

dynaklim-Publikation



Gefördert durch:



ERFASSUNGS- UND OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN DES KÜHLUNGSPOTENZIALS VON BÖDEN DARGESTELLT AN AUSGEWÄHLTEN WOHN- UND PARKFLÄCHEN DER STADT BOTTRUP

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science (B.Sc.) an der RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Abfallwirtschaft

Eva Damm

Betreuung bei der ahu AG, Aachen: Frau Dr. Silke Höke und Herr Dr. Michael Denneborg

dynaklim-Publikation Nr. 35 / Februar 2013



Data survey and optimisation possibilities concerning cooling potential of soils exemplified at selected residential and park areas in the city of Bottrop

An drei Standorten in der Stadt Bottrop wurde das Kühlungspotenzial durch die Verdunstung auf der Grundlage aktueller Stadtbodenkartierungen erfasst. Es wurden Vorschläge gemacht, wie durch einen optimierten Bodenaufbau und eine kontinuierliche Wasserversorgung die Verdunstungsleistung und damit die Kühlung erheblich gesteigert werden kann. Im B-Plan Gebiet Jorgensmannwiese wurden die Vorschläge mittlerweile umgesetzt. Dadurch konnte ein Großteil der natürlichen Kühlungsleistung durch die Verdunstung erhalten werden.

Schlagworte (im *dynaklim*-Wiki¹)

Kühlfunktion Boden, Stadtboden, Stadtbodenkartierung

¹ <http://www.dynaklim.de/dynaklim/index/wissensmanagement/wiki.html>

Inhalt

1	Veranlassung und Zielstellung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Verdunstung	2
2.1.1	Verdunstung in der Stadt	6
2.1.2	Verdunstungskälte und ihr ökonomisches und ökologisches Potenzial	8
2.1.3	Einflüsse auf die Verdunstung	11
2.2	Der Boden als Wasserspeicher für die Verdunstung	13
2.2.1	Bodenaufbau	14
2.2.2	Bodenwasser	16
3	Methoden zur Ermittlung der Gebietsverdunstung	19
3.1	Datenerfassung	19
3.1.1	Felderfassung	19
3.1.2	Digitale Datengrundlagen	20
3.2	Berechnungsverfahren	21
3.2.1	Jährliche tatsächliche Verdunstungsleistung (ETa)	21
3.2.2	Bodenkühlungspotenzial	23
3.2.3	Ökonomisches Potenzial	24
4	Kühlungspotenzial unterschiedlicher Böden	25
5	Untersuchungsgebiete	30
5.1	Wohngebiet Jörgensmannwiese	32
5.2	Parkanlage Ehrenpark	35
5.3	Grünland Welheimer Mark	38
6	Bodenkühlleistung der Untersuchungsgebiete	39
6.1	Ist-Zustand und B-Plan	39
6.1.1	Jörgensmannwiese	40
6.1.2	Ehrenpark	44
6.1.3	Welheimer Mark	48
7	Optimierung der Bodenkühlleistung	52
7.1	Optimierungsmöglichkeiten	53
7.2	Optimierung der Untersuchungsgebiete	58
7.2.1	Jörgensmannwiese	58
7.2.2	Ehrenpark	60
7.2.3	Welheimer Mark	62
8	Zusammenfassung und Ausblick	63

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Anteile der Verdunstungsformen an der Gesamtverdunstung in der mittleren Jahreswasserbilanz für Deutschland	8
Tab. 2.2:	Ökonomischer und ökologischer Profit kühlerer Städte	13
Tab. 2.3:	Porengrößenverteilung der Primärporen	16
Tab. 4.1:	Speicherausnutzung der Feinbodenfraktionen, im Trockenjahr 1976	25
Tab. 4.2:	Mittlerer effektiver Wurzelraum (We) in Abhängigkeit von Bodenart bei Getreide des Norddeutschen Tieflands	27
Tab. 5.1:	Mittlere langjährige Klimadaten der Zeitreihe 1961-1990 der Station Bochum	28

Tab. 6.1:	Bodenspezifische Eigenschaften der Teilflächen, Durchwurzelungstiefe We_{eff} , nutzbare Feldkapazität und kapillarer Aufstieg k_A	38
Tab. 6.2:	Jährliche Verdunstungsleistung Vergleich von Ist-Zustand und B-Plan, Jörgensmannwiese	38
Tab. 6.3:	Merkmale urbaner Böden und deren Auswirkung auf den Bodenwasserhaushalt	39
Tab. 6.4:	Vergleich der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum ($nFKWe$), der Sickerwasserrate (SWR_j) und der tatsächlichen Verdunstung (ETa) von Böden der drei Untersuchungsgebiete, alle Angaben in [mm]	39
Tab. 6.5:	Bodenspezifische Eigenschaften der Teilflächen, Durchwurzelungstiefe We_{eff} , nutzbare Feldkapazität und kapillarer Aufstieg k_A	41
Tab. 6.6:	Jährliche Verdunstungsleistung Vergleich von Ist-Zustand und B-Plan, Ehrenpark	42
Tab. 6.7:	Bodenspezifische Eigenschaften der Teilflächen, Durchwurzelungstiefe We_{eff} , nutzbare Feldkapazität und kapillarer Aufstieg k_A	43
Tab. 6.8:	Jährliche Verdunstungsleistung Vergleich von Ist-Zustand und B-Plan, Welheimer Mark	44
Tab. 7.1:	Differenz [mm] der tatsächlichen Verdunstung ETa zur Gras- Referenzverdunstung ET_r im Jahresmittel 1961-1990	45
Tab. 7.2:	Priorisierung und Bewertung von Optimierungsmöglichkeiten	46
Tab. 7.3:	Optimierung der Bodeneigenschaften und resultierende Auswirkungen auf $nFKWe$, SWR_j , ETa ; OB= Oberboden, UB= Unterboden	46
Tab. 7.4:	Mittlere Evaporationsleistungen verschiedener Pflanzen	48
Tab. 7.5:	Verdunstungswerte und Kühlleistung, Jörgensmannwiese; €-Beträge errechnet aus Energieäquivalent	50
Tab. 7.6:	Auswirkungen der Optimierung auf $nFKWe$, SWR_j , ETa , im Vergleich zum Ist-Zustand am Regosol urb10	51
Tab. 7.7:	Verdunstungswerte und Kühlleistung, Ehrenpark; €-Beträge errechnet aus Energieäquivalent	51
Tab. 7.8:	Verdunstungswerte und Kühlleistung, Welheimer Mark; €-Beträge errechnet aus Energieäquivalent	52

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Verdunstungskreislauf	8
Abb. 2.2:	Globale Strahlungsbilanz eines natürlichen Gebiets mit hohem latenten Wärmestrom	9
Abb. 2.3:	Wasserkreisläufe der Erde	10
Abb. 2.4:	Urbane Strahlungsbilanz am Beispiel eines Asphalt Dachs	11
Abb. 2.5:	Tagesgang der Lufttemperatur auf verschiedenen Flächennutzungstypen in Oberhausen	11
Abb. 2.6:	Vergleich der Oberflächentemperatur von versiegelten und bewachsenen Flächen	12
Abb. 2.7:	Energiemenge, die pro Jahr durch Verdunstung in latente Wärme umgewandelt wird	12
Abb. 2.8:	Jahresgang der Verdunstung, dargestellt als monatliche Gebietsverdunstung in Prozent des Jahreswertes, für niederschlagsreiche und niederschlagsarme Gebiete	14
Abb. 2.9:	pF-Kurve: Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt unterschiedlich gekörnter Böden	18

Abb. 4.1:	Verdunstung im Sandboden	23
Abb. 4.2:	Verdunstung in Lehm- und Schluffböden	24
Abb. 4.3:	Verdunstung im Tonboden	24
Abb. 4.4:	Speicherfüllstände verschiedener Böden, Trockenjahr 1976, Durchwurzelungstiefe We 60 cm	25
Abb. 4.5:	Speicherfüllstände verschiedener Böden, Trockenjahr 1976, Durchwurzelungstiefe We 80 cm	26
Abb. 4.6:	Speicherfüllstände verschiedener Böden, Referenzzeitraum, Durchwurzelungstiefe We 60 cm	26
Abb. 5.1:	Übersichtsplan der drei Untersuchungsgebiete Jörgensmannwiese, Ehrenpark und Welheimer Mark	27
Abb. 5.2:	Untersuchungsfläche Jörgensmannwiese, mit Gebietsgrenze und Bohrpunkten der Bodenuntersuchungen	29
Abb. 5.3:	Vorentwurf zum B-Plan Nr. 5.11/9, Maßstab 1:1000 vom 27.01.2011	30
Abb. 5.4:	Anteile der Landnutzung, Ist-Zustand im Vergleich zum B-Plan- Vorentwurf	31
Abb. 5.7:	Anteile der Landnutzung, Ist-Zustand im Vergleich zum B-Plan	32
Abb. 5.8:	B-Plan des Ehrenparks	33
Abb. 5.9:	Untersuchungsfläche Welheimer Mark, mit Gebietsgrenze und Bohrpunkten der Bodenuntersuchungen	34
Abb. 6.1:	oben: Brachfläche, unten: Gleyplaggenesch, Profil urb013	36
Abb. 6.2:	Einteilung der Teilflächen für den Ist-Zustand, Jörgensmannwiese	37
Abb. 6.3:	Vergleich der jährlichen Verdunstungsrate vom Ist-Zustand und B-Plan	39
Abb. 6.4:	oben: Rasen Parkfläche, unten: Regosol, Profil urb010	40
Abb. 6.5:	Einteilung der Teilflächen für den Ist-Zustand, Ehrenpark	41
Abb. 6.6:	oben: Intensivwiese, unten: Vega-Gley, urb041	42
Abb. 6.7:	Einteilung der Teilflächen für den Ist-Zustand, Welheimer Mark	43
Abb. 6.8:	Jährliche Verdunstungsrate des Ist-Zustands, Welheimer Mark	44
Abb. 7.1:	Auswirkung der Optimierung von Bodeneigenschaften auf den Bodenspeicherfüllstand, 30 % Quantil 1974	47
Abb. 7.2:	Änderung der Speicherfüllstände und der damit verbundenen Bewässerungsmengen durch Bodenverbesserung am Regosol urb010, Trockenjahre 1974 und 1976	51

Literaturverzeichnis	53
-----------------------------	-----------

Anhang	56
---------------	-----------

Verzeichnis der Symbole, Abkürzungen und Einheiten

Symbol	Einheit	Bezeichnung
B _{max}	[mm]	maximale Bodenfeuchte
E _p	[mm]	potentielle Verdunstung
E _{Ta}	[mm]	tatsächliche Verdunstung
E _{T₀}	[mm]	Gras-Referenzverdunstung
E _{T_r}	[mm]	empirische Referenzverdunstung
E _{Tpot_{FAO}}	[mm]	mittlere jährliche potenzielle Evapotranspiration als FAO-Gras-Referenzverdunstung
FK	[mm]	Feldkapazität
h	[m]	Höhenkorrektur, Höhe über NN
k		Küstenfaktor
k _A	[mm]	mittlerer kapillarer Aufstieg
k _{WB}	[mm]	klimatestische Wasserbilanz
L	[kJ/kg]	Verdampfungswärme
n _{FK}	[mm]	nutzbare Feldkapazität
n _{FKWe}	[mm]	nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes
N _{j_{kor}}	[mm]	korrigierter mittlerer Niederschlag im Gesamtjahr
N _{s_{kor}}	[mm]	korrigierter mittlerer Niederschlag im Sommerhalbjahr
RG	[W/m ²]	Globalstrahlung
SWR _j	[mm]	mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden
SWR _{TUB}	[mm]	mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden
T	[°C]	Temperatur
We	[cm]	Durchwurzelungstiefe
We _{eff}	[cm]	effektive Durchwurzelungstiefe
W _p	[mm]	Welkepunkt
W _{pfl}	[mm]	pflanzenverfügbares Bodenwasser
ArcGIS		Geographisches Informationssystem der Firma ESRI Geoinformatik GmbH
BMBF		Bundesministerium für Bildung und Forschung
CLM		Regionales , dynamisches Klimamodell
DIN		Deutsches Institut für Normung e.V.
DVWK/ DWA		Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
DWD		Deutscher Wetterdienst
<i>dynaklim</i>		Dynamische Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels in der Emscher-Lippe-Region (Ruhrgebiet)
EG		Emschergerossenschaft
FAO		Food and Agriculture Organization
GRZ		Grundflächenzahl
IPCC		Intergovernmental Panel on Climate Change
NLFB		Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
RVR		Regionalverband Ruhr
RWW		Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft
UBA		Umweltbundesamt
URBIS_ER		Urbanes Bodeninformationssystem Emscherraum

1. Veranlassung und Zielstellung

In der vorliegenden Bachelorarbeit wird anhand von Bodeneigenschaften, Landnutzung, Grundwasserständen, des Klimas und weiterer Eigenschaften das Bodenkühlungspotenzial von drei Untersuchungsgebieten der Stadt Bottrop untersucht. Die Berechnungen erfolgen für den Ist-Zustand, den Bebauungsplan und mögliche Optimierungsszenarien.

Anlass für diese Arbeit sind deutlich Temperaturunterschiede zwischen städtischen und ländlichen Gebieten, bedingt durch erhöhte Versiegelungen, Grundwasserabsenkungen und Bodenveränderungen. Sie vermindern die Verdunstung und damit die Kühlung der Städte. Der vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007) prognostizierte Klimawandel (Klimaszenario A1B, Klimamodell CLM) könnte die Überhitzung von Städten weiter verstärken. Im BMBF-Forschungsprojekt „Dynamische Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels in der Emscher-Lippe-Region“, im Folgenden *dynaklim*, werden dynamische Anpassungsmöglichkeiten an die Auswirkungen des Klimawandels entwickelt (*dynaklim* 2011). Im *dynaklim*-Teilprojekt Urbanes Bodeninformationssystem Emscher-raum (URBIS_ER) wird in einem Arbeitspaket eine mittelmaßstäbige Arbeitskarte zu Bodenkühlungspotenzialen der Städte erarbeitet. Diese Arbeit wird in Anlehnung an die Untersuchungen im Teilprojekt URBIS_ER erstellt. Sie betrachtet, neben den Verdunstungsleistungen, auch das ökonomische Potenzial der Untersuchungsgebiete im Hinblick auf die Verdunstungskälte. Besonderes Augenmerk wird auf die Funktion der vorhandenen Böden gelegt, die in den bisherigen Berechnungen und Überlegungen zur Optimierung der Verdunstung vernachlässigt wurde (Höke 2011). Die Untersuchungsgebiete sind durch die Stadt Bottrop vorgeschlagen worden, die als Innovation City 2011 in Zukunft plant, vermehrt gegen die Überhitzung ihrer Stadt vorzugehen und somit das Kühlungspotenzial der Böden besser zu nutzen.

Durch eine Literaturrecherche werden die Grundlagen zum Prozess der Verdunstung sowohl im natürlichen Kreislauf als auch in der Stadt sowie das unterschiedliche Vermögen von Böden Wasser zu speichern, erarbeitet. Im Methodenteil werden die Erfassungs- und Berechnungsverfahren, die in der Arbeit verwendet werden, dargestellt und erläutert. Nach der Vorstellung der Untersuchungsgebiete wird dann der Ist-Zustand im Vergleich zum Bebauungsplan beschrieben und Optimierungsmöglichkeiten, besonders im Hinblick auf die Bodenkühlleistung der Untersuchungsgebiete, betrachtet.

2. Grundlagen

2.1 Verdunstung

Verdunstungsvorgang

„Verdunstung ist die Umwandlung von Wasser in Wasserdampf bei Temperaturen unterhalb des Siedepunktes“ (ATV-DVWK M504, S.19). Physikalisch betrachtet läuft der Phasenübergang von flüssig zu gasförmig dabei folgendermaßen ab: In einer Flüssigkeit liegen die Moleküle nah nebeneinander und üben starke Anziehungskräfte aufeinander aus. Durch zugeführte Energie werden die Anziehungskräfte der Moleküle verringert und beim Austritt in die Gasphase überwunden. In der Gasphase liegen die Moleküle aufgrund der geringeren Anziehungskräfte weiter voneinander entfernt. Bei der Verdunstung nimmt lediglich die potentielle (latente) Energie zu. Sie führt zu keiner Erwärmung der Umgebungstemperatur (TIPLER & MOSCA 2006). Dies wird umgangssprachlich als Verdunstungskälte verstanden. Der direkte Übergang von Eis zu Wasserdampf wird Sublimation genannt. Bei den entgegengesetzten Prozessen der Kondensation, des Gefrierens und der Resublimation wird die aufgenommene Energie als Wärme wieder freigesetzt. Im Naturhaushalt ist die Verdunstung, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, sowohl Bestandteil des Wasserhaushalts als auch des Wärmehaushalts. Das

Wasser verdunstet durch Sonnenenergie. Die Höhe der Verdunstung hängt außerdem vom Sättigungsdefizit der Luft und den Windbewegungen ab, die eine Durchmischung der Luft und damit ein höheres Defizit bewirken. Der entstandene Wasserdampf wird durch die Atmosphäre transportiert, kondensiert bei geänderten Umgebungsbedingungen in höheren Luftschichten und fällt als Niederschlag zurück auf die Erde.

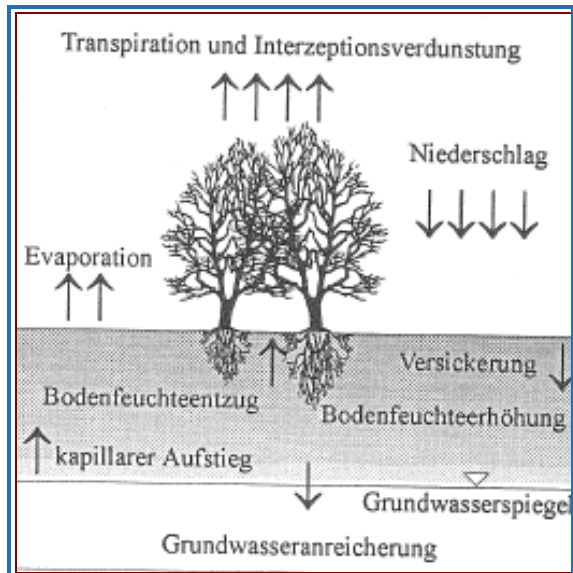


Abb. 2.1: Verdunstungskreislauf (verändert nach Disse 1995)

Verdunstungsformen

Die Verdunstung eines Einzugsgebiets wird als Evapotranspiration bezeichnet. Sie teilt sich in zwei Teilprozesse, die Evaporation und die Transpiration, auf. Unter Evaporation werden die Verdunstung der unbewachsenen Erdoberfläche, des auf Pflanzenoberflächen zurückgehaltenen Niederschlags (Interzeptionsverdunstung) und die Verdunstung von freien Wasserflächen (Gewässerverdunstung) zusammengefasst. Die Transpiration ist die Verdunstung der Vegetation, die durch die Stomata an der Blattunterseite reguliert wird. Sie macht mit über 70 % den wichtigsten Teil der Verdunstung und zusammen mit der Interzeption fast 90 % der Gesamtverdunstung aus (SCHRÖDTER 1985). In Tabelle 2.1 sind die Anteile der Verdunstungsformen an der Gesamtverdunstung in Deutschland dargestellt.

Verdunstungsform	Anteil an Gesamtverdunstung
Gewässerverdunstung	2,2 %
Bodenevaporation	9,2 %
Interzeption	16 %
Transpiration	72,6 %

Tab. 2.1: Anteile der Verdunstungsformen an der Gesamtverdunstung in der mittleren Jahreswasserbilanz für Deutschland (Schrödter 1985)

Der Anteil der Gesamtverdunstung an der jährlichen Niederschlagsmenge in Deutschland beträgt nach Keller (1979) 64 %, dies macht bei durchschnittlich 800 mm NS/a (Niederschlag) in Deutschland, ca. 512 mm ETa/a (tatsächliche Verdunstung) aus. Zwei Drittel der Verdunstung erfolgt in den Sommermonaten mit rund 2-3 mm/d (ATV-DVWK M504 2002). Die Intensität der Verdunstung ist abhängig von der zur Verfügung stehenden Energie, dem verfügbaren Wasser und dem Sättigungsdefizit der Luft. Diese physikalischen Bedingungen werden je nach Standort durch klimatische, geologische,

pedologische und biologische Faktoren beeinflusst (vgl. Kap. 2.1.3). Bei der Angabe der Verdunstungshöhe wird zwischen potentieller und tatsächlicher Verdunstung unterschieden. Die potentielle Verdunstung (E_p) ist nach DIN 4049-3 (1994) definiert als „Verdunstungshöhe von Oberflächen bei unbegrenzt verfügbarem Wasser“ und eine reine Rechengröße. Heute wird anstatt der potentiellen Verdunstung meist die Gras-Referenzverdunstung (ET_0) verwendet. Diese wird von der Food and Agriculture Organization der UNESCO (FAO) als einheitliche Schätzgröße der Verdunstung, bei definierten Randbedingungen eines 12 cm hohen Grasbestandes ohne Wassermangel, empfohlen (ATV-DVWK M504 2002). Die tatsächliche Verdunstung (ET_a) wird im Feld gemessen oder berücksichtigt bei Berechnungsverfahren den begrenzten Wassernachschub, weshalb sie meistens kleiner ist als ET_0 . Nur wenn die Wasserverfügbarkeit nicht limitiert ist, oder ein anderer Vegetationsbestand berücksichtigt wird, entspricht $ET_a \geq ET_0$. Bei der Messung und Berechnung der Verdunstung liegen aufgrund der Komplexität des Prozesses je nach Verfahren Differenzen im Bereich von $\pm 5\%$ bei der potentiellen, und $\pm 10\%$ bei der tatsächlichen Verdunstung vor (ATV-DVWK M504 2002).

Verdunstung im Wasser- und Wärmehaushalt

Die Verdunstung ist neben dem Niederschlag die Hauptkomponente des globalen Wasserkreislaufs. Beide sind auch im Energiehaushalt der Atmosphäre entscheidende Faktoren (ATV-DVWK M504 2002). Die Sonne treibt mit ihrer Strahlung den Wasser- und Energiekreislauf an. Die Verdunstung verbindet die beiden Kreisläufe miteinander. Die von der Erde aufgenommene Sonnenenergie wird sowohl als kurz- und langwellige Strahlung als auch als Verdunstungswärmestrom wieder an das Weltall abgegeben (HARLAß 2008). In welchem Maße die Abgabe der Energie erfolgt hängt maßgeblich von der Präsenz des Wassers im Ökosystem ab (KOHUTJAR 2008). Das Wasser beeinflusst die Umwandlung der Sonnenenergie in latente oder sensible Wärmeflüsse. Ist genügend Wasser vorhanden, wird ein großer Teil der Energie (44 %) beim Phasenwechsel des Wassers (Verdunstung) verbraucht und in höhere Luftschichten transportiert. Dieser Wärmestrom wird als latente oder versteckte Energie bezeichnet, da er nicht mit einer Temperaturerhöhung korrespondiert. Steht kein oder nur wenig Wasser zur Verfügung, wie z.B. auf versiegelten Flächen, wird ein großer Teil der Sonnenenergie in sensible Wärme umgewandelt, welche eine deutliche Erwärmung der Atmosphäre verursacht (vgl. Abb. 2.2) (KOHUTJAR 2008).

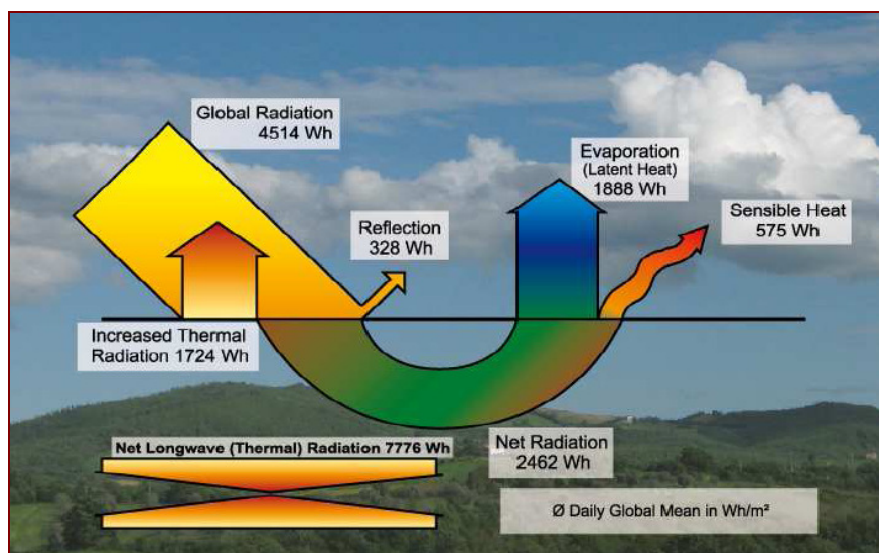


Abb. 2.2: Globale Strahlungsbilanz eines natürlichen Gebiets mit hohem latenten Wärmestrom (Schmidt 2010)

Das Wasser, das zum latenten Wärmestrom beigetragen hat, sich also durch Phasenwechsel und Transport weiterhin in der Atmosphäre befindet, ist Bestandteil eines kleinen Wasserkreislaufs. Diese sind geschlossene Kreisläufe die entweder über Landflächen oder dem Meer zirkulieren (vgl. Abb. 2.3).

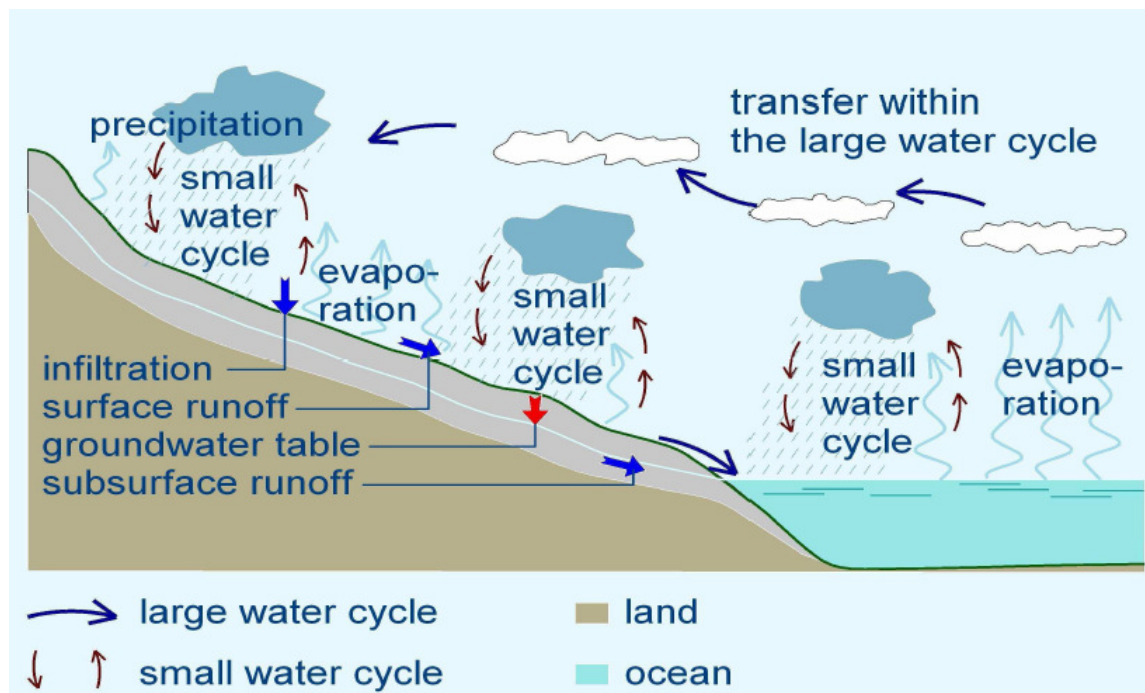


Abb. 2.3: Wasserkreisläufe der Erde (Kravčik et al. 2007)

Die immer weiter wachsende Flächeninanspruchnahme, 2009 waren es 95 ha/d in Deutschland (UBA 2009), verursacht hohe Wasserverluste in den kleinen Wasserkreisläufen. Versiegelung und Verdichtung verhindern eine Infiltration des Niederschlags in den Boden und mindern die Verdunstung erheblich, wodurch der Abfluss vom Land über die Flüsse ins Meer beschleunigt wird. So wird den kleinen Wasserkreisläufen viel Wasser entzogen, das dem großen Wasserkreislauf zugeführt wird. In Anbetracht der Tatsache, dass zwei Drittel des Landniederschlags aus den kleinen Wasserkreisläufen, also der Verdunstung stammen (KOHUTAR 2008), ist die Forderung nach einer Verringerung der Flächeninanspruchnahme, um eine hohe Evaporation zu ermöglichen und gleichzeitig den Abfluss in den großen Wasserkreislauf zu vermindern, die logische Konsequenz. Außerdem fällt der Niederschlag aus dem großen Wasserkreislauf meist in Form von Starkregenereignissen auf die Landflächen zurück (KOHUTAR 2008). Global gesehen ist die Verdunstung die Klimaanlage oder das Ventil der Erde, die eine Überhitzung und hohe Temperaturdifferenzen verhindert.

