

*dynaklim*-Publikation



Gefördert durch:





# UNTERIRDISCHE WÄRMEINSEL IN OBERHAUSEN

## Untersuchung subterranner Wärme- und Energieflüsse in verschiedenen Klimatopen

Wilhelm Kuttler, Helene Püllen, Dirk Düttemeyer, Andreas-Bent Barlag

**Universität Duisburg-Essen**

**Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie**

<http://www.uni-due.de/klimatologie/>

---

*dynaklim*-Publikation Nr. 23 / März 2012



### Zusammenfassung

Diese Publikation stellt die Ergebnisse eines Bodentemperaturmessnetzes in Oberhausen im Rahmen der Aktivität 4.1.3 „Sicherung der Trinkwasserqualität bei der Wasserverteilung infolge veränderter Bodentemperaturen“ dar. Zur Beantwortung der Frage, ob in Folge des globalen Klimawandels erhöhte Bodentemperaturen die Trinkwasserqualität verschlechtern können, wurden in acht unterschiedlichen Klimatopen bodenphysikalische Parameter bestimmt. Die Bodentemperaturen wurden vom Trinkwasserleitungsniveau beginnend und jeden Horizont abdeckend bis annähernd an die Erdoberfläche gemessen. Zusätzlich wurden Bodenwärmeströme (6 Standorte) und die Bodenfeuchte (2 Standorte) bestimmt.

Die Temperaturkurven der Böden zeigen ein typisches, aber standortspezifisches Verhalten. So kann grundsätzlich eine jahreszeitenabhängige Temperaturzunahme (Winter) bzw. Temperaturabnahme (Sommer), Amplitudenabschwächung und Phasenverschiebung mit zunehmenden Tiefen festgestellt werden. Die Profilttemperaturen spreizen besonders im Sommer mit bis zu 10 K im Tagesmittel sehr stark und zeigen höchste Werte an den anthropogenen Standorten, niedrigste Werte an den natürlicheren Standorten. In Trinkwasserleitungsniveau reichen die Temperaturspannen von 3 °C im Winter (kältester Standort) bis zu 24 °C (wärmster Standort). Temperaturen größer 20 °C werden in einem Zeitraum von insgesamt 12 Wochen nur an einem stark versiegelten Standort aufgezeichnet. Stark versiegelte Bereiche bilden somit in thermischer Hinsicht potenzielle Risikogebiete für erhöhte Trinkwassertemperaturen. Darüber hinaus wird die unterirdische Bodenwärmeinsel für Oberhausen mit einer Intensität von bis zu 7 K (Tagesmittel) nachgewiesen.

### Schlagworte (im *dynaklim*-Wiki<sup>1</sup>)

Städtische Wärmeinsel (UHI), unterirdische Wärmeinsel, Stadtklima, Klimawandel, Bodentemperaturen, Bodenenergiegehalt, Bodenwärmestrom, Trinkwasserhygiene

---

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

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Wissenschaftlich-technischer Hintergrund	1
2.1	Wissenschaftlicher Stand der Forschung	2
2.2	Technischer Stand der Forschung	2
3	Material und Methoden	3
3.1	Untersuchungsgebiet und Standorte	3
3.2	Klimatische Repräsentanz des Messzeitraums	7
3.3	Messausrüstung und –aufbau	8
3.4	Bodenphysikalische Untersuchungen	9
3.5	Datenverfügbarkeit und Gap Filling	11
4	Ergebnisse des Bodentemperaturmessnetzes	12
4.1	Auswertung der Bodentemperaturen – Profilmittelwerte	12
4.1.1	Überblick über das thermische Verhalten der Standorte im Messzeitraum anhand von Profilhresgängen und –mittelwerten	12
4.1.2	Detailbetrachtung des saisonalen thermischen Verhaltens der Standorte	13
4.1.3	Detailbetrachtung des thermischen Verhaltens der Standorte im Messzeitraum, dargestellt anhand monatlicher Profilmittelwerte	16
4.2	Auswertung der Bodentemperaturen – Vergleich ausgewählter Tiefenstufen	19
4.2.1	Thermische Differenzierung innerhalb der Profile anhand der Betrachtung statistischer Kennzahlen ausgewählter Tiefenstufen im Jahresmittel	19
4.2.2	Saisonale thermische Differenzierung innerhalb der Profile anhand der Betrachtung statistischer Kennzahlen ausgewählter Tiefenstufen	22
4.2.3	Thermische Differenzierung innerhalb der Profile anhand der Betrachtung statistischer Kennzahlen ausgewählter Tiefenstufen im Monatsmittel	23
4.3	Auswertung der Bodentemperaturen – diurnaler Temperaturverlauf	24
4.3.1	Diurnaler Temperaturverlauf – ausgewählte Standorte und Tiefen	24
4.4	Auswertung der Schachttemperatur: Korrelationen von Schacht- und Lufttemperatur, Schacht- und Bodentemperatur sowie Luft- und Bodentemperatur	26
4.5	Auswertung der Bodenfeuchte	27
4.6	Auswertung der Bodenwärmeströme	28
4.7	Unterirdische Wärmeinsel der Stadt Oberhausen	32
4.8	Oberflächennaher Bodenenergiegehalt der Stadt Oberhausen	34
5	Fazit	35
6	Literaturverzeichnis	36

## 1 Einleitung

Aufgabe der hier beschriebenen Forschungen war die Ermittlung der Bodentemperaturen als Unterstützung für die *dynaklim*-Aktivität 4.1.3 (Sicherung der Trinkwasserqualität bei der Wasserverteilung infolge veränderter Bodentemperaturen) unter Federführung des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wasserforschung (IWW), Mülheim/Ruhr (E 4.1):

Ziel der Aktivität 4.1.3 ist es zu untersuchen, inwiefern sich Bodenwärme in Abhängigkeit unterschiedlicher Flächennutzungen und Bodeneigenschaften auf die Trinkwasserqualität im urbanen Raum auswirkt und welche Implikationen durch eine potentielle, klimawandelbedingte Erwärmung für die Zukunft zu erwarten sind. Höhere Bodentemperaturen können zu einem Temperaturanstieg in Trinkwasserverteilungsnetzen führen, wodurch sich die durch die Trinkwasserverordnung spezifizierte und zu gewährleistende Qualität des Trinkwassers u. a. durch Vermehrung von hygienisch relevanten Mikroorganismen verschlechtern kann. Da zu Trinkwassertemperatur und -qualität in Abhängigkeit von Bodentemperaturen keine belastbaren Messdaten vorlagen, wurden für den Projektpartner IWW im Rahmen der Aktivität 4.1.3 mittels eines Bodentemperaturmessnetzes diese Daten erhoben.

Mit dem Bodentemperaturmessnetz wurden nicht nur die Bodentemperaturen in der Tiefe des Trinkwasserleitungsnetzes an urbanen Standorten unterschiedlicher Flächennutzungen ermittelt; die Messungen erfassten zusätzlich alle an den jeweiligen Standorten auftretenden Bodenhorizonte, um deren potentielle Auswirkungen auf das Temperaturprofil berücksichtigen zu können. Um möglichst viele die Bodentemperatur bestimmende Größen untersuchen zu können, erfolgte zusätzlich zur Bodentemperaturmessung die Erfassung der Bodenfeuchte ( $\Theta$ ) an zwei exemplarischen Standorten, die Messung des Bodenwärmestroms ( $Q_B$ ) an sechs ausgewählten Standorten sowie an sieben Standorten die Bestimmung der Lagerungsdichte ( $d_B$ ) und eine Korngrößenanalyse.

Diese Publikation präsentiert die Ergebnisse des Messnetzes, schildert die Bodentemperaturverteilung im Bereich des Trinkwassernetzes und zeigt, im Hinblick auf den Forschungsschwerpunkt der Aktivität 4.1.3, die bereits heute bestehende thermisch Belastung des Stadtbodens auf.

## 2 Wissenschaftlich-technischer Hintergrund

Zur Unterstützung der Aktivität 4.1.3 „Sicherung der Trinkwasserqualität in der Wasserverteilung bei veränderten Bodentemperaturen“ wurde ein Messprogramm zur Erfassung von Bodentemperaturen an verschiedenen urbanen und ruralen Standorten der Modellstadt Oberhausen in unterschiedlichen Bodentiefen konzipiert. Um Synergieeffekte bezüglich der wissenschaftlichen Transparenz, des Datentransfers sowie der Beschaffungs- und Unterhaltskosten zu nutzen, waren die Messstationen gleichzeitig Bestandteil der Messnetze in den Aktivitäten 4.3.1 und 4.3.2. Der Messzeitraum umfasste zwecks Berücksichtigung saisonaler Effekte einen einjährigen Zeitraum vom 01.08.2010 bis zum 31.07.2011.

Sowohl die Wahl Oberhausens als Modellstadt als auch die Auswahl der einzelnen Standorte erfolgte als Kompromiss zwischen den Ansprüchen des Projektpartners IWW an Leitungsdurchflüsse, Leitungsnennweiten, Lage der Anschlüsse (Endstrang ja/nein), Herkunft des Trinkwassers und den Ansprüchen des Projektpartners Universität Duisburg-Essen an die Lage im Stadtgebiet (Klimatope). Die verwendete Messausrüstung (Temperatursonden, Logger etc.) wurde zunächst unter Laborbedingungen getestet und nach einer ersten bodenkundlichen Standorterkundung (typische Geländeaufnahme nach AG Boden (1996): Horizonte und Horizontgrenzen, Bodenart, Bodenfeuchte etc.) im Untersuchungsgebiet aus Trinkwasserschächten heraus erfolgreich installiert. In wöchentlichen Abständen wurden die Daten gesichert und auf Plausibilität geprüft sowie an zwei für die Bodenfeuchte repräsentativen Standorten Bodenproben entnommen und daraus im Labor die Bodenfeuchte bestimmt.

## 2.1 Wissenschaftlicher Stand der Forschung

Die Bereitstellung sauberen Trinkwassers erfolgt in Deutschland nach den strengen hygienischen Qualitätsstandards der Trinkwasserverordnung und erfordert je nach Ausgangsbeschaffenheit des Wassers einen hohen technischen Aufwand, um es in einwandfreier Qualität vom Erzeuger über das Verteilungsnetz zum Verbraucher zu transportieren (BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ 2001).

Die potenzielle Beeinträchtigung der Trinkwasserqualität bei der Verteilung an Endnutzer ist daher ein wichtiges Untersuchungsfeld und Gegenstand nationaler und internationaler Forschungsprojekte (u. a. WINGENDER and FLEMMING 2004; SAFER 2006). Bekannte Einflussgrößen sind mangelhafte Aufbereitung belasteter Wässer, Aufkeimungen durch bakterienverfügbare Nährstoffe in Kombination mit langen Aufenthaltszeiten (in Fernwassernetzen in schwach durchflossenen Netzabschnitten) oder schwankender Desinfektionsmittelkonzentration (KORTH et al. 2007). Der Nachweis des Vorkommens und die Bedeutung von Biofilmen in Trinkwasserverteilungssystemen war Gegenstand eines vom IWW koordinierten BMBF-Verbundprojekts 02WT9860-9863 „Erfassung des Wachstums und des Kontaminationspotentials von Biofilmen in der Verteilung von Trinkwasser“ (FLEMMING 2002). Im Zusammenhang mit einer potenziellen klimabedingten Erhöhung der Bodentemperaturen (SAVVA et al. 2010) ist zukünftig auch die Erwärmung des Trinkwassers in Verteilungsnetzen zu erwarten, insbesondere in schwach durchflossenen Netzabschnitten und bei der Führung des Verteilungsnetzes unter asphaltierten Flächen und Straßen. Auf Grund von Beobachtungen in anderen Systemen ist zu beachten, dass auch geringe Temperaturerhöhungen im Bereich von 1 K bis 3 K zu einer sprunghaften Vermehrung von hygienisch relevanten Mikroorganismen führen können. Dies ist bislang nur unzureichend untersucht worden, kann aber für die öffentliche Gesundheit eine wichtige Rolle spielen. Gerade in Deutschland wird die überwiegende Zahl der Versorgungssysteme ohne Desinfektion betrieben (UHL et al. 2001). Für diese Versorgungsbedingungen liegen bislang keine wissenschaftlichen Ergebnisse darüber vor, wie sich eine Erhöhung der Trinkwassertemperaturen auf die hygienische Qualität des verteilten Wassers auswirken wird.

