßbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. 6. Aufl. UTB Stuttgart. 408 S.
- LUA (2004): Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden gemäß § 12 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. Merkblätter 44. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen. Essen.
- MÜLLER, U. & A. WALDECK (2011): Auswertungsmethoden im Bodenschutz. Dokumentation zur Methodendatenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS). GeoBerichte 19. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Hannover.
- MUNLV NRW (2007): Schutzwürdige Böden in Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Referat Bodenschutz, Altlasten, Deponien (Hrsg.). Düsseldorf.

- MUNLV NRW (2009): Anpassung an den Klimawandel – Eine Strategie für Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Referat Öffentlichkeitsarbeit, (Hrsg.), Düsseldorf.
- MKRO (2013): Leitbilder und Handlungsstrategien für die Raumentwicklung in Deutschland 2013. 39. Sitzung der Ministerkonferenz für Raumordnung am 3. Juni 2013 in Nürnberg. URL: http://service.mvnet.de/php/download.php?datei_id=98844 (letzter Aufruf 04.05.2015).
- MKULNV NRW (2011): Handbuch Stadtklima. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Referat VII B-1: Raumordnung und Landesplanung, Flächenverbrauch, Klimaanpassung (Hrsg.), Düsseldorf.
- RENGER, M. & STREBEL, O. (1982): Berechnungsbedürftigkeit der landwirtschaftlichen Nutzpflanzen in Niedersachsen. Geologisches Jahrbuch Reihe F13. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover.
- ROWELL, D.L. (1997): Bodenkunde: Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen, Springer Berlin, Heidelberg, New York.
- SCHEFFER, F. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde / Scheffer/Schachtschabel. 15. Aufl. neubearbeitet und erweitert von Hans-Peter Blume u.a. Spektrum. Heidelberg 2002
- SCHMIDT, M. (2011): Ökologisches Bauen im Kontext von Klimaänderungen: Paradigmenwechsel in der Klimapolitik. Vortrag. TU Berlin, Institut für Architektur, Arbeitsgruppe „Watergy“.
- SENATSVERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT (2012): Stadtentwicklungsplan Klima. Urbane Lebensqualität im Klimawandel sichern. Berlin.
- STADT BAD LIEBENWERDA (2013): Bad Liebenwerda – Eine Stadt zum Wohlfühlen im Klimawandel. Die Klimaanpassungsstrategie. Stadt Liebenwerda (Hrsg.). Bericht zum Modellvorhaben des Experimentellen Wohnungs- und Städtebaus (ExWoSt) im Forschungsfeld „Urbane Strategien zum Klimawandel – Kommunale Strategien und Potenziale“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)/Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).
- STADT NEUSS (2014): Planungshinweiskarte aus klimatologischer Sicht. Stadtklimakataster Neuss, Amt für Umwelt und Stadtgrün.
- SUSTAINABILITY CENTER BREMEN (2009): Klimaanpassung im Planungsverfahren. Leitfaden für die Stadt- und Regionalplanung. Sustainability Center Bremen (Hrsg.) Bericht im Forschungsvorhaben Klimawandel Unterweser – Mit dem Klimawandel handeln! Bremen.
- TUSCHL, P. (1970): Die Transpiration von *Phragmites communis* im geschlossenen Bestand des Neusiedler Sees. Dissertation, Wien.
- UPMANIS, H., ELIASSON, I., LINDQVIST, S. (1998): The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden). International Journal of Climatology 18(6):681-700.

- WESSOLEK, G., DUIJNISVELD, W.H.M. & TRINKS, S. (2009): Teil III: Hydro-Pedotransferfunktionen zur Berechnung der Sickerwasserrate aus dem Boden: das TUB-BGR-Verfahren. In: Wessolek, G., Kaupenjohann, M. & Renger, M.: Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Bodenökologie und Bodengene-se. Heft 40:66-80. FG Bodenkunde/Standortkunde und Bodenschutz, TU Berlin.
- WILLAND, A., BUCHSTEINER, D., HÖKE, S. & KAUFMANN-BOLL, C. (2014): Erarbeitung fachlicher, rechtlicher und organisatorischer Grundlagen zur Anpassung an den Klimawandel aus Sicht des Bodenschutzes. Teilvorhaben 1: Erarbeitung der fachlichen und rechtlichen Grundlagen zur Integration von Klimaschutzaspekten ins Bodenschutzrecht. FKZ 371171213/01. Umweltbundesamt (Hrsg.) Texte 57/2014
- WOHLRAB, B.; ERNSTBERGER, H.; MEUSER, A. & SOKOLLEK, V. (1992): Landschaftswasserhaushalt. Parey Hamburg.