2.1.1 Verdunstung in der Stadt

Die Verdunstungsleistung in der Stadt ist durch den hohen Anteil versiegelter Flächen (Straßen, Gebäude, Parkplätze etc.) deutlich geringer als in ländlichen Räumen, wo Wiesen, Wälder und Felder überwiegen. Daraus resultiert, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, ein höherer Fluss sensibler Energie, die eine Bildung von „urbanen Hitzeinseln“ durch deutlich erhöhte Oberflächentemperaturen erzeugt (vgl. Abb. 2.6). Im Vergleich mit Abbildung 2.4 zeigt sich, dass das Verhältnis von latentem (44 %) und sensiblem (12 %) Wärmestrom auf natürlichen Flächen in urbanen Räumen deutlich zum sensiblen (fühlbaren) Wärmestrom (34 %) verschoben ist.

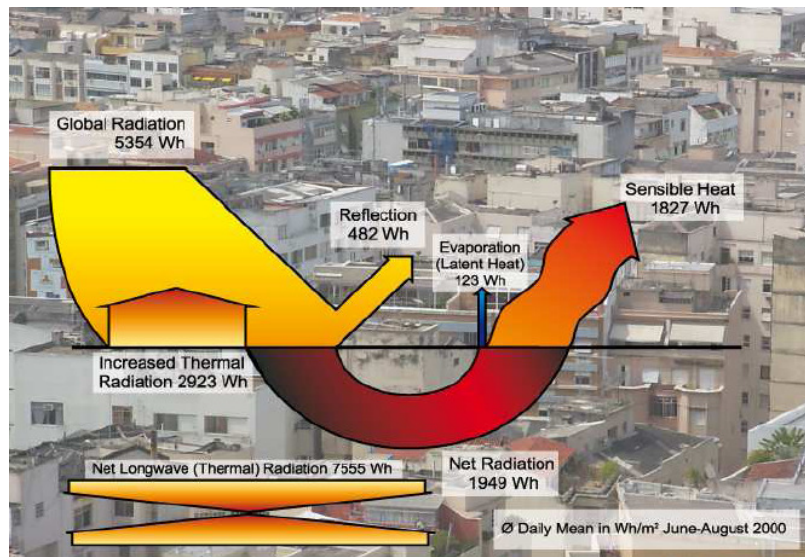


Abb. 2.4: Urbane Strahlungsbilanz am Beispiel eines Asphalt Dachs (Schmidt 2010)

Durch die hohe Versiegelung kann wenig Niederschlag infiltrieren. Dies bewirkt eine Verringerung der Verdunstung und Grundwasserneubildung. Der Abfluss erhöht sich erheblich. Gerade in Städten wird ein hoher Anteil des Niederschlagswassers über die Kanalisation in die Vorfluter geleitet und fehlt so dem Boden, den Pflanzen, dem Grundwasser und der Luft. Dadurch trocknen Städte aus und erzeugen einen hohen Fluss an sensibler Wärme. Die Kühlung durch Verdunstungsprozesse fehlt. Der Abfluss eines städtischen Gebiets beläuft sich auf drei Viertel des Niederschlags, der natürlicher Flächen auf weniger als ein Drittel (KOHUTAR 2008). Bei Untersuchungen in Städten der Slowakei kann Pokorný (2010) dieses Problem durch Infrarot- und Wärmebildaufnahmen anschaulich visualisieren. Messungen der Oberflächentemperaturen von Hausdächern und Fassaden liegen bei 56 °C, während zur gleichen Zeit die Temperaturen von Bäumen in nahegelegenen Landflächen nur 28 °C betragen, ein Unterschied von 50 %. Kohutiar führt diesen Unterschied auf die zu hohe Versiegelung in der Stadt und die fehlende Verdunstungskälte der Vegetation zurück. In heißen Sommern kann die städtische Luft um 2 °C bis 6 °C heißer sein als die umliegende Landluft (vgl. Abb. 2.5).

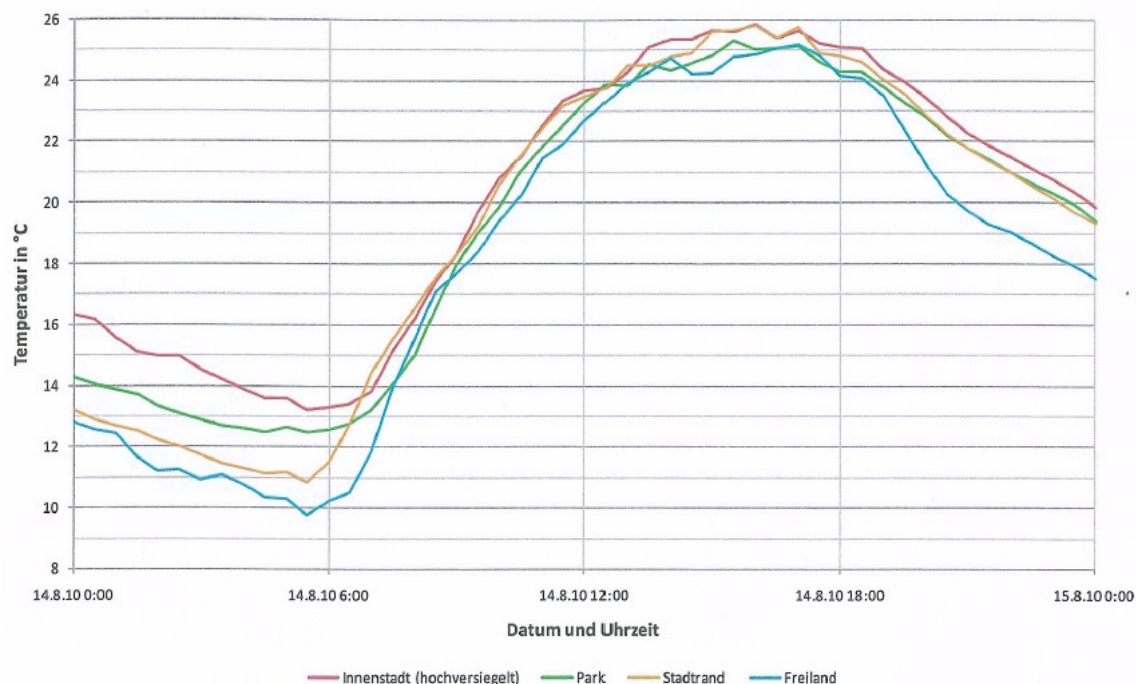


Abb. 2.5: Tagesgang der Lufttemperatur auf verschiedenen Flächennutzungstypen in Oberhausen (Kuttler et al. 2011)

Der Hauptgrund sind die oben beschriebenen Versiegelungen, die eine Verdunstung und damit Kühlung der Umgebung verhindern.



Abb. 2.6: Vergleich der Oberflächentemperatur von versiegelten und bewachsenen Flächen (Pokorný 2010)

2.1.2 Verdunstungskälte und ihr ökonomisches und ökologisches Potenzial

Um die Verdunstungskälte ökonomisch zu betrachten, sind der potenzielle Ertrag und die entstehenden Kosten des Verdunstungsprozesses gegenüberzustellen. Als Ertrag ist die Verdunstungskälte anzusehen. Kosten können in urbanen Gebieten durch Optimierungsmaßnahmen und deren Unterhaltung, wie z.B. Bewässerung oder Bodenbearbeitung entstehen. In natürlichen Systemen entstehen keine Kosten, da die für die Verdunstung benötigten Komponenten Energie und Wasser sowie der Prozess an sich durch Sonne, Niederschlag und Pflanzen, also die Natur, bereitgestellt werden. Um diese wirtschaftliche Leistung der Natur vergleichbar zu machen und den ökonomischen Profit zu verdeutlichen, wird versucht, den Prozess monetär auszudrücken.

Die Verdampfungswärme [L] gibt an, welche Energiemenge zur Verdunstung einer bestimmten Menge Wasser benötigt wird. Sie ist abhängig von der Temperatur.

- bei 20 °C warmen Wasser liegt sie bei 2454 kJ/kg (BAUMGARTEN & LIEBSCHER 1996)
- für die Verdunstung von 1 mm = 1 l/m² = 1 mm/dm³ ist folglich eine Energiemenge von ca. 2500 kJ erforderlich

Diese wird im natürlichen Prozess von der Sonne bereitgestellt (vgl. Abb. 2.7).

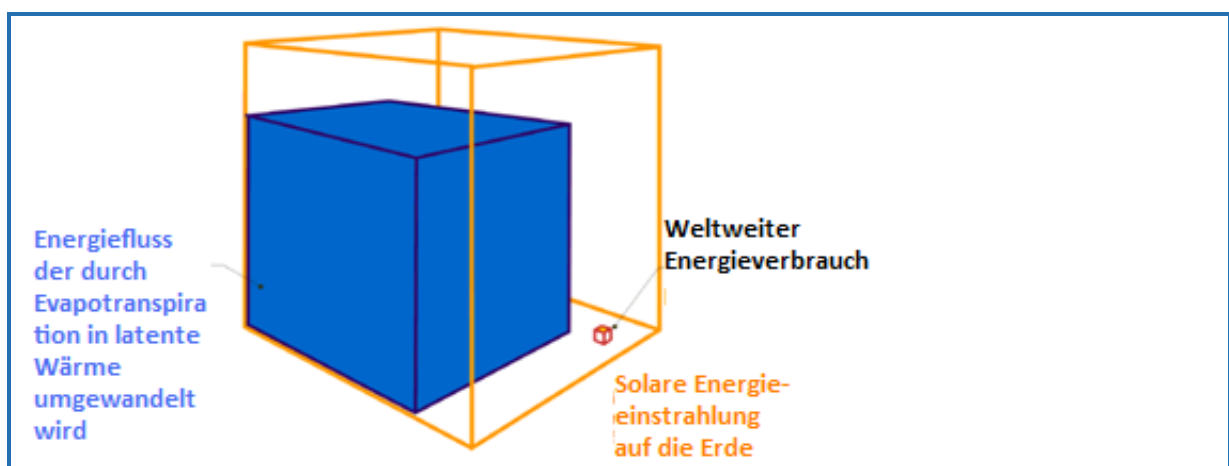


Abb. 2.7: Energiemenge, die pro Jahr durch Verdunstung in latente Wärme umgewandelt wird (verändert nach Schmidt 2010)

Würde man die Menge Wasser künstlich verdampfen, entstünden Kosten von ca. 140 €/m³. Annahmen hierfür sind ein Preis von 0,2 €/kWh für die benötigte Energie sowie 1,62 €/m³ als Trinkwasserspreis der Stadt Bottrop (RWW 2011). Die Ergebnisse zu den Berechnungen der Kühlleistung in den Untersuchungsgebieten werden in Kapitel 6 und 7, die Berechnungsmethode in Kapitel 3, dargestellt.

Eine kühlere Stadt hat einen erheblichen Einfluss auf die Lebensqualität des Menschen. Die dadurch verminderte Anzahl von tropischen Tagen und Nächten führt zu einer tieferen Schlafphase und damit verbundenen höheren Arbeitsleistungen. Außerdem sinkt die Anzahl der Kreislauferkrankungen, was die Gesundheitskosten deutlich reduzieren kann. Durch die Verdunstungskälte wird die Notwendigkeit der aktiven Gebäudekühlung, besonders durch Klimaanlage, und damit ein hoher zusätzlicher Stromverbrauch reduziert. Eine Nutzung von Regenwasser für die Verdunstung führt zu einer Minderung der Abwasserkosten und durch eine Entlastung der Kanalisation außerdem zum Gewässerschutz.

Durch eine Optimierung der Verdunstung werden ökologische Faktoren gestärkt, die den ökonomischen Profit durch kühlere Städte bewirken. Denn eine hohe Verdunstung füllt die kleinen Wasserkreisläufe und hält sie aufrecht (vgl. Kap. 2.1). Dies führt zu einem stabileren Regionalklima und reduziert die Anzahl der Extremwetter (KOHUTAR 2008). Außerdem tragen Vegetation und Wasser in der Stadt zu einer besseren Lebensqualität des Menschen und höherer Attraktivität der Stadt bei. Nebenbei absorbieren sie CO₂, Staub und Geräusche und verbessern so die Luftqualität (KOHUTAR 2008). Der Profit im Hinblick auf Ökologie und Ökonomie, der durch Verdunstung gekühlter Städte entsteht, ist in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Kühlung durch Verdunstung	
ökologischer Profit	ökonomischer Profit
stabileres Klima	
weniger Extremwetterlagen	weniger Schäden durch Extremwetter
weniger tropische Nächte	geringerer Stromverbrauch
höhere Lebensqualität (besserer Schlaf, weniger Kreislauferkrankungen)	bessere Arbeitsleistung
	geringere Gesundheitskosten
Absorption von CO ₂ , Staub und Lärm	attraktivere Städte
Biodiversität, neue Lebensräume	
Gewässerschutz	Entlastung der Kanalisation, geringere Abwasserkosten
geringere Abflussspitzen (Hochwasserschutz)	
Ökosystemleistung der Kühlfunktion > 50- 80€/ m² x a (eigene Berechnungen)	

Tab. 2.2: Ökonomischer und ökologischer Profit kühlerer Städte

Diese Potenziale sollte man in Hinblick auf die Anpassung an den Klimawandel beachten, da besonders in Städten längere und intensivere Überwärmungsperioden und Starkregenereignisse mit hohen Abflussspitzen in den Sommermonaten prognostiziert werden (KUTTLER 2011).

Erste Ansätze zur Berechnung des ökonomischen Potenzials der Verdunstungskälte zeigen folgende Ergebnisse:

I: Würde die Evaporation auf der Landfläche Frankreichs um 1 mm sinken, ist die Menge von zusätzlicher sensibler (fühlbarer) Wärme ungefähr so groß wie die Energie, die in neun Monaten von allen französischen Kraftwerken zusammen erzeugt wird.

Kohutiar (2008)

II: Die Kühlleistung eines Baumes mit einer Krone von 10 m Durchmesser, ist zu vergleichen mit der Kühlleistung von mehr als zehn Klimaanlage. Neben der Kühlleistung bindet der Baum auch Staub und CO₂ und absorbiert Geräusche, was man von Klimaanlage nicht behaupten kann.

Kohutiar (2008)

III: Eine Erhöhung des fühlbaren Wärmestroms um 106.300 GJ/a, entspricht dem Heizwert von 2.900.000 m³ Erdgas (Umrechnungsfaktor: 0,0273 MJ/m³). Diese Menge ist gleich dem durchschnittlichen Jahresenergieverbrauch für Heizung und Warmwasseraufbereitung von 1160 Haushalten (Durchschnittsverbrauch 2005: 2500 m³/a).

Harlaß (2008)

IV: Durch Versiegelung von 1 ha gutem Boden in Stuttgart, entsteht ein Energiestrom von 9.100 GJ, der aufgrund der fehlenden Kühlfunktion von Boden und Pflanze in fühlbare Wärme umgewandelt wird und so zu Hitzeinseln führt. Diese Menge Energie korrespondiert mit:

- 2.500.000 kWh (= 500.000 €, bei einem Preis von 0,2 €/ kWh)
- 20.000 m² gekühlter Bürofläche/ Jahr

Höke et al. (2010)

2.1.3 Einflüsse auf die Verdunstung

Im ATV-DVWK Merkblatt 504 (2002) werden Wetterbedingungen, Art und Dichte der Vegetation sowie der Anteil der versiegelten Flächen und die Bodenzusammensetzung als Haupteinflüsse auf die Verdunstung beschrieben. Sie sollen hier kurz im Hinblick auf die Optimierungsmöglichkeit der Gebietsverdunstung und damit einer besseren ökologischen und ökonomischen Nutzung der Verdunstungskälte erläutert werden. Der Boden wird in einem eigenen Kapitel behandelt, da er Hauptbetrachtungsgegenstand dieser Arbeit ist.

Die am Standort verfügbare Energie- und Wassermenge wird von den klimatischen Bedingungen bestimmt. Wichtigste Faktoren sind hierbei: Strahlungsenergie, Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre für Wasserdampf und Windverhältnisse am Standort (ATV-DVWK M504 2002). Die Intensität der Verdunstung hängt von der Oberflächentemperatur und somit von der Sonneneinstrahlung und der Albedo (Rückstrahlungsvermögen von nicht spiegelnden Oberflächen) der Oberflächen ab. Je dunkler eine Fläche ist, desto größer ist ihr Absorptionsvermögen (Erwärmung). Die Abhängigkeit der Verdunstung von der Sonneneinstrahlung führt zu Jahres- und Tagesganglinien (vgl. Abb. 2.8). In Deutschland werden deshalb die höchsten Verdunstungsmengen im Sommer und die niedrigsten im Winter erreicht. Die Folge sind unterschiedliche Füllstände im Bodenwasserspeicher, da die Niederschläge gleichmäßig verteilt über das ganze Jahre fallen. Im Winterhalbjahr wird der Bodenwasserspeicher aufgefüllt, da aufgrund der geringeren Sonneneinstrahlung die Verdunstungs- unter der Niederschlagsmenge liegt. Im Sommer liegt die Verdunstungsmenge aufgrund der hohen Sonneneinstrahlung und der Verdunstungsleistung der Pflanzen oft über der Niederschlagsmenge, sodass sich der Bodenwasserspeicher ohne kapillar aufsteigendes Wasser, entleert.

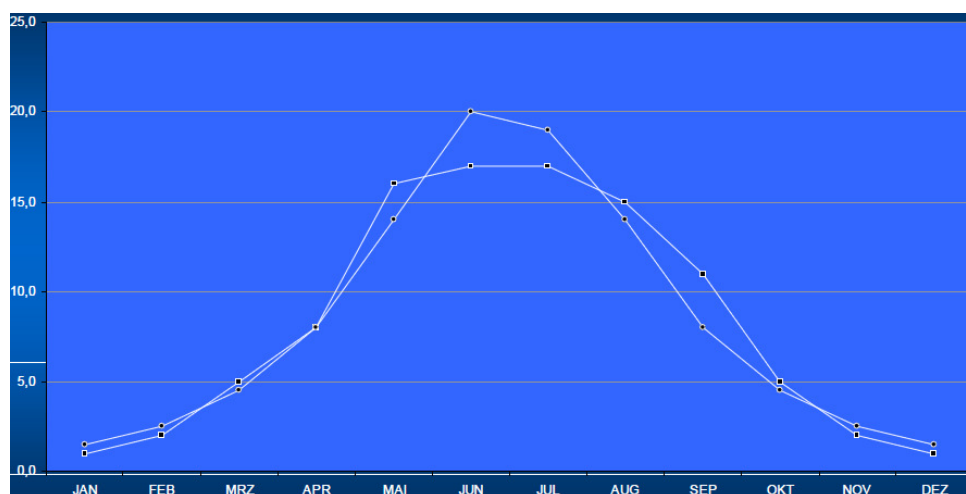


Abb. 2.8: Jahresgang der Verdunstung, dargestellt als monatliche Gebietsverdunstung in Prozent des Jahreswertes, für niederschlagsreiche und niederschlagsarme Gebiete (Nacken 2011)

Im Hinblick auf die Optimierung sind die klimatischen Bedingungen als gegeben und nicht beeinflussbar anzusehen. Für die Zukunft sind aber die durch das Intergovernmental Panel on Climate Change prognostizierten Klimaänderungen zu beachten. Diese sind für den *dynaklim*-Projektraum in erster Linie mit dem Szenario A1B aus dem Special Report on Emissions Scenarios (IPCC 2000) durch das regionale und dynamische Klimamodell CLM modelliert (KROPP et al. 2009). Folgende maximale Veränderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1961-1990 aus den Modellergebnissen könnten einen Einfluss auf die Verdunstung haben:

- Zunahme der mittleren Jahrestemperatur
- Veränderung der Jahresniederschläge
- Abnahme der Niederschlagssummen im meteorologischen Sommer
- Zunahme von Starkregenereignissen

90 % der Verdunstung ergeben sich in Deutschland aus der Transpiration und Interzeption der Pflanzen (vgl. Tab.2.1). Dadurch hat die Vegetation einen großen Einfluss auf die Verdunstungsmenge eines Gebietes. Die Höhe der Transpiration und der Interzeption ist je nach Bestand unterschiedlich und von der Wachstumsphase, dem Bedeckungsgrad, der effektiven Durchwurzelungstiefe und dem Blattflächenindex abhängig.

Die Höhe des Interzeptionsspeichers einer Pflanze unterliegt der Größe und Benetzbarkeit der Blattoberfläche sowie der Stellung der Blätter. Die Interzeptionsverdunstung ist von den Pflanzen nicht steuerbar, sie wird neben den Pflanzeigenschaften von der zur Verfügung stehenden Energie beeinflusst. Bei Laubbäumen beträgt die Interzeptionsverdunstung etwa 20 % des Freilandniederschlages und bei Eichen und Buchen rund 17 % (GEODZ 2011).

Die Transpiration kann von den Pflanzen aktiv durch Öffnen und Schließen der Spaltöffnungen (Stomata) beeinflusst werden. 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. Die an der Blattunterfläche gelegenen Zellen sind über den Tag (Dauer abhängig von Pflanzenart) geöffnet, um den Zutritt von CO₂ für die Photosynthese zu ermöglichen (ROWELL 1997). Sinkt das pflanzenverfügbare Wasser 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). Die Aufnahme des Wassers aus dem Boden und der Transport in der Pflanze zu den Stomata erfolgt über die Saugspannung der Pflanzen, die über das Sättigungsdefizit zwischen Luft und Blattfläche aufgebaut wird. Dieser Prozess ist für die Pflanzen lebensnotwendig, da sie ihren Energiehaushalt und die Nährstoffaufnahme darüber regulieren. Interzeption und Transpiration können nicht gleichzeitig ablaufen. Solange aus dem Interzeptionsspeicher Wasser verdunstet, ist das Sättigungsdefizit zwischen Umgebungsluft und Blattoberfläche zu gering, um Wasser aus der Pflanze zu verdunsten (DVWK M238 1996). Die Vegetation wirkt also als Ventil zwischen Boden und Atmosphäre. Sie schützt den Boden vor Überhitzung und Austrocknung und optimiert die Höhe der Transpiration über die Stomata in den Blättern (KOHUTJAR 2008). Die Modellierung des Verdunstungsprozess wird durch die biologische Steuerung erschwert (ATV-DVWK M504 2002). Im Hinblick auf die Optimierung sollten Pflanzen gewählt werden, die über eine hohe Durchwurzelungstiefe, lange Stomataöffnungszeiten, große Interzeptionsspeicher und lange Wachstumsphasen verfügen. Eine Optimierung der Vegetation macht aber erst dann Sinn, wenn der Bodenwasserspeicher genügend Wasser für die Verdunstung der Vegetation zur Verfügung stellen kann. Dies ist besonders im Sommerhalbjahr aufgrund der hohen Verdunstung durch die Vegetation nicht immer gegeben. Oft ist der Bodenwasservorrat schon nach den ersten Sommermonaten aufgebraucht und die Vegetation reduziert durch die Stomata aktiv ihre Verdunstungsleistung. Daher ist die Größe der Bodenwasserspeicherkapazität trotz der ganzjährig hohen Niederschläge in Deutschland sehr wichtig für die Klimawirksamkeit der Böden (HÖKE 2011). Hierauf soll in dieser Arbeit besonders eingegangen werden. Es werden die Speicherleistung verschiedener Böden und Möglichkeiten zur Vergrößerung des Bodenwasserspeichers dargestellt.

2.2 Der Boden als Wasserspeicher für die Verdunstung

Der Boden kann als Pufferzone im hydrologischen Kreislauf betrachtet werden. Durch seine Fähigkeit Wasser aufzunehmen, zu speichern und zu halten, hat er eine zentrale Stellung im Wasserkreislauf und einen großen Einfluss auf die Verdunstung. Denn der Teil des Niederschlags, den der Boden durch seine Bindungskräfte gegen die Schwerkraft hält, steht der Vegetation zur Transpiration zur Verfügung. Er fließt z.B. nicht durch Zwischenabfluss oder Perkolation (Sickerung) ab. Für die Transpiration sind, außer in Böden mit Grundwasseranschluss, die oberen Dezimeter des Bodens, der sogenannte effektive Wurzelraum, entscheidend. Er liegt in der ungesättigten Bodenzone, in der das Wasserspeicher- und -haltevermögen von Körnung, Gefüge, Lagerungsdichte, Humusgehalt und dem daraus resultierendem Porenraum abhängt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

2.2.1 Bodenaufbau

Der Porenraum der ungesättigten Bodenzone ermöglicht und begrenzt zugleich die Aufnahmefähigkeit von Wasser in den Boden. Er ist neben Wasser auch mit Luft, Wurzeln und Bodenorganismen gefüllt. Die Wasseraufnahme ist vom Volumen und der Sättigung des Porenraumes abhängig, die Speicherfähigkeit von den in den Poren wirkenden Haltekräften. Anzahl, Größe und Form der Poren und somit das Porenvolumen in dem das Wasser gespeichert wird, kann von den nachfolgend beschriebenen Bodeneigenschaften reguliert werden.

Es wird zwischen Primärporen, abhängig von den Bodeneigenschaften und Sekundärporen, abhängig von äußeren Einflüssen, unterschieden. Das Porenvolumen wird in weite $> 50 \mu\text{m}$ und enge $10\text{-}50 \mu\text{m}$ Grobporen, Mittelporen ($0,2\text{-}10 \mu\text{m}$) und Feinporen ($< 0,2 \mu\text{m}$) untergliedert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Je feiner die Poren sind, desto höher sind die Spannungskräfte, die das Wasser in den Poren halten und so für die Wasserspeicherung sorgen. Nach DIN 4022 liegen die unterschiedenen Größenklassen für die Hauptbodenarten wie in Tabelle 2.3 dargestellt vor. Sandböden enthalten besonders viele Grobporen, Schluff- und Lehm Böden viele Mittelporen und Tonböden viele Feinporen.

	Weite Grobporen ($> 50 \mu\text{m}$)	Enge Grobporen ($10\text{-}50 \mu\text{m}$)	Mittelporen ($0,2\text{-}10 \mu\text{m}$)	Feinporen ($< 0,2 \mu\text{m}$)
Sand	10-20%	20-40%	3-12%	2- 8%
Schluff	0-10%	5-25%	7-20%	5-20%
Ton	0- 5%	3- 20%	5-15%	25-45%
Anmoor	10-25%		10-40%	10-25%

Tab. 2.3: Porengrößenverteilung der Primärporen
(verändert nach Dyck & Peschke 1995; Scheffer & Schachtschabel 2002)

Die festen Bodenbestandteile beeinflussen durch ihre Körnung (Größe und Form) und ihr Gefüge (räumlichen Anordnung) die Größe des Porenraumes. Über die Korngrößenzusammensetzung wird die Bodenart bestimmt. Zuerst wird zwischen Bodenskelett ($> 2\text{mm}$) und Feinböden ($< 2\text{mm}$) unterschieden.

Eine weitere Unterteilung des Feinbodens erfolgt dann in die drei Fraktionen Sand ($0,063\text{-}0,2 \text{mm}$), Schluff ($0,002\text{-}0,063 \text{mm}$) und Ton ($< 0,0002 \text{mm}$) (AD-HOC AG 2005). Mit abnehmender Korngröße nehmen auch die Abrundung und die Variationsbreite der Partikel ab, sodass sich für die drei Fraktionen oft folgende charakteristische Formen ergeben (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

- Sand: nicht rund und nicht kantig
- Schluff: kantig, Scherbenform
- Ton: unregelmäßige Formen, ausgeprägte Blättchenformen

Gleichförmige Korngemische besitzen ein großes Porenvolumen, ungleichförmige Gemische ein geringeres, da die Poren durch feineres Korn ausgefüllt werden (HÖLTING & COLDEWEY 2009). Außer-

dem spielt die Oberfläche eine weitere Rolle für die Größe des Porenraumes. Körner mit glatter Oberfläche haben im Allgemeinen ein niedrigeres Porenvolumen. Je unregelmäßiger die Oberfläche ist, desto größer ist das Porenvolumen (HÖLTING & COLDEWEY 2009).