Die Veränderungen des Mikro- und Mesoklimas durch Urbanisierung sind für zahlreiche Städte belegt und quantifiziert (ARNFIELD 2003, KUTTLER 2011); negative Auswirkungen des Klimawandels auf das thermische Niveau von Städten wurden vielfach untersucht. Dass unterschiedliche Versiegelungsgrade und anthropogene Materialien sich auch auf Bodentemperaturen auswirken, zeigten beispielsweise HALVERSON and HEISLER (1981) und ASAEIDA and CA (1993). Lange Zeitreihen und Modellrechnungen belegen die Rolle des Klimawandels sowohl für vergangene als auch für zukünftige Anstiege der Bodentemperaturen (z. B. SAVVA et al. 2010). Urbanisierung und Klimawandel sind somit die Hauptursache für die Erwärmung des Stadtbodens (unterirdische Wärmeinsel), die sich bis in Tiefen von mehreren hundert Metern fortsetzen kann (FERGUSON and WOODBURY 2007, TANIGUCHI et al. 2007, ZHU et al. 2010). Flächennutzungsabhängige Untersuchungen zur Erwärmung des Stadtbodens in Tiefen von Trinkwasserleitungen (bis ca. 2 m) sind hingegen nicht bekannt.

## 2.2 Technischer Stand der Forschung

Zur Erfassung der Bodenphysik wurde auf bodenkundliche Standardmethoden zurückgegriffen, deren Funktionsweise in einschlägigen Lehrbüchern (z. B. SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2009, SCHLICHTING et al. 2011) beschrieben wird. Die Bodentemperaturen wurden mit Widerstandsthermometern (Pt100, Fa. Friedrichs, Schenefeld) sowie der Bodenwärmestrom mit Wärmeflussplatten (HFP01, Fa. Hukseflux, Delft, NL) direkt gemessen. Die Bestimmung der Bodenfeuchte erfolgte nach Probennahme mit dem Pürckhauer-Bohrer im Labor gemäß DIN 19671 (DIN 1964), die der Lagerungsdichte gemäß DIN 18125-2 (DIN 2010). Die Korngrößenanalyse wurde in Anlehnung an DIN ISO 11277 (DIN ISO 2002) durchgeführt.

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Untersuchungsgebiet und Standorte

In der Stadt Oberhausen (NRW; 77 km<sup>2</sup>, 213.000 Einwohner (IT.NRW 2011b)) wurde an acht repräsentativen Standorten in unmittelbarer Nähe zu Trinkwasserschächten in verschiedenen Klimatopen die Messung bodenklimatischer Parameter während des Messzeitraums 01.08.2010 bis 31.07.2011 vorgenommen.

Klimatope sind Gebiete, die auf Grund ihrer Flächennutzungs-, Relief- und Bebauungsstruktur, Vegetationsbedeckung und Bodenart im mikro- bis mesoklimatischen Bereich ein relativ einheitliches, charakteristisches Klima ausbilden (VDI 2003). Diese entsprechen weitestgehend den „thermal climate zones“ (TCZ) nach STEWART and OKE (2009), die sich nach mikrometeorologischen Parametern gliedern. Die Messungen wurden in den Klimatopen Innenstadt (2x), Gewerbe, Park, Stadtrand, Gewässer, Wald und Freiland vorgenommen (siehe Abb. 1).

Die ausführliche Nomenklatur der Standorte (u. a. Klimatop, Stationsname, Kürzel, Messgröße) findet sich in Tab. 1, die charakteristischen Merkmale der Klimatope, die die Bodentemperaturen beeinflussen, zeigt Tab. 2.

Nr.	Klimatop	Stationsname	Kürzel	Koordinaten <sup>3</sup>			Messgrößen	Aktivitäten
1	Innenstadt	Innenstadt (hochversiegelt)	INHO	51°28'07"	N 6°51'32"	E	t <sub>a</sub> , rH, WR, WG, t <sub>B</sub>	4.1.3/ 4.3.2
2	Innenstadt	Innenstadt	INN	51°27'58"	N 6°51'16"	E	t <sub>a</sub> , rH, WR, WG, t <sub>B</sub> , Q <sub>B</sub> , θ	4.1.3/ 4.3.2
3	Park	Park	PARK	51°28'26"	N 6°51'31"	E	t <sub>a</sub> , rH, WR, WG, t <sub>B</sub>	4.1.3/ 4.3.2
4	Gewerbe	Gewerbe	GEW	51°29'08"	N 6°51'57"	E	t <sub>a</sub> , rH, WR, WG, t <sub>B</sub> , Q <sub>B</sub>	4.1.3/ 4.3.2
5	Stadtrand	Stadtrand	STA	51°29'29"	N 6°54'33"	E	t <sub>a</sub> , rH, WR, WG, t <sub>B</sub> , Q <sub>B</sub>	4.1.3/ 4.3.2
6	Gewässer	Gewässer	WAS	51°29'38"	N 6°54'40"	E	t <sub>a</sub> , rH, WR, WG, t <sub>B</sub> , Q <sub>B</sub>	4.1.3/ 4.3.2
7	Wald	Wald	WALD	51°32'03"	N 6°49'60"	E	t <sub>a</sub> , rH, WR, WG, t <sub>B</sub> , Q <sub>B</sub>	4.1.3/ 4.3.2
8	Freiland	Freiland	FREI	51°32'03"	N 6°47'18"	E	t <sub>a</sub> , rH, WR, WG, t <sub>B</sub> , Q <sub>B</sub> , θ	4.1.3/ 4.3.2
9	Innenstadt	urbaner Standort <sup>1</sup>	URB	51°28'52"	N 6°61'59"	E	Q <sub>H</sub> , Q <sub>E</sub> , Q*, WR, WG	4.3.1
10	Gewässer	suburbaner Standort <sup>2</sup>	SUB	51°29'37"	N 6°54'35"	E	Q <sub>H</sub> , Q <sub>E</sub> , Q*, WR, WG	4.3.1

<sup>1</sup> im näheren Umfeld der Stationen 1 und 2  
<sup>2</sup> im näheren Umfeld der Station 6  
<sup>3</sup> Koordinaten für die Bodenuntersuchungen in A4.1.3; Koordinaten der Standorte in A4.3.2 davon leicht abweichend  
 t<sub>a</sub>: Lufttemperatur (in °C), rH: relative Feuchte (in %); WR: Windrichtung (in °), WG: Windgeschwindigkeit (in m/s),  
 t<sub>B</sub>: Bodentemperatur (in °C), Q<sub>B</sub>: Bodenwärmestrom (in W/m<sup>2</sup>), Q<sub>H</sub>: turbulente sensible Wärmeflussdichte (in W/m<sup>2</sup>),  
 Q<sub>E</sub>: turbulente latente Wärmeflussdichte (in W/m<sup>2</sup>), Q\*: Strahlungsbilanz (in W/m<sup>2</sup>)

© UDE (AGAK)

**Tab. 1: Zusammenstellung der Messstationen in Oberhausen mit den entsprechenden Stationsnummern, Klimatopen, Stationsnamen, Kürzeln, Koordinaten, Messgrößen und Aktivitäten**

Die Untersuchungsstandorte sind insgesamt vier verschiedenen Bodeneinheiten zuzuordnen, die etwa 40 % der Gesamtfläche von Oberhausen einnehmen (siehe Abb. 2, BK 1:50.000) (IT.NRW (2011a)). Die durchgeführten Untersuchungen ergaben für die Standorte Innenstadt (Station 2), Park (Station 3) und Freiland (Station 8) (Bodeneinheit „Sandboden“) die Bodentypen Regosol, Rigosol und Gley. Der Standort 1 (Innenstadt (hochversiegelt)) (Bodeneinheit „Sandboden“) liegt in einer Fußgängerzone. Bei den Standorten Stadtrand (Station 5) und Gewässer (Station 6) (Bodeneinheit „tonige Lehmböden“) handelt es sich um einen Regosol über Gley und einen Regosol; beim Standort Wald (Station 7) (Bodeneinheit „lehmiger Sandboden“) um eine pseudovergleyte podsolige Braunerde. Für den Standort 4 (Gewerbe) wurde keine Bodeneinheit angegeben, da es sich hierbei um einen ehemaligen Industriestandort handelt und zum Zeitpunkt der Kartenerstellung kein ursprünglicher Boden

mehr vorhanden war. Der heutige Boden ist das Ergebnis von Sanierungsmaßnahmen (siehe Abb. 2 und Tab. 2).

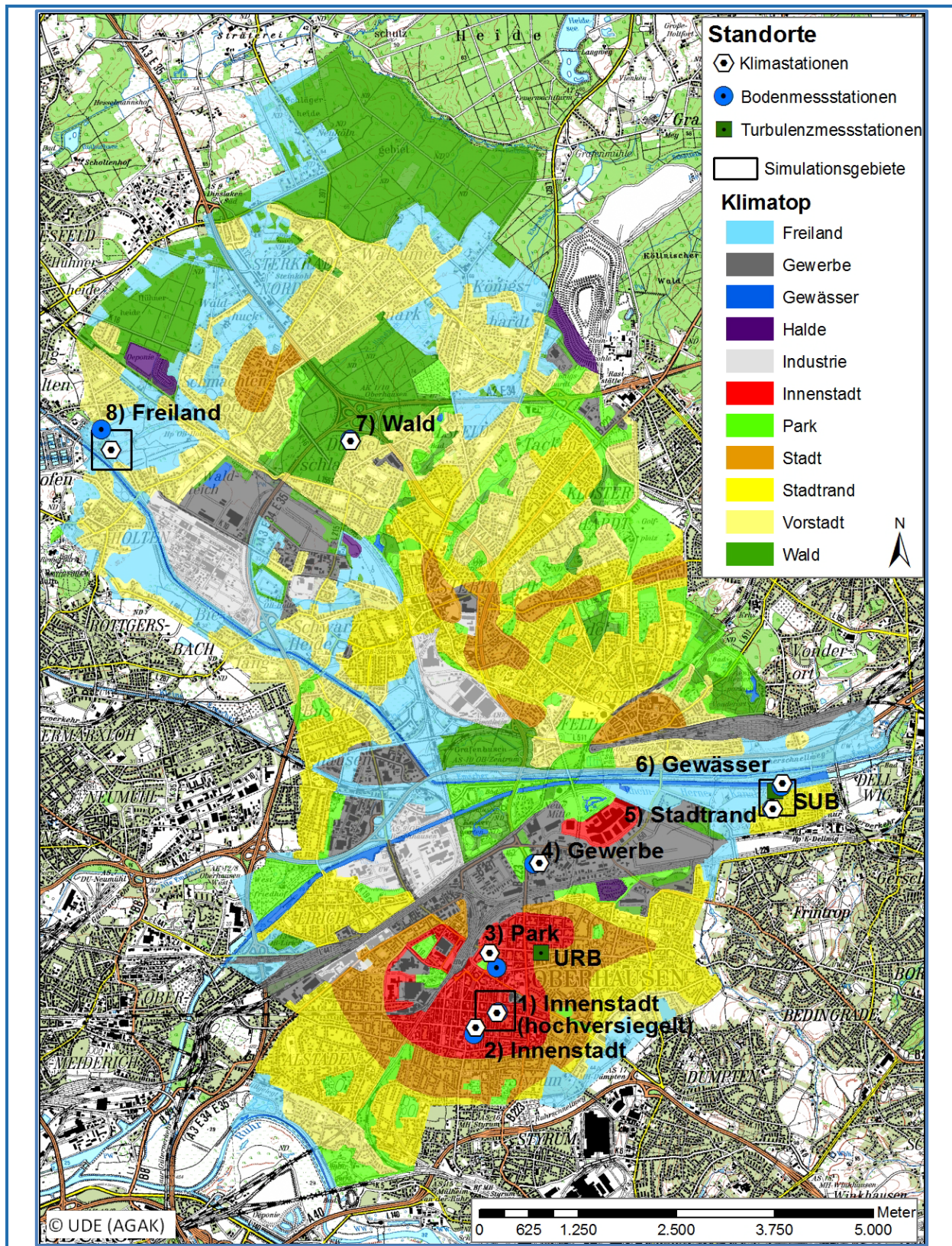


Abb. 1: Übersicht über die Klimatope, Messstandorte und Modellgebiete der Aktivitäten 4.1.3, 4.3.1 und 4.3.2 in Oberhausen (RVR 2007 und IT.NRW 2011a, verändert)