Anhang 1: Vorgehen zur Ermittlung der Verdunstungsleistung eines Bodens und Datengrundlagen

Nachfolgend wird beschrieben, wie die Verdunstungsleistung eines Bodens ermittelt und auf eine Fläche hochgerechnet wird, um das Bodenkühlungspotenzial dieser Fläche bei Planungen berücksichtigen zu können.

Das Vorgehen erfordert bodenkundliches und meteorologisches Fachwissen. Es wird daher empfohlen, dass nachfolgende Berechnungen von einem/-r Mitarbeiter/-in oder einem/-r externen Gutachter/-in durchgeführt werden, die diese Fachkenntnisse nachweisen können.

Die Vorgehensweise zur Berechnung der Verdunstungsleistung gliedert sich in:

1. Ermittlung der klimatischen Eingangsgrößen
 - 1.1. Gebietsverdunstung
 - 1.2. Jährlicher Sickerwasserrate
 - 1.3. Tägliche Verdunstung
2. Berechnung der Bodenkühlleistung.

1 Klimatische Eingangsgrößen

1.1 Gebietsverdunstung

Die Verdunstung ist von vielen Einflussfaktoren abhängig (vgl. Kapitel 3.1 und 3.2). Soll die Verdunstung für ein Gebiet berechnet werden, ist die Annahme zu treffen, dass der Bodenaufbau in diesem homogen ist und gleichartige klimatische Verhältnisse wirksam sind. Größere Gebiete werden in der Regel in kleinere gleichartige Teilflächen gegliedert, für welche jeweils die Verdunstung zu berechnen ist.

Die jährliche Verdunstungsleistung einer Untersuchungsfläche wird über die Bilanzierung des Wasserhaushalts berechnet.

Nach der Wasserhaushaltsgleichung für einen betrachteten Zeitraum

$$P = E + R + \Delta W \quad (\text{Gl. 1})$$

mit

- | | |
|------------|--|
| P | = Niederschlagshöhe |
| E | = Verdunstungshöhe |
| R | = Abflusshöhe |
| ΔW | = Änderung des Wasservorrats über den betrachteten Zeitraum. |

entspricht die Niederschlagshöhe der Summe aus Verdunstung, Abfluss und Änderung des Wasservorrats.

Da über längere Jahresreihen die Summe der Wasservorratsänderungen gegen Null geht (DVWK M238 1996), kann sie in der Berechnung der Verdunstung nach

$$E = P - R \quad (\text{Gl. 2})$$

vernachlässigt werden. Zudem wird vereinfachend von einer ebenen Oberfläche ausgegangen, von der das Niederschlagswasser nicht seitlich abfließt. Die Abflusshöhe entspricht deshalb der Höhe der jährlichen Sickerwasserrate (DWA 2007).

1.2 Jährliche Sickerwasserrate

Die Berechnung der jährlichen Sickerwasserrate aus dem Boden erfolgt mit Hilfe des TUB-BGR-Verfahrens (WESSOLEK et al. 2009). Es fließen folgende Eingangsgrößen ein:

Nd	= mittlere korrigierte jährliche Niederschlagshöhe [mm/a]
Nd _{som}	= mittlere korrigierte Niederschlagshöhe im Sommerhalbjahr [mm/a]
ET0	= jährliche potenzielle FAO-Grasreferenzverdunstung [mm/a]
nFKWe	= nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum [mm] = [l]
KR	= kapillare Aufstiegsrate [mm/d]
WV	= Wasserverfügbarkeit im Sommerhalbjahr (Nd _{som} + nFKWe + vkap) [mm]
vkap	= tatsächlicher kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser [mm].