Das Gefüge erzeugt durch die räumliche Anordnung der verschieden großen und geformten mineralischen Partikel unterschiedlich geformte Porenräume. In biologisch aktiven Böden bildet sich das Gefüge als Krümel (z.B. durch Regenwürmer) oder Feinkoagulate. In lehmig/tonigen Böden als Polyeder, Prismen oder Säulen durch Austrocknung. In Schluffböden als Subpolyeder und in städtischen Böden (meistens Sande) als Einzelkorngefüge (BLUME 2004). Krümelbildung vermindert die Verschlammungsneigung, was sich stabilisierend auf den Porenraum auswirkt. Polyeder- und Prismenbildung mindern die Durchwurzelbarkeit und damit auch die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen (BLUME 2004).

Die Trockenraumdichte des Bodens hat einen großen Einfluss auf das Porenvolumen. Je ungleichmäßiger sortiert die Körnung und je höher die Trockenraumdichte ist, umso kleiner ist das Porenvolumen und damit der Wasserspeicher (HÖLTING & COLDEWEY 2009). Beanspruchungen, wie z.B. heftiger Niederschlag, Befahren, Betreten, Auflasten, Stampfen von Bäumen durch Windbewegungen, oder auch Sickerwasserfronten und Partikel wie Staub in den Städten, erhöhen die Trockenraumdichte der Bodenteilchen (HÖKE 2011; DISSE 1995; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Bei diesen Vorgängen nehmen die Anteile der Grobporen und bei den meisten Bodenarten auch die der Mittelporen ab, was die Wasserspeicherfähigkeit von Schluffen und Tonen deutlich verschlechtert. Bei Sanden hingegen tritt keine Verringerung des Porenvolumens ein, sondern häufig ist eine Verbesserung der Speicherleistung nachweisbar (BLUME 2004).

Eine Zunahme des Humusgehalts korrespondiert in der Regel mit höherem Porenvolumen sowie mehr Grob- und Mittelporen (BLUME 2004). Besonders bei Sandböden führt nach Scheffer & Schachtschabel (2002) ein zunehmender Gehalt an organischer Substanz zu einer Erhöhung des Mittel- und Feinporenanteils. Humus kann das 3- bis 5-fache seines Eigengewichts an Wasser aufnehmen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Insgesamt ist der Bodenaufbau stabiler, was Verdichtung und Verschlammung des Porenraums entgegenwirkt.

2.2.2 Bodenwasser

Als Bodenwasser wird der Teil des Wassers bezeichnet, der bis zur Trocknung von 105 °C aus dem Boden schwindet und sein prozentualer Anteil am Boden wird als Wassergehalt definiert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Das Bodenwasser wird durch die oben beschriebenen Bindungskräfte gegen die Schwerkraft im Boden gespeichert. Der Teil des Wassers, der durch die Bindungskräfte nicht gehalten werden kann, versickert weiter und bildet das Grundwasser. Das Bodenwasser wird, abgesehen vom kapillaren Aufstieg bei grundwassernahen Böden, in der Regel alleine durch den Niederschlag ergänzt. In Sonderfällen erfolgt ein lateraler Zufluss oder es wird durch Bewässerung zusätzliches Wasser bereitgestellt.

Die feste Phase wirkt mit den in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Eigenschaften, den daraus resultierenden Haltekräften und weiteren von außen einwirkenden Kräften auf die Bewegung des Wassers im Boden ein und beeinflusst dadurch die Verfügbarkeit für Pflanzen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Relativ zum Atmosphärendruck herrscht in der ungesättigten Bodenzone ein Unterdruck, die Saugspannung. Sie resultiert aus der Kapillarität (molekulare Anziehungskräfte an der Grenzfläche Feststoff/ Flüssigkeit) des Bodens. Die Saugspannung hängt von den in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Bodeneigenschaften ab. Deshalb weist jeder Boden eine charakteristische Retentionsfunktion, die pF-Kurve (p =Potenzial, F = freie Energie) auf (BLUME 2004).

Diese wird zur Beschreibung der Wasserspannung als negativer dekadischer Logarithmus und Funktion der Wassersättigung der Poren verwendet (HÖLTING & COLDEWEY 2009). Je niedriger der pF-Wert (Saugspannung), desto höher ist die Wassersättigung und umgekehrt.

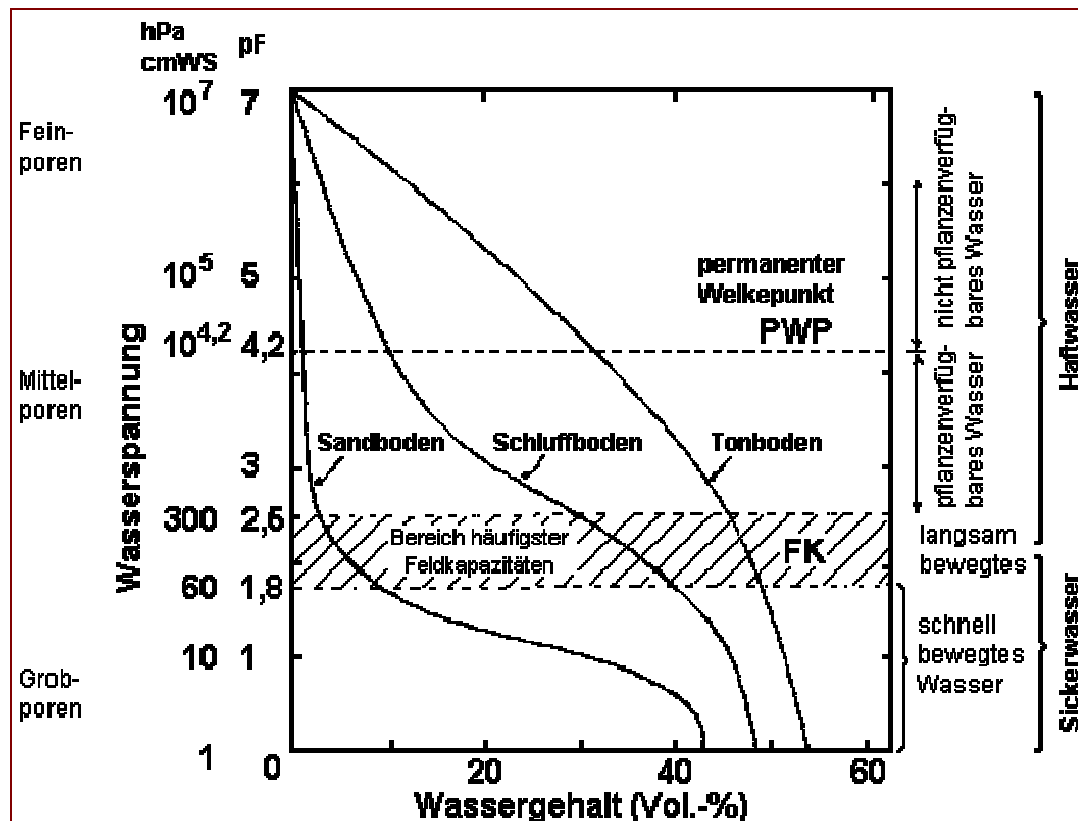


Abb. 2.9: pF-Kurve: Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt unterschiedlich gekörnter Böden (NGB 2009)

Die abgebildete pF-Kurve (Abb. 2.9) ist nach pflanzenphysiologischen Gesichtspunkten in drei Bereiche gegliedert. Sie bezeichnen charakteristische Wasserspannungen und den Wasserhaushalt des Bodens.

- Bereich 1 (0 bis 1,8 pF): Der Wasseranteil in diesem Druckbereich kann von den Böden nicht gehalten werden und perkoliert schnell in tiefere Schichten. Dieser Wasseranteil steht somit nicht für die Transpiration der Pflanzen zur Verfügung (Sickerwasser) (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).
- Bereich 2 (1,8 bis 2,5 pF): Hier kann das Wasser nur langsam sickern und von den Böden gegen die Schwerkraft gehalten werden, wodurch es für die Transpiration zur Verfügung steht. Pflanzen können dem Boden bis etwa pF 4.2 Wasser entziehen (BLUME 2004). Dieser Bereich wird als nutzbare Feldkapazität bezeichnet, der Bereich um pF 4.2 als Permanenter Welkepunkt.
- Bereich 3 (4.2 bis 7 pF): Der Wasseranteil in diesem Druckbereich ist so stark gebunden, dass er nicht pflanzenverfügbar ist und wird als Totwasser bezeichnet (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

Diese drei Bereiche des Bodenwasserhaushalts entsprechen bestimmten Porendurchmessern unter der Annahme ideal radial ausgebildeter Poren. Danach bewegt sich das schnell perkolierende Sickerwasser in den großen Grobporen. Der pflanzenverfügbare Wasseranteil der nutzbaren Feldkapazität liegt in den Mittelporen und den engen Grobporen vor. Der nicht mehr pflanzenverfügbare Bodenwasseranteil kann den Feinporen zugeordnet werden (BLUME 2004).

Neben dem Niederschlag kann in grundwassernahen Böden auch Wasser aus tieferen Bodenschichten oder aus dem Grundwasser zur Transpiration dienen. Das Wasser bewegt sich nach oben, wenn in den oberen Bodenzentimetern Wasser durch Evaporation oder über die Wurzeln der Pflanzen durch Transpiration entzogen wird. Der Aufstieg wird bedingt durch Meniskenbildung des Wassers in der ungesättigten Bodenzone, wodurch der Schwerkraft entgegengesetzte Adsorptions- und Kapillarkräfte auftreten (AD-HOC AG 2005).

Die Bewegung des Wassers im Boden kann über das Potenzialkonzept betrachtet werden, um eine detaillierte Beurteilung des Bodenwasserhaushalts zu erhalten. Dieses ist für numerisch aufwendige Simulationsmodelle nötig. Bei der Betrachtung der Bilanzglieder der Bodenwasserhaushaltsgleichung, wie es in dieser Arbeit der Fall ist, kann die ungesättigte Bodenzone nach Disse (1995) aber als integratives Speichersystem betrachtet werden. Hierfür sind lediglich die in Kapitel 2.2.1 aufgeführten Bodenkennwerte und der kapillare Aufstieg erforderlich. Für ausführliche Informationen über die Bewegung des Wassers im Boden sei auf Disse (1995) oder Dyck & Peschke (1995) verwiesen.

3 Methoden zur Ermittlung der Gebietsverdunstung

Wie in Kapitel 2 erläutert hängt die Verdunstung von vielen Einflussfaktoren ab. Aus diesem Grund ist die Verdunstung eine von Standort zu Standort und auch von Teilfläche zu Teilfläche stark schwankende und schwer zu erfassende Größe. In dieser Arbeit wird die Gebietsverdunstung über „homogene“ Teilflächen, die durch die verschiedenen Einflussfaktoren gegliedert sind, ermittelt.

3.1 Datenerfassung

Um die tatsächliche jährliche Verdunstung (ETa) und die jährliche Sickerwasserrate (SWRj) bestimmen zu können, müssen die Größen des Wasserhaushalts bekannt sein. Es werden Parameter durch Feldarbeiten erfasst aber auch auf digitale Datengrundlagen über das Geographische Informationssystem ArcGIS zurückgegriffen. Durch eine Akteneinsicht im Umweltamt der Stadt Bottrop konnten weitere Informationen über die Untersuchungsgebiete recherchiert werden. Die Werte für die SWRj, ETa und klimatische Wasserbilanz (kWB) werden über Modellrechnungen simuliert.

3.1.1 Felderfassung

Die Bodenuntersuchungen wurden mittels Rammkernsondierungen bis 2 m Tiefe (60 mm Durchmesser) im Mai 2011 durchgeführt. Die Bohrpunkte wurden durch Verschneidung verschiedener Geodaten zu Flächennutzung, Ausgangssubstrat und Grundwasserflurabstand sowie durch Auswertung von Luftbildern so ausgewählt, dass eine möglichst große Bandbreite der Bodeneigenschaften in den Untersuchungsgebieten abgedeckt wird. Die bodenkundliche Ansprache der Bohrkerns erfolgte nach § 2 BBodSchG für die Bewertung von Bodenfunktionen (AD-HOC AG 2005). Es wurden Horizonte, Humusgehalt, Bodenfeuchte, Trockenraumdichte, Feinboden und Grobboden untersucht. Aus diesen Felddaten können über Verknüpfungsregeln die für die Berechnung der Sickerwasserrate durch das TUB_BGR-Modell notwendigen Parameter berechnet und abgeleitet werden.

Die Landnutzung wurde erfasst und unterteilt nach: Grünland, Grünland mit Bäumen, Pflanzbeet, Acker, Teilversiegelung und Vollversiegelung.

Die Größe der Teilflächen wurde durch Digitalisieren der Flächen im ArcGIS ermittelt.

3.1.2 Digitale Datengrundlagen

Die verwendeten Klimadaten der DWD-Wetterstation Bochum stehen durch das vom BMBF geförderte *dynaklim*-Projekt zur Verfügung (*dynaklim* 2011). Die Station Bochum liegt zwar entfernter zu den Untersuchungsgebieten als die Station Essen, ihre Bedingungen werden aber aufgrund der ähnlichen Höhenlage und der Lageverhältnisse als vergleichbar mit der Stadt Bottrop angesehen. Eingangsgrößen für die Berechnungen sind die korrigierten Jahres- und Monatssummen des Niederschlags sowie die Monatsmittel der Temperatur und der tatsächlichen Sonnenscheindauer. Weitere Daten zu Globalstrahlung, astronomisch möglicher Sonnenscheindauer etc. sind dem DVWK Merkblatt 238 (1996) entnommen und entsprechen den Angaben zu 51° nördlicher Breite.

Zur Unterteilung der Untersuchungsflächen in Teilflächen dienen neben den erfassten Bodendaten auch digitale Karten mit Angaben zu Grundwasserflurabständen, Gewässern, Klimatopen und Geländehöhen aus dem *dynaklim* BMBF-Projekt (*dynaklim* 2011). Durch die Stadt Bottrop stehen weiterhin die Flächen der Untersuchungsgebiete, Karten zu Flurstücken und Gebäuden sowie eine Bodeneignungskarte aus dem Jahr 1948 und eine topographische Uraufnahme Bottrops zur Verfügung. Auf die Vornutzung der Flächen wurde aus den Luftbildern von 1952 bis heute geschlossen. In Tab. A5 im Anhang sind die Metadaten zu den verwendeten Daten angegeben.

3.2 Berechnungsverfahren

3.2.1 Jährliche tatsächliche Verdunstungsleistung (ETa)

Die jährliche tatsächliche Verdunstungsleistung der Teilflächen der Untersuchungsgebiete wird durch die Bilanzierung des Wasserhaushalts berechnet. In der Wasserhaushaltsgleichung ist in einem bestimmten Zeitabschnitt Δt die Niederschlagshöhe P gleich der Summe von Verdunstungshöhe E , Abflusshöhe R und Speicheränderung ΔW (vgl. Gl. 1).

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

In dieser Arbeit kann ΔW vernachlässigt werden, da in längeren Jahresreihen die Summe der positiven und negativen Speicheränderungen gegen Null geht (DVWK M238 1996).

So gilt für die Verdunstung der Untersuchungsgebiete und deren Teilflächen:

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

Für den Abfluss R wird nur die Versickerung (SWR_j) angesetzt, da von einer ebenen Fläche ohne Oberflächenabfluss ausgegangen wird (DWA M 153 2007).

Dieser Weg wurde für die Berechnung gewählt, um über das TUB_BGR-Modell von Wessolek und Trinks eine hohe Gewichtung der erfassten Bodenparameter in die Berechnungen einfließen lassen zu können, was in Verdunstungsmodellen so detailliert nicht möglich ist.

Die Versickerung oder auch Sickerwasserrate (SWR_j) wird mit dem TUB_BGR-Modell von Wessolek und Trinks aus NLFB (2004) für alle Teilflächen der Untersuchungsgebiete berechnet. Eingangsdaten sind: $N_{j_{\text{korr}}}$, $N_{s_{\text{korr}}}$ (Klimadaten aus *dynaklim*), $ET_{\text{pot}_{\text{FAO}}}$ (DVWK M198), $nFKWe$ und KA (Verknüpfungsregeln) sowie die Nutzungsart (Feldkartierung).

Ein Beispiel der Regressionsgleichungen für die Sickerwasserrate aus dem TUB_BGR-Modell zeigt Gleichung 3. Weitere Gleichungen für die Landnutzung Grünland und Acker sowie grundwassernahe Standorte sind in NLFB (2004) zu finden. Die Verknüpfungsregeln für die Bodenkennwerte sind Höke et al. (2009) und NLFB (2004) zu entnehmen.

Grünland, GW fern, $W_{\text{pfl}} \leq 700 \text{ mm}$:

$$SWR_{\text{TUB}} = N_{j_{\text{korr}}} - ET_{\text{pot}_{\text{FAO}}} \times [1,45 \times \log(nFKWe + N_{s_{\text{korr}}}) - 3,08] \times [0,76 \times \log\left(\frac{1}{ET_{\text{pot}_{\text{FAO}}}}\right) + 3,07] \quad (\text{Gl. 3})$$

SWR_{TUB} Sickerwasserrate

$N_{j_{\text{korr}}}$ langjähriger Mittelwert der Niederschlagshöhe des Gesamtjahr nach Korrektur der Messfehler [mm]

$ET_{\text{pot}_{\text{FAO}}}$ Gras-Referenzverdunstung nach FAO, hier verwendet ET_r [mm]

nFKWe	nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums [mm]
Ns _{kor}	langjähriger Mittelwert der Niederschlagshöhe der Sommermonate nach Korrektur der Messfehler [mm]

Die Gras-Referenzverdunstung (ET_{potFAO}) gilt international als Standard und setzt einen über das Jahr einheitlichen Grasbestand von 0,12 m Höhe bei fehlendem Wasserstress (Bodenfeuchte > 70 % nFK) voraus. Die verwendete Gleichung zur Berechnung der Verdunstung ist die aus ET_{potFAO} gewonnene empirische Referenzverdunstung aus der Turc-Wendling-Beziehung und wird mit ET_r bezeichnet (vgl. Gl. 4). Im folgenden Teil der Arbeit wird sie als Gras-Referenzverdunstung angesehen. Eingangswerte sind die Globalstrahlung RG, Küstenfaktor k, Temperatur T und Höhenkorrektur h, die in dieser Arbeit aufgrund der Lage Bochums unter 200 m über NN vernachlässigt wird (DVWK M238 1996). Ausgangswert ist die Verdunstung in mm/d, für die Modellrechnungen wurden die Tageswerte auf Monatswerte summiert.

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

ET _r	empirische Referenzverdunstung zur Grasreferenzverdunstung
RG	Globalstrahlung
k	Küstenfaktor (Lage unter 200 m über NN, k zu vernachlässigen)
T	Temperatur
h	Höhenkorrektur

In einem letzten Schritt wird die Gesamtverdunstung der Teilflächen durch Multiplikation der jährlichen tatsächlichen Verdunstung mit der Größe der Teilflächen ermittelt.

3.2.2 Bodenkühlungspotenzial

Um darzustellen, wie sich der Bodenwasserhaushalt über die Sommermonate aufgrund der Verdunstung und der Bodenspeichergröße verändert, werden die folgenden Schritte und Annahmen zur Bilanzierung verwendet.

Schritt 1: Berechnung der Gras-Referenzverdunstung (ET_{potFAO}/ ET_r)

Vgl. 3.2.1

Schritt 2: Berechnung der klimatischen Wasserbilanz (kWB)

Die kWB ist die Differenz aus korrigiertem Jahresniederschlag (N_{jkor}) und potenzieller Evapotranspiration, hier der Gras-Referenzverdunstung (ET_r) (AD-HOC AG 2005). Positive Werte bedeuten Wasserüberschuss, negative Wassermangel.

$$ET_r = \frac{(R_G + 93 \times k) \times (T + 22)}{162 \times (T + 123)} \times \frac{1}{1 + 0,0003 \times h} \quad (\text{Gl. 5})$$

Schritt 3: Berechnung der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe)

Die Berechnung erfolgte durch die Anwendung von Standardmethoden z.B. NLFB (2004) und für urbane Böden über eine Erweiterung nach Höke et al. (2009).

Schritt 4: Berechnung der Speicherfüllstände

$$ET_r = \frac{(R_G + 93 \times k) \times (T + 22)}{162 \times (T + 123)} \times \frac{1}{1 + 0,0003 \times h} \quad (\text{Gl. 6})$$

Weitere Modellannahmen:

- 100 % Speicherfüllung Ende März aufgrund humider Winter
- ab nFKWe-Füllung < 70 % Wasserstress für Pflanzen (DVWK M238 1996)
- ab nFKWe-Füllung < 40 % erhöhter Wasserstress, im Erwerbsanbau, ab dann Bewässerung (RENGER & STREBEL 1982)

Ausgewählte Jahre:

Alle Berechnungen werden für die Sommermonate April bis September im Referenzzeitraum 1960-1991, den trockensten Sommer des Referenzzeitraums 1976 und für das 30 % Quantil (30 % aller Sommer im Referenzzeitraum sind trockener) des Referenzzeitraums, das Jahr 1974 gemacht.

Das Trockenjahr 1976 kann als Beispiel für die durch das IPCC prognostizierte Häufung der trockenen Sommer (Kap. 2.1.3) gesehen werden.

3.2.3 Ökonomisches Potenzial

Um das ökonomische Potential der Untersuchungsgebiete zu berechnen, werden folgende Annahmen und Berechnungen durchgeführt.

Schritt 1: Berechnung der Verdunstungskapazität

$$\text{Verdunstungskapazität pro Fläche und Jahr} = ET_a \times \text{Flächengröße} \quad (\text{Gl. 7})$$

Schritt 2: Berechnung der benötigten Energiemenge

Für die in Schritt 1 berechneten Wassermenge/ Verdunstungskapazität wird eine Berechnung für die benötigte Energiemenge durchgeführt.

Annahme: Bei 20 °C warmen Wasser, werden 2454 kJ/kg verbraucht (BAUMGARTEN & LIEBSCHER 1996), das entspricht bei 1 mm= 1 l/m²= 1 mm/dm³ einer Energiemenge von ca. 2500 kJ.

Schritt 3: Monetarisierung und Vergleichbarkeit

Die für die Verdunstung des Wassers verbrauchte Energiemenge in KiloJoule wird mit dem Faktor 0,0036 GJ = 1 kWh in Kilowattstunden umgerechnet. Für eine Kilowattstunde wird entweder ein Preis von 0,02 € angesetzt oder die benötigte Menge Strom mit dem Verbrauch technischer Geräte (z.B. Kühlschrank, Klimaanlage) verglichen. Ansätze aus Höke et al. (2010).

Schritt 4: Verlustrechnung und Gewinnrechnung

Um die Veränderung der Verdunstungsleistung monetarisch darzustellen, werden die Schritte 1 bis 3 mit der Differenz der Verdunstungskapazität aus Ist-Zustand und B-Plan (entweder Gewinn oder Verlust) erneut durchgeführt.

Dabei wird berücksichtigt, dass versiegelte Flächen noch ca. 18 % des Niederschlags verdunsten (vgl. HARLAß 2008).

4 Kühlungspotenzial unterschiedlicher Böden

Das Kühlungspotenzial der Böden liegt in ihrer Fähigkeit Wasser zu speichern und den Pflanzen zur Transpiration zur Verfügung zu stellen. Dies ist besonders in Trockenperioden, in denen kein Niederschlagswasser zur Transpiration dienen kann, immens wichtig. Entscheidend ist das pflanzenverfügbare Bodenwasser (Wpfl). Die Menge wird von der nutzbaren Feldkapazität (nFK), der effektiven Durchwurzelungstiefe (W_e) und eventuellem kapillarem Aufstieg (k_A) bestimmt. Wie aus der Saugspannungskurve in Kapitel 2.2.2 deutlich wird, hängt die nFK vor allem vom Anteil der Mittelporen und der engen Grobporen ab. Dies begründet, warum grobkörnige Böden nur eine geringe nFK und feinkörnige Böden wie Schluff, Feinsande und Lehm eine hohe nFK besitzen.

In den folgenden Abbildungen sind die Schlüsse aus den Retentionskurven (Abb. 2.9) anschaulich auf die Speicherfähigkeit der drei Feinbodenfraktionen bezogen worden.

Sandböden haben einen hohen Anteil an Grobporen (vgl. Tab. 2.3), durch die das Wasser schnell perkoliert und schon bei geringen negativen Drücken nicht gehalten werden kann. Der Anteil an Mittelporen, in denen das Wasser gespeichert werden kann, ist gering. Daraus folgt auch die geringe nFK von 5 mm/dm. Charakteristisch für Sandböden sind also geringe Speicherleistungen und hohe Sickerwasserraten.

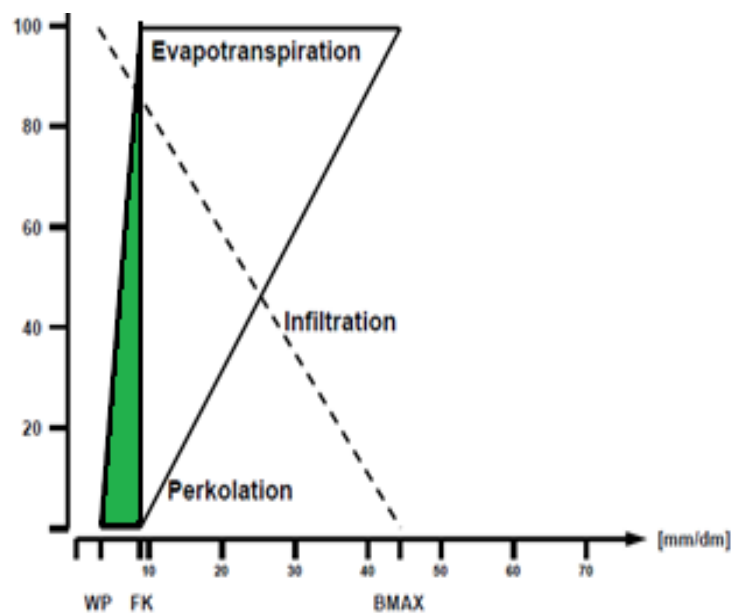


Abb. 4.1: Verdunstung im Sandboden (verändert nach Nacken 2011)

Lehm- und Schluffböden haben einen höheren Anteil an Feinkorn und somit einen großen Anteil an Mittelporen, die das pflanzenverfügbare Wasser speichern und erst bei höheren Drücken abgeben. Die nFK liegt bei 25 mm/dm. Charakteristisch für Lehm- und Schluffböden sind also gute Speicherleistungen und geringe Sickerwasserraten.

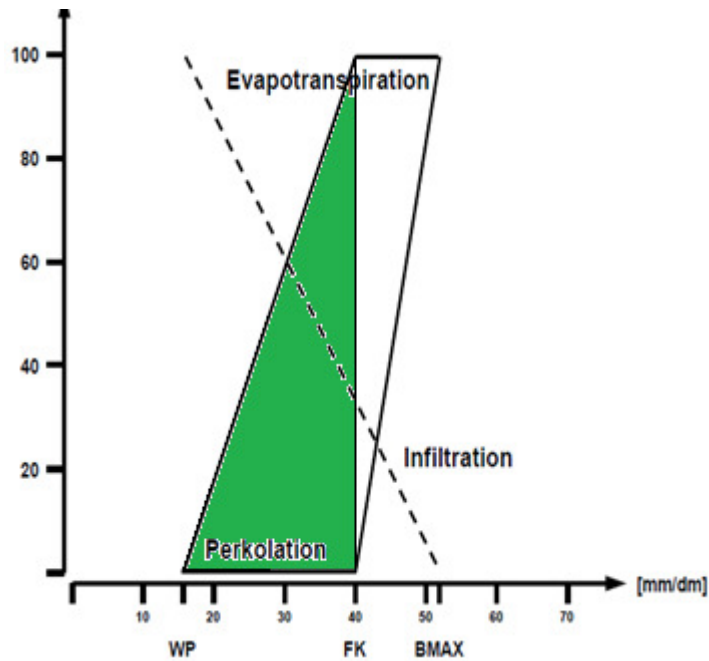


Abb. 4.2: Verdunstung in Lehm- und Schluffböden (verändert nach Nacken 2011)

Tonböden sind die Böden mit dem feinkörnigsten Material, was zu einem großen Anteil an Mittelporen, aber auch zu vielen Feinporen mit sehr hohen Bindungskräften in den Porenräumen führt. Deshalb ist die nFK geringer als bei Schluff und Lehm Böden (20 mm/dm). Positive Wirkung auf die Bindung des Wassers hat bei Tonpartikeln die poröse Oberflächenform.