Nr.	Standort/Klimatop (TCZ) <sup>a</sup>	Horizont-Nr. (Hz.) <sup>b</sup>	Horizont-grenzen in cm <sup>c</sup>	Humus-gehalt in Masse-%	Lagerungs-dichte (dB) in 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	Bodenart <sup>d</sup>	Bodentyp (Horizont-Bezeichnung) [Bodeneinheit] <sup>e</sup>	Kennzeichnende Merkmale
1	Innenstadt (hochversiegelt) (Old Core)	Keine Beprobung möglich, da Straße					[Sandboden]	Sehr stark versiegelt
2	Innenstadt Old Core)	1	0-15	3 - 6	1,2	SI2 <sup>f</sup>	Regosol (jAh - jC) <sup>f</sup> [Sandboden]	Stark versiegelt, geringer Rasenflächenanteil, wenige kleine Sträucher
		2	15+	0	1,3	S		
3	Park (Open Grounds)	1	0-57	7 - 13	1,1	SI3	Rigosol (R-Ah - jC) [Sandboden]	Im Beet; umgeben von hohen Laubbäumen
		2	57+	3 - 6	1,3	SI2		
4	Gewerbe (Extensive Lowrise)	1	0-6	3 - 6	1,4	Ut3	Regosol (Ah - jAh/C - jC) [keine Bodeneinheit]	Kurzgehaltene Rasenfläche; Parkplatz; keine schattenspendenden Bäume
		2	Jun 25	3	1,4	Ut3		
		3	25+	3		SI2		
5	Stadttrand (Regular Housing)	1	0-40	3 - 6	1,5	SI3	Regosol über Gley (jAh/C - II C <sub>1</sub> - rGo - rGr) [toniger Lehmboden]	Einfamilienhäuser, Straße, Gartenflächen, Laubbäume; teils beschattet
		2	40-115	2 - 3	1,5	SI4		
		3	115-133	< 1		S		
		4	133+	0		Su2		
6	Gewässer (Dispersed Settlement)	1	0-29	2 - 4	1,1	SI2	Regosol aus sandig-humosem Bodenmaterial (jAh - jAh - jI Cv - yC - yC) [toniger Lehmboden]	Straßen, Parkplatz, Gebäude, Gärten, Laubbäume; Kanal in 40 m Entfernung; beschattet
		2	29-43	0	1,5	SI2		
		3	43-52	0		Su2		
		4	52-63	0		Su2		
		5	63+	0		SI2		
7	Wald (Forest)	1	43	7 - 13	0,8	SI3	Pseudovergleyte podsolige Braunerde (jAh - Sew - Sw - Swd) [lehmiger Sandboden]	Wald; Waldwege, Garten; überwiegend stark beschattet
		2	53	0	0,9	SI2		
		3	90	0	1,7	SI3		
		4	160+	0	1,7	Lts		
8	Freiland (Cropped Fields)	1	20	3 - 6	0,7	SI3	Gley (Ah - Go - Gr) [Sandboden]	Wäldchen; Straße; teils beschattet
		2	150	1	1,7	SI3		
		3	200+	0		Lts		

© UDE (AGAK)

<sup>a</sup>) nach STEWART and OKE (2009) <sup>b</sup>) Reihenfolge der Horizonte von oben nach unten <sup>c</sup>) Grenzen der Horizonte in cm; (+ = Horizontende bei Beprobung nicht erreicht) <sup>d</sup>) Sand, Schluff oder Ton <sup>e</sup>) Bodentyp (Horizonte), [Bodeneinheit] <sup>f</sup>) Klassifikation der Bodenart mittels Pipettanalyse nach Köhn (DIN 1973 bzw. DIN ISO 2002)

Tab. 2: Bodenphysikalische Standortparameter und Umfeldeigenschaften der Untersuchungsstandorte in Oberhausen

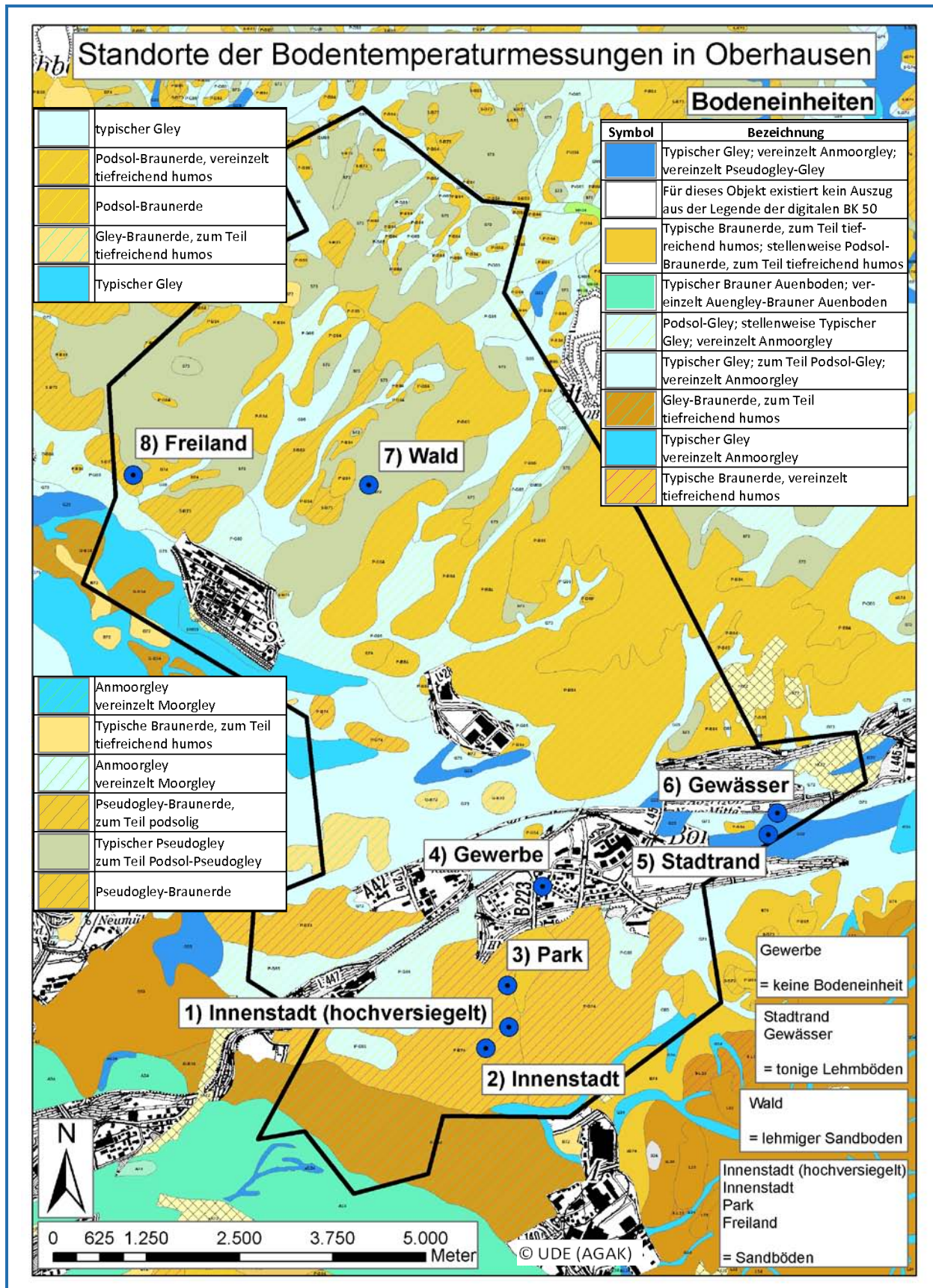
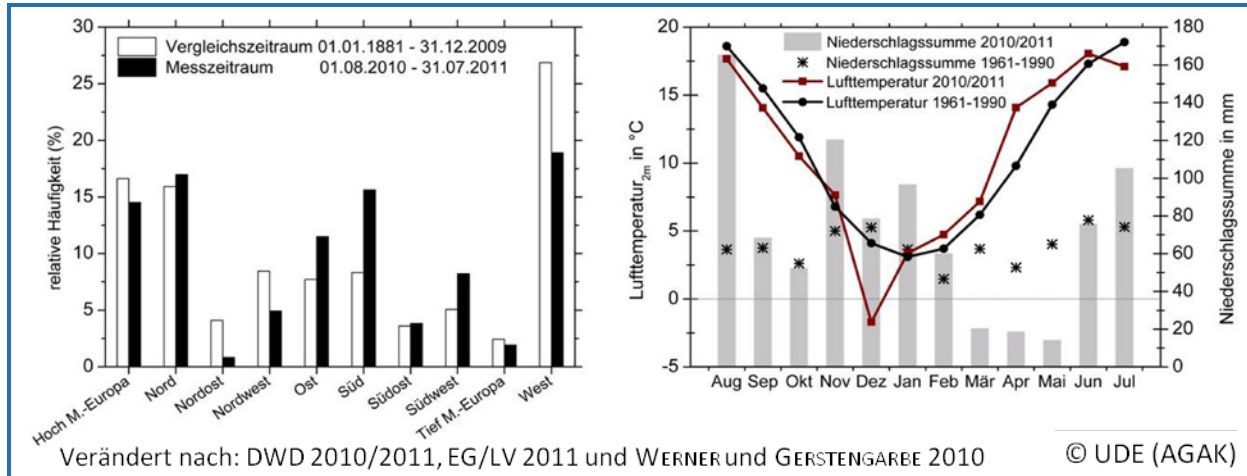


Abb. 2: Untersuchungsstandorte von A4.1.3 und Bodeneinheiten in Oberhausen auf Grundlage der BK 1:50.000 des Geologischen Dienstes NRW (IT.NRW 2011a)

### 3.2 Klimatische Repräsentanz des Messzeitraums

Die klimatische Repräsentanz des Messzeitraums wurde anhand der Monatsmittelwerte der Lufttemperatur und des Niederschlags sowie der Verteilung der Großwetterlagen (DWD 2010/11) im Vergleich zum langjährigen Mittel (WERNER und GERSTENGARBE 2010) untersucht (Abb. 3).