Das TUB-BGR-Verfahren arbeitet mit Regressionsgleichungen, die für vier Nutzungsarten und in Abhängigkeit von der Höhe der Wasserverfügbarkeit (WV) im Sommerhalbjahr erstellt wurden.

Beispielhaft sei hier die Regressionsgleichung für grundwasserfernes Grünland mit WV < 700 mm aufgeführt (Gl. 3):

$$SWR = Nd - ET0 \times [1,79 \log(WV) - 3,89] \times \left[0,53 \log\left(\frac{1}{ET0}\right) + 2,43 \right] \quad (\text{Gl. 3})$$

Weitere Regressionsgleichungen für die Nutzungsvarianten Grünland, Acker und Wald unter jeweils verschiedenen Bedingungen der Wasserverfügbarkeit im Sommerhalbjahr sind WESSOLEK et al. (2009) zu entnehmen:

https://www.boden.tu-berlin.de/fileadmin/fg77/_pdf/Rote_Liste/Rote_Reihe_Heft_40.pdf

(letzter Aufruf: 28.08.2014)

Die FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET0) gilt für einen über das Jahr konstanten Grasbestand von 0,12 m Höhe bei fehlendem Wasserstress (Bodenfeuchte > 70 % nFK) und ist eine international verbindliche Bezugsgröße. Sie ist geeignet, die aus dem Zusammenhang zwischen meteorologischen Messgrößen und Bodenfeuchtemessungen entwickelten empirisch-statistischen Methoden der Verdunstungsberechnung zu kalibrieren.

1.3 Tägliche Verdunstung

Um den Schritt von der jährlichen Verdunstungsrate hin zur Berechnung täglicher Verdunstungsraten und damit einer potenziellen Bodenkühlleistung machen zu können, kommt die Turc-Wendling-Beziehung zur Anwendung. Sie wurde nach Kalibrierung an der FAO-Grasreferenzverdunstung um einen Höhenfaktor erweitert (DVWK 1996):

$$ETr = \frac{(R_G + 93 \times k) \times (T + 22)}{162 \times (T + 123)} \times \frac{1}{1 + 0,0003 \times h} \quad (\text{Gl. 4})$$

mit

ETr	= kalibrierte empirische Referenzverdunstung nach Turc-Wendling [mm]
RG	= Globalstrahlung [J/cm ²]
k	= Küstenfaktor (in NRW k = 1)
T	= Temperatur [°C]
h	= geodätische Höhe [m üNN].

Auf diese Weise können Tageswerte von Temperatur und Globalstrahlung einfließen, und die tägliche Referenzverdunstung ETr kann berechnet werden.

Die Gesamtverdunstung einer Teilfläche wird abschließend durch Multiplikation der errechneten ETr mit der Flächengröße in [m²] ermittelt.

2 Potenzielle Bodenkühlleistung

Die Berechnung der potenziellen Bodenkühlleistung erfolgt in folgenden Schritten:

- 1) Berechnung der kalibrierten empirischen Referenzverdunstung nach (Gl. 4).

Liegen keine Messwerte für die Globalstrahlung vor, kann diese nach der Ångström-Formel berechnet werden (DVWK 1996):

$$RG = R_0 \times \left(0,19 + 0,55 \times \frac{S}{S_0} \right) \quad (\text{Gl. 5})$$

mit

R ₀	= extraterrestrische Strahlung [J/cm ²]
S	= Sonnenscheindauer des Tages [h]
S ₀	= astronomisch mögliche Sonnenscheindauer [h]

- 2) Berechnung der klimatischen Wasserbilanz nach Gl. 2, umgestellt nach R.

Positive Werte bedeuten Wasserüberschuss, negative Wassermangel.

- 3) Berechnung der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) für den Referenzboden der Teilfläche.

Die nutzbare Feldkapazität wird in Vol.-% in Abhängigkeit von Bodenart und Trockenrohdichte nach der Schätzwerttabelle aus der KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) abgeleitet und durch Zu- und Abschläge für Skelettgehalt und Humusgehalt modifiziert. Für Böden aus urban-industriellen Substraten (z.B. Kohlen, Schlacken, Bauschutt) kann auf Tabellen nach HÖKE et al. (2009) zurückgegriffen werden.