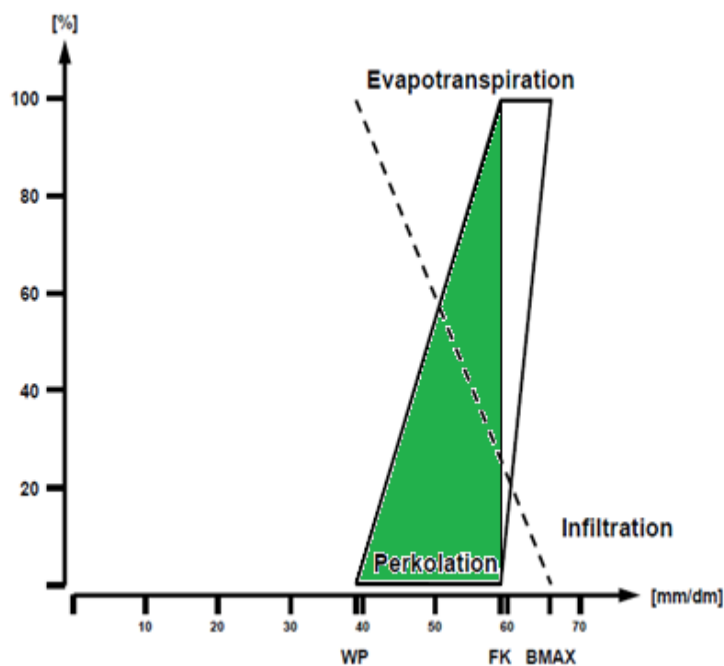


Abb. 4.3: Verdunstung im Tonboden (verändert nach Nacken 2011)

Aus den beschriebenen Eigenschaften und Zusammenhängen lässt sich ableiten, dass das in den Abbildungen 4.1 bis 4.3 eingefärbte Speichervermögen eines Bodens vorrangig von der Anzahl der Mittel- und engen Grobporen abhängt. Somit kann man in der Regel folgende Reihenfolge im Bezug zur Speicherleistung der unterschiedlichen Bodenarten festlegen: Sandböden < Tonböden < Lehm- und Schluffböden.

Zusätzlich können Verdichtung, Humusgehalt und Grundwassernähe positive oder negative Wirkung auf das Speichervolumen und die Haltekräfte haben (vgl. Kap. 2.2.1). Bei vielen gewachsenen Böden ist der Bodenaufbau von Horizont zu Horizont unterschiedlich. Darum sollte für ein aussagekräftiges Speicherergebnis jeder Horizont einzeln betrachtet werden. Außerdem wird aus den Abbildungen 4.1 bis 4.3 deutlich, dass eine maximale Verdunstungsleistung von 100 % erst bei einer hohen Füllung des Bodenwasserspeichers eintritt. Im DVWK Merkblatt M238 (1996) wird die geringere Verdunstungsleistung mit dem Wasserstress der Pflanzen begründet, der etwa ab einer nFK < 70 % eintritt. Im Erwerbsgartenbau wird ab einer nFK < 40 % bei erhöhtem Wasserstress die Bewässerung eingesetzt (RENGER & STREBEL 1982).

Die in Tabelle 4.2 und den Abbildungen 4.4 bis 4.6 dargestellten Berechnungen (vgl. Kap. 3) zeigen, dass Pflanzen in trockenen Jahren auf Böden mit guter Wasserspeicherung (Ton und Lehm) seltener unter Wasserstress stehen als auf Böden mit schlechter Speicherefähigkeit (Sand). Daraus resultiert eine höhere Verdunstung, die sich positiv auf die Verdunstungsleistung und somit die Kühlfunktion auswirkt.

	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sept
KWB`76 [mm]	-37	-18	-61	-28	-45	-14
nFKWe	% Speicherfüllung bei nFKWe (60cm)					
Sand 30 mm	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Lehm 150 mm	75 %	63 %	22 %	4 %	0 %	0 %
Ton 120 mm	69 %	54 %	3 %	0 %	0 %	0 %
nFKWe	% Speicherfüllung bei nFKWe (80 cm)					
Sand 30 mm	8 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Lehm 150 mm	82 %	72 %	42 %	28 %	5 %	0 %
Ton 120 mm	77 %	65 %	27 %	10 %	0 %	0 %

Tab. 4.1: Speicherausnutzung der Feinbodenfraktionen, im Trockenjahr 1976

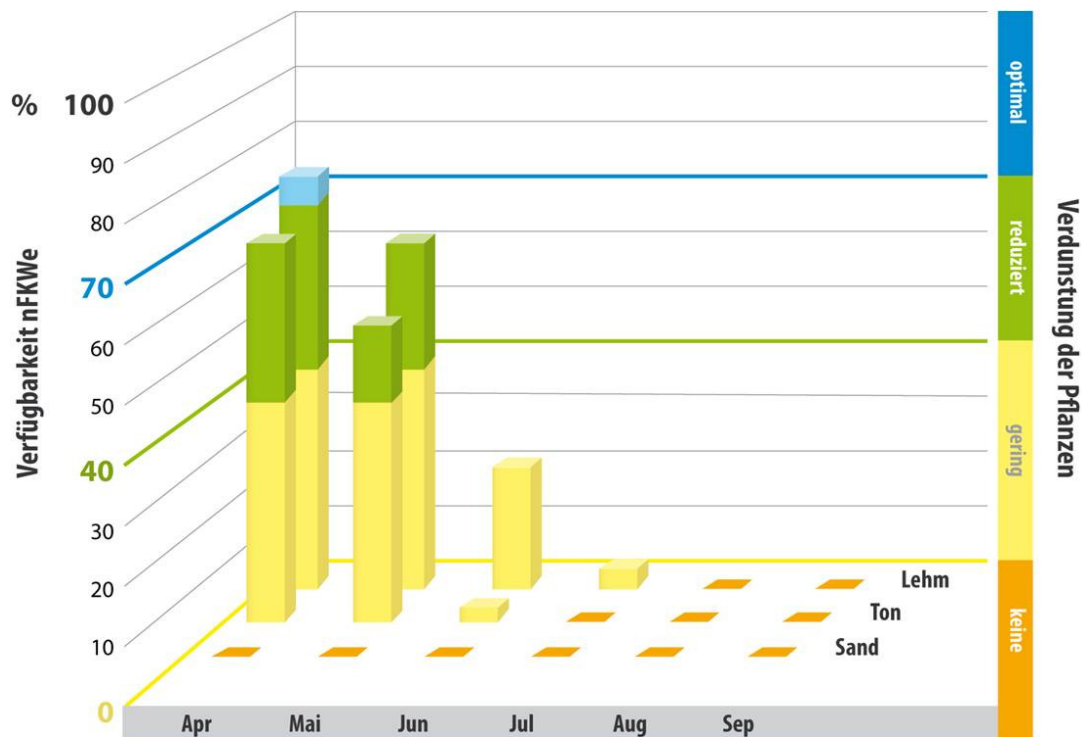


Abb. 4.4: Speicherfüllstände verschiedener Böden, Trockenjahr 1976, Durchwurzelungstiefe We 60 cm

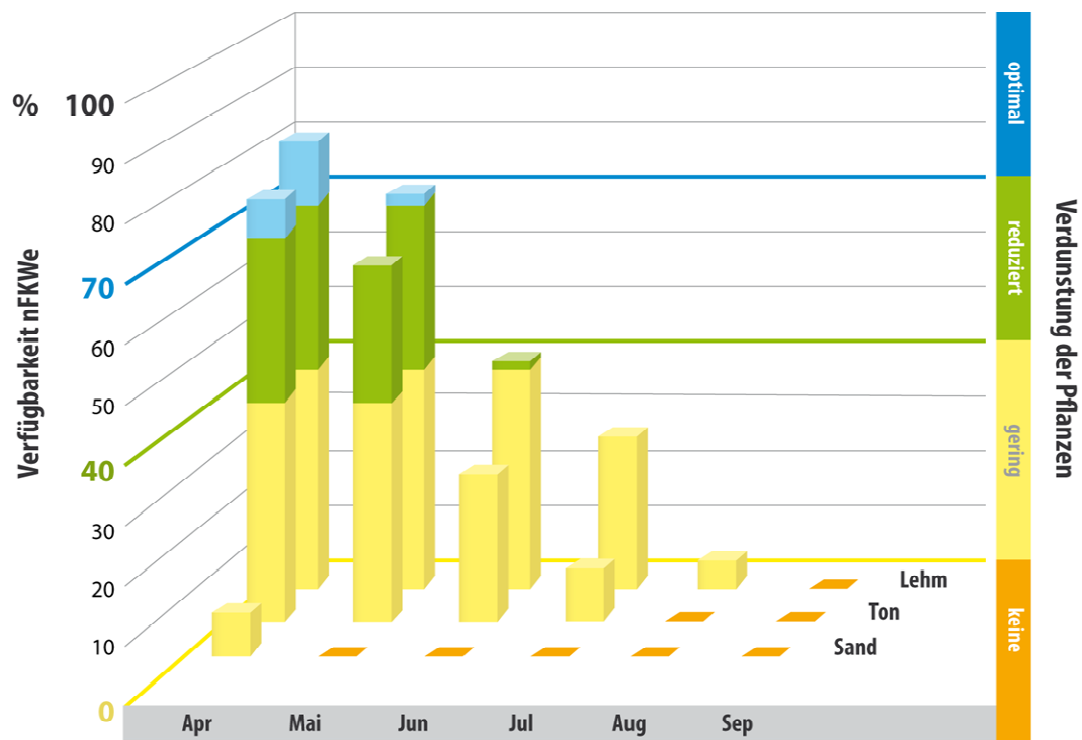


Abb. 4.5: Speicherfüllstände verschiedener Böden, Trockenjahr 1976, Durchwurzelungstiefe We 80 cm

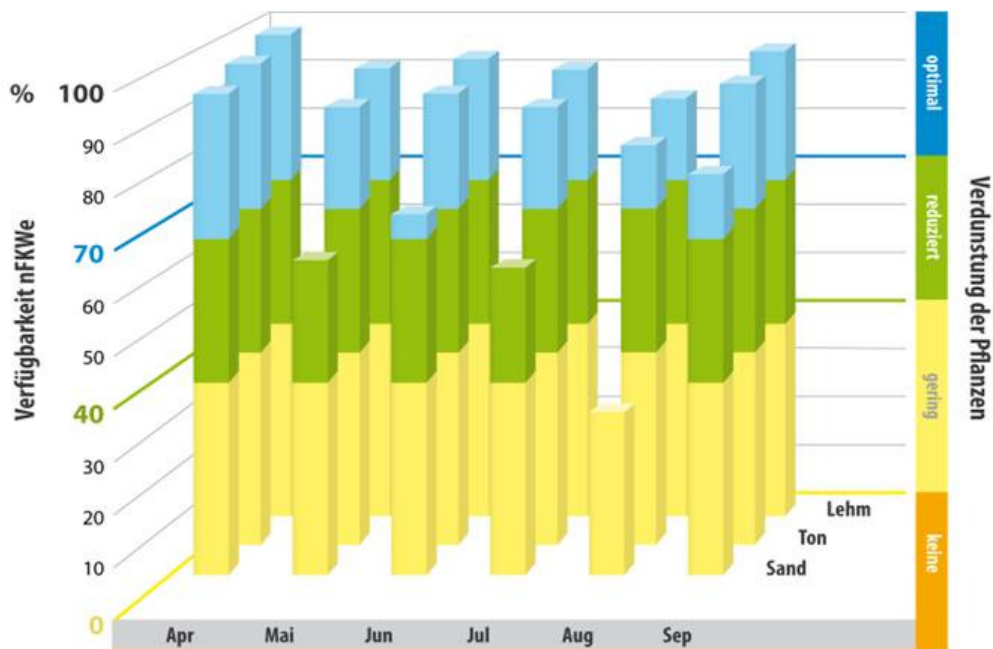


Abb. 4.6: Speicherfüllstände verschiedener Böden, Referenzzeitraum, Durchwurzelungstiefe We 60 cm

Es wird deutlich, dass über den Referenzzeitraum 1961-1990 (vgl. Abb.4.6) gesehen genügend Wasser zur Verdunstung gespeichert werden kann, lediglich die Füllstände der Sandböden liegen im Mai, Juni und August nicht im optimalen Bereich und würden die Verdunstung reduzieren. Für Einzelne Trockenjahre zeigen die Berechnungen sowohl für Sandböden als auch für Lehm- und Tonböden zu Beginn des Sommers deutlich reduzierte und nach 2 bis 3 Monaten entleerte Speicherfüllstände (vgl. Abb. 4.4). Hier liegt das Optimierungspotenzial der Bodenkühlleistung. Weiter zeigt der Vergleich von Abbildung 4.4 (We 60 cm) und 4.5 (We 80 cm), wie wichtig neben der Bindungskraft die Speichergröße ist. Sie wird durch die Durchwurzelungstiefe mitbestimmt und hält in Trockenzeiten so länger Wasser für die Verdunstung bereit. Renger und Strebel (1982) haben die effektive Durchwurzelungstiefe für Getreide bei unterschiedlichen Bodenarten untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2 dargestellt und machen deutlich, dass feinkörnigere Böden, die durch ein höheres Porenvolumen mehr Wasser speichern können, auch besser durchwurzelt werden.

Bodenart	Sand	Lehm	Ton	Schluff
We _{eff} [dm]	5-8	9-10	10	11

Tab. 4.2: Mittlerer effektiver Wurzelraum (We) in Abhängigkeit von Bodenart bei Getreide des Norddeutschen Tieflands (mittlere Lagerungsdichte) (verändert nach Renger & Strebel 1982)

5 Untersuchungsgebiete

Die Untersuchungsgebiete Jörgensmannwiese (Wohngebiet), Ehrenpark (Park) und Welheimer Mark (Feld) liegen in der Stadt Bottrop im Ruhrgebiet (Abb. 5.1).

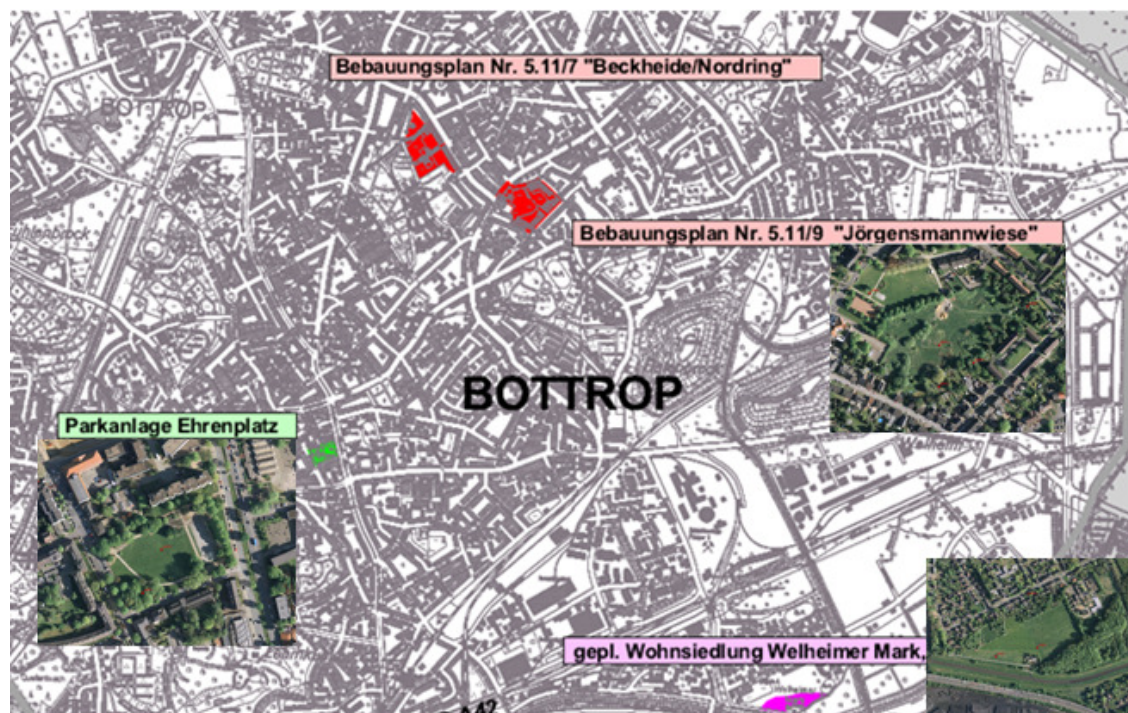


Abb. 5.1: Übersichtsplan der drei Untersuchungsgebiete Jörgensmannwiese, Ehrenpark und Welheimer Mark (Stadt Bottrop 2011)

Für die Verdunstungs- und Wasserhaushaltberechnungen der Teilflächen sind als Eingangsgrößen das Klima, die Sickerwasserrate und die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums, die Grundwasserstände, die Landnutzung und die Größen der Flächen von Bedeutung. Diese Eingangsgrößen werden in der Vorstellung der Untersuchungsgebiete dargelegt. Da die klimatische Situation in den drei Gebieten gleich ist, wird sie vorangestellt betrachtet.

Klima

Das Klima der Stadt Bottrop wird durch ozeanische Einflüsse bestimmt. Die überwiegend aus westlicher Richtung angeführte Meeresluft bewirkt ein ausgeglichenes Klima mit mäßig warmen Sommern und milden Wintern (STADT BOTTROP 2004).

Die für die Berechnungen zu Grunde gelegten langjährigen klimatischen Mittelwerte des Referenzzeitraums 1960-1991 sind in Tabelle 5.1 angegeben.

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Korrigierter Niederschlag $P_{\text{kor}} [\text{mm}]$	60,7	48,2	63,4	57,6	68,1	87,2	84,5	68,2	66,1	56,6	71,7	72,9
Lufttemperatur $T [^{\circ}\text{C}]$	1,8	2,3	4,9	8,2	12,6	15,6	17	16,7	13,9	10,2	5,5	2,8
Tägliche Sonnenscheindauer $S [\text{h/d}]$	1,3	2,5	3,1	4,7	5,8	5,8	5,8	5,5	4,2	3,4	1,8	1,1
Astronomisch mögliche Sonnenscheindauer $S_0 [\text{h/d}]$	8,5	10	11,9	13,8	15,5	16,5	16	14,5	12,6	10,7	9	8
Extraterrestrische Strahlung $R_0 [\text{J/cm}^2]$	862	1411	2238	3133	3831	4150	3992	3406	2577	1704	1019	716
Grasreferenzverdunstung $ET_r [\text{mm}]$	12,1	18,8	33,8	54,3	78,4	84,3	87,7	77,2	51,3	32,9	15,9	10,9

Tab. 5.1: Mittlere langjährige Klimadaten der Zeitreihe 1961-1990, der Station Bochum (DWD 2011; DVWK M 238 1996)

Für die Berechnungen werden folgende Klimadaten, abgeleitet aus der Zeitreihe 1961-1990 (vgl. Tab. 5.1), verwendet:

- Mittlerer Jahresniederschlag $N_{j\text{kor}}$ 804 mm
- Niederschlag Sommerhalbjahr (Apr.-Sept.) $N_{S\text{kor}}$ 432 mm
- Gras-Referenzverdunstung ET_r 558 mm
- Mittlere Lufttemperatur T 9,3 °C
- Mittlere tatsächliche Sonnenscheindauer S 1347 h

5.1 Wohngebiet Jörgensmannwiese



Abb. 5.2: Untersuchungsfläche Jörgensmannwiese, mit Gebietsgrenze und Bohrpunkten (blau: Stadt Bottrop, rot: dynaklim) der Bodenuntersuchungen (Luftbild 2008, Stadt Bottrop)

Das Wohngebiet liegt im Stadtteil Bottrop-Batenbrock, im Nord-Osten des Stadtgebietes. Die gesamte Fläche ist rund 63.000 m² (ca. 6 Hektar) groß, die im Vorentwurf des B-Plans zu bebauende Brachfläche 31.400 m². In naher Umgebung (südlich) befindet sich der Volkspark, der im Flächennutzungsplan als Frischluftschneise ausgewiesen ist (Karten und Fotos der Untersuchungsgebiete sind in Anhang 2 zu finden).

Nutzungsgeschichte

- Bis zum Ende des 2. Weltkrieges erfolgte eine landwirtschaftliche Nutzung. Da als Bodentyp Plaggenesche auftreten, muss hier früher Plaggenwirtschaft betrieben worden sein. Dabei wurden die höher gelegenen Flächen ackerbaulich genutzt, die tiefer gelegenen Bereiche waren Viehweiden, wobei die vernässte Senke als natürliche Tränke diente (STADT BOTTROP 2010).
- 1952 bis 1983 Blockrandbebauung entlang der nördlichen und westlichen Straßen
- 1983 bis heute entlang der nördlichen Straße öffentliche Grünfläche mit Sportplatz, Laubbäume. Die Grünfläche wird mit einem Wall zur restlichen Freifläche abgegrenzt. In dieser liegt bis heute eine Brachfläche. Nach der Flächennutzung ist das Gebiet zu 87 % Grünland, zu 10 % vollversiegelt und zu 3 % teilversiegelt. Der Vorentwurf zum Bebauungsplan sieht Wohnbebauung mit Einfamilienhäusern, Doppelhäusern und Reihenhäusern sowie öffentlichen Einrichtungen (Seniorenheim) auf der Brachfläche vor (vgl. Abb.5.3). Die Straßenrandbebauung inkl. Gärten, Schrebergärten und die öffentliche Grünfläche sollen erhalten bleiben. Lediglich im Süden des Gebiets wird ein Teil der Gärten mit verplant. Das Maß der baulichen Nutzung ist mit der Grundflächenzahl (GRZ) auf 0,4 (40 % des Grundstücks) festgelegt. In der Regel darf aber eine maximale Über-

schreitung der GRZ bis auf 0,8 (80 % des Grundstücks) für Terrassen, Zufahrten, Stellplätze etc. ausgeführt werden (B-Plan Nr. 5.11/9).

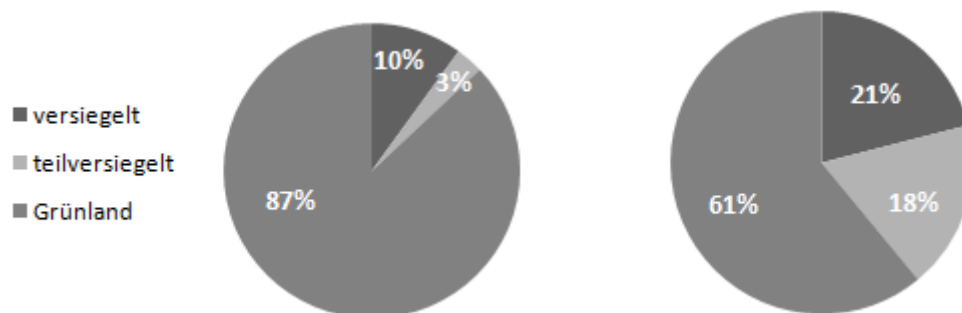
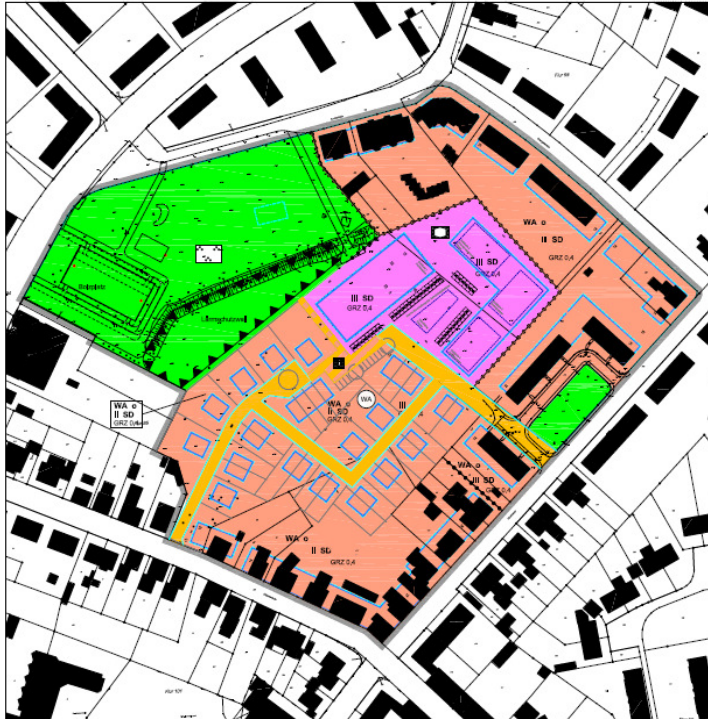


Abb. 5.3: Vorentwurf zum B-Plan Nr. 5.11/9, Maßstab 1:1000 vom 27.01.2011 (Stadt Bottrop 2011)



Abb. 5.4: Anteile der Landnutzung, Ist-Zustand (links) im Vergleich zum B-Plan-Vorentwurf (rechts)

Naturräumliche Gliederung

Hydrologische Situation

- Grundwasserfließrichtung: West (STADT BOTTROP 2010)
- Grundwasserflurabstand: im zentralen und südlichen Bereich des Gebiets mit < 1,5 m, im nord-westlichen, nördlichen und östlichen Bereich 1,5 – 3 m (vgl. Anhang 2.1.1). Im südlichen Teil der Brachfläche steht das Wasser z.T. bis zur Geländeoberkante an.

Boden

- Das Untersuchungsgebiet gliedert sich in vier Bodentypen: Plaggenesche (Grünfläche), grundwasser geprägte Plaggenesche, Braunerdegleye sowie Gleyplaggenesch (Brachfläche) und Regosole (Gärten). Zusätzlich wurde eine weitere Gliederung in Teilflächen durch verschiedene Grundwasserstände vorgenommen (vgl. Abb. 5.5).
- Aus einem Gutachten zur orientierenden Bewertung der Baugrundverhältnisse werden zwei ergänzende Bohrprofile für eine kleinflächige Unterteilung der Brachfläche verwendet. Die Profilbeschreibungen finden sich im Anhang (Tab. A1). Auf die Speicherefähigkeit und Kühlleistung der Böden wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

Vegetation

- Öffentliche Grünfläche: Laubbäume (Hasel, Pappel, Ahorn, Linde)
- Brachfläche: größten Teils mit Gräsern aber auch mit Sträuchern und Bäumen bewachsen. Hohe Anzahl an Schösslingen. In der nassen Senke findet man typische Feuchtezeiger, z.B. Seggenried, an den Grenzflächen zu den Gärten der Wohnbebauung ist die Fläche mit dichtem Brombeergestrüpp bewachsen.

Klimatope

- Parkklima auf Grün- und Brachfläche, Stadtrandklima auf Grundstücken (RVR 2011).

5.2 Parkanlage Ehrenpark

Der Ehrenpark liegt im Stadtzentrum Bottrops, unweit der Innenstadt. Er erstreckt sich über eine Fläche von ca. 16.300 m². Das Untersuchungsgebiet ist im Westen, Norden und Süden von Wohnbebauung (u.a. Kindergarten und Seniorenheim) umgeben. Im Osten, jenseits der Friedrich-Ebert-Straße, befindet sich ein Schulgelände.

Nutzungsgeschichte

- Im 18. Jahrhundert befand sich auf der Fläche ein See, der zugeschüttet worden ist.
- Im 19. Jahrhundert Nutzung als Parkanlage, die im Krieg auch zum Anbau von Lebensmitteln bewirtschaftet wurde. Ein vorhandener Bachlauf wurde später verrohrt.
- Heute: Im Ostteil des Geländes befinden sich eine Skateranlage sowie eine weitestgehend versiegelte Fläche. Der Rest des Parks ist Grünfläche. Pflanzbeete entlang der Straßen grenzen eine große Rasenfläche ein. Nach der Flächennutzung ist das Gebiet entsprechend Abbildung 5.7 in folgende Nutzungen unterteilt.