**Abb. 3:** links: Vergleich der Großwettertypen des langjährigen Vergleichszeitraums 01.01.1881 – 31.12.2009 (DWD 2010/11, WERNER und GERSTENGARBE 2010) mit den Großwettertypen des Messzeitraums 01.08.2010 – 31.07.2011 rechts: Vergleich der monatlichen Niederschlagssumme und der mittleren monatlichen Lufttemperatur der Referenzperiode 1961 – 1990 mit den Werten aus der vorliegenden Untersuchung (Temperaturdaten der Station Duisburg-Laar (DWD 2011) im Vergleich zu Lufttemperaturwerten gemessen in 3,3 m ü. Gr. Am Stadtrand von Oberhausen (Station 5); Niederschlagsdaten der Station Oberhausen-Buschhausen für den Messzeitraum und die Referenzperiode (EG/LV 2011))

Der Vergleich der Monatsmittelwerte der Lufttemperatur des Messzeitraums mit der langjährigen Referenzperiode (1961-1990) erfolgte am Stadtrand (Station 5) und der Station Duisburg-Laar (DWD), da beide Stationen eine ähnliche Bbauungs- und Grünflächenstruktur aufweisen. Die mittlere monatliche Lufttemperatur zeigt nur geringe Abweichungen vom langjährigen Mittelwert. Auffallend sind jedoch der überaus kalte und schneereiche Dezember 2010 (ca. – 5 K im Vergleich zur Periode 1961-1990) und der warme April 2011 (+ 5 K).

Da im Messnetz der Niederschlag nicht an einer eigenen Station erfasst wurde, erfolgte der Vergleich der langjährigen Messstation (Duisburg-Laar, DWD) mit der Station Oberhausen-Buschhausen der Emschergerossenschaft. Die Daten dieser Station wurden auch in 4.5 zur Auswertung der Bodenfeuchte verwendet. Die Untersuchungsperiode ist durch einen überdurchschnittlich feuchten August (166 mm = 267 % der langjährigen monatlichen Niederschlagssumme) und November 2010 (121 mm = 168 %) sowie eine sehr trockene Episode im März (21 mm = 34 %), April (19 mm = 36 %) und Mai 2011 (14 mm = 22 %) geprägt. Die registrierte Niederschlagssumme in den Monaten August und November 2010 übertraf die absoluten Niederschlagsmaxima zwischen 1961 und 1990 in diesen Monaten (August: 130 mm, 1968; November: 113,1 mm, 1977). Dementgegen lag die Niederschlagssumme im März 2011 unter dem absoluten Minimum von 22,1 mm (1973). Der Niederschlag im Monat Dezember fiel weitestgehend in fester Form (Schnee). Auf Grund der niedrigen Temperaturen blieb die Schneedecke lange erhalten und beeinflusste den Bodenwärmehaushalt.

Im Vergleich der Großwettertypen zeigt sich, dass einerseits die für die mittleren Breiten typische Westlage sowie die Nordost- und Nordwestlagen reduziert, andererseits Wetterlagen mit Südkomponente vermehrt auftraten. Alle übrigen Wettertypen entsprachen weitestgehend dem langjährigen Durchschnitt. Die Ausprägung von stabilen Hochdruckwetterlagen vor allem im Frühjahr 2011 hatte außergewöhnlich trockenes und warmes Wetter zu Folge, wie auch im Vergleich der Temperatur- und Niederschlagswerte ersichtlich wird (Abb. 3 rechts).

Durch die nur einjährige Messperiode sind die aufgezeigten Abweichungen im Auftreten der Großwettertypen gegenüber dem langjährigen Mittel nicht ungewöhnlich. Die für stadtklimatische Fragestellungen wichtigen austauscharmen Wetterlagen traten im Messzeitraum in ausreichender Anzahl auf.

### 3.3 Messausrüstung und -aufbau

Die Messung der Bodentemperatur ( $t_B$ ) erfolgte an jedem Standort in allen Bodenhorizonten (BHz.) bis in die Tiefe der Trinkwasserleitung (maximal 195 cm). Der Bodenwärmestrom ( $Q_B$ ) wurde in 7,5 cm und 30 cm Tiefe gemessen, die Bodenfeuchte ( $\Theta$ ) bis in maximal 100 cm Tiefe (Tab. 3).

© UDE (AGAK)										
Standort	$t_B$ 1 cm	$t_B$ 10 cm	$t_B$ 15 cm	$t_B$ 30 cm	$t_B$ 45 cm	$t_B$ 70 cm	$t_B$ Trinkwasser- leitungsniveau (110 – 195 cm)	$t_{Schacht}$ (50 – 130 cm)	Bodenwärme- strom ( $Q_B$ ) (7,5 cm; 30 cm)	Bodenfeuchte ( $\Theta$ ) (0 – 100 cm)
INHO (1) <sup>a, b</sup>					✓	✓	✓	✓		
INN (2)	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
PARK (3) <sup>a, c</sup>				✓		✓	✓	✓		
GEW (4) <sup>a, d</sup>			✓		✓	✓	✓	✓	✓	
STA (5)			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
WAS (6) <sup>a, e</sup>			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
WALD (7)			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
FREI (8)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

a) Temperaturmessungen in weiteren Tiefen, zur Erfassung aller im Profil auftretenden Horizonte <sup>b)</sup> weitere Tiefen:  $t_B$  55 cm,  $t_B$  125 cm <sup>c)</sup> weitere Tiefen:  $t_B$  85 cm <sup>d)</sup> weitere Tiefen:  $t_B$  125 cm <sup>e)</sup> weitere Tiefen:  $t_B$  58 cm

Tab. 3: Überblick über die Messensorik der einzelnen Untersuchungsstandorte in Oberhausen

Die Installation der Messsonden erfolgte von Trinkwasserschächten aus in den umgebenden Boden (Schematische Darstellung: Abb. 4). Dabei wurde in der entsprechenden Tiefe jeweils ein Loch durch die senkrechte Schachtwand gebohrt und eine Sonde (Pt 100, Fa. Friedrichs, Schenefeld) bis auf ca. 50 cm horizontalen Abstand zum Schacht eingebracht, wobei darauf geachtet wurde, dass die Sonden nicht direkt senkrecht übereinander eingebaut wurden.

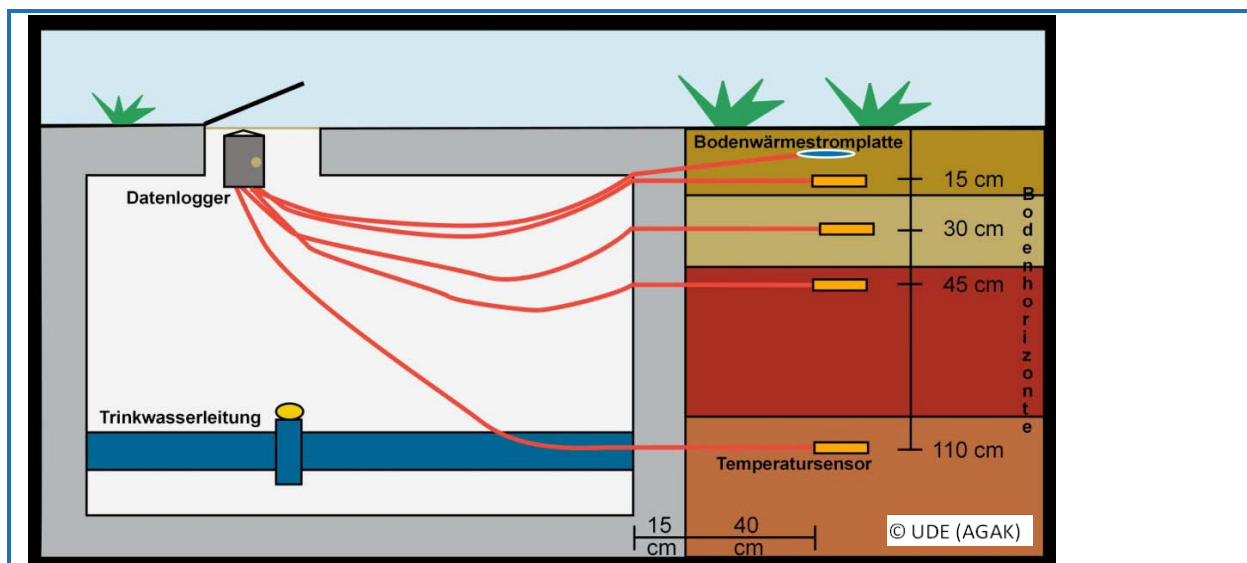


Abb. 4: Schematischer Überblick über den Bodentemperaturmessaufbau

Der tiefste Messpunkt wurde durch die Lage der Trinkwasserleitung bestimmt, die von Standort zu Standort variierte (INHO (Station 1): 110 cm, INN (Station 2): 145 cm, PARK (Station 3): 115 cm, GEW (Station 4): 195 cm, STA (Station 5): 115 cm, WAS (Station 6): 110 cm, WALD (Station 7): 115 cm, FREI (Station 8): 145 cm).

Der Bodenwärmestrom ( $Q_B$ ) wurde mittels Wärmeflussplatten (HFP01, Fa. Hukseflux, Delft, NL) an den vier Standorten Park (Station 3), Gewerbe (Station 4), Stadtrand (Station 5) und Gewässer (Station 6) jeweils in 7,5 cm Tiefe gemessen, an den Stationen 2 (Innenstadt) und 8 (Freiland) hingegen in 30 cm Tiefe erfasst. Aus den dort zusätzlich durchgeführten Temperaturmessungen (1 cm, 10 cm), der Lagerungsdichte ( $d_B$ ) sowie der Bodenfeuchte wurde der thermische Speicherterm ( $Q_S$ ) für die Bodenschicht zwischen 0 und 30 cm berechnet und die in 30 cm Tiefe gemessenen Wärmeflussdichten zu  $Q_{B \text{ Erdoberfläche}}$  ergänzt. Dieser Wert spiegelt realistischer den oberflächennahen Bodenwärmestrom wider als Messungen in 7,5 cm Tiefe, konnte aber auf Grund der notwendigen umfangreichen Eingangsdaten nur exemplarisch für die oben genannten zwei Standorte ermittelt werden. Der Einbau der Platten erfolgte nach einem ähnlichen Konzept wie bei den Sonden. Die Daten der Bodentemperatursonden und der Bodenwärmestromplatten wurden als Dreiminutenmittelwerte gespeichert (Datenlogger, Fa. Friedrichs, Schenefeld), zu Stundenmittelwerten aggregiert und ganzjährig in Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) dargestellt.

Es ist zu erwähnen, dass auf Grund der teils schwierigen Standortbedingungen im Stadtgebiet sowie der Horizontverteilung in den Profilen nicht an allen Standorten in identischen Tiefen gemessen werden konnte. Die automatisierten Messungen des Bodenwärmestroms begannen auf Grund eines Methodenwechsels ca. Mitte September 2010. Fehlende Tiefen oder Zeiten wurden in der Auswertung dementsprechend nicht berücksichtigt.

Neben den bodenklimatischen Messungen lieferte ein oberirdisches Klimamessnetz an den gleichen Standorten die Parameter Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung, standortabhängig in drei bis vier Metern ü. Gr. (A4.3.2). An zwei weiteren Standorten (urban und suburban) erfolgte in A4.3.1 die Messung der Evapotranspiration (Gebietsverdunstung) mittels Eddy-Kovarianz-Methode.