Der effektive Wurzelraum (= effektive Durchwurzelungstiefe) wird als potenzielle Ausschöpfungstiefe von pflanzenverfügbarem Bodenwasser verstanden, das durch Pflanzenwurzeln (einjährige landwirtschaftliche Nutzpflanzen) in Trockenjahren dem Boden maximal entzogen werden kann (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Er wird anhand der Verknüpfungsregeln aus dem Arbeitsheft Boden nach MÜLLER & WALDECK (2011) bestimmt.

4) Berechnung der täglichen Speicherfüllstände:

Für die Berechnung des täglichen pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrats wird der erste Tageswert der betrachteten Zeitraums der Klimatischen Wasserbilanz (Schritt (2)) zum Ergebnis aus Schritt (3) addiert. Für alle weiteren Tage wird der Tageswert der KWB jeweils zum Speicherfüllstand des Vortages addiert. Die Berechnung eines prozentualen Speicherfüllstand mit der nFKWe aus Schritt (3) als Ausgangswert ermöglicht die Einschätzung der verbliebenen potenziellen Kühlleistung des Bodens (vgl. Kapitel 3).

Die Bewertung der potenziellen Kühlleistung des Bodens beruht auf folgenden weiteren Modellannahmen:

- 100 % Speicherfüllung Ende März aufgrund humider Winter.
- Ab nFKWe-Füllung < 70 % besteht Wasserstress für Pflanzen (Beginn Reduzierung der Transpirationsleistung) (DVWK 1996).
- Ab nFKWe-Füllung < 40 % besteht erhöhter Wasserstress für Pflanzen, im Erwerbsanbau ist ab jetzt Bewässerung notwendig, um Ertragsdepressionen zu verhindern (RENGER & STREBEL 1982).

3 Empfehlungen für die Datenerhebung

Tab. 1: Checkliste für die Erhebung bodenkundlicher und klimatologischer Eingangsdaten

Eingangsdaten	Datenquelle	datenführende Stelle	Vollständigkeit Datensatz	Eignung für Planungsmaßstab
Bodenkühlleistung				
<u>Eingangsparameter:</u> Feinbodenart (nach KA5) Grobbodenanteil (KA5) Substrat (nach KA5) Humus (nach KA5) Trockenrohdichte (KA5) Tiefe des effektiven Wurzelraums (KA5) Grundwasserstand	Bodenkarte 1:50.000	GD NRW	nahezu vollständig <ul style="list-style-type: none"> TRD und effektiver Wurzelraum müssen abgeleitet werden 	FNP <ul style="list-style-type: none"> unzureichende Substratinformation für Innenbereich
	Auskunftssystem BK50 – Karte der schutzwürdigen Böden 1:50.000	GD NRW	mit relevanten Bodenfunktionskarten z.B. Boden als Kohlenstoffspeicher, Wasserspeicherfunktion, Bodenfruchtbarkeit	FNP <ul style="list-style-type: none"> Eingrenzung von Suchräumen für geeignete Böden und Erhalt dieser Böden
	Bodenkarte 1:5.000	GD NRW	nahezu vollständig <ul style="list-style-type: none"> TRD und effektiver Wurzelraum müssen abgeleitet werden 	BLP
	BBK-S, Profilbeschreibungen	Kommunen	nahezu vollständig <ul style="list-style-type: none"> TRD und effektiver Wurzelraum müssen abgeleitet werden 	BLP
	bodenkundliche Kartierung (KA5)			BLP
	Bodenfunktionskarten, Profilbeschreibungen + Auswertekarten zum Wasserhaushalt	Kommunen	Einige Städte	
	Baugrunduntersuchungen (mit Angaben nach DIN 4022)	städtisches Umweltamt, UBB	nur aggregierende Beschreibung des Bodens <ul style="list-style-type: none"> z.T. mit TRD und Humusgehalt, i.d.R. horizontübergreifend 	BLP
Vegetation	Planung/Kartierung	städtisches Grünflächenamt	vollständig	
Abgrenzung von Flächen zur Ermittlung der Gebietsverdunstung	Karten zu Grundwasserflurabständen Klimatopkarte Geländehöhenmodell			
Stadtklima				
<u>Eingangsparameter:</u> Lufttemperatur Niederschlag Luftfeuchtigkeit Wind Globalstrahlung extraterrestrische Strahlung Sonnenscheindauer des Tages astronomisch mögliche Sonnenscheindauer des Tages	nahegelegene Klimastation	DWD KlimaAtlas.nrw.de	vollständig	FNP, BLP
	Lage im stadtklimatischen System	Kommunen		
	Vegetation	Kommunen		