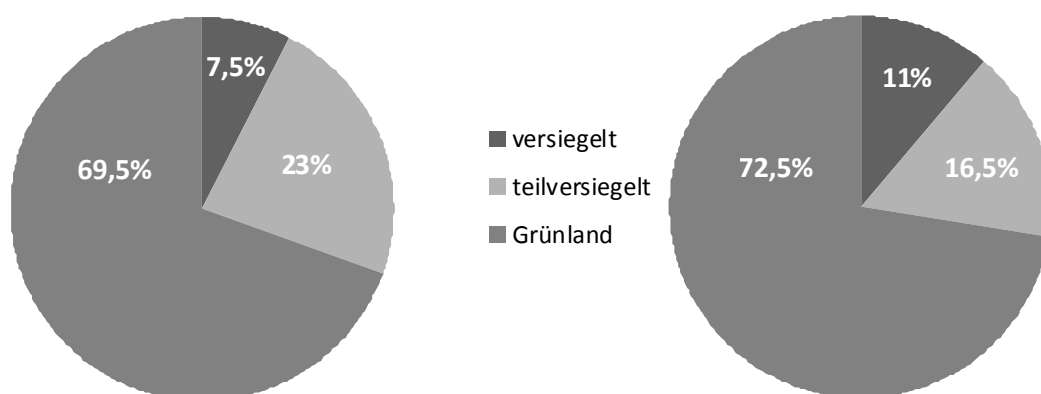


Abb. 5.7: Anteile der Landnutzung, Ist-Zustand (links) im Vergleich zum B-Plan (rechts)

- Die Umgestaltung des Ehrenparks sieht einen Mehrgenerationenpark mit Café, Toiletten, Skater-Anlage, Graffitiwand, Spielplatz, Fitnessgeräten, einen Pfad der Sinne und seniorengerechte Spielanlagen vor (vgl. Abb. 5.8). So wird auf die unterschiedlichen Nutzungsansprüche der umliegenden Anwohner und Einrichtungen (Kindergarten, Schule, Seniorenheim) eingegangen. Eine deutliche Verringerung der Versiegelung wird nicht vorgenommen (vgl. Abb. 5.7).

Naturräumliche Gliederung

Hydrologische Situation

- Grundwasser-Fließrichtung: Südosten, mit deutlichem Gefälle in Richtung Emscher, die ca. 2.000 m südlich des Ehrenparks als lokaler Vorfluter fließt (STADT BOTTROP 2009).
- Grundwasserstand: 1 m bis 4 m unter GOK (vgl. Anhang 2.2.1).
- Der Park wurde von West nach Süd von einem Bach durchquert. Der Bach ist inzwischen verrohrt, über seinen hydraulischen Einfluss liegen keine Informationen vor.



Abb. 5.8: B-Plan des Ehrenparks (Stadt Bottrop 2011)

Boden

- Der Bodenaufbau wurde für diese Arbeit durch 2 Rammkernsondierungen und einen Schurf kartiert. Zusätzlich liegen weitere Bohrungen, aus einem Gutachten zur orientierenden Altlastenuntersuchung „Umgestaltung Ehrenpark“, vor (STADT BOTTROP 2009).
- Das gesamte Untersuchungsgebiet ist durch oberflächennahe Aufschüttungen mit hohen Anteilen technogener Substrate (z.B. Bauschutt, Schlacke, Asche und Bergematerial), die bis in durchnässte Tiefen reichen können, aufgeschüttet. Darunter stehen Sande und dünne Torflagen an. Die Profilbeschreibungen finden sich in Anhang 1. Auf die Speicherfähigkeit und Kühlleistung der Böden wird im Kapitel 6 näher eingegangen.

Vegetation

- Rasen und Pflanzbeete mit Sträuchern und Bäumen

Klimatope

- Parkklima (RVR 2011)

5.3 Grünland Welheimer Mark



Abb. 5.9: Untersuchungsfläche Welheimer Mark, mit Gebietsgrenze und Bohrpunkten
(blau: Stadt Bottrop, rot: *dynaklim*) der Bodenuntersuchungen (Luftbild 2008, Stadt Bottrop)

Die Welheimer Mark liegt im Süd-Osten von Bottrop am nördlichen Ufer der Emscher. Im Norden grenzt ein Sportplatz an die Untersuchungsfläche, im Süden ein Pumpwerk der Emschergenossenschaft. Die Fläche des Untersuchungsgebiets ist ca. 24.700 m² groß.

Nutzungsgeschichte

- Die alten Luftbilder zeigen, dass die Untersuchungsfläche bis heute landwirtschaftlich genutzt wird. Der westliche Teil der Fläche wird aktuell ackerbaulich als Maisfeld bewirtschaftet, während der östliche Teil mit Mähwiese bewachsen ist.
- Ein konkreter Bebauungsplan liegt noch nicht vor. Die Gestaltung der Fläche soll durch einen Wettbewerb erfolgen (STADT BOTTRUP 2011).

Naturräumliche Gliederung

Hydrologische Situation: Grundwasserflurabstand: 2,5 m bis 5 m (Grünfläche), 3,5 m bis 5 m (Ackerfläche) (vgl. Anhang 2.3.1)

Boden: Auenboden, Vegagley

Klimatope: Freilandklima (RVR 2011)

6 Bodenkühlleistung der Untersuchungsgebiete

Die drei Untersuchungsgebiete sind in ihrer Landnutzung (Wohngebiet, Park, Feld) unterschiedlich. Die kleinflächige Erkundung zeigt, dass sie verschiedene Klimatope, Grundwasserstände, Bodenarten und Versiegelungsgrade abdecken (vgl. Kap. 5 und Anlage 2). Dies bietet auch bei gleichem Klima unterschiedliche Verdunstungsleistungen und somit verschiedene Kühlpotentiale. Die Untersuchungsgebiete werden in „homogene“ Teilflächen unterteilt. So kann eine Bestimmung der tatsächlichen Verdunstung mit Hilfe der Wasserhaushaltsgleichung und des TUB_BGR-Modells bzw. der klimatischen Wasserbilanz (vgl. Kap. 3) erfolgen. Geplante Nutzungsänderungen der Untersuchungsgebiete können die Verdunstungsleistung aufgrund weiterer Versiegelung verringern oder durch Entsiegelung, Bodenverbesserung und Bepflanzung erhöhen. Die Berechnungen für den Ist-Zustand und Planungszustand werden im Folgenden gegenübergestellt.

6.1 Ist-Zustand und B-Plan

Die Aufteilung der Tabellen zur Darstellung der jährlichen Verdunstungsleistung der Untersuchungsgebiete wurde in Anlehnung an Harlaß (2008) gewählt. Für die Berechnung einiger Teilflächen müssen aufgrund mangelnder Informationen oder Modellgrenzen folgende Annahmen getroffen werden:

- Mittlere jährliche Verdunstung für versiegelte und teilversiegelte Flächen 18 % des $N_{j_{\text{korr}}}$ (HARLAß 2008)
- Mittlere jährliche Verdunstung für Wasserflächen 72 % des $N_{j_{\text{korr}}}$ (HARLAß 2008)
- Mittlere jährliche Verdunstung von Rasenflächen mit Bäumen: Änderung der We_{eff} auf 110 cm für Laubbäume und Nass- Feuchtwiese (HÖKE et al. 2009)
- Zierrasen We_{eff} 20 cm
- Mittlere jährliche Verdunstung für Gartenflächen des Bebauungsplans Jörgensmannwiese: Kapillarer Aufstieg durch GW-Absenkung oder Aufschüttung nicht mehr vorhanden.

6.1.1 Jörgensmannwiese



Abb. 6.1: oben: Brachfläche, unten: Gleyplaggenesch, Profil urb013

Das Untersuchungsgebiet wurde in 11 verschiedene Teilflächen gegliedert. Die Gliederung erfolgte nach der Bodenart, der Landnutzung und dem Grundwasserflurabstand. Die Teilflächen sind Abbildung 6.2 und ihre Eigenschaften Tabelle 6.1 zu entnehmen. Für eine gute Verdunstungsleistung sind, wie in Kapitel 4 erarbeitet, besonders die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums (n_{FKWe}) und die Wasserverfügbarkeit entscheidend. Im Untersuchungsgebiet finden sich daher mit 650 mm/a die verdunstungsstärksten Flächen auf der z.T. nassen Brachfläche, die in Zukunft bebaut werden soll. Hier liegen grundwasserbeeinflusste Böden vor. Als Leitprofil wird urb013 vorgestellt (Abb. 6.1). Es handelt sich um einen Gleyplaggenesch aus Flugsanden. Er hat aufgrund des Grundwasseranschlusses und der ehemaligen Plaggenwirtschaft hohe Humusgehalte bis ca. 90 cm ausgebildet. Dies verbessert die Wasserspeicherfähigkeit der Sandböden auf der Brachfläche. Ein hoher Anteil enger Grobporen (durch die feinen Sande), hohe Humusgehalte und lockere Lagerung bedingen in den Berechnungen n_{FKWe} -Werte von ca. 160 mm bis 200 mm, die für Sandböden hoch sind. Zusätzlich sorgt vor allem der Grundwasseranschluss (vgl. Anhang 2.1.1) für eine hohe Verdunstungsleistung, da Grün- und Baumflächen durch kapillaren Aufstieg zusätzliches Wasser nutzen können. Die Auswirkung der Landnutzungsänderung durch die Bebauung der Brachfläche wird aus Tabelle 6.2 deutlich. Neben der sichtbaren Veränderung des Landschaftsbildes ergibt sich eine unsichtbare, aber große Auswirkung auf den Wasser- und Energiehaushalt der 31.400 m² großen Brachfläche, da die Teilflächen mit hoher Verdunstungsleistung durch Bebauung versiegelt werden. Desweiteren muss, um eine Bebauung zu realisieren, der verdunstungsfördernde Grundwasseranschluss entweder durch

anthropogene Aufschüttungen > 1 m oder Grundwasserabsenkungen gekappt werden (STADT BOTTROP 2010). Boden der für Baugrund geeignet ist und im Falle einer Bebauung aufgeschüttet wird, hat i.d.R. keine guten Wasserhaltefähigkeiten. Aufgrund der Absenkung des Grundwassers wäre der verdunstungsfördernde kapillare Aufstieg auch auf den nichtversiegelten Gartenflächen nicht mehr gegeben.

In Bezug auf die Verdunstungsleistung sind die Veränderungen in Tabelle 6.2 dargestellt. Da ein Teil des Untersuchungsgebietes durch die geplante Bebauung nicht betroffen ist, wird nur der Bereich des Bebauungsplans, eingefärbt in Abbildung 6.3, betrachtet. Der Vergleich des Ist-Zustand mit dem B-Plan (GRZ 0,8) zeigt eine Reduzierung der Verdunstungsleistung auf 51 %. Abbildung 6.3 verdeutlicht die Auswirkungen der Bebauung auf die jährliche Verdunstungsrate der Teilflächen. Eine Reduzierung der Verdunstung um 51 % entspricht einer Wassermenge von 9206 m³/a, die im Zuge der Verwirklichung des B-Plans oberirdisch abfließt und nicht zur Transpiration oder Grundwasserneubildung dient. Nach Kapitel 3 entzieht die Verdunstung der Umgebung pro Millimeter verdunstetem Wasser eine Energiemenge von 2.500 kJ. Für das Untersuchungsgebiet ergibt sich durch die Nutzungsänderung eine Menge von 23.015 GJ an Energie, die nicht mehr über die Verdunstung in latente Wärme umgewandelt wird, sondern nun als fühlbare Wärme die Umgebung erwärmt und eine Minderung der Kühlleistung von umgerechnet 1.278.611 Euro pro Jahr verursacht. Sie korrespondiert weiterhin mit einem Stromverbrauch von ca. 23.000 Kühlschränken, mit der Kühlung von 50.600 m² Bürofläche oder 628.310 m³ Erdgas. Dies entspricht dem durchschnittlichen Jahresenergieverbrauch für Heizung und Warmwasseraufbereitung von 251 Haushalten.



Abb. 6.2: Einteilung der Teilflächen für den Ist-Zustand, Jörgensmannwiese
(Luftbild 2008, Stadt Bottrop)

ERFASSUNGS- UND OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN DES KÜHLUNGSPOTENZIALS VON BÖDEN
DARGESTELLT AN AUSGEWÄHLTEN WOHN- UND PARKFLÄCHEN DER STADT BOTTROP

Teilfläche	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
We _{eff} [cm]	0	0	60	60	85	70	60	110	90	80	110
nFKWe [mm]	0	0	145	149	217	126	129	230	200	170	230
kA	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-

Tab. 6.1: Bodenspezifische Eigenschaften der Teilflächen, Durchwurzelungstiefe We_{eff}, nutzbare Feldkapazität und kapillarer Aufstieg kA

Nr.	Landnutzung	Mittlere jähr- liche Verduns- tung	Ist-Zustand		B-Plan	
			Fläche [m ²]	Verdunstung [m ³ /a]	Fläche [m ²]	Verdunstung [m ³ /a]
B-Plan Gebiet						
1	Dächer	145	2079	301	7663	1111
2	Straße und Wege	145	366	53	3448	500
	Terrasse, Stellplatz	145	0	0	9414	1365
	Lärmschutzwall	632	0	0	2269	1434
3	Gärten ohne GW	573	0	0	2358	1358
4	Gärten mit GW	603	9212	5555	6248	3768
5	Gleyplaggenesch GW: 0 - 0,5 m	650	1423	925	0	0
6	Gleyplaggenesch GW 0,5 - 1 m	650	3899	2534	0	0
7	Plaggenesch	650	6464	4202	0	0
8	Plaggenesch mit Bäumen	650	2449	1592	0	0
9	Braunerdegley	650	5508	3580	0	0
Summe			31400	18742	31400	9536
ETa/ m ² x a [m ³]			0,6		0,3	
% Ist-Zustand			100%		51%	
% ET _r			104%		53%	
Ökosystemleistung der Kühlfunktion						
€ pro Gesamtfläche / a			2.603.055 €		1.324.444 €	
€ pro m ² /a			83€		42€	
Verlust/a			1.278.611€			

Tab. 6.2: Jährliche Verdunstungsleistung Vergleich von Ist-Zustand und B-Plan, Jörgensmannwiese

6.1.2 Ehrenpark

Das Untersuchungsgebiet wurde in 8 Teilflächen gegliedert. Die Unterteilung erfolgte nach der Bodenart, der Landnutzung und dem Grundwasserflurabstand. Die sich daraus ergebenden Teilflächen sind in Abbildung 6.5 eingezeichnet und ihre Eigenschaften in Tabelle 6.5 dargestellt. Der gesamte Boden des Ehrenparks besteht aus anthropogenen Aufschüttungen, vor allem aus Aschen und Bauschutt (vgl. Abb. 6.4). Urbane Böden haben andere Eigenschaften und Merkmale als naturnahe Böden, diese sind in Tabelle 6.3 aufgeführt und machen deutlich, dass sie sich reduzierend auf die Wasserspeicherfähigkeit und Wasserspeichergroße der Böden auswirken.

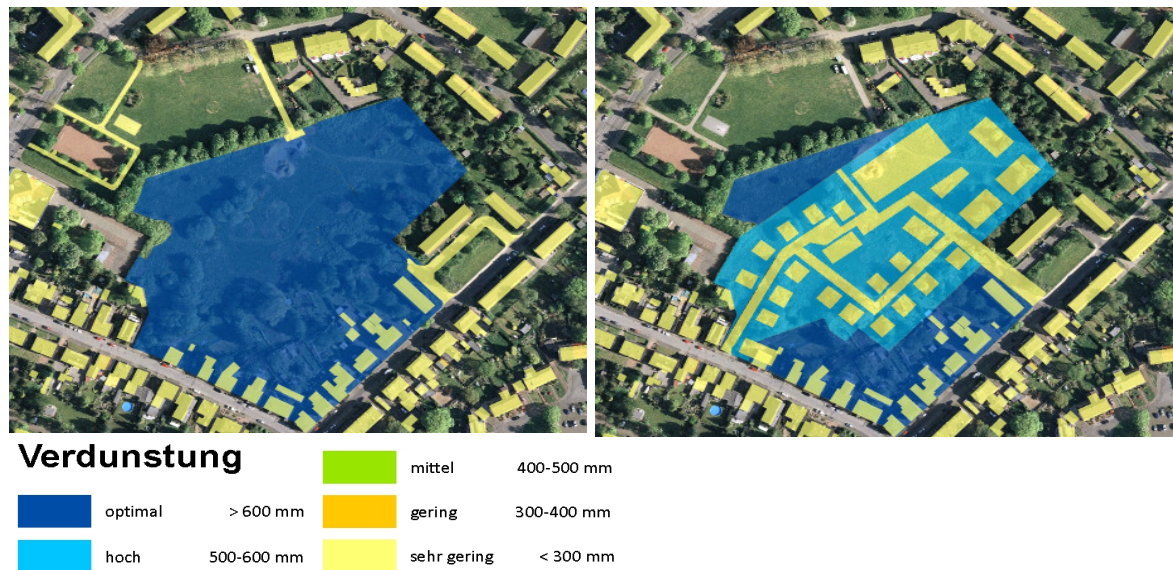


Abb. 6.3: Vergleich der jährlichen Verdunstungsrate vom Ist-Zustand (links) und B-Plan (rechts)

Merkmale urbaner Böden	Bedeutung für den Bodenwasserhaushalt
Technogene Substrate	Spez. Eigenschaften im Wasser- und Lufthaushalt
Mischung und Schichtung	Schichtgrenzen und Porensprünge Vermindern kf und KA
Grobbodenanteile	Abnahme der nFK Abnahme der Durchwurzelungstiefe Zunahme bevorzugter Fließwege

Tab. 6.3: Merkmale urbaner Böden und deren Auswirkung auf den Bodenwasserhaushalt (Höke et al. 2010)

Auch die Berechnungen der nFK_{We}, SWR_j und ET_a im Vergleich zu den naturnahen Böden, z.B. aus der Welheimer Mark (vgl. Tab. 6.4), zeigen eine schlechtere Wasserspeicherfähigkeit und somit eine geringe Verdunstung der Böden im Ehrenpark. Berechnungen aus der Bodendatenbank verschiedener Stadtböden (Projekt *dynaklim*) zeigen im Schnitt eine 12 bis 22 % geringer nFK_{We} von Stadtböden im Vergleich zu natürlichen Böden.

Boden	nFK _{We}	SWR _j	ET _a
Regosol, urbaner Boden Ehrenpark	36	320	485
Vega-Gley, naturnaher Boden Welheimer Mark	166	217	588
Gleyplaggenesch, naturnaher Boden Jörgensmannwiese	217	155	650

Tab. 6.4: Vergleich der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFK_{We}), der Sickerwasserrate (SWR_j) und der tatsächlichen Verdunstung (ET_a) von Böden der drei Untersuchungsgebiete, alle Angaben in [mm]



Abb. 6.4: oben: Rasen Parkfläche, unten: Regosol, Profil urb010

Das Leitprofil urb010 (Abb. 6.4), im Zentrum des Ehrenparks (Abb. 5.6), ist ein Regosol aus aufgeschüttetem, natürlichem Bodenmaterial, über humosen-Bauschutt-Bodengemisch, über aufgeschüttetem Lehm über Asche (vermutlich Hausbrandaschen). Der hohe Grobbodenanteil von über 47 % hat einen negativen Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt. Die nFKWe wird aufgrund des Grobbodens, der sowohl eine schlechtere Speicherleistung als auch Durchwurzelung als Feinboden bietet, verringert (vgl. Kap. 2.2.1). Hohe Humusgehalte und lockere Lagerung bewirken eine bessere Speicherfähigkeit. Die Durchwurzelungstiefe des Rasens (P10, P16, P6) wurde auf 20 cm (90 % der Durchwurzelung) festgelegt. Es ist ein dichter Wurzelfilz ausgebildet, der aber nur in eine geringe Tiefe reicht. Durch die dichten Wurzeln kann das Niederschlagswasser zwar gut zurückgehalten und aufgenommen werden, aber zusätzliches Wasser aus tieferen Bodenschichten kann aufgrund der geringen Durchwurzelungstiefe nicht erschlossen werden (HARLAß 2008). Dies ist vor allem in Trockenperioden ungünstig, da nur ein geringer Speicherraum des Bodens zur Wasserversorgung erschlossen ist. Ein großer Teil des Bodens im Ehrenpark bietet mit einer nFKWe von 36 mm unter der Rasenfläche keinen guten Wasserspeicher. Dies wird auch aus Tab. 6.6 deutlich. Im Ehrenpark werden lediglich 73 % der Grasreferenzverdunstung verdunstet. Die Berechnungen zeigen durch die Umgestaltung des Ehrenparks keine Verschlechterung der Verdunstungsleistung, aber auch nur eine Erhöhung der Verdunstungsleistung um 1 %. Zwar wurde der Anteil versiegelter Flächen verringert, aber der Anteil der teilversiegelten Flächen durch andere Wegführung und Sandkästen vergrößert.



Abb. 6.5: Einteilung der Teilflächen für den Ist-Zustand, Ehrenpark (Luftbild 2008 Stadt Bottrop)

Teilfläche	1	2	3	4	5	6	7	8
We_{eff} [cm]	0	0	110	110	110	20	20	20
nFK_{We} [mm]	0	0	194	220	142	30	36	50
kA	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 6.5: Bodenspezifische Eigenschaften der Teilflächen, Durchwurzelungstiefe We_{eff} , nutzbare Feldkapazität und kapillarer Aufstieg kA

Nr.	Landnutzung	Mittlere jährliche Verdunstung	Ist-Zustand		B-Plan	
			Fläche [m ²]	Verdunstung [m ^{3/a}]	Fläche [m ²]	Verdunstung [m ^{3/a}]
Versiegelte Fläche						
1	Skateranlage, Wege	145	2169	314	1205	175
Teilversiegelte Fläche						
2	Wege	145	2620	380	3737	542
Grünfläche						
3	Pflanzbeet I	608	3305	2009	4985	3031
4	Pflanzbeet II	625	914	571	529	330

Nr.	Landnutzung	Mittlere jährliche Verdunstung	Ist-Zustand		B-Plan	
			Fläche [m ²]	Verdunstung [m ^{3/a}]	Fläche [m ²]	Verdunstung [m ^{3/a}]
5	Wiese I mit Bäumen	650	352	201	352	201
6	Wiese I	479	1448	694	686	328
7	Wiese II	485	4940	2396	4388	2128
8	Wiese III	500	552	276	419	210
Summe			16300	6869	16300	6973
ETa/m ² x a [m ³]			0,42		0,43	
% Ist-Zustand			100%		102%	
% ET _r			73%		74%	
Ökosystemleistung der Kühlfunktion						
€ pro Gesamtfläche /a			954.028 €		968.472 €	
€ pro m ² /a			58€		59€	
Gewinn/a			14.444€			

Tab. 6.6: Jährliche Verdunstungsleistung Vergleich von Ist-Zustand und B-Plan, Ehrenpark

6.1.3 Welheimer Mark



Abb. 6.6: oben: Intensivwiese, unten: Vega-Gley, urb041

Das Untersuchungsgebiet wurde nach der Landnutzung und der Bodenart in zwei Teilflächen gegliedert. Die Einteilung der Teilflächen sind Abbildung 6.8, ihre Eigenschaften Tabelle 6.8 zu entnehmen. Auf der Untersuchungsfläche

liegen natürliche Böden vor. Das Profil 41 ist ein reliktischer Vega-Gley (Abb. 6.7), der aufgrund seiner feinen Körnung (sandiger Lehm, toniger Lehm), eine sehr gute Wasserhaltekapazität von 166 mm (nFKWe) hat. Reduzierend wirken sich, vor allem auf der Teilfläche 2, die erhöhte Trockenraumdichte von pt5 und der tiefe Grundwasserstand von 2,5 bis 5 m aus (vgl. Anhang 1 und Anhang 2.3.1). Die Verdichtung des Bodens entsteht durch das Befahren und Bearbeiten der Felder mit landwirtschaftlichen Maschinen. Es können Bodenerosionen und Verschlammungen entstehen. Diese Vorgänge wirken sich verringernd auf das Porenvolumen und damit das Wasserspeichervermögen aus (vgl. Kap. 2.2.1). Aufgrund des wahrscheinlich durch den Emscherbau oder den Zechenbetrieb Prosper abgesenkten Grundwasserflurabstands von über 3 m ist ein kapillarer Aufstieg und somit mehr pflanzenverfügbares

Wasser nicht vorhanden. Ein konkreter B-Plan für die Bebauung der Fläche liegt noch nicht vor, daher wird von einer Bebauung mit ca. 50 Wohneinheiten (STADT BOTTRUP 2011) ausgegangen. Desweiteren wird eine Grundflächenzahl (GRZ) von 0,4 (40 % des Grundstücks) sowie eine maximale Überschreitung der GRZ bis auf 0,8 (80 % des Grundstücks) für Terrassen, Zufahrten, Stellplätzen etc., wie es in der Planung für die Jörgensmannwiese vorgesehen ist, angenommen.

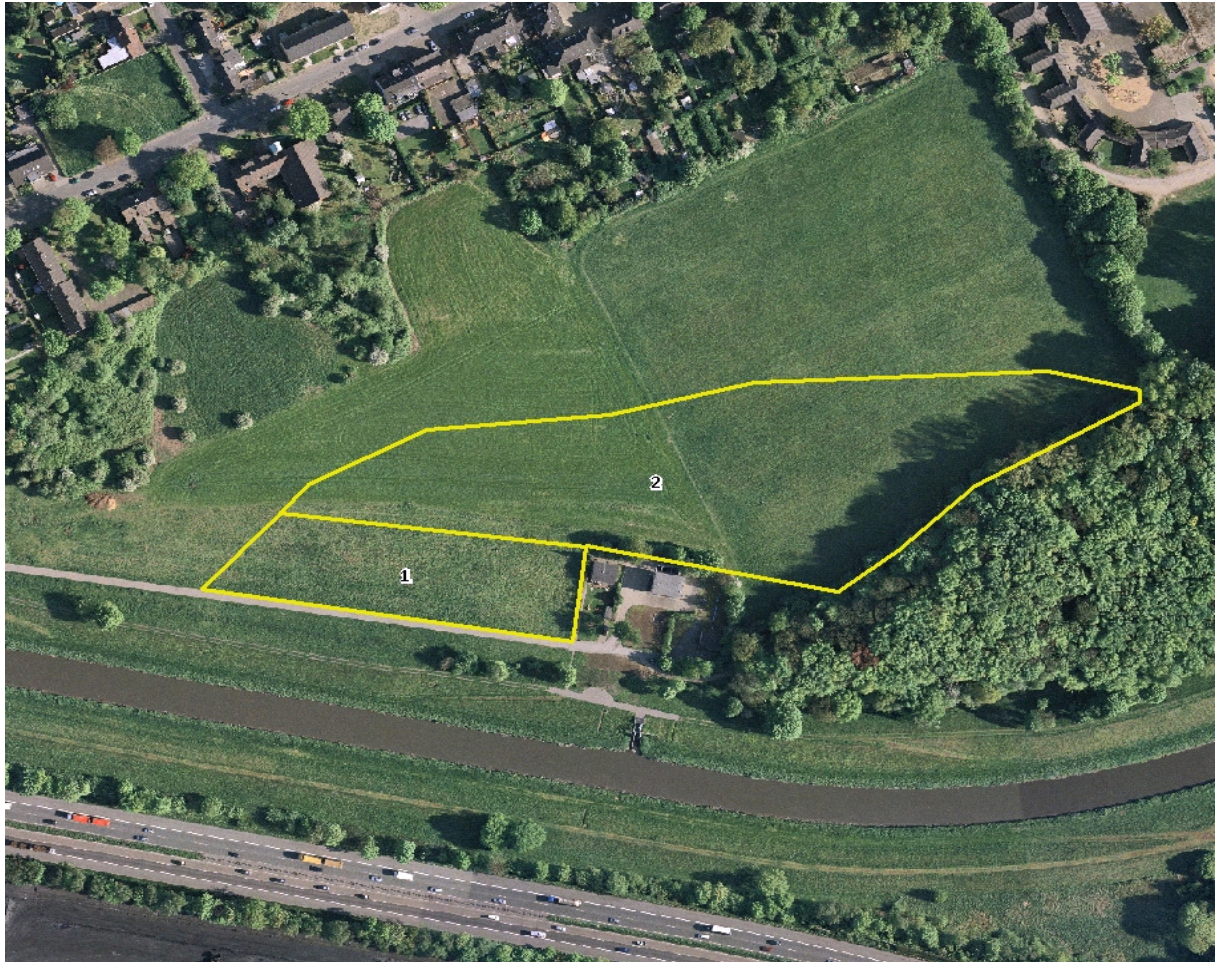


Abb. 6.7: Einteilung der Teilflächen für den Ist-Zustand, Welheimer Mark (Luftbild 2008 Stadt Bottrop)

TF	We_{eff} [cm]	nFKWe [mm]	kA
1	90	188	-
2	100	166	-

Tab. 6.7: Bodenspezifische Eigenschaften der Teilflächen, Durchwurzelungstiefe We_{eff} , nutzbare Feldkapazität und kapillarer Aufstieg kA



Verdunstung



Abb. 6.8: Jährliche Verdunstungsrate des Ist-Zustands, Welheimer Mark (Luftbild 2008, Stadt Bottrop)

Nr.	Landnutzung	Mittlere jährliche Verdunstung	Ist-Zustand		B-Plan	
			Fläche [m ²]	Verdunstung [m ³ /a]	Fläche [m ²]	Verdunstung [m ³ /a]
Ackerfläche						
1	Maisfeld	604	5639	34056	1649	996
Grünflächen						
2	Intensivwiese	587	19090	11206	3297	1935
Versiegelte Fläche						
	Versiegelt	145	0	0	19783	2869
Summe			24729	14612	24729	5800
ETa/ m ² x a [m ³]			0,6		0,24	
% Ist-Zustand			100		39	
% ET _r			106		42	
Ökosystemleistung der Kühlfunktion						
€ pro Gesamtfläche / a			2.029.444		805.555	
€ pro m ² /a			82		33	
Verlust			1.223.889			

Tab. 6.8: Jährliche Verdunstungsleistung Vergleich von Ist-Zustand und B-Plan, Welheimer Mark

Die Auswirkung der Landnutzungsänderung durch die Bebauung der landwirtschaftlich genutzten Flächen ist besonders groß. Neben der sichtbaren Veränderung des Landschaftsbildes ergibt sich auch hier eine unsichtbare, aber große Auswirkung auf den Wasser- und Energiehaushalt der 24.729 m² großen Fläche, da Flächen mit hoher Verdunstungsleistung durch Versiegelung vernichtet werden. Im Bezug auf die Verdunstungsleistung sind die Veränderungen in Tabelle 6.8 dargestellt. Der Vergleich des Ist-Zustand mit dem B-Plan zeigt eine Reduzierung der Verdunstungsmenge von 8.812 m³/a, was 39 % der Ausgangssituation entspricht. Statt 106 % der ET_r, bedingt durch gute Bodenverhältnisse vor der Bebauung, verdunsteten nach der Bebauung nur 42 %. Nach Kapitel 3 entzieht

die Verdunstung der Umgebung pro Millimeter verdunstetem Wasser eine Energiemenge von 2.500 kJ. Für das Untersuchungsgebiet ergibt sich durch die Nutzungsänderung eine Menge von 22.030 GJ an Energie, die nicht mehr über die Verdunstung in latente Wärme umgewandelt wird, sondern nun als fühlbare Wärme die Umgebung erwärmt und eine Minderung der Kühlleistung von umgerechnet 1.223.889 Euro verursacht. Sie korrespondiert weiterhin mit einem Stromverbrauch von ca. 22.000 Kühlschränken, mit der Kühlung von 48.500 m² Bürofläche oder 601.420 m³ Erdgas. Dies entspricht dem durchschnittlichen Jahresenergieverbrauch für Heizung und Warmwasseraufbereitung von 241 Haushalten.