### 3.4 Bodenphysikalische Untersuchungen

Zur Erfassung der Bodenhorizonte wurden Rammkernsondierungen durchgeführt ([www.uni-muenster.de](http://www.uni-muenster.de)). Die Erfassung der Bodenfeuchte erfolgte wöchentlich an den Standorten INN (Station 2) und FREI (Station 8) durch Probennahme mit einem Pürckhauer-Bohrer in unmittelbarer Nähe zum Schacht und Analyse im Labor gemäß DIN 19671-1 (DIN 1964). Dieses Verfahren gilt nach FOKEN (2006) als die genaueste Methode, die Bodenfeuchte zu bestimmen. Die Lagerungsdichte wurde in Anlehnung an DIN 18125 (DIN 2010) mit Stechzylindern von 100 cm<sup>3</sup> Volumen und mit einer Stichprobenzahl von je sechs pro Horizont und anschließender Mittelwertbildung für alle Horizonte im obersten Meter der Böden bestimmt (Tab. 2). Die Korngrößenanalyse wurde nach Köhn in Anlehnung an DIN 19683 (DIN 1973) und DIN ISO 11277 (DIN ISO 2002) durchgeführt.

Betrachtet man die standortspezifischen, relativen Verteilungen der Korngrößenfraktionen, so fallen die hohen Schluff-Anteile an den Horizonten BHz. 1 und BHz. 2 des Gewerbestandortes (Station 4) (ca. 50 %) sowie die hohen Tonanteile im BHz. 4 des Standortes Wald (Station 7) und im BHz. 3 des Standortes Freiland (Station 8) (jeweils knapp 30 %) auf (Abb. 5 und Abb. 6).

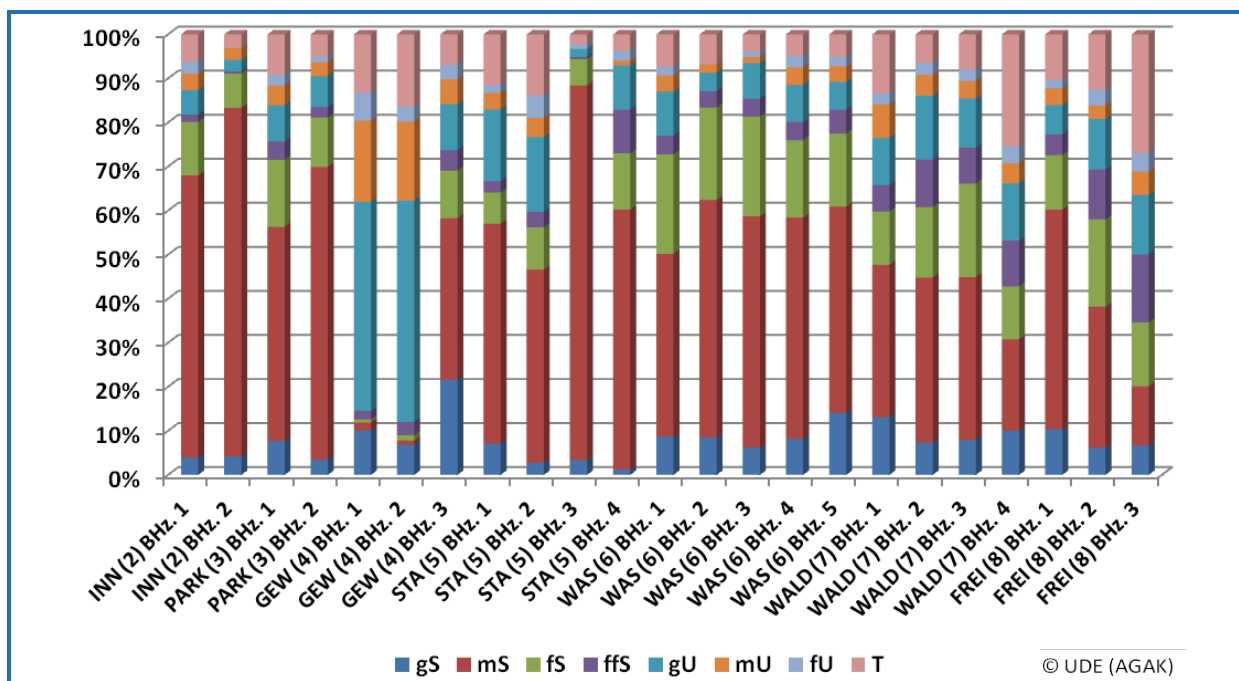


Abb. 5: Prozentualer Anteil der Korngrößenfraktionen (T = Ton, fU = Feinschluff, mU = Mittelschluff, gU = Grobschluff, ffs = Feinstsand, fs= Feinsand, mS = Mittelsand, gS = Grobsand) für jeden Horizont der untersuchten Standorte in Oberhausen (INN (Station 2), PARK (Station 3), GEW (Station 4), STA (Station 5), WAS (Station 6), WALD (Station 7) und FREI (Station 8))

Die genannten Horizonte des Standorts Gewerbe (Station 4) weisen mit Abstand die höchsten Grob- und Mittelschluffanteile aller Horizonte auf. Dies entspringt der Tatsache, dass es sich um einen im Rahmen einer Sanierungsmaßnahme künstlich angelegten Boden handelt, dessen Aufbau und Zusammensetzung anthropogen ist.

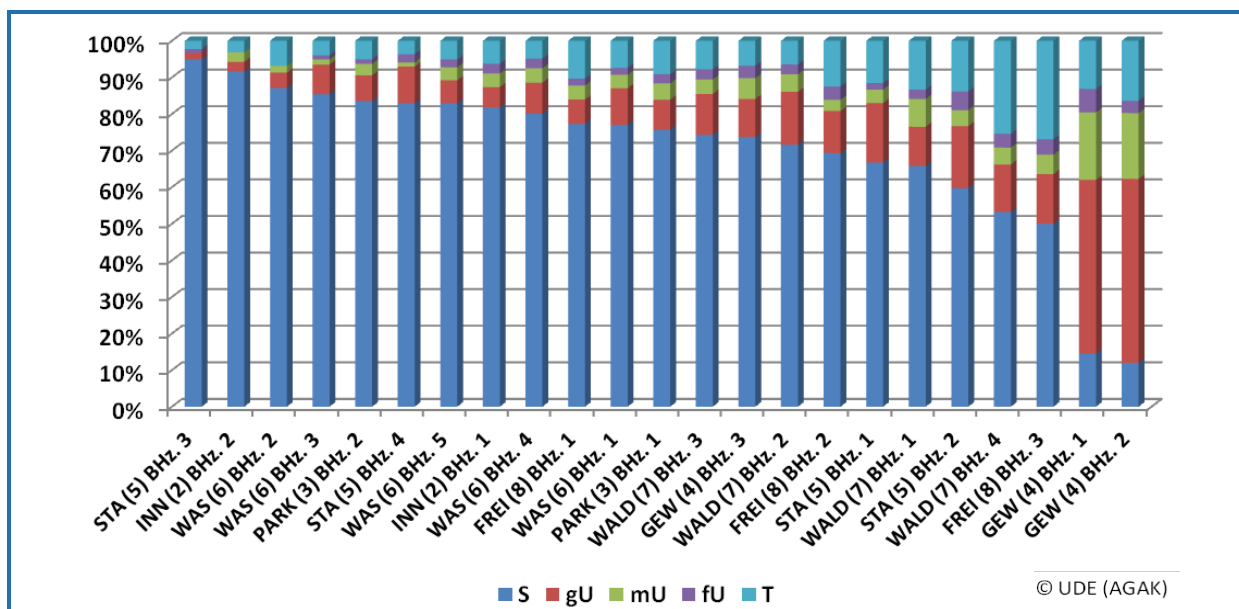


Abb. 6: Prozentualer Anteil der Korngrößenfraktionen (Sand (S), Grobschluff (gU), Mittelschluff (mU), Feinschluff (fU), Ton (T)) für jeden Horizont der untersuchten Standorte in Oberhausen (INN (Station 2), PARK (Station 3), GEW (Station 4), STA (Station 5), WAS (Station 6), WALD (Station 7) und FREI (Station 8)). Alle Sandfraktionen zusammengefasst und nach abnehmendem Sandgehalt sortiert

Beim Feinschluff tritt dieser Unterschied nicht mehr zu Tage. Der Horizont BHz. 1 des Standorts Gewerbe (Station 4) weist zwar den höchsten Feinschluffanteil aller Horizonte auf (knapp 20 %), aber

die Unterschiede zu anderen Horizonten sind nicht so eklatant und der Standort Gewerbe (Station 4) BHz. 2 und BHz. 3 folgen erst an siebter bzw. sechster Stelle.

Der Tongehalt an den Standorten Freiland (Station 8), BHz. 3 (Gr-Horizont) und Wald (Station 7), BHz. 4 (Swd-Horizont) beträgt über 25 %, so dass beide die Bodenart sandig toniger Lehm (Lts) aufweisen. Sie sind zusätzlich beide grundwasserbeeinflusst bzw. wasserstauender Natur.

Hohe Sandgehalte und gleichzeitig geringe Tongehalte (Abb. 6) treten vor allem bei den stark überformten Standorten 2 (Innenstadt) und 6 (Gewässer), horizontweise auch an den Messstationen 3 (Park) oder 5 (Stadttrand) auf. Tendenziell könnte man annehmen, dass mit einem höheren Überformungsgrad auch ein höherer Sandgehalt auftritt. Gewerbe (Station 4) als stark anthropogener, aber künstlicher Standort, fällt aus diesem Muster heraus.

Die Gesamtverteilung der Standorte im Körnungsdreieck konzentriert sich auf die Sand-Schluff-Ecke (Bodenarten S, Sl und Su) und ähnelt damit der typischen Verteilung von Böden aus Geschiebesand oder Geschiebemergel (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2009). Dieses Ergebnis steht in guter Übereinstimmung mit den Angaben der BK 1:50.000 NRW (IT.NRW 2011a), die für Oberhausen überwiegend Böden, die aus oben erwähntem Ausgangsgestein hervorgegangen sind, ausweist. Ausnahmen bezüglich der Einordnung im Körnungsdreieck bilden die oben erwähnten Horizonte Wald (Station 7) BHz. 4 und Freiland (Station 8) BHz. 3, sowie Gewerbe (Station 4) BHz. 1 und BHz. 2.

Der insgesamt relativ hohe Sandgehalt in den Oberhausener Böden (ca. 80 % der untersuchten Standorte weisen einen Sandgehalt von > 60 % auf) spiegelt ein eher schlechtes Wasserspeichervermögen und somit geringes Verdunstungspotenzial wider.

### 3.5 Datenverfügbarkeit und Gap Filling

Die Datenverfügbarkeit ist an allen Standorten überwiegend sehr hoch (Tab. 4). Im Mittel für alle Standorte beträgt der Datenausfall der Stundenmittelwerte ca. 3 %, der der Tagesmittelwerte ca. 3,5 %. Da technikbedingte Datenausfälle nicht ganz zu vermeiden waren wurde, um einen vollständigen Datensatz zu erhalten, eine Interpolation der Datenlücken (Gap Filling) mittels Kreuzkorrelation vorgenommen: Die Gleichung der besten Korrelation zweier Tiefenstufen wurde zum Berechnen der fehlenden Werte genutzt. Die dabei erzielten Bestimmtheitsmaße sind mit  $r^2 > 0,98$  sehr gut und die Auswirkungen des Auffüllens auf die Datensätze wurde mittels Vergleich der NMBs (NMB = normalized mean bias) für den Jahresverlauf als sehr gering eingestuft.