Anhang 2: Wirkkette „Niederschlag – Boden – Luft“: Erkenntnisse aus stationären Messungen

Im Neusser Stadtgebiet wurden drei Klimastationsstandorte ausgewählt, an denen die folgenden Parameter kontinuierlich erfasst werden:

- Niederschlag,
- Windrichtung und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Boden,
- Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit in 2 m Höhe über Boden,
- Bodentemperaturen und Bodenfeuchte in 3 verschiedenen Bodenhorizonten.

Zwei der Standorte sind südlich der Neusser Innenstadt im Freiland gelegen und weisen ähnliche Bodenprofile bei unterschiedlicher Flächennutzung („Acker“ mit Zuckerrüben und „Grünland“ mit einer extensiv gepflegten Rasenfläche) auf. Der dritte Standort („Brache“) weicht in Lage und Bodenzusammensetzung stark hiervon ab. Er liegt nördlich der Neusser Innenstadt auf einer Brache. Der anthropogen überprägte Boden weist einen hohen Anteil an Bauschutt auf. Im Anhang 3 sind die Profile der Böden an den drei Klimamessstationen im Stadtgebiet Neuss beschrieben.

An einem Beispiel mit Starkregen soll gezeigt werden, wie unterschiedlich die Standorte aufgrund ihrer Bodenparameter auf Niederschlagsereignisse reagieren. Am 9. Juni 2014 fielen nach einer längeren Trockenperiode innerhalb von 30 Minuten 19,5 mm Niederschlag. Erwartungsgemäß steigen die Bodenfeuchtwerte in den Bodenhorizonten des Grünlandes an, am stärksten in der obersten Tiefenstufe (10 cm Tiefe, Ah-Horizont) in der mittleren Tiefenstufe (30 cm Tiefe, Go-Horizont) und abgeschwächt sowie leicht zeitverzögert auch in 70 cm Tiefe (Gr-Horizont; s. Abb. 1). Gleichzeitig nimmt die Bodentemperatur des obersten Horizontes leicht ab.

Ganz anders sieht die Situation auf dem Acker aus (Abb. 2). Die vorausgegangene Trockenheit sowie die freien Ackeroberflächen zwischen den einzelnen Rübenpflanzen führen dazu, dass der gesamte Starkniederschlag oberirdisch abfließt und nicht in den Boden eindringt. Dadurch erhöhen sich die Bodenfeuchtwerte des Ackerstandortes nach dem Regenereignis nicht.

Der Standort auf der Brache (Abb. 3) zeigt ebenfalls ein für den anthropogen mit Bauschutt überformten Boden typisches Verhalten. Das Niederschlagswasser dringt sofort in den Boden ein und läuft fast ungehindert durch. Eine Zeitverzögerung zwischen den oberen und dem tiefen Horizont ist nicht erkennbar. Außerdem sinkt die Bodenfeuchte sofort nach dem Regenereignis wieder ab, das Wasser kann nur zu einem sehr geringen Teil im Boden gehalten werden. Insgesamt sind deshalb die Bodenfeuchtwerte der Brache mit Werten um 5 % deutlich niedriger als an den anderen beiden Standorten. Auf Standorten mit einem entsprechenden Bodenprofil wären deshalb Bewässerungsmaßnahmen zur Verbesserung der Bodenkühlleistung ungeeignet.