7 Optimierung der Bodenkühlleistung

Es werden Optimierungsmöglichkeiten vorgestellt, die dazu dienen sollen, die negativen Einflüsse der Nutzungsänderungen zu kompensieren oder aber eine weitere Erhöhung der Verdunstung über die Verdunstungsrate der Gras-Referenzverdunstung (ET_r) zu erzielen, um somit eine hohe Kühlung zu erzeugen. Dazu werden zuerst Optimierungsmöglichkeiten allgemein betrachtet, um dann mögliche Vorgehensweisen/Möglichkeiten für die drei Untersuchungsgebiete zu erarbeiten.

Auch wenn die Berechnungen der tatsächlichen Verdunstung zeigen, dass die meisten Teilflächen übers Jahr gesehen nur gering von der ET_r abweichen (vgl. Tab 7.1), also eine gute Verdunstungsleistung haben, zeigt eine Betrachtung der Sommermonate in Trockenjahren, um die es bei einer Optimierung der Verdunstung zur Kühlung der Städte ankommt, noch ein großes Potenzial zur Verbesserung der Verdunstungsleistung. Die Ursache hierfür liegt in der einfachen Bilanzierung über ein ganzes Jahr, wie sie zur Berechnung der Gebietsverdunstung in Kapitel 3 durchgeführt worden sind. Sie vernachlässigt den Bodenwasserspeicher, der bei höherer zeitlicher Auflösung, hier Monate, erhebliche Wassermengen vorübergehend festlegen bzw. freisetzen kann (BLUME 2004). Von den 16 berechneten Profile zeigen 12, dass auch eine höhere jährliche Verdunstung als ET_r möglich ist. Dazu führen guter Boden, ein Grundwasseranschluss und Bewuchs mit höherer Verdunstungsleistung, als die in der Referenzgleichung angenommenen Standardbedingungen. Dies macht deutlich, dass die Gras-Referenzverdunstung keine maximale Verdunstung darstellt. Das mögliche Maximum der Verdunstung hängt nicht nur von atmosphärischen, sondern auch von den jeweiligen Standortfaktoren (Boden und Vegetation) ab (DVWK M504 2002). Das sind die Faktoren, die z.B. bei Umbau- oder Ausgleichsmaßnahmen in Städten optimiert werden können.

Profil	W-Mark		Ehrenpark					
	Urb12	Urb41	Urb10	Urb11	RK15	RK16	RK16	RK6
Differenz	+28	+12	-91	+32	+49	-97	+74	-79
Profil	Jörgensmannwiese							
	Urb5	Urb5	RKS2	Urb14	Urb13	RKS12	Urb4	Urb40
Differenz	+80	+56	+74	+74	+74	+36	+27	-3

Tab. 7.1: Differenz [mm] der tatsächlichen Verdunstung ET_a zur Gras-Referenzverdunstung ET_r im Jahresmittel 1961-1990

7.1 Optimierungsmöglichkeiten

In Städten sind Energie- und Sättigungsdefizit ausreichend vorhanden und höher als auf natürlichen Flächen (Kap. 2.1.1). Entscheidend für hohe Verdunstungsraten ist die Wasserverfügbarkeit, die in Städten durch Versiegelung, Grundwasserabsenkungen und urbane Böden deutlich reduziert ist. Der wirksamste Ansatz zur Optimierung der Verdunstungsleistung liegt in der Bereitstellung und Zwischenspeicherung von Wasser. Tabelle 7.2 zeigt und bewertet Maßnahmen zur Verbesserung der

Verdunstung. Höchste Priorität wird auf die Entsiegelung von bebauten Flächen gelegt, was die große Bedeutung des Bodens als Wasserspeicher verdeutlicht. Eine Optimierung dieses bedeutenden Speichers selber und dessen Nutzung, worauf in dieser Arbeit besonders eingegangen wird, ist nicht dargestellt.

Priorität	Bewertung	Maßnahme
1	+++	Flächenentsiegelung (Parks, Gärten, Hofbegrünung), Straßenbäume
2	++	Gebäudebegrünung (Fassadenbegrünung, Dachbegrünung)
3	++	Künstliche urbane Gewässer, offene Wasserflächen
4	+	Regenwassernutzung zur Bewässerung
5	+	Muldenversickerung
6		Teildurchlässige Oberflächenbefestigung

Tab. 7.2: Priorisierung und Bewertung von Optimierungsmöglichkeiten (Schmidt 2010)

Optimierung des Bodenspeichers

Mit der Optimierung des Bodenspeichers ist nicht die Entsiegelung, sondern die Verbesserung der Bodeneigenschaften gemeint, die zu einer höheren Speicherfähigkeit und damit einer besseren Verdunstungsleistung über die Sommermonate führt. Eine Optimierung im Hinblick auf Bodenart oder Trockenraumdichte bedeuten jedoch Eingriffe in den Bodenhaushalt, weshalb diese Option nicht auf natürlichen und geschützten Böden, sondern auf urban gestörten und überprägten Böden ausgeführt werden sollte. Auf naturnahen Böden sollte eine Optimierung lediglich mittels Humuseintrag, Bewässerung oder Bepflanzung stattfinden. Im folgenden Beispiel wird der Boden mit den schlechtesten Bodeneigenschaften in den Untersuchungsgebieten (RK16, Ehrenpark) unter Einbeziehung der Anforderungen des Bodenschutzes realistisch optimiert, um die Auswirkungen der einzelnen Eigenschaften darzustellen (vgl. Tab.7.3). Das Ergebnis zeigt eine Erhöhung der nFKWe auf 201 %, woraus eine geringe Sickerwasserrate und damit verbunden eine höhere tatsächliche Verdunstung resultieren. Des Weiteren wird durch das höhere Speichervolumen die Menge des zur Bewässerung benötigten Wassers in einem Trockenjahr reduziert (vgl. Abb.7.1).

Maßnahme	Bodenart	Humus	TRD	Nutzung	nFKWe	SWRj	Eta
IST-Zustand RK16 EP	-	-	-	-	70	291	513
1: Su2 → LS2 (100 cm)	+	-	-	-	110	247	557
2: pt5 → pt3 (UB)	+	+	-	-	140	187	617
3: h3→h4 OB h2→h1 UB	+	+	+	-	141	187	617
4: We 100 cm → We 110 cm (Bäume)	+	+	+	+	154	155	649

Tab. 7.3: Optimierung der Bodeneigenschaften und resultierende Auswirkungen auf nFKWe, SWRj, ETa;
OB= Oberboden, UB= Unterboden

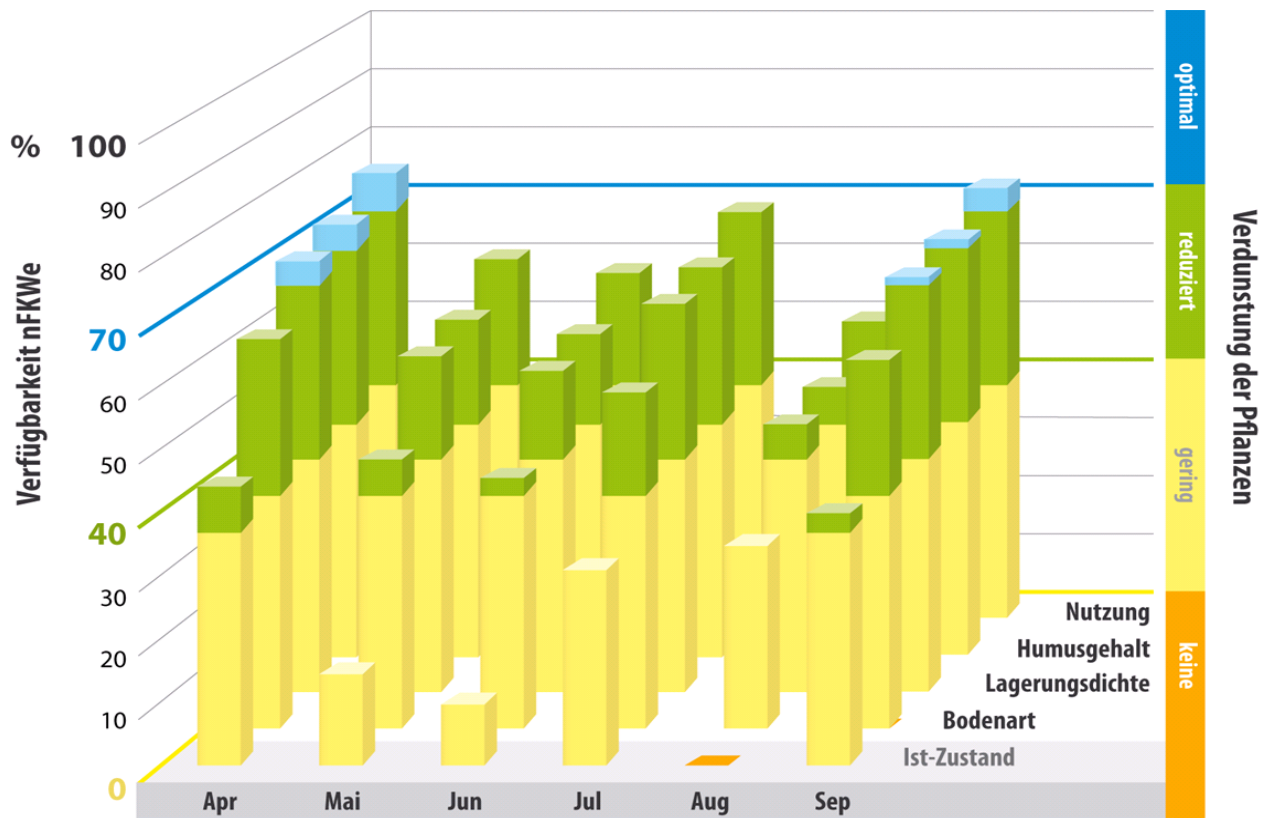


Abb. 7.1: Auswirkung der Optimierung von Bodeneigenschaften auf den Bodenspeicherfüllstand, 30 % Quantil 1974

Maßnahmen, um die Optimierungsmöglichkeiten der Bodeneigenschaften durchzuführen, sind vielfältig und auf die entsprechenden Untersuchungsgebiete abzustimmen. Es können sowohl natürliche Maßnahmen, wie z.B. Nutzung des Laubs zur Humusakkumulation, tiefer wurzelnde Bepflanzung für lockeren Boden oder hohe Bioaktivität im Boden, als auch technische Maßnahmen, wie z.B. Tiefenlockerungen durch Grubber, Bodenauftrag und Humuseintrag angewandt werden. Neben den positiven Wirkungen auf die Größe des Speichervolumens wirken sich sowohl natürliche als auch technische Maßnahmen positiv auf den Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre, den O_2 -Gehalt im Boden, die Erwärmung des Bodens, eine hohe Bodenlebewesenaktivität und ein gutes Wurzelwachstum aus (BLE 2006). Dies begünstigt das Pflanzenwachstum und führt zusätzlich zu einer besseren Verdunstungsleistung.

Optimierung durch Bewässerung

Liegt kein Grundwasseranschluss vor, kann durch eine Bewässerung der Böden bei negativer klimatischer Wasserbilanz in den Sommermonaten der Bodenwasserspeicher zusätzlich gefüllt werden. Diese Maßnahme würde eine ständige Versorgung der Pflanzen mit Wasser zur Verdunstung sicherstellen und vermeiden, dass die Pflanzen aufgrund von Wassermangel ihre Verdunstungsleistung zurückfahren. Als Grenzwerte werden in dieser Arbeit 70 % der nFKWe als einsetzender Wasserstress (DVWK M238 1996) und eine nFKWe geringer als 40 % als Einsatz für die Bewässerung angenommen (RENGER & STREBEL 1982).

Ist vor der Optimierung der Bewässerung auch eine Optimierung des Bodens durchgeführt worden, verringert sich sowohl der Zeitraum als auch die Menge der Bewässerung. Um Kosten für die Bewässerung zu sparen wäre eine Regenwasserbewirtschaftung sinnvoll. Weiter sollte über eine Unterflurbewässerung nachgedacht werden, da das Wasser so direkt im Boden gespeichert werden kann und nicht vor der Infiltration in den Boden verdunstet. Zusätzlich würde die Nutzung der Fläche, z.B. als Liegewiese in einem Park, nicht durch die Bewässerung eingeschränkt werden. Eine Bewässerung in

der Stadt sollte überwacht und kontrolliert werden, um Probleme wie Versalzung oder unerwünschte Sickerwasserbildung zu vermeiden. Außerdem ist dadurch ein nachhaltiger und ökologischer Einsatz des Regenwassers zur Bewässerung möglich. Realisiert werden könnte dies durch Bodenfeuchtemessungen, die mit Berücksichtigung der Wettervorhersage eine Bewässerung automatisch bei Unterschreitung der nFKWe von 40 % einsetzen, aber auch bei Erreichen einer Bodenfeuchte von > 70 % nFKWe wieder einstellen.

Optimierung durch Bepflanzung

Eine optimierte Bepflanzung macht vor allem dann Sinn, 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 sinnvolle Bepflanzung die Verdunstung deutlich über die Gras-Referenzverdunstung gesteigert werden. Die erfolgt zum einen durch Pflanzen die tiefere Wurzeln ausbilden und damit einen großen Bodenwasserspeicher zur Verfügung haben und zum anderen durch Pflanzen die große Blattflächen entwickeln und damit einen großen Interzeptionsspeicher sowie eine hohe Anzahl an Stomata zur Verdunstung bieten. Bei der Bepflanzung muss beachtet werden, dass der Abtransport der mit Wasserdampf gesättigten Luft durch Windbewegungen nicht durch Baumkronen verhindert wird. Daher wird z.B. eine Savannenbepflanzung empfohlen, um einen guten Luftaustausch zu ermöglichen. Eine sehr hohe Verdunstungsleistung bieten Wasserpflanzen die in Feuchtgebieten gepflanzt sind. Eine Einordnung verschiedener Pflanzen und ihrer Verdunstungsleistung zeigt Tabelle 7.4 aus Harlaß (2008).

Pflanzenart	mittlere Evaporationsleistung [mm/a]
Schwimmpflanzen	1000-1500
Hochstauden in Flussaue	800-1500
Sumpfpflanzen	ca. 1100
Nadelwälder	500-700
Laubwälder	500-600
Grasflächen	400-500
Ackerflächen	300-400
Heideflächen	ca. 200

Tab. 7.4: Mittlere Evaporationsleistungen verschiedener Pflanzen
(Harlaß 2008; aus Wohlrab et al. 1992, Larcher 2001, DWA 2002)

Umgekehrt macht schlechte Vegetation auf gutem Boden genauso wenig Sinn!

Optimierung durch Gestaltung

Neben den drei natürlichen Faktoren Boden, Wasser und Pflanzen auf den Flächen selber, kann auch durch gestalterische Maßnahmen eine Optimierung erzielt werden. Hierzu zählen angelegte Wasserflächen wie Versickerungsmulden, Teiche und Feuchtgebiete sowie Gründächer, Fassadenbegrünung oder Oberflächenvergrößerungen. Sie bieten zusätzlichen Speicherraum und z.T. auch Rückhaltemöglichkeiten für Starkniederschläge. Dies ist im Bezug auf den durch das IPCC prognostizierten Klimawandel mit erhöhten Starkregenereignissen von großer Bedeutung. Versickerungsmulden, Regenrückhaltebecken oder unterirdische Zisternen bieten einen großen Speicherraum. So können die Niederschläge aus Starkregenereignissen z.T. gespeichert werden und verzögert zur Bewässerung und damit Verdunstung dienen. Außerdem wirken sie abflussmindernd und verringern Abflussspitzen; eine Synergie zum Hochwasserschutz. Gerade in urbanen Gebieten, wo durch hohe Versiegelung ein großer oberirdischer Abfluss entsteht, sollte eine Regenwasserbewirtschaftung das benötigte Wasser für die Verdunstungsoptimierung zur Verfügung stellen. Bei der Anlage dieser Maßnahmen

müssen einige planerische Aspekte beachtet werden, z.B. welche Pflanzen zur Fassaden- oder Dachbegrünung geeignet sind, wie das Regenwasser in mögliche Speicher geleitet werden kann und in welchem Maße es vor der Einleitung in den Boden gereinigt werden muss u.v.m. Hierzu soll auf das DVWK Merkblatt Regenwasserbewirtschaftung (2007) und den Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung von Gebäudebegrünung und Gebäudekühlung der Stadt Berlin (2010) verwiesen sein.

7.2 Optimierung der Untersuchungsgebiete

Bei der Optimierung der Untersuchungsgebiete liegt besonders der Bodenspeicher im Fokus, danach wird auf Bewässerung und Bepflanzung zurückgegriffen. Mögliche Konflikte mit Bodenschutz und Nutzung werden berücksichtigt.

7.2.1 Jörgensmannwiese

Die Berechnungen aus Kapitel 6 zeigen, dass durch die Bebauung der Brachfläche eine hohe Kühlleistung von 1.278.611 € oder 23.015 GJ verloren geht. Zusätzlich erwärmt sich die Lufttemperatur, da die 23.015 GJ nach der Bebauung nicht mehr als latenter, sondern als fühlbarer Wärmestrom zurück in die Atmosphäre gehen. Ein weiterer überwärmter Bereich würde entstehen, der in diesem Fall als Lückenschluss vieler überwärmter Bereiche fungieren würde. Dies wird besonders in der Klimatope-Karte im Anhang 2.1.2 deutlich. Die vorhandenen Böden haben aufgrund des Grundwasseranschlusses die höchsten Verdunstungsleistungen der drei Untersuchungsgebiete (vgl. Abb. 6.3). Da das Untersuchungsgebiet mit Gleyen und Plaggeneschen sowohl natürliche als auch schützenswürdige Böden aufweist (STADT BOTTROP 2010), sollte eine Optimierung im Sinne des Bundesbodenschutzgesetzes nicht an den Bodeneigenschaften, sondern wenn nötig, an Bewässerung und Bepflanzung stattfinden. Die klimatische Wasserbilanz der Profile über die Sommermonate zeigt, dass die Böden nur in besonders heißen Sommern, nicht aber in durchschnittlichen Sommern bewässert werden müssten, was für eine sehr gute Verdunstungsleistung der Flächen spricht. Dies verdeutlicht auch der hohe Ökosystemertrag von durchschnittlich 83 €/m² pro Jahr, auf den Flächen mit Grundwasseranschluss sogar 90 €/m² pro Jahr. Daher wird neben der Optimierung des Bebauungsplans, als zweite Möglichkeit, eine Änderung des Bebauungsplans betrachtet.

Optimierung 1

Im Falle einer Bebauung nach aktuellem Vorentwurf sollte, um die Grundwasserabsenkung und Aufschüttung zu minimieren, auf Kellerbauten verzichtet werden. Grundsätzlich erzielt eine Verringerung der Versiegelung die größte Wirkung. Daher wird eine Änderung der GRZ von 0,8 auf 0,5 angesetzt. Durch Erhaltung des Grundwasseranschlusses und Verringerung der Versiegelungen auf den Grundstücken können verdunstungsstarke Gärten geschaffen werden. Weiter wird angenommen, dass alle neuen Bauten mit Gründächern und Fassadenbegrünung bepflanzt werden.

Optimierung 2

Für die Optimierung wird eine Änderung des Bebauungsplans zu Gunsten der verdunstungsstarken und schützenswürdigen Gleyplaggenesch-Flächen (vgl. Abb. 6.3) vorgenommen. Hierzu muss ein Teil der geplanten Wohneinheiten mit Gärten (5322 m²) von den Flächen mit Grundwasseranschluss auf die öffentliche Grünfläche im nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets verlegt werden. Dort liegen aber ebenfalls schützenswürdige Plaggenesche vor. Weiter wird wie in Optimierung 1 eine Änderung der GRZ von 0,8 auf 0,5 angesetzt und die Bepflanzung von Gründächern und Fassaden angenommen.

Die Ergebnisse der Optimierungsmöglichkeiten sind in Tabelle 7.5 dargestellt und zeigen, dass eine komplette Kompensierung der Versiegelung durch Bebauung nicht zu leisten ist. Jedoch ist nach den Berechnungen eine Optimierung um 15 % möglich.

	Ist-Zustand	B-Plan	Optimierung 1	Optimierung 2
$ETa \text{ m}^3/\text{m}^2 \times a \text{ [mm]}$	0,6	0,30	0,38	0,42
% ET_r	104	53	67	76
% Ausgang	100	51	66	75
€ pro Gesamtfläche/a	2.603.055	1.324.444	1.678.472	1.831.666
€ pro m^2/a	83	42	53	58

Tab. 7.5: Verdunstungswerte und Kühlleistung, Jörgensmannwiese; €-Beträge errechnet aus Energieäquivalent

7.2.2 Ehrenpark

In Kapitel 6 wurde erarbeitet, dass der aufgeschüttete Boden im Ehrenpark keine gute Speicherleistung aufweist. Da es sich um überprägten Boden handelt, kann in diesem Untersuchungsgebiet über eine Optimierung des Bodens nachgedacht werden. Aufgrund der hohen Anteile an Grobboden, die auch nach einer Optimierung der Trockenraumdichte und des Humusgehalts noch hohe reduzierende Wirkung auf den Bodenspeicher haben, wird vorgeschlagen, den vorhandenen Boden mit ca. 1 m natürlichem Boden zu überkippen. Als Aufschüttungsmaterial bietet sich der Boden aus der Welheimer Mark mit guten Speicherleistungen an, der im Falle einer Bebauung als Überschuss anfällt. Eine Finanzierung der Maßnahme könnte z.B. über eine Verknüpfung beider Vorhaben realisiert werden. So könnte die Verbesserung der Kühlfunktion des Ehrenparks als Ausgleichsmaßnahme zur Reduzierung der Kühlfunktion in der Welheimer Mark dienen. Um die mögliche Optimierung darzustellen, wird das Leitprofil urb010 beispielhaft im Sinne des Bodenschutzes (kein C_{org} im Unterboden etc.) durch Aufkippen natürlichen Bodens aus der Welheimer Mark (urb041) und zusätzlicher Lockerung sowie angemessenem Humuseintrag optimiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.6 und Abbildung 7.2 dargestellt. Da ein großer Teil der Parkfläche mit Rasen (sehr geringe We_{eff} von 20 cm) bewachsen ist, ist in diesem Fall neben der Bodenoptimierung eine verbesserte Bepflanzung zur Verdunstungsoptimierung nahezu unumgänglich. Würde nach der Optimierung des Bodens wieder Rasen angelegt, wirkt sich die gesamte Optimierung im Zugewinn von 6 mm nFKWe aus. Angesetzt wird eine Minimierung der Rasenfläche und eine gleichzeitige Erhöhung von Wiesen und Staudenbepflanzung, die eine tiefere We aufweisen und somit den nach der Optimierung des Bodens sehr guten Wasserspeicher effizienter nutzen können (nFKWe-Gewinn von 52 mm). Weiter könnten durch Bewässerung in den Monaten, wo der Bodenspeicher trotz gutem Boden unter 40 % nFKWe geleert ist, die Verdunstungsleistungen über die Sommermonate konstant hoch gehalten werden. Abbildung 7.2 zeigt aber, dass eine Bewässerung nach der Optimierung des Bodens lediglich in sehr trockenen Sommern notwendig wäre. In Kauf genommen werden muss, dass durch die Aufschüttung kein Grundwasseranschluss erreicht werden kann, weshalb zusätzliche Wasserzufuhr nur durch eine Bewässerung möglich ist. Um die gute Verdunstungsleistung nach der Optimierung aufrechtzuerhalten, kann eine angepasste Pflege des Parks dienen. Der Laubfall sollte auf den Beeten und unter den Bäumen bleiben und zur neuen Humusakkumulation dienen. Dazu können unter den Bäumen Mulden angelegt werden, die zusätzlich auch Niederschlags- oder Bewässerungswasser speichern können (HÖKE 2011). Eine weiterhin lockere Lagerung kann durch gute Durchwurzelung und hohe Bioaktivität im Boden sicher gestellt werden. Bei den Berechnungen einer Optimierung wird von gutem Boden und zusätzlicher Bewässerung ausgegangen, sodass die Pflanzen in ihrer Verdunstung nicht eingeschränkt sind. Zusätzlich wird der hohe Anteil an Rasen deutlich reduziert (4.388 m^2) und die Flächen mit Wiese und Staudengewächsen bepflanzt (3.388 m^2) sowie eine Gestaltung von Wasserflächen mit Hochstauden und Wasserpflanzen angenommen (1000 m^2). Dies sorgt für eine weitere Verbesserung der Verdunstungsleistung.

	nFKWe [mm]	SWRj [mm]	ETa [mm]
IST-Zustand urb10 We 20 cm (Rasen)	36	320	485
IST-Zustand urb10 We 60 cm (Stauden, Wiese)	82	281	524
Optimierung urb10 We 20 cm (Rasen)	42	315	490
Optimierung urb 10 We 90 cm (Stauden, Wiese)	149	229	576

Tab. 7.6: Auswirkungen der Optimierung auf nFKWe, SWRj, Eta im Vergleich zum Ist-Zustand am Regosol urb10

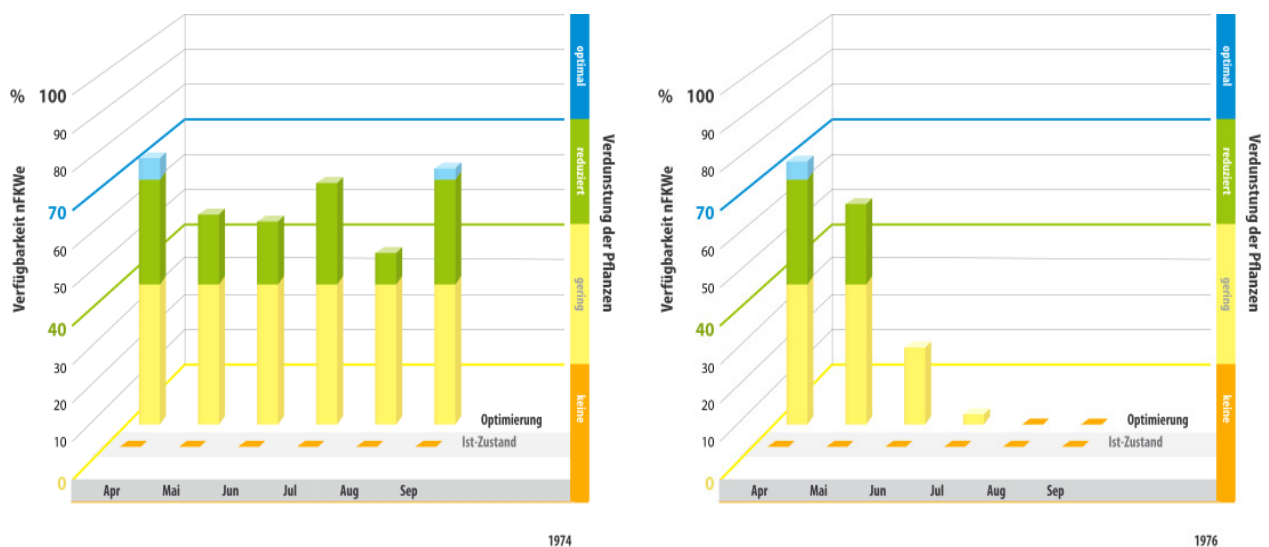


Abb. 7.2: Änderung der Speicherfüllstände und der damit verbundenen Bewässerungsmengen durch Bodenverbesserung am Regosol urb010, Trockenjahre 1974 und 1976

Die Ergebnisse der Optimierungsmöglichkeiten sind in Tabelle 7.7 dargestellt und zeigen, dass eine Optimierung der Parkanlage möglich ist.