© UDE (AGAK)	INHO (1)	INN (2)	PARK (3)	GEW (4)	STA (5)	WAS (6)	WALD (7)	FREI (8)	Mittel
$t_{B, \text{Tage}} + Q_{B, \text{Tage}}$	0,0	5,0	2,6	5,0	3,4	8,1	0,5	3,3	3,5
$t_{B, \text{Tage}}$	0,0	5,1	1,6	4,9	3,7	7,9	0,3	3,3	3,4
$Q_{B, \text{Tage}}$		5,0		5,6	2,8	9,1	2,2	3,8	4,8
$t_{B, \text{Stunden}} + Q_{B, \text{Stunden}}$	0,1	4,8	2,2	3,8	2,9	7,1	0,6	3,4	3,1
$t_{B, \text{Stunden}}$	0,1	4,9	1,3	3,8	3,3	7,0	0,2	3,4	3,0
$Q_{B, \text{Stunden}}$		4,7		4,3	2,2	7,9	2,5	3,8	4,2

Tab. 4: Überblick über Datenausfälle in Prozent des Messjahres, aufgeschlüsselt nach Tagen und Stunden sowie Temperatur- und Bodenwärmestrommessungen an allen Untersuchungsstandorten in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011

## 4 Ergebnisse des Bodentemperaturmessnetzes

### 4.1 Auswertung der Bodentemperaturen – Profilmittelwerte

Aufgrund der großen Anzahl an Bodentemperaturmessungen an verschiedenen Standorten und in unterschiedlichen Tiefen ist es sinnvoll, sich durch Mittelwertbildung und die einhergehende Reduzierung auf einen Wert je Profil einen Überblick zu verschaffen. So werden die Betrachtung der Verhältnisse der Standorte zueinander und die Abschätzung der Größenordnung der thermischen Verhältnisse möglich. (Berechnungsmethode: Jede Sonde repräsentiert, abhängig von der Entfernung zur nächsten Sonde, eine unterschiedlich mächtige Bodenschicht. Die Werte aller Sonden eines Profils werden gemittelt, wobei die Mächtigkeit der Schicht als Gewichtungsfaktor eingeht). Die Auswertungen erfolgen von Jahresmitteln über Jahreszeitenmitteln bis hin zu Monatsmitteln (grob zu fein). Auf die Temperaturen in spezifischen Tiefen, besonders in Tiefe der Trinkwasserleitungen, wird in einem eigenen Unterkapitel eingegangen.

#### 4.1.1 Überblick über das thermische Verhalten der Standorte im Messzeitraum anhand von Profilmittelwerten und -mittelwerten

Einen Überblick über die mittleren Bodenprofiltemperaturen (Mittel aller Sonden eines Profils, s. o.) gibt Abb. 7. Darin lassen sich zum einen der typische Jahresgang (sinusförmig), zum anderen die absoluten Temperaturen der Profile erkennen. Desweiteren ist die Wetterlagenabhängigkeit der Bodentemperaturen zu sehen. Die Temperaturen erreichen in allen Profilen im August 2010 ihr Maximum, fallen zu den Wintermonaten ab, erreichen im Winter 2010/2011 die niedrigsten Werte und steigen ab März 2011 wieder deutlich an. Dabei erreicht der Standort 1 (Innenstadt (hochversiegelt)) Profilmittelwerte bis maximal 25 °C bei einer winterlichen Abkühlung auf ca. 3 °C. Der Wald (Station 7) als insgesamt kühler Standort erreicht nur sommerliche Maximalwerte von knapp 16 °C und winterliche Minimumtemperaturen von knapp 5 °C. Die sommerliche Spanne zwischen den Standorten beträgt somit fast 10 K, im Winter nur etwa 2 K.

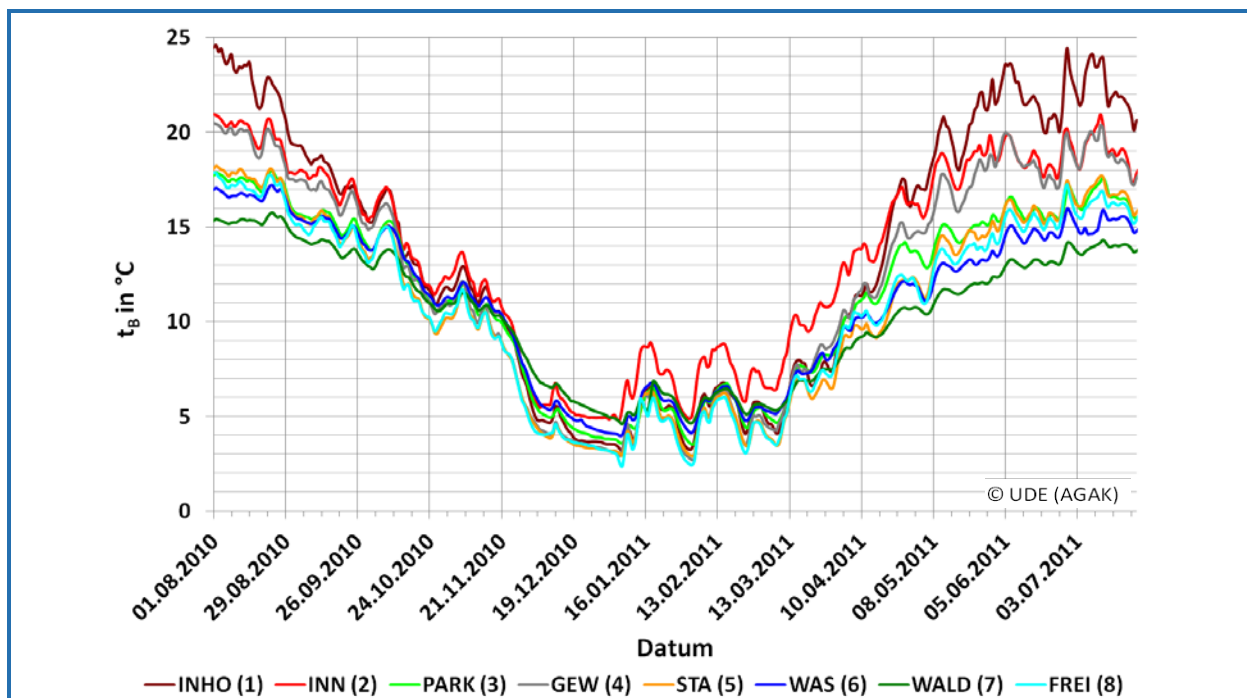


Abb. 7: Mittlere Bodenprofiltemperaturen in °C (gewichtetes Tagesmittel der Temperaturfühler) aller Standorte in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011



Der Standort Innenstadt (Station 2), der für diesen Vergleich nicht berücksichtigt wurde, erweist sich als Sonderfall, da dieser in den Wintermonaten nicht die gleiche Abkühlung wie die übrigen Standorte erfährt. Dessen winterlichen Temperaturen liegen zwischen 5 und 9 °C, die der übrigen Standorte zwischen 3 und 7 °C (Versatz von ca. 2 K). Verantwortlich für die vergleichsweise hohen Temperaturen ist die Nähe zu einer Fernwärmeleitung (Entfernung ca. 1 m). Da die Nähe von Trinkwasserleitungen zu Fernwärmeleitungen auch an anderen Stellen in der Stadt gegeben sein dürfte, bedarf dieser Umstand der weiteren Untersuchung.

Der Einfluss der Witterung zeigt sich sehr deutlich im Winter, als Schnee- und Frostperioden sich mit wärmeren Phasen abwechselten, aber auch im restlichen Jahr in Form der lokalen Maxima und Minima der Kurven. Diese Abbildung ermöglicht auch eine thermische Differenzierung der Standorte und Klassifizierung in zwei Gruppen: einerseits die stark anthropogenen Standorte Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1), Innenstadt (Station 2) sowie Gewerbe (Station 4) und andererseits die weniger stark überformten bis eher natürlichen Standorte Park (Station 3), Stadtrand (Station 5), Gewässer (Station 6), Wald (Station 7) und Freiland (Station 8). Besonders ersichtlich werden die Unterschiede in den Sommermonaten; in den Wintermonaten hingegen findet eine typische thermische Annäherung der Standorte aneinander statt (PAGEL et al. 1993).

Die mittleren Bodentemperaturen im Untersuchungsgebiet liegen zwischen 13,6 °C (Station 1 (Innenstadt (hochversiegelt))) und 10,3 °C (Station 7 (Wald)), differieren somit um mehr als 3 K und zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Profilen (Tab. 5). Die anthropogenen Standorte sind am wärmsten, gefolgt vom Park (Station 3). Dieser liegt im Stadtkörper und ist mit weniger als einem Hektar Größe verhältnismäßig stark vom umgebenden Stadtkörper beeinflusst (KIESE 1988). Die höchsten Jahresamplituden verzeichnen die Standorte 1 (Innenstadt (hochversiegelt)) und 4 (Gewerbe) (10,9 K und 9,3 K) aufgrund ihrer materialbedingten starken sommerlichen Erwärmung aber auch vergleichsweise starken Abkühlung auf oder sogar unter das thermische Niveau der übrigen Standorte im Winter. Ein derartiges Temperaturverhalten anthropogener Standorte beobachtete auch PAGEL et al. (1993, s.o.) für Hannover und erklärte es durch eine höhere Ausstrahlung bei negativer Strahlungsbilanz und einen Wärmeabtransport mit dem Sickerwasser. Der Wald (Station 7) weist mit 5,6 K die kleinste Amplitude auf, was auf das Bestandsklima sowie einen relativ feuchten Boden zurückzuführen ist.

© UDE (AGAK)	INHO (1)	INN (2)	PARK (3)	GEW (4)	STA (5)	WAS (6)	WALD (7)	FREI (8)
$t_B$ Mittel, h-Mittel	13,6	13,4	11,3	12,1	10,8	10,9	10,3	10,6
$t_B$ max, h-Mittel	24,8	21,8	18,0	21,2	18,3	17,2	15,8	18,1
$t_B$ min, h-Mittel	2,9	4,6	3,5	2,7	2,9	3,9	4,5	2,2
$t_B$ Amplitude, h-Mittel	10,9	8,6	7,3	9,3	7,7	6,7	5,6	7,9

Tab. 5: Jahresmittelwerte, -maxima, -minima und –amplituden der über alle Messtiefen gemittelten Bodentemperatur in °C aller Profile in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2011 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte

#### 4.1.2 Detailbetrachtung des saisonalen thermischen Verhaltens der Standorte

Bei den betrachteten klimatologischen Jahreszeiten handelt es sich um Herbst 2010 (September, Oktober, November), Winter 2010/2011 (Dezember, Januar, Februar), Frühling 2011 (März, April, Mai) und Sommer 2011 (Juni, Juli, August). Um einen vollständigen Sommer zu betrachten, wurden Daten verwendet, die über die eigentliche Messperiode hinaus reichen.

Sehr vereinfacht betrachtet zeigt die Zusammenstellung der Jahreszeitenmittelwerte ein erwartungsgemäßes Bild. Abb. 8, Abb. 9 und Abb. 10 ist zu entnehmen, dass Mittelwerte, Maxima und Minima im Sommer die höchsten, im Winter die niedrigsten und im Herbst und Frühling dazwischen liegende Werte erreichen, die standortbedingt jedoch schwanken.