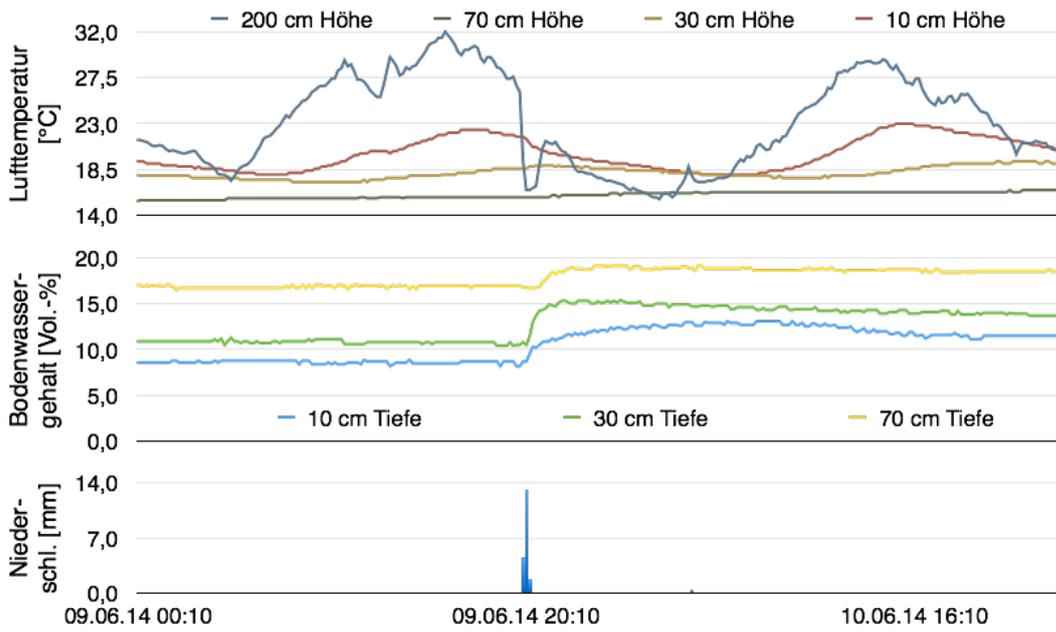


Abb. 1 Temperaturen und Bodenfeuchte nach einem Starkregenereignis an der Station „Grünland“

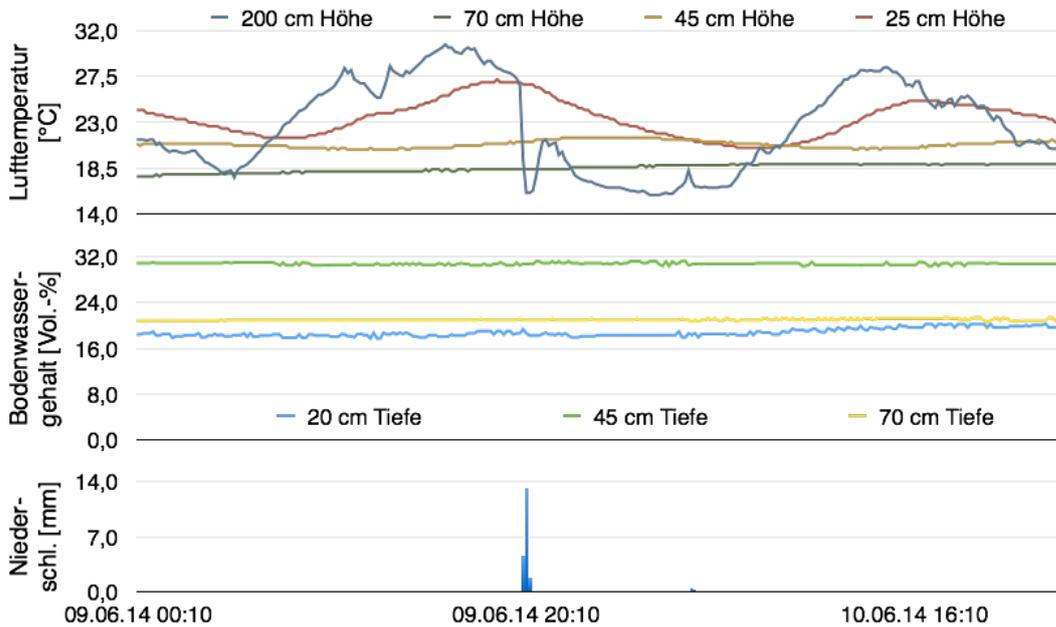


Abb. 2 Temperaturen und Bodenfeuchte nach einem Starkregenereignis an der Station „Acker“