	Ist-Zustand	B-Plan	Optimierung
Eta m ³ /m ² x a [mm]	0,42	0,43	0,49
% ET _r	73	74	85
% Ausgang	100	102	116
€ pro Gesamtfläche / a	954.028	968.472	1.112.919
€ pro m ² /a	58	59	68

Tab. 7.7: Verdunstungswerte und Kühlleistung, Ehrenpark; €-Beträge errechnet aus Energieäquivalent

7.2.3 Welheimer Mark

Der Auenboden der Welheimer Mark hat gute Eigenschaften. Es lässt sich lediglich die Verdichtung durch den landwirtschaftlichen Gebrauch verringern. Eine weitere Optimierung könnte über Bewässerung und Bepflanzung erfolgen. Die Bewässerung kann in sehr trockenen Sommern einen hohen Wirkungsgrad erzielen, da die Flächen keinen kapillaren Anschluss bieten und so neben den Niederschlägen kein zusätzliches Wasser zur Verdunstung und zur Auffüllung des großen Bodenspeichers in den Sommermonaten vorhanden ist. Auch eine Bepflanzung der bis jetzt landwirtschaftlich genutzten Fläche, z.B. mit Bäumen und anderen verdunstungsstarken Pflanzen, wird die jährliche Verdunstungsrate der Untersuchungsflächen weiter erhöhen. In Tabelle 7.8 ist aber für die Optimierung lediglich die Verringerung der GRZ von 0,8 auf 0,5 angesetzt.

	Ist-Zustand	B-Plan	Optimierung
$ETa \text{ m}^3/\text{m}^2 \times a \text{ [mm]}$	0,42	0,43	0,49
% ET_r	73	74	85
% Ausgang	100	102	116
€ pro Gesamtfläche / a	954.028	968.472	1.112.919
€ pro m^2/a	58	59	68

Tab. 7.8: Verdunstungswerte und Kühlleistung, Welheimer Mark; €-Beträge errechnet aus Energieäquivalent

8 Zusammenfassung und Ausblick

Städte haben, im Vergleich zu ihrem Umland, schon heute eine deutlich höhere mittlere Lufttemperatur. Das Problem der städtischen Überwärmung in den Sommermonaten wird sich voraussichtlich durch die Klimaänderungen weiter verstärken.

Um einen Lösungsbeitrag zu dieser Problematik zu leisten, war es Ziel der Arbeit das Bodenkühlungspotenzial von Untersuchungsgebieten im Ist- und Bebauungs-Zustand zu erfassen sowie mögliche Optimierungsmaßnahmen vorzustellen. Zur Entwicklung der Vorgehensweise wurden drei Untersuchungsgebiete, mit unterschiedlicher Nutzung (Wohngebiet, Parkanlage und Feld), in der Stadt Bottrop untersucht.

Die Vorgehensweise zur Erfassung des Bodenkühlungspotenzials soll möglichst einfach und praktikabel sein sowie auf der Grundlage vorhandener und einfach im Feld zu erfassender Daten durchgeführt werden können.

Während der Bearbeitung wurde deutlich, dass eine kleinflächige Erfassung sowie eine Einzelfallbetrachtung der Untersuchungsgebiete notwendig sind. Für die Anwendung in der Praxis ist daher eine quantitativ und qualitativ etwas hochwertigere Datendichte, als in dieser Arbeit verwendet, nötig. Dies betrifft z.B. Bohrdaten, die nicht aus Rammkernsondierungen und deren Ansprache nach DIN 4022, sondern besser aus Bodenuntersuchungen nach der BBodSchV und gegebenenfalls ergänzenden Laborergebnissen ermittelt werden sollten.

Die Arbeit zeigt anhand der drei Untersuchungsgebiete die großen Unterschiede in der Kühlleistung zwischen Ist-Zustand und einer möglichen Bebauung, trockenen Jahren zum Referenzzeitraum und

natürlichen Böden zu überprägten, anthropogenen Böden. Weiter lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Besonders in Trockenjahren ist die Größe des Bodenspeichers von Bedeutung. In feuchten oder normalen Jahren tritt nur in sandigen Böden wirklich ein Wasserdefizit auf.
- Natürliche Böden können in der Regel mehr Wasser speichern und zur Kühlung bereitstellen als anthropogen überprägten Böden.

Da die Anzahl der trockenen Sommer nach den Prognosen des IPCC zunehmen sollen, gewinnt die Größe und Leistung des Bodenspeichers zunehmend an Bedeutung.

Die entwickelte Methode ist auch geeignet, um das Potenzial möglicher Optimierungen abzuschätzen. Nachhaltige Optimierungsmöglichkeiten bieten Böden und Pflanzen, die nach einer einmaligen Verbesserung/ Bepflanzung kaum einer weiteren Aufwendung/ Pflege bedürfen. Auch Bewässerung bietet sich in besonders von der Überhitzung betroffenen Gebieten in den Sommermonaten an. Bewässerung ist jedoch weniger nachhaltig als eine Optimierung der anthropogen überprägten Böden oder der Vegetation. Da die Optimierungsmaßnahmen Nutzungskonflikte auslösen können, sollten sie im Zuge von Umgestaltungen oder Umbauten frühzeitig mitberücksichtigt werden. Eine Finanzierung könnte zum Beispiel durch eine Berücksichtigung der Optimierung von Bodenkühlleistungen in den Ersatz- oder Ausgleichsmaßnahmen für Bauvorhaben realisiert werden. Die Berechnungen zeigen, dass eine Optimierung der Untersuchungsflächen den Kühlungsverlust durch Bebauung zwar mindert, jedoch nicht ausgleichen kann. Dies sollte in der Stadtplanung zunehmend berücksichtigt werden, indem die Bebauung verdunstungsstarker Flächen in Zukunft unterbleibt. Nur so können diese optimiert und vermehrt zu „Klimaanlagen“ der Stadt werden.

Der nächste Schritt in diese Richtung könnten Erprobungen von konkreten Optimierungen und deren Monitoring in Pilotprojekten darstellen.

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN: Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5), 5. Verbesserte und erweiterte Auflage, Hannover, 2005.
- ATV-DVWK: Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden, Merkblatt 504, 2002.
- BAUMGARTEN, A.; LIEBSCHER, H.-J.: Lehrbuch der Hydrologie, Berlin, Gebrüder Borntraeger, 1996.
- BLE: Grundsätze der Bodenpflege, D2 Bodenmanagement. Online verfügbar unter: http://www.oekolandbau.de/fileadmin/redaktion/oeko_lehrmittel/Fachsschulen_Agrar/Weinbau/fwb_modul_d/fwb_d_02/fwbmd02_15neu.pdf (abgerufen am 04.07.2011), 2006.
- BLUME, H-P.: Handbuch des Bodenschutzes, 3. Auflage, Landsberg am Lech, 2004.
- BBODSCHG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten vom 17. März 1998. In: UmwR 2009.
- DIN: DIN 4049-3; Hydrologie-Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994.
- DIN: DIN 4022-1; Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels, Schichtenverzeichnis von Bohrungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1997.
- DISSE, M.: Modellierung der Verdunstung und der Grundwasserneubildung in ebenen Einzugsgebieten – IHW Heft 53, Karlsruhe, Universität Karlsruhe, 1995.
- DVWK: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen, Merkblatt 238, 1996.
- DWA: Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser, Merkblatt 153, 2007.
- DWD – Deutscher Wetterdienst: Klimadaten (Sonnenscheindauer/d) der Station Bochum, Zeitraum 1961-1990, Offenbach. Online verfügbar unter: http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_menu2_leistungen_az_freiemetinfos&T115202758871200642573928gsbDocumentPath=Navigati on%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimadatenzentren%2FNKDZ%2Fkldaten__akt%2Fausgabe__mittelwerte__node.html%3F__nnn%3Dtrue (abgerufen am 08.05.2011), 2011.
- DYCK, S.; PESCHKE, G.: Grundlagen der Hydrologie, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1995.
- dynaklim*: Homepage: <http://www.dynaklim.de/dynaklim/index.html>, 2011.
- EG: Emschergenossenschaft, Grundwasserflurabstands- und Gewässerkarte, 2011.
- GEODZ: Das Lexikon der Erde, Landschaftswasserhaushalt. Online verfügbar unter: <http://www.geodz.com/deu/d/Landschaftswasserhaushalt> (abgerufen am 28.05.2011), 2011.
- HARLAß, R.: Verdunstung in bebauten Gebieten, Dissertation TU Dresden, 2008.
- KOHUTJAR, J.: Soil Sealing- a prospect of starvation (for soil bugs) and flooding (for us), people and water Slovakia, GreenWeek Brussel, 2008.
- HÖKE, S.: Bodenkühlungspotenziale. Aachen. Gespräche mit E. Damm, 2011.
- HÖKE, S.; LAZAR, S.; KAUFMANN-BOLL, C.; WOLFF, G.; BLÜMLEIN, P.: WP 6: Umweltauswirkungen der urbanen Bodeninanspruchnahme. Entwicklung neuer Bodenmanagement-Strategien Teil 1. EU-Projekt URBAN SMS, (Projekt-Nr. 6.56), 2010.
- HÖKE, S.: Fachliche Grundlage – Stand des Wissens zur urbanen Bodenfunktionsbewertung. In: Rück, F.; Dressler von, H.; Rolf, M.; Höke, S.; David, S. (2009): Stadtboden, Funktionsbewertung urbaner Böden und planerische Umsetzung im Rahmen kommunaler Flächenschutzkonzeptionen. Endbericht. BMBF REFINA- Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen 0330728, 2009.

HÖKE, S.; DAVID, S.; SCHNEIDER, J.: Weiterentwicklung und Validierung der Funktionsbewertung für urbane Böden. In: Rück, F.; Dressler von, H.; Rolf, M.; Höke, S.; David, S. (2009): Stadtboden, Funktionsbewertung urbaner Böden und planerische Umsetzung im Rahmen kommunaler Flächenschutzkonzeptionen. Endbericht. BMBF REFINA- Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen 0330728., 2009.

HÖLTING, B.; COLDEWEY, W.G.: Hydrogeologie Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 7. Auflage Springer, Heidelberg, 2009.

IPCC: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2007.

IPCC: Special Report. Emissions Scenarios. Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000.

KELLER, R.: Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland. Textband, Boldt, Boppard, 1979.

KRAVČÍK, M.; PORKORNÝ, J.; KOHUTÍAR, J.; KOVÁČ, M.; TÓTH, E.: Water for the Recovery of the Climate- A New Water Paradigm. Cooperation between People and Water NGO, ENKI, Foundation for the Support of Civic Activities and Association of Towns and Municipalities of Slovakia, 2007.

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.: „Klimawandel in Nordrhein-Westfalen-Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren“. Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimaforschung (PIK) für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV). Potsdam, 2009.

KUTTLER, W.: Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkung. Environmental Sciences Europe, a SpringerOpen Journal, 2011.

KUTTLER, W.; GOLDBACH, A.; PÜLLEN, H.; MÜLLER, N.; DÜTEMAYER, D.; BARLAG, A.-B.: Stadtklima am Beispiel Oberhausen-Strategien gegen Hitzestress im Klimawandel, Universität Duisburg-Essen, 2011.

NACKEN: Vorlesung Hydrologie 1, RWTH Aachen, 2011.

NGB: Bodenkunde (Teil 4), 2009. Online verfügbar unter:
http://www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Wald-Jagd/Bodenzustandserhebung/Handbuch/A-Boden-und-Humusuntersuchungen.pdf?__blob=publicationFile. (abgerufen am 14.05.2011).

NLFB: Arbeitshefte Boden, Auswertungsmethoden im Bodenschutz, Heft 2004/2.

POKORNÝ, J.: Direct role of plants, water, land in local climate. Towards sustainable use of ecosystems and agriculture, CSIRO-Canberra, 2010.

RENGER, M.; STREBEL, O.: Beregnungsbedürftigkeit der landwirtschaftlichen Nutzpflanzen in Niedersachsen. Geologisches Jahrbuch Reihe F 13, Bundesanstalt Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1982.

ROWELL, D.L.: Bodenkunde, Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen, Springer-Verlag, Berlin, 1997.

RVR: Regionalverband Ruhr, Klimatopekarte, 2011.

RWW: Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH. Allgemeine Tarife, Mengenpreis Trinkwasser, 2011. Online verfügbar unter: <http://www.rww.de/index.php?id=314> (abgerufen am 14.05.2011).

SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P.: Lehrbuch der Bodenkunde, 15. Auflage Heidelberg, 2002.

SCHMIDT, M.: Ökologisches Bauen im Kontext von Klimaänderungen: Paradigmenwechsel in der Klimapolitik, Technische Universität Berlin-Institut für Architektur, Arbeitsgruppe watery, 2010.

Schrödter, H.: Verdunstung; Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden, Springer-Verlag, Berlin, 1985.

STADT BOTTRUP: Telefonate mit Frau S. Volle und Gespräch mit Herrn T. Müller. Umweltamt, 2011.

STADT BOTTRUP: Bericht zur Orientierenden Gefährdungsabschätzung, Orientierenden Bewertung des Baugrunds, sowie der Prüfung einer Eignung des Untergrundes zur Niederschlagsversickerung im Bereich des B-Plans 5.11/9 „Jörgensmannwiese“ in Bottrop-Batenbrock, 2010.

STADT BOTTRUP: Verdachtsflächenuntersuchung, Skate-Anlage Ehrenpark durch AWG Rumel & Knüf-fermann GbR, 2010.

STADT BOTTRUP: Orientierende Altlastenuntersuchung, „Umgestaltung Ehrenpark“ durch Dipl.-Geol. R. Petersen jr., 2009.

STADT BOTTRUP: Flächennutzungsplan Bottrop, Erläuterungsbericht, 2004. Fassung vom 29.12.2004.

STADTVERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG BERLIN (Hrsg.): Konzepte der Regenwasserbewirt-schaftung, Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung, Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung. Berlin, 2010.

TIPLER, P.; MOSCA, G.: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 2. Deutsche Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2006.

UBA: Die Beeinträchtigung des Bodens-Flächenverbrauch, 2009. Online verfügbar unter:
<http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/boden/bilder/>

bodengefahren_flaechenverbrauch.pdf (abgerufen am 01.08.2011).

Anhang

- 1 Bodenansprache der Bohrpunkte
- 2 Karten und Fotos der Untersuchungsgebiete
- 3 Quellenangaben zu den verwendeten Geodaten

Tab.A1: Titeldaten: urb005 Jörgensmannwiese (Bodenkartierung *dynaklim*)

Profil-Nr.	Datum	RW	HW	Aufschlussart	Nutzungsart	Vegetation
005	09.05.2011	2565555	5711514	BR	Rasen	Rasen

Aufschlusssdaten

Bodenabtrag/ Bodenauftrag	Bodensystematische Einheit	Substratsystematische Ein	Wasserstand unter GOF
	GG-YE		-

Horizontbezogene Daten		Gelände						Abgeleitet	
NR	Unter-Obergrenze	Horizontsymbol	Humusgehalt	Bodenfeuchte	Lagerungsdichte	Feinboden	Grobboden	We	nFkwe
1	0-10	jAh	h4	tro	pt3	fS		80	170
2	10-70	bE	h2-3	tro	pt3	fS			
3	70-110	llrGolCv	h0	tro/sw feu	pt3	fS			
4	110-150	rGo1	h0	Tro	pt 3	fS			
5	150-180	rGo2	h0	Tro	pt3	fS			
6	180-200	rG(r)o	h0	sw feu	pt4	fS+ Su3			

Bemerkungen: Profil bis +/- 80cm durchwurzelt; Gley-Plaggenesch

Tab.A1: Titeldaten: RKS 2 Jörgensmannwiese (Bodenkartierung durch aguS im Auftrag der Stadt Bottrop)

Profil-Nr.	Datum	RW	HW	Aufschlussart	Nutzungsart	Vegetation
2	03.03.2010			RKS	Grünland	Wiese

Aufschlusssdaten

Bodenabtrag/ Bodenauftrag	Bodensystematische Einheit	Substratsystematische Ein	Wasserstand unter GOF
			40-50 cm unter GOK

Horizontbezogene Daten		Gelände						Abgeleitet	
NR	Unter-Obergrenze	Horizontsymbol	Humusgehalt	Bodenfeuchte	Lagerungsdichte	Feinboden	Grobboden	We	nFkwe
1	0-40	AhE	h5		pt2	Su2		60	129
2	40-80	AhE	h5		pt3	mS			
3	80-100	II Bhs	h0		pt3	mS			
4	100-120	II Gor	h0		pt2	fS			
5	120-140	II Gor	h0		pt3	Su3			
6	140-155	II Gr	h0		pt3	Us			
7	155-200	II Gr	h0		pt3	Su3			

Bemerkungen: stark durchnässt

Tab.A1: Titeldaten: urb014 Jörgensmannwiese (Bodenkartierung *dynaklim*)

Profil-Nr.	Datum	RW	HW	Aufschlussart	Nutzungsart	Vegetation
014	09.05.2011	2565668	5711437	BR	Brache	Ruderalfläche mit Gras- und Krautfläche

Aufschlussdaten

Bodenabtrag/ Bodenauftrag	Bodensystematische Einheit	Substratsystematische Ein	Wasserstand unter GOF
AY	GM		12 cm

Horizontbezogene Daten		Gelände						Abgeleitet	
NR	Unter-Obergrenze	Horizontsymbol	Humusgehalt	Bodenfeuchte	Lagerungsdichte	Feinboden	Grobboden	We	nFkwe
1	0-40	Aa	h6	st. Feu	pt3	Su2 + fS		70	126
2	40-120	Go	h0	st. feu-nass	pt3	Su2 + fS			
3	120-200	Gr	h0	st. Nass	pt3	Fs			

Bemerkungen: bis 120 cm Tiefe durchwurzelt, Anmoorgley; Ziegel und Glasstücke in 120 cm

Tab.A1: Titeldaten: urb013 Jörgensmannwiese (Bodenkartierung <i>dynaklim</i>)										
Profil-Nr.	Datum	RW	HW	Aufschlussart	Nutzungsart	Vegetation				
013	31.05.2011	2565642	5711400	Schurf	Hundewiese	Ruderalfläche mit Grasfläche und Brombeergebüsch				
Aufschlusssdaten										
Bodenabtrag/ Bodenauftrag		Bodensystematische Einheit		Substratsystematische Ein		Wasserstand unter GOF				
AY		anthropogener Auftrag		Üb. GM Anmoorgley		90 cm				
Horizontbezogene Daten		Gelände							Abgeleitet	
NR	Unter-Obergrenze	Horizontsymbol	Humusgehalt	Bodenfeuchte	Lagerungsdichte	Feinboden	Grobboden	We	nFkwe	
1	0-30	rAp	h5	tro	pt1	fS		85	169	
2	30-60	bE	h5	tro	pt1	fS				
3	60-90	IIGor	h2	feu	pt2	fS				
4	90-120	Gr	h1	nass*	pt3	fS				
Bemerkungen: *ab 100cm										

Tab.A1: Titeldaten: RKS12 Jörgensmannwiese (Bodenkartierung durch aguS im Auftrag der Stadt Bottrop)

Profil-Nr.	Datum	RW	HW	Aufschlussart	Nutzungsart	Vegetation
12	03.03.2010			RKS	Grünland	Beerengestrüpp

Aufschlusssdaten

Bodenabtrag/ Bodenauftrag	Bodensystematische Einheit	Substratsystematische Ein	Wasserstand unter GOF
			115 cm unter GOK (Lichtlotmessung)

Horizontbezogene Daten		Gelände						Abgeleitet	
NR	Unter-Obergrenze	Horizontsymbol	Humusgehalt	Bodenfeuchte	Lagerungsdichte	Feinboden	Grobboden	We	nFkwe
1	0-50	Ah	h4		pt2	Su2		90	200
2	50-80	Go-Bv	h0		pt2	Su2			
3	80-100	Go	h0		pt2	Su2			
4	100-140	Gor	h0		pt3	mS			
5	140-170	Gor	h0		pt2	mS			
6	170-200	Gor	h0		pt3	mS			

Bemerkungen:-

Tab.A1: Titeldaten: urb004 Jörgensmannwiese (Bodenkartierung *dynaklim*)

Profil-Nr.	Datum	RW	HW	Aufschlussart	Nutzungsart	Vegetation
004	19.05.2011	2565724	5711411	BR	Wohnfläche	Zierrasen

Aufschlusssdaten

Bodenabtrag/ Bodenauftrag	Bodensystematische Einheit	Substratsystematische Ein	Wasserstand unter GOF
AY	anthropogener Auftrag	Üb. GG	-

Horizontbezogene Daten		Gelände						Abgeleitet	
NR	Unter-Obergrenze	Horizontsymbol	Humusgehalt	Bodenfeuchte	Lagerungsdichte	Feinboden	Grobboden	We	nFkwe
1	0-50	jAh	h4	Tro	pt2	fS		60	149
2	50-85	jAh+lC	h2	sw feu	pt3	fS			
3	85-130	II Gro-lCv	(h2)*	sw feu	pt2	fS			
4	130-200	Gro	h0	nass ab 140	pt 2-3	fS + ffS			

Bemerkungen: * nur an Wurzelbahn; Durchwurzelt bis 150 cm Tiefe

Tab.A1: Titeldaten: urb040 Jörgensmannwiese (Bodenkartierung *dynaklim*)

Profil-Nr.	Datum	RW	HW	Aufschlussart	Nutzungsart	Vegetation
040	09.05.2011	2565805	5711504	BR		Brombeergebüsch

Aufschlussdaten

Bodenabtrag/ Bodenauftrag	Bodensystematische Einheit	Substratsystematische Ein	Wasserstand unter GOF
AY	anthropogener Auftrag		-

Horizontbezogene Daten		Gelände						Abgeleitet	
NR	Unter-Obergrenze	Horizontsymbol	Humusgehalt	Bodenfeuchte	Lagerungsdichte	Feinboden	Grobboden	We	nFkwe
1	0-50	jAh	h4	tro	pt3	fS	fGr+mGr2 (5%)	60	145
2	50-180	jAh+Bv	h5	sw feu	pt3	fS			
3	180-200	II rGro	h0	sw feu	pt3	fS			
4									

Bemerkungen: Durchwurzelbarkeit bis 180 cm, bis 180 cm Tiefe ehem. Plaggeneschmaterial (YE)

Tab.A1: Titeldaten: urb010 Ehrenpark (Bodenkartierung *dynaklim*)

Profil-Nr.	Datum	RW	HW	Aufschlussart	Nutzungsart	Vegetation
010	30.05.2011	2564569	5710004	Schurf	Parkanlage	Zierrasen

Aufschlussdaten

Bodenabtrag/ Bodenauftrag	Bodensystematische Einheit	Substratsystematische Ein	Wasserstand unter GOF
AY	anthropogener Auftrag		-

Horizontbezogene Daten		Gelände						Abgeleitet	
NR	Unter-Obergrenze	Horizontsymbol	Humusgehalt	Bodenfeuchte	Lagerungsdichte	Feinboden	Grobboden	We	nFkwe
1	0-15	jAh	h4	tro	pt2	fSu2	fGr (5%)	20	36
2	15-55	yC1	h4	tro	pt2	fSu2	fGr_Yb (47%)		
3	55-75	yC2	h1	tro	pt4	Sl3	fGr_Yb_Ys (29%)		
4	75-120	yC3	h6	tro	pt1	mSfs	fGr_Yak (70%)		

Bemerkungen:

Tab.A1: Titeldaten: urb011 Ehrenpark (Bodenkartierung *dynaklim*)

Profil-Nr.	Datum	RW	HW	Aufschlussart	Nutzungsart	Vegetation
011	19.05.2011	2566481	5707153	BR	Parkanlage-Pflanzbeet	Ziergehölz

Aufschlusssdaten

Bodenabtrag/ Bodenauftrag	Bodensystematische Einheit	Substratsystematische Ein	Wasserstand unter GOF
AY	anthropogener Auftrag		-

Horizontbezogene Daten		Gelände						Abgeleitet	
NR	Unter-Obergrenze	Horizontsymbol	Humusgehalt	Bodenfeuchte	Lagerungsdichte	Feinboden	Grobboden	We	nFkwe
1	0-10	jAh	h4	tro	pt2	fs	mGr2 (5%)	80	166
2	10-70	yjAh + IC	h3	tro	pt2	fs(u2)	mGr_Yb1, gG_nat, fGr_Ys (10%)		
3	70-200	yC	h2	sw feu	pt2	mSfs_Ys+Y b	fGr- mGr+X4_Yb +Ys (40%)		

Bemerkungen: bis unten durchwurzelbar, auch Bäume im Beet

Tab.A1: Titeldaten: RKS15 Ehrenpark (Bodenkartierung durch BG RheinRuhr im Auftrag der Stadt Bottrop)

Profil-Nr.	Datum	RW	HW	Aufschlussart	Nutzungsart	Vegetation
15	30.07.2009				Parkanlage-Pflanzbeet	Bäume, Sträucher

Aufschlusssdaten

Bodenabtrag/ Bodenauftrag	Bodensystematische Einheit	Substratsystematische Ein	Wasserstand unter GOF
			-

Horizontbezogene Daten		Gelände						Abgeleitet	
NR	Unter-Obergrenze	Horizontsymbol	Humusgehalt	Bodenfeuchte	Lagerungsdichte	Feinboden	Grobboden	We	nFkwe
1	0-30		h4	feu	pt3	Su4		60	131
2	30-60		h4	erdfeu	pt4	St2/ Su2	mGr_Yebb (3%)		
3	60-70		h2	erdfeu	pt4	Ss			
4	70-120		h2	erdfeu	pt4	Su4	mGr_Ys_Yb (8%)		
5	120-200		h2	erdfeu	pt5	Ss/St	mGr_Ys_Yb (53%)		

Bemerkungen:

Tab.A1: Titeldaten: RKS16 Ehrenpark (Bodenkartierung durch BG RheinRuhr im Auftrag der Stadt Bottrop)

Profil-Nr.	Datum	RW	HW	Aufschlussart	Nutzungsart	Vegetation
16	30.07.2009				Parkanlage	Zierrasen

Aufschlussdaten

Bodenabtrag/ Bodenauftrag	Bodensystematische Einheit	Substratsystematische Ein	Wasserstand unter GOF
			-

Horizontbezogene Daten

Gelände

Abgeleitet

NR	Unter-Obergrenze	Horizontsymbol	Humusgehalt	Bodenfeuchte	Lagerungsdichte	Feinboden	Grobboden	We	nFkwe
1	0-30		h3	feu	pt3	Ss	-	20	30
2	30-200		h2	feu	pt5	Su2/St2	mGr_Ys_Ya k_Yb (26%)		

Bemerkungen:

Tab.A1: Titeldaten: RKS6 Ehrenpark (Bodenkartierung durch BG RheinRuhr im Auftrag der Stadt Bottrop)

Profil-Nr.	Datum	RW	HW	Aufschlussart	Nutzungsart	Vegetation
6	29.07.2009			RK	Parkanlage	Zierrasen

Aufschlussdaten

Bodenabtrag/ Bodenauftrag	Bodensystematische Einheit	Substratsystematische Ein	Wasserstand unter GOF
			-