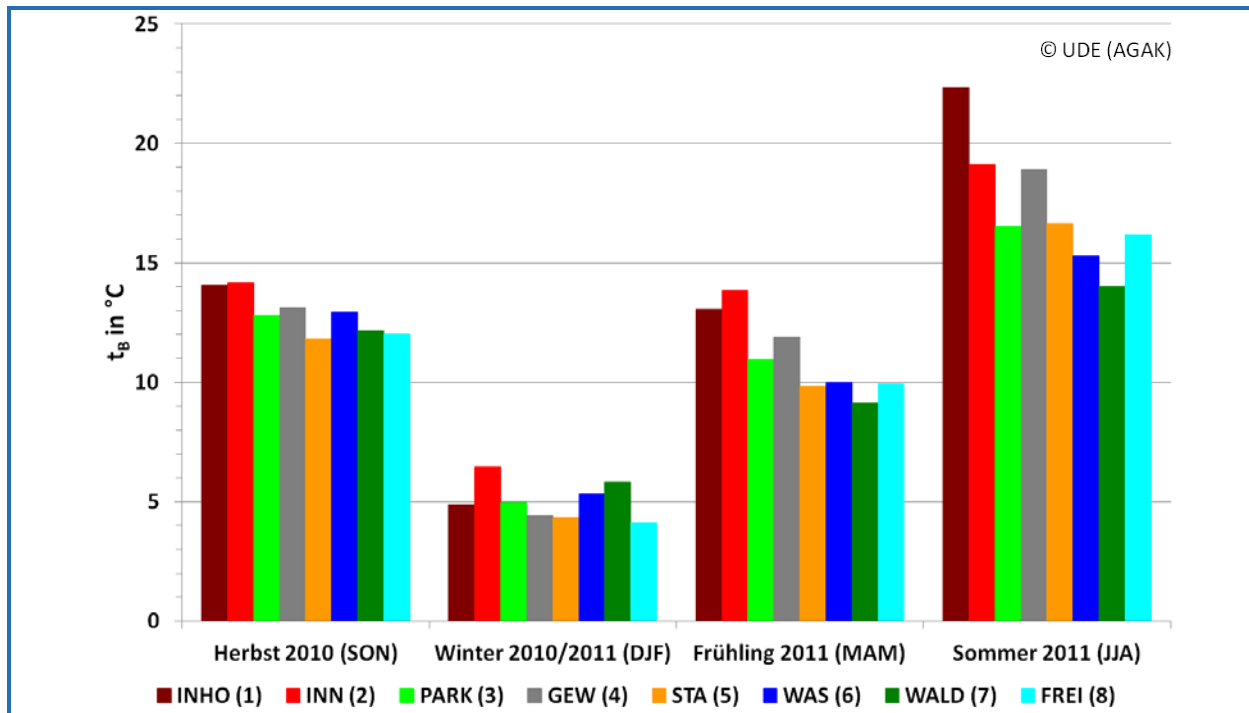


Abb. 8: Mittelwerte der über alle Messtiefen gemittelten Bodentemperatur in °C aller Profile in Oberhausen in vier aufeinanderfolgenden Jahreszeiten (Herbst 2010 bis Sommer 2011; 01.09.2010 – 31.08.2011; Stundenmittelwerte)

Im Sommer 2011 sind besonders große Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen bezüglich der Mittelwerte und Maxima festzustellen (< 10 K zwischen INHO (Station 1) und WALD (Station 7)), ebenso jedoch auch im Frühling 2011. Das Verhalten des Frühlings 2011 ist durch das frühe Auftreten einer Schönwetterperiode geprägt (siehe 3.2).

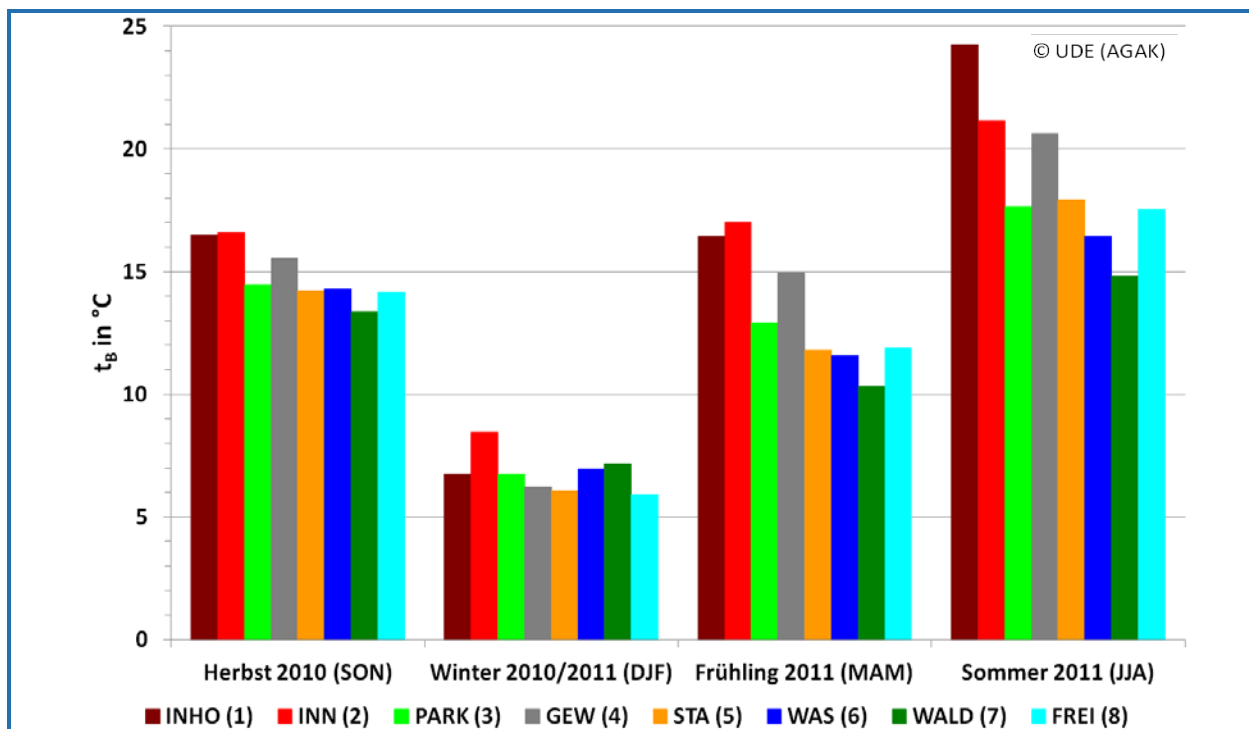


Abb. 9: Maxima der über alle Messtiefen gemittelten Bodentemperatur in °C aller Profile in Oberhausen in vier aufeinanderfolgenden Jahreszeiten (Herbst 2010 bis Sommer 2011; 01.09.2010 – 31.08.2011; Stundenmittelwerte)

Grundsätzlich gilt, dass sich während autochthoner Wetterlagen die thermischen und hygri-schen Bodeneigenschaften stark ausprägen. Dies führt zu besonders hohen Temperaturwerten an den anthropogenen Standorten INHO (Station 1), INN (Station 2) und GEW (Station 4). Im Frühling sind die Böden tendenziell (mit Ausnahme der anthropogenen Standorte) etwas kühler als im Herbst, was durch den typischen Temperaturverlauf von Böden zu erklären ist. Einer größeren Erwärmung im Frühjahr und Sommer folgt eine langsame und länger währende Abgabe der gespeicherten Wärme und Auskühlung bis zum Ende des Herbstes.

Die Auswertung der Minimumtemperaturen (Abb. 10) zeigt, dass (wiederum mit Ausnahme des fernwärmebeeinflussten Standortes INN (Station 2)), im Winter die höchsten Minimumtemperaturen von den Standorten Wald (Station 7) und Gewässer (Station 6) erzielt werden, bei insgesamt jedoch recht ähnlichen Werten aller Standorte (s.o.). Dies spricht für einen gemäßigten Temperaturgang auf Grund des relativ hohen Vegetations- bzw. Feuchteanteils. Im Sommer zeigen die anthropogenen Standorte die höchsten Minimumtemperaturen (zwischen 17 und 20 °C), was verdeutlicht, dass diese Standorte sich im Sommer nicht besonders abkühlen, sondern Hitze speichern.

Die absoluten Amplituden (Abb. 11) (berechnet aus  $t_{max, \text{Stundenmittel}}$  der betrachteten Jahreszeit und  $t_{min, \text{Stundenmittel}}$  der betrachteten Jahreszeit) sind zwischen den Jahreszeiten, besonders jedoch zwischen den Standorten in den vier Jahreszeiten sehr unterschiedlich stark ausgeprägt. Die höchsten Amplituden werden mit einer einzigen Ausnahme jeweils von den drei anthropogenen Standorten INHO (Station 1), INN (Station 2) und GEW (Station 4) erzielt (bis > 3 K). Sie sind in den Wechseljahreszeiten Herbst und Frühling höher als in den relativ homogenen Jahreszeiten Sommer und Winter. Während die Dreimonatsspanne SON von verhältnismäßig warm bis verhältnismäßig kalt, die Spanne MAM von verhältnismäßig kühl bis verhältnismäßig warm reicht, ist der Winter eher „nur“ kalt, der Sommer eher „nur“ warm.

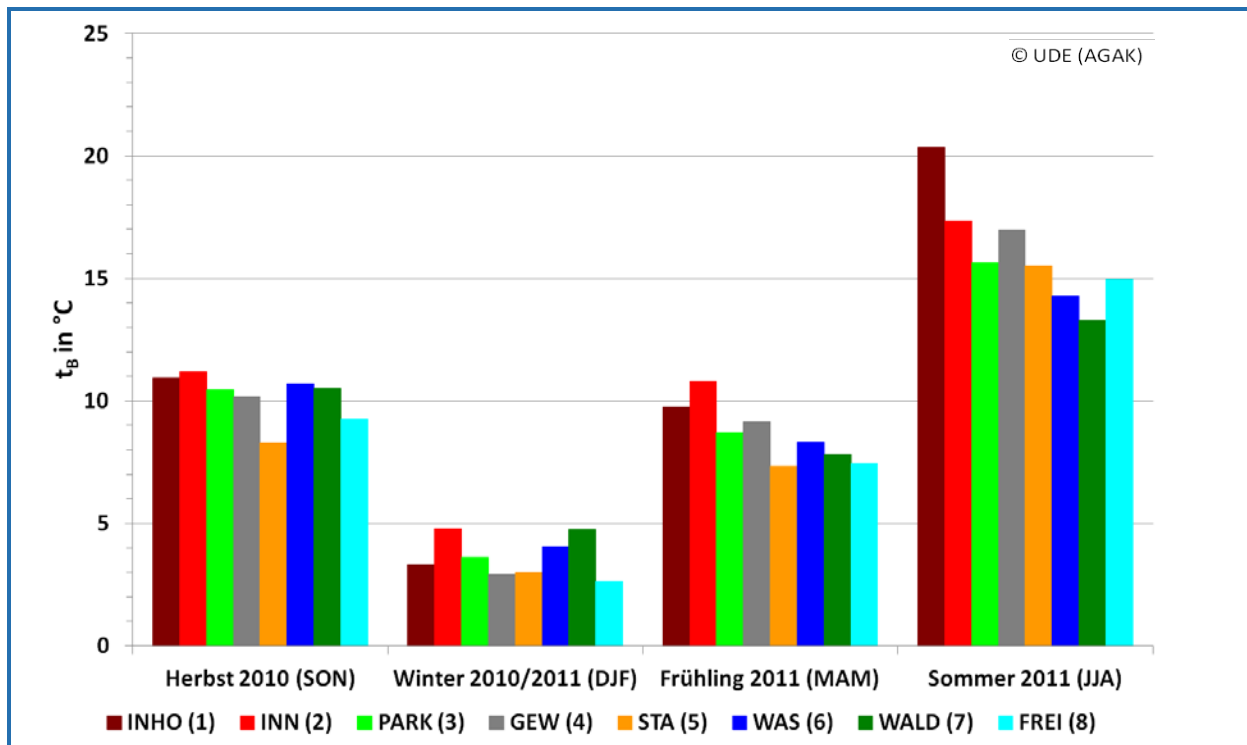


Abb. 10: Minima der über alle Messtiefen gemittelten Bodentemperatur in °C aller Profile in Oberhausen in vier aufeinanderfolgenden Jahreszeiten (Herbst 2010 bis Sommer 2011; 01.09.2010 – 31.08.2011; Stundenmittelwerte)