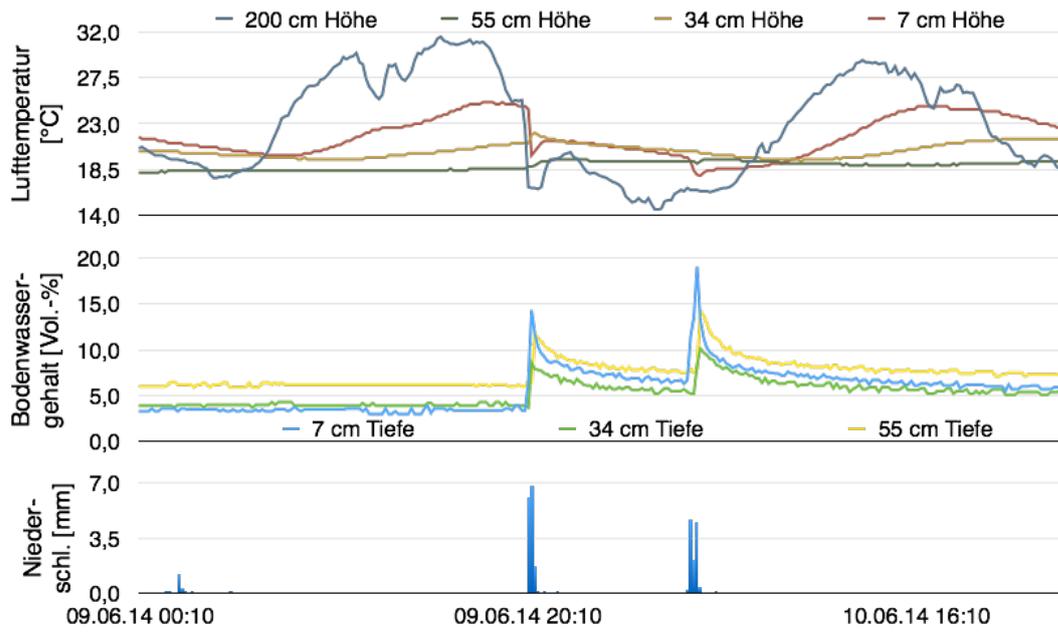


Abb. 3 Temperaturen und Bodenfeuchte nach einem Starkregenereignis an der Station „Brache“

Anhang 3: Beschreibung der Böden an den Klimamessstationen nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (AD-HOC-AG BODEN 2005)

Station „Grünland“

Profilbezeichnung: N02 (RUB Standort 2)

Neigung: N1

Exposition: S

Nutzung: Park-, Grünanlage

Vegetation: Wiese

Bodensystematische Einheit: Gley

Bodenform: Gley aus kiesführendem Hochflutsand über tiefem kiesführendem Hochflutlehm

Humusform: Mull

Bemerkungen: Regenwurmgänge bis 90 cm Tiefe, Feinwurzeln bis 64 cm Tiefe

Nr.	Tiefe	Horizontsymbol	Beschreibung
1	0-16 cm	Ah	Ah-Horizont aus kiesführendem Hochflutsand (fG1); mittel humos; 10 YR 4/4; Subpolyedergefüge, carbonatfrei, sehr stark durchwurzelt, Su3, mS (Nester)
2	16-40 cm	Go	Go-Horizont aus kiesführendem Hochflutsand (fG1); schwach humos; oxidativ rostfarben, sehr schwach reduktiv gebleicht, 7.5 YR 4/6, 7.5 YR 6/4; Subpolyedergefüge, carbonatfrei, mittel durchwurzelt, Su3
3	40-64 cm	Gor	Gor-Horizont aus kiesführendem Hochflutsand (fG1); reduktiv gebleicht, schwach oxidativ rostfarben; 7.5 YR 4/6, 7.5 YR 6/4; Subpolyedergefüge, carbonatfrei, schwach durchwurzelt, Su3
4	64-90 cm	Gr	Gr-Horizont aus kiesführendem Hochflutsand (fG1); reduktiv gebleicht, schwach oxidativ rostfarben, 10 YR 4/2; Subpolyedergefüge, carbonatfrei, nicht durchwurzelt, Su3
5	90-100 cm	II Gr	II Gr-Horizont aus kiesführendem Hochflutlehm (fG1, gG1); reduktiv gebleicht, 10 YR 4/1; Subpolyedergefüge, carbonatfrei, nicht durchwurzelt, Lts