Horizontbezogene Daten								Gelände		Abgeleitet	
NR	Unter-Obergrenze	Horizontsymbol	Humusgehalt	Bodenfeuchte	Lagerungsdichte	Feinboden	Grobboden	We	nFkwe		
1	0-20		h5	erdfeu	pt2	Su2	mGr_Yb (3%)	20	50		
2	20-190		h3	erdfeu	pt3	Su2/St2	mGr_Yak_Y b_Yebb (29%)				

Bemerkungen:

Tab.A1: Titeldaten: urb12 Welheimer Mark (Bodenkartierung *dynaklim*)

Profil-Nr.	Datum	RW	HW	Aufschlussart	Nutzungsart	Vegetation
012	19.05.2011	2567138	5708664	BR	Acker	Mais

Aufschlusssdaten

Bodenabtrag/ Bodenauftrag	Bodensystematische Einheit	Substratsystematische Ein	Wasserstand unter GOF
			-

Horizontbezogene Daten		Gelände						Abgeleitet	
NR	Unter-Obergrenze	Horizontsymbol	Humusgehalt	Bodenfeuchte	Lagerungsdichte	Feinboden	Grobboden	We	nFkwe
1	0-50	aAp	h3	sw feu	pt2	Ls2		90	188
2	50-90	aGo	h2	sw feu	pt3	Lts +Lt3			
3	90-200	II aGo	(h3)*	sw feu	pt2	fs			

Bemerkungen: * Humusbänder

Tab.A1: Titeldaten: urb041 Welheimer Mark (Bodenkartierung *dynaklim*)

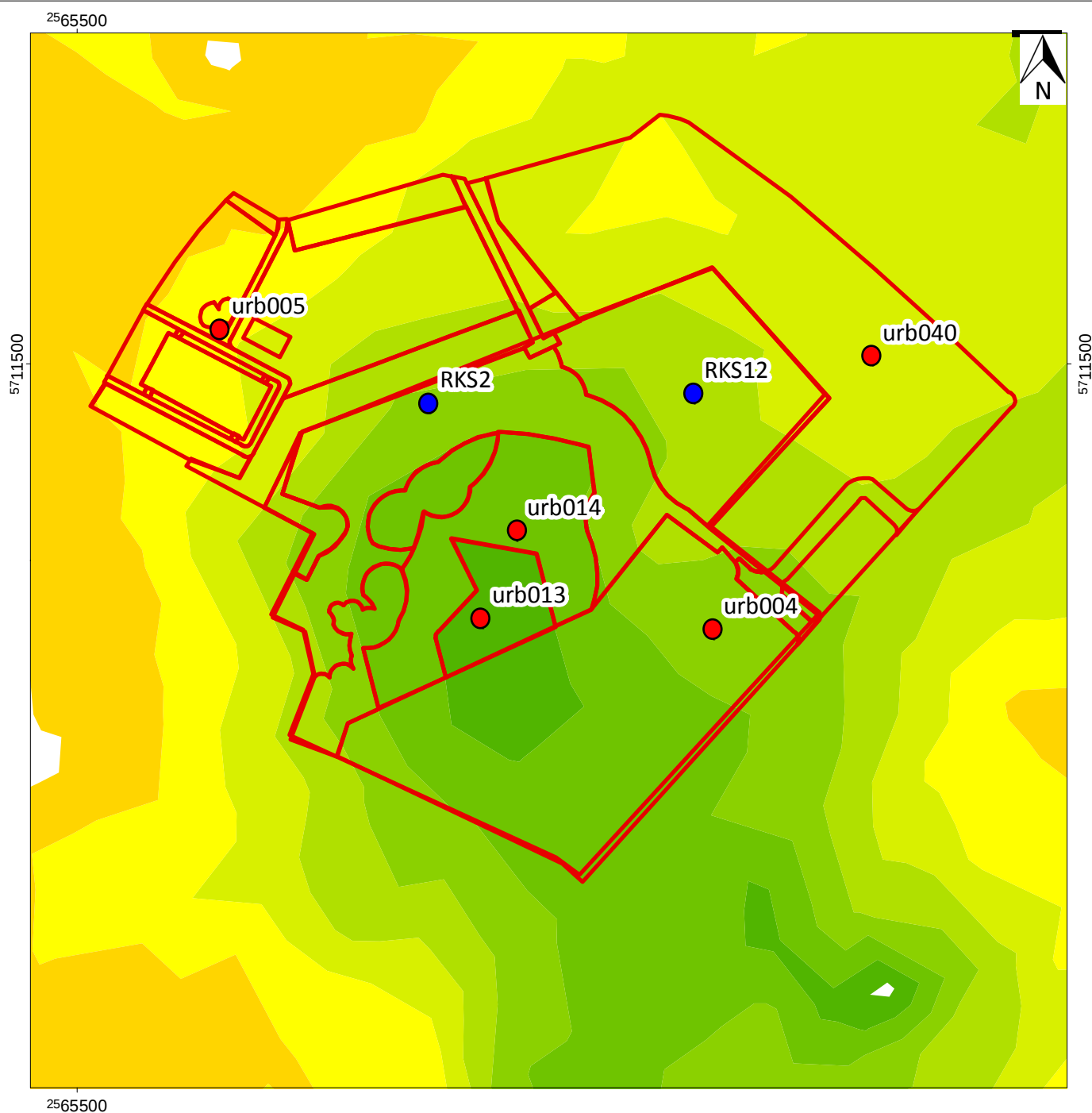
Profil-Nr.	Datum	RW	HW	Aufschlussart	Nutzungsart	Vegetation
041	19.05.2011	2567303	5708707	BR	Grasflur	Mähwiese

Aufschlusssdaten

Bodenabtrag/ Bodenauftrag	Bodensystematische Einheit	Substratsystematische Ein	Wasserstand unter GOF
	AB-GG	Vega-Gley	-

Horizontbezogene Daten		Gelände						Abgeleitet	
NR	Unter-Obergrenze	Horizontsymbol	Humusgehalt	Bodenfeuchte	Lagerungsdichte	Feinboden	Grobboden	We	nFkwe
1	0-40	aAh	h4	tro	pt3	Ls2		100	166
2	40-90	aM – Go	h2	tro	pt5	tl			
3	90-160	II aGo	h1	sw feu	pt2-3	ffs + fsu3			
4	160-170	III aGo- Ah	h5	feu	pt 2	Lu			

Bemerkungen:



Legende

Teilflächen



Bohrpunkte



dynaklim



Stadt Bottrop

Grundwasserflurabstand



0 bis 0,5 m



0,5 bis 1 m



1 bis 1,5 m



1,5 bis 2 m



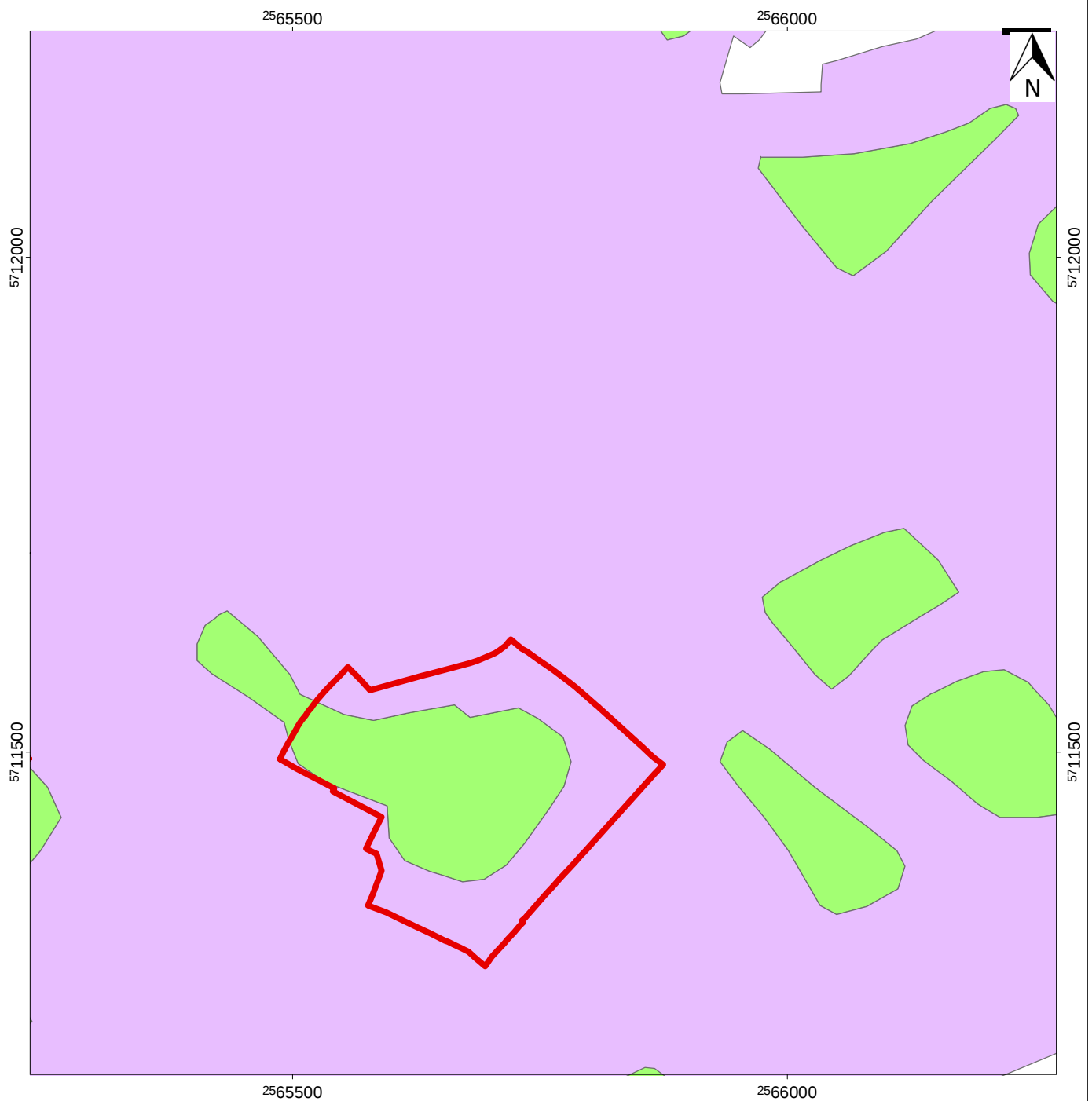
2 bis 2,5 m



2,5 bis 3 m



3 bis 3,5 m

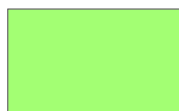


Legende

Untersuchungsgebiet



Klimatope



Parkklima



Stadttrandklima



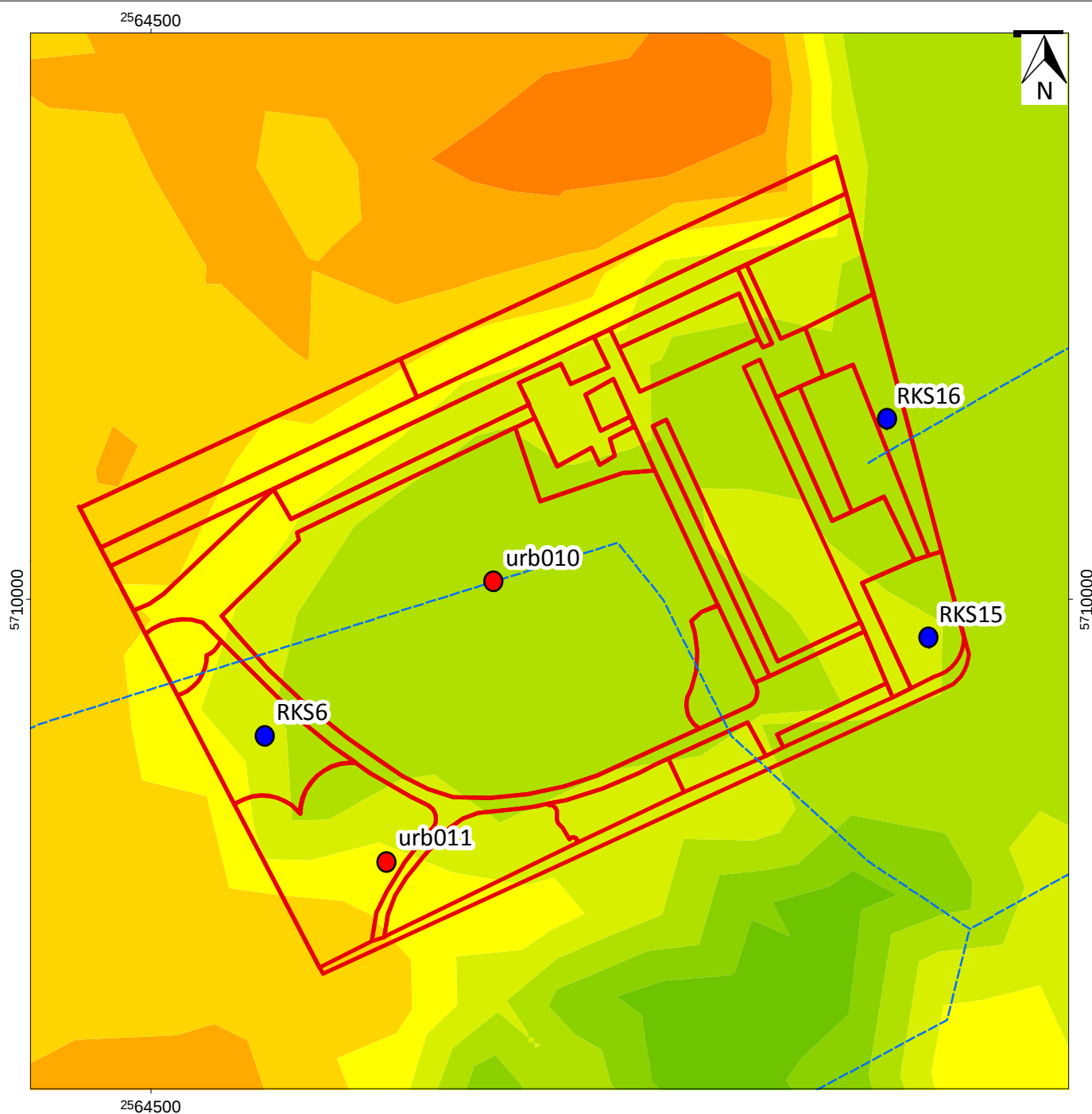
Foto1: Jörgensmannwiese, öffentliche Grünfläche



Foto2: Jörgensmannwiese, Brachfläche



Foto3: Jörgensmannwiese, Schrebergärten und Brombeergestrüpp



Teilflächen



Bohrpunkte



dynaklim



Stadt Bottrop



historische Gewässer

Grundwasserflurabstand



0 bis 0,5 m



0,5 bis 1 m



1 bis 1,5 m



1,5 bis 2 m



2 bis 2,5 m



2,5 bis 3 m



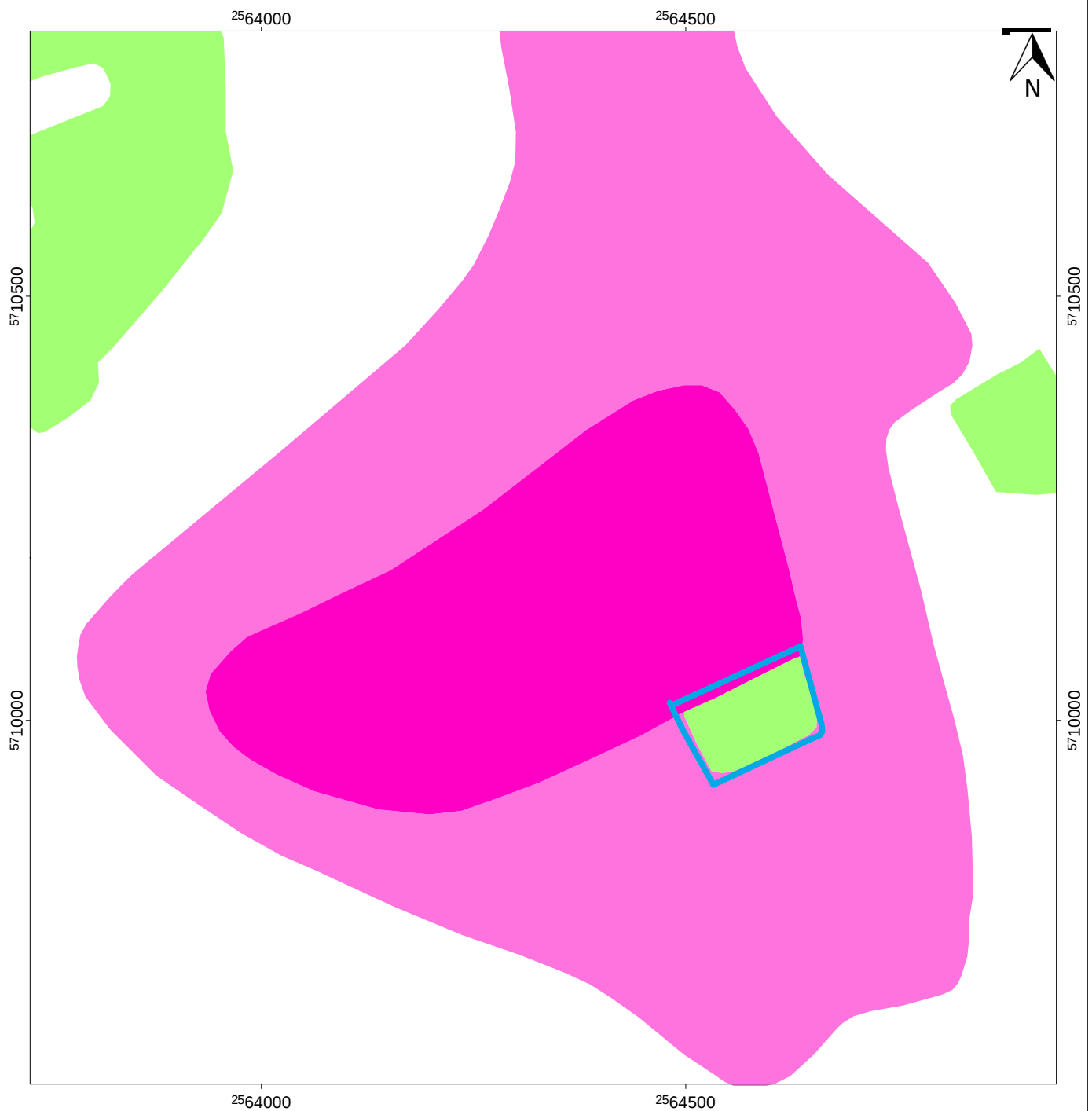
3 bis 3,5 m



3,5 bis 4 m



4 bis 4,5 m



Legende

Untersuchungsgebiet



Klimatope



Parkklima



Innenstadtklima



Stadtklima



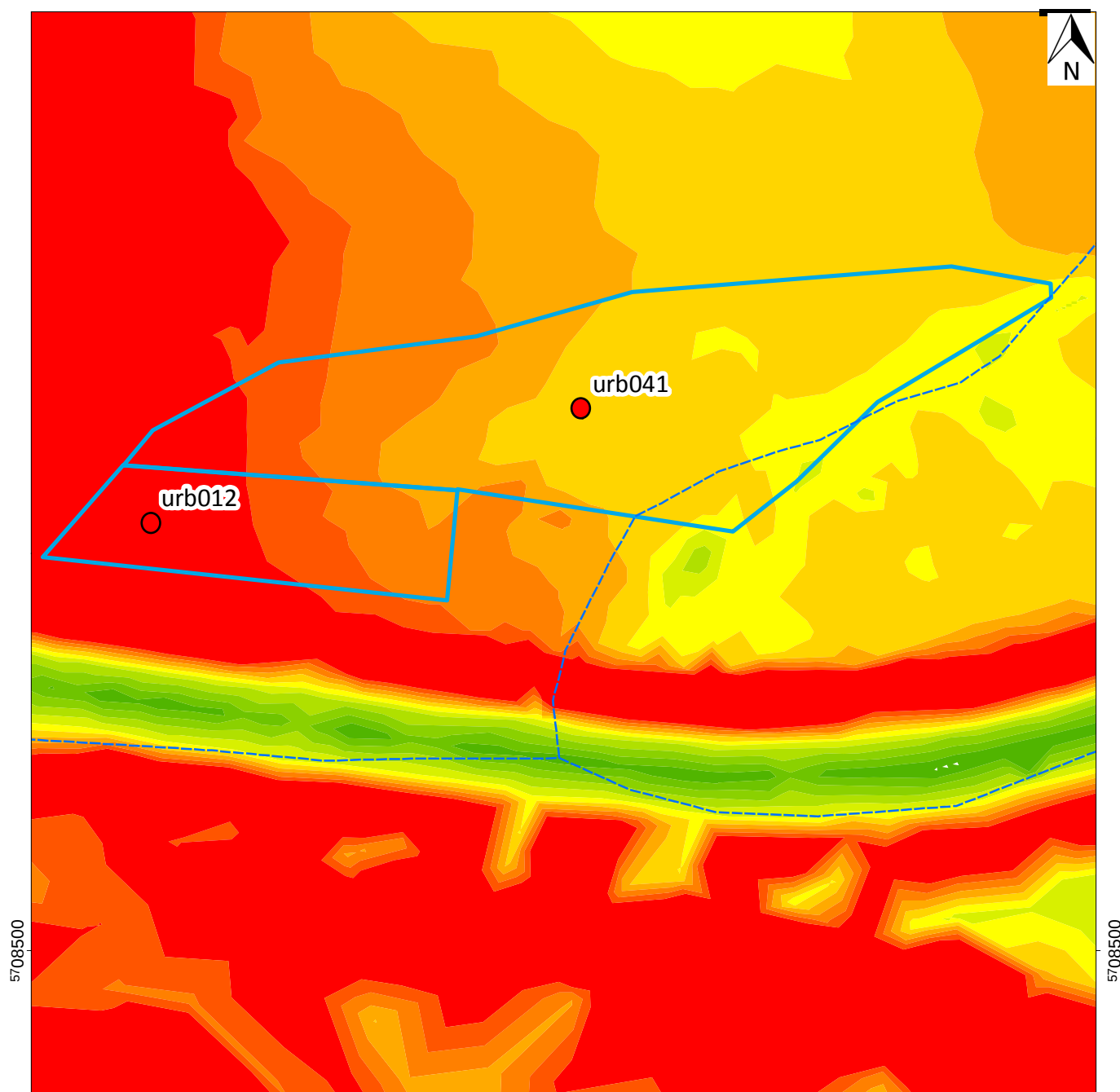
Foto1: Ehrenpark, Eingang Ehrenplatz



Foto2: Ehrenpark, Pflanzbeet



Foto3: Ehrenpark, Skateranlage



Legende

Teilflächen



Bohrpunkte



dynaklim



Stadt Bottrop



historische Gewässer

Grundwasserflurabstand



0 bis 0,5 m



0,5 bis 1 m



1 bis 1,5 m



1,5 bis 2 m



2 bis 2,5 m



2,5 bis 3 m



3 bis 3,5 m



3,5 bis 4 m



4 bis 4,5 m



4,5 bis 5 m

> 5 m



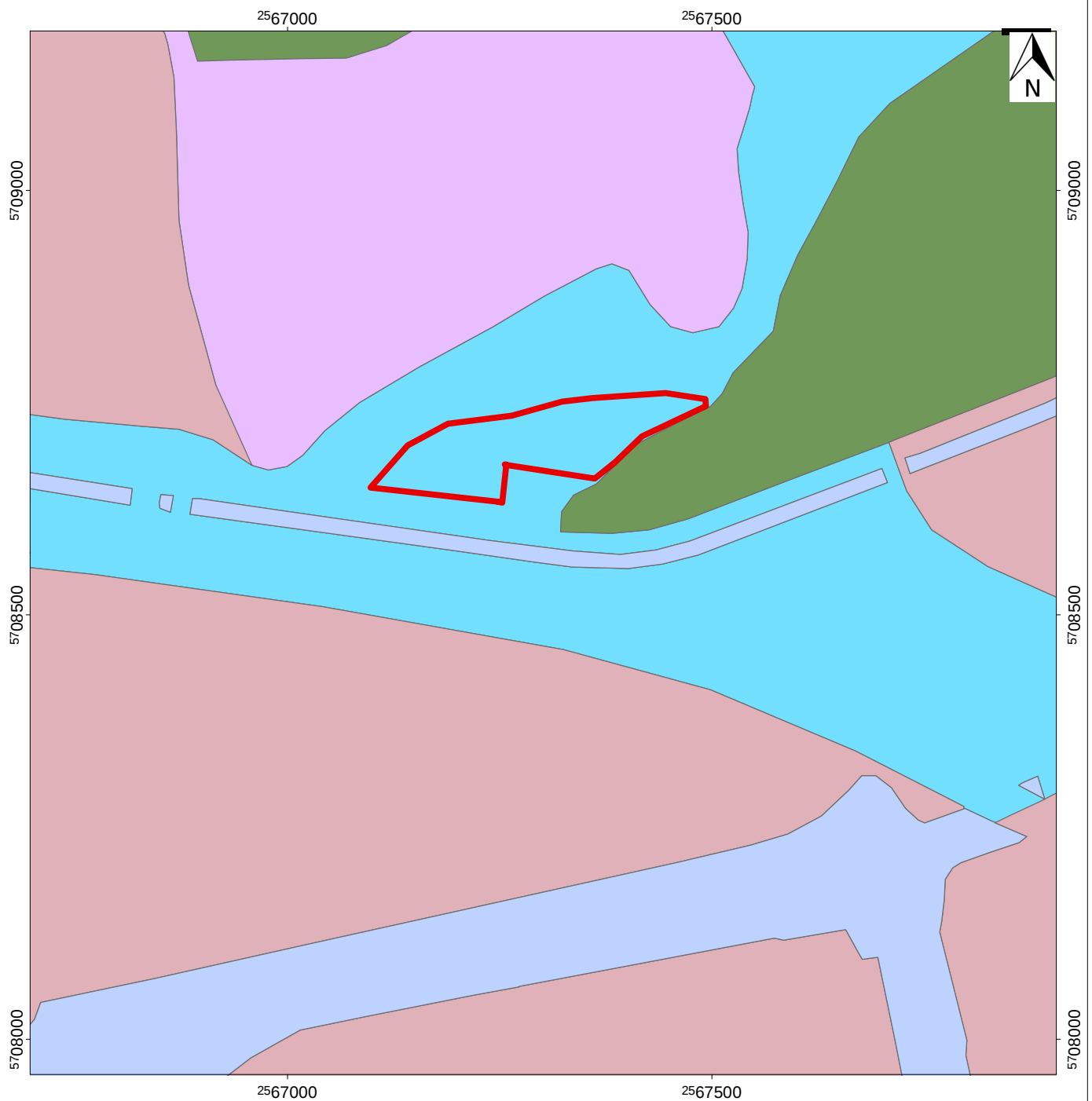
4 bis 4,5 m



4,5 bis 5 m



> 5 m



Legende

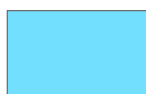
Untersuchungsgebiet



Klimatope



Waldklima



Freilandklima



Gewässer- / Industrieklima



Stadtrandklima



Gewässer- / Industrieklima

Quelle: RVR 2011, modifiziert



Foto1: Welheimer Mark, Intensivwiese



Foto2: Welheimer Mark, Intensivwiese



Foto3: Welheimer Mark, Ackerfläche

Tab A5: Quellenangabe zu den verwendeten Geodaten, im ArcGIS

Karte	Jahr	Maßstab	Urheber
Befestigte Flächen	2010	1:5.000	EGLV
Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen (BK50)	2007/2011	1:50.000	GD NRW
Bodeneignungskarte	1948		Stadt Bottrop
Digitales Geländemodell (DGM)	1996-2008	k.A.	BR. Köln Abt. 7/ Geobasis NRW
Flächennutzungskartierung (FNK)	2009	1:5.000	RVR
Flurstückkarte	2011		Stadt Bottrop
Gebäudekarte	2011		Stadt Bottrop
Karten der Gewässer	k.A.	k.A.	EGLV
Grundwasserflurabstand Emscherraum	2010	k.A.	EGLV
Klimatope Ruhrgebiet	k.A.	k.A.	RVR
Luftbilder	1952-2008		Stadt Bottrop
Topographische Karten	unterschiedlich	1:25.000	BR. Köln Abt. 7/ Geobasis NRW
Uraufnahme			Stadt Bottrop

Ansprechpartner

Jens Hasse
hasse@fiw.rwth-aachen.de

Birgit Wienert
wienert@fiw.rwth-aachen.de

Projektbüro *dynaklim*

Mozartstraße 4
45128 Essen

Tel.: +49 (0)201 104-33 38

www.dynaklim.de