Station „Acker“**Profilbezeichnung:** N03 (RUB Standort 1)**Neigung:** N0**Exposition:** -**Nutzung:** Acker**Vegetation:** Zuckerrübe**Bodensystematische Einheit:** Gley**Bodenform:** Braunerde aus kiesführendem Hochflutlehm**Humusform:** Mull**Bemerkungen:** leichte Pflugsohlenverdichtung in 1. Horizont, Wurzelröhren, Humus, Regenwurmgänge in 2. und 3. Horizont, Steinband im Liegenden 3. Horizont, zwei Regenwürmer

Nr.	Tiefe	Horizontsymbol	Beschreibung
1	0-30 cm	Ap	Ap-Horizont aus kiesführendem Hochflutlehm (mG1); stark humos; 10 YR 4/3; Krümel- bis Subpolyedergefüge, carbonatfrei, sehr stark durchwurzelt, Slu
2	30-68 cm	Bv	Bv-Horizont aus kiesführendem Hochflutlehm (mG1); schwach humos; 7.5 YR 4/6; Subpolyedergefüge, carbonatfrei, stark durchwurzelt, Slu
3	68-87 cm	II Cv	II Cv-Horizont aus kiesführendem Hochflutlehm (mG3); stark humos; 7.5 YR 4/4; Einzelkorn- bis Subpolyedergefüge, carbonatfrei, schwach durchwurzelt, Sl3
4	87-100 cm	III Cv	III Cv-Horizont aus kiesführendem Hochflutlehm (mG1); 5 YR 4/6; Einzelkorn- bis Subpolyedergefüge, carbonatfrei, sehr schwach durchwurzelt, Sl2
5	100-110 cm	IV Cv	IV Cv-Horizont aus Hochflutlehm; 7.5 YR 5/6; Einzelkorngefüge, carbonatfrei, sehr sehr schwach durchwurzelt, Su2

Station „Brache“

Profilbezeichnung: N01 (RUB Standort 3)

Neigung: N0

Exposition: -

Nutzung: Brachfläche, Auffüllung

Vegetation: Ruderalvegetation

Bodensystematische Einheit: Pararendzina

Bodenform: Pararendzina aus Siedlungsbauschutt und anthropogen umgelagertem Terrassensand und -kies

Humusform: Mull

Bemerkungen: Ziegel, große Gesteinsbruchstück, Schlacken, Aschen, Betonblöcke, Flaschenglas in 2. Horizont

Nr.	Tiefe	Horizontsymbol	Beschreibung
1	0-8 cm	Ah	Ah-Horizont aus anthropogen umgelagertem Terrassensand mit Siedlungsbauschutt (fGr2); mittel humos; 10 YR 3/2; Einzelkornggefüge, carbonatfrei, stark durchwurzelt, SI2
2	8-13 cm	II yC-Ah	II yC-Ah-Horizont aus anthropogen umgelagertem Terrassensand mit Siedlungsbauschutt (mGr4); mittel humos; 10 YR 3/1; Einzelkornggefüge, stark carbonathaltig, schwach durchwurzelt, Su2
3	13-20 cm	III rAh	III rAh-Horizont aus anthropogen umgelagertem Terrassensand mit Siedlungsbauschutt (fGr3); 10 YR 4/2; Einzelkorn- bis Subpolyederggefüge, stark carbonathaltig, mittel durchwurzelt, SI2
4	20-24 cm	III ejIC1	III ejIC1-Horizont aus anthropogen umgelagertem Terrassensand und -kies (mG3) mit Siedlungsbauschutt (mGr3, X3); 10 YR 4/3; Einzelkorn- bis Subpolyederggefüge, stark carbonathaltig, sehr schwach durchwurzelt, mS
5	24-60 cm	III ejIC2	III ejIC2-Horizont aus anthropogen umgelagertem Terrassensand und -kies (mG3) mit Siedlungsbauschutt (mGr3, X3); 10 YR 4/4; Einzelkornggefüge, stark carbonathaltig, nicht durchwurzelt, mS

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen
Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de