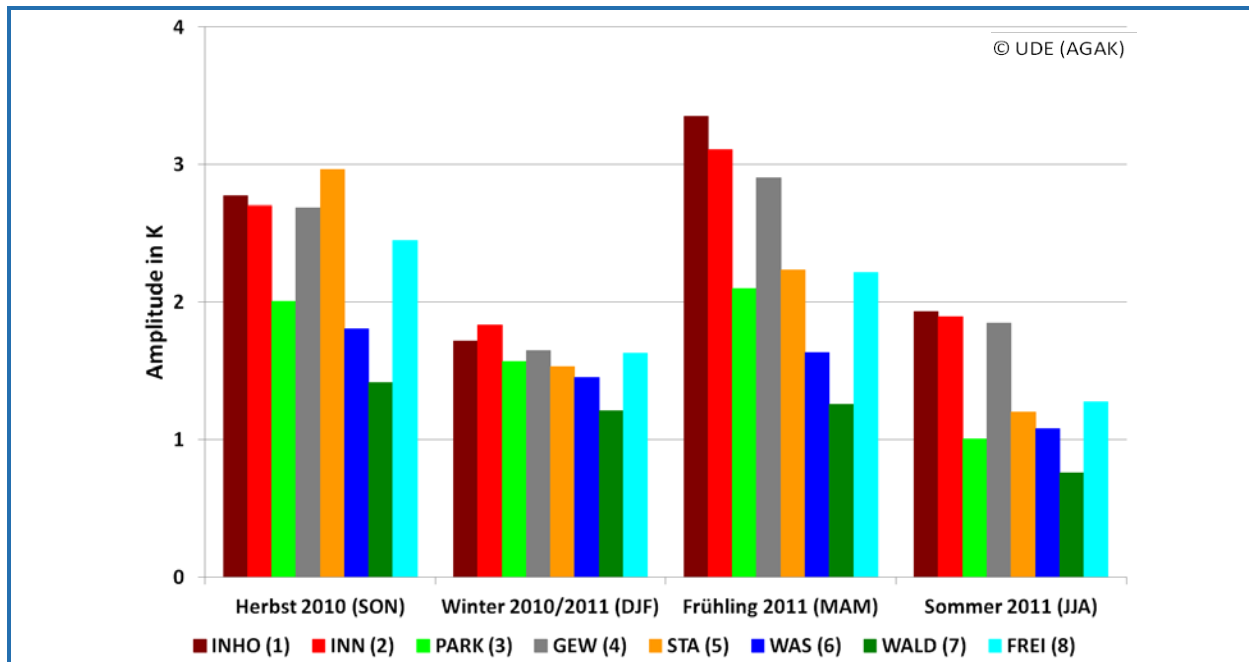


Abb. 11: Absolute Amplituden der über alle Messtiefen gemittelten Bodentemperatur in K aller Profile in Oberhausen in vier aufeinanderfolgenden Jahreszeiten (Herbst 2010 bis Sommer 2011; 01.09.2010 – 31.08.2011; berechnet aus dem maximalen und minimalen Stundenmittelwert der entsprechenden Jahreszeit)

#### 4.1.3 Detailbetrachtung des thermischen Verhaltens der Standorte im Messzeitraum, dargestellt anhand monatlicher Profilmittelwerte

Die Abbildungen Abb. 12 bis Abb. 15 illustrieren das thermische Verhalten der Profile im Monatsverlauf.

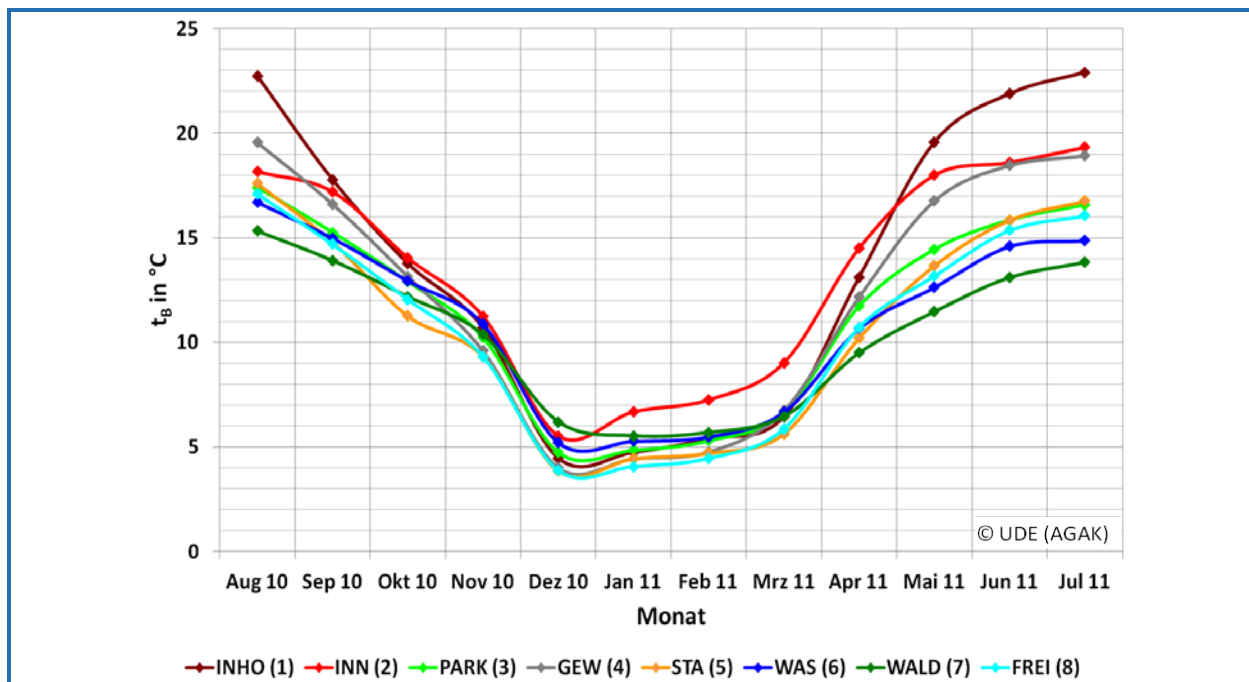


Abb. 12: Monatsmitteltemperaturen aller Profile in °C in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte

Die monatliche Darstellungsweise in Abb. 12 und den folgenden Abbildungen unterstreicht den bereits anhand von Abb. 7 geschilderten Verlauf der Tagesmittelwerte und präzisiert den oben dargestellten Jahreszeitenverlauf im Messzeitraum. Der annähernd sinusförmige Jahresverlauf wird erkennbar mit der durch Schnee verstärkten Stagnationsphase im Winter und dem frühjährlichen Anstieg der Temperaturen, der bei den anthropogenen Standorten sichtlich stärker erfolgt und zu Unterschieden von fast 10 K zwischen dem Standort 1 (Innenstadt (hochversiegelt)) und dem Standort 7 (Wald) im Juli 2011 führt.

Die Monatsmaxima (Abb. 13) zeigen ein ähnliches Bild, verdeutlichen jedoch eher einen markanten Temperaturabfall zwischen November und Dezember sowie den sprunghaft wirkenden Bodentemperaturanstieg ab März, vor allem an den anthropogenen Stationen.

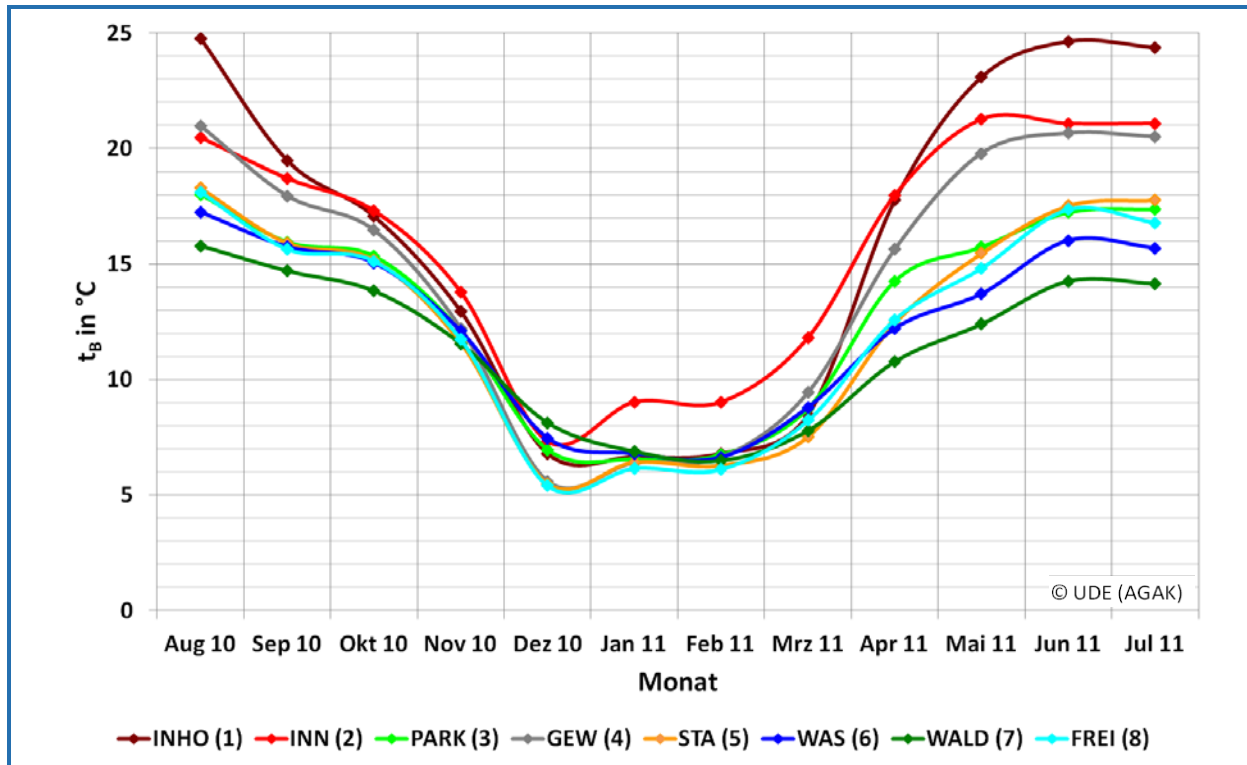


Abb. 13: Absolute Monatsmaxima aller Profile in °C in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte

An den Monatsminima (Abb. 14) ist zu erkennen (mit Ausnahme des Sonderfalles Innenstadt (Station 2), dass insbesondere an den Standorten Wald (Station 7), Gewässer (Station 6) und Park (Station 3) milde Wintertemperaturen aufgezeichnet werden, die über denen der Station 1 (Innenstadt (hochversiegelt) und der Station 4 (Gewerbe) liegen.

Abb. 15 zeigt die Saisonalität der Monatsamplituden (berechnet aus  $t_{\max, \text{Stundenmittel}}$  des jeweiligen Monats und  $t_{\min, \text{Stundenmittel}}$  des betrachteten Monats). In den Herbst- und Frühlingsmonaten werden die größten Amplituden erzielt, wenn die tags stattfindende Einstrahlung noch/schon stark ist, die nächtliche Abkühlung jedoch auch schon/noch stark ist. Dies ist der Zeitraum, in dem der Bodentemperaturstrom sein Vorzeichen wechselt und sich nicht mehr in den Boden sondern in die Atmosphäre richtet.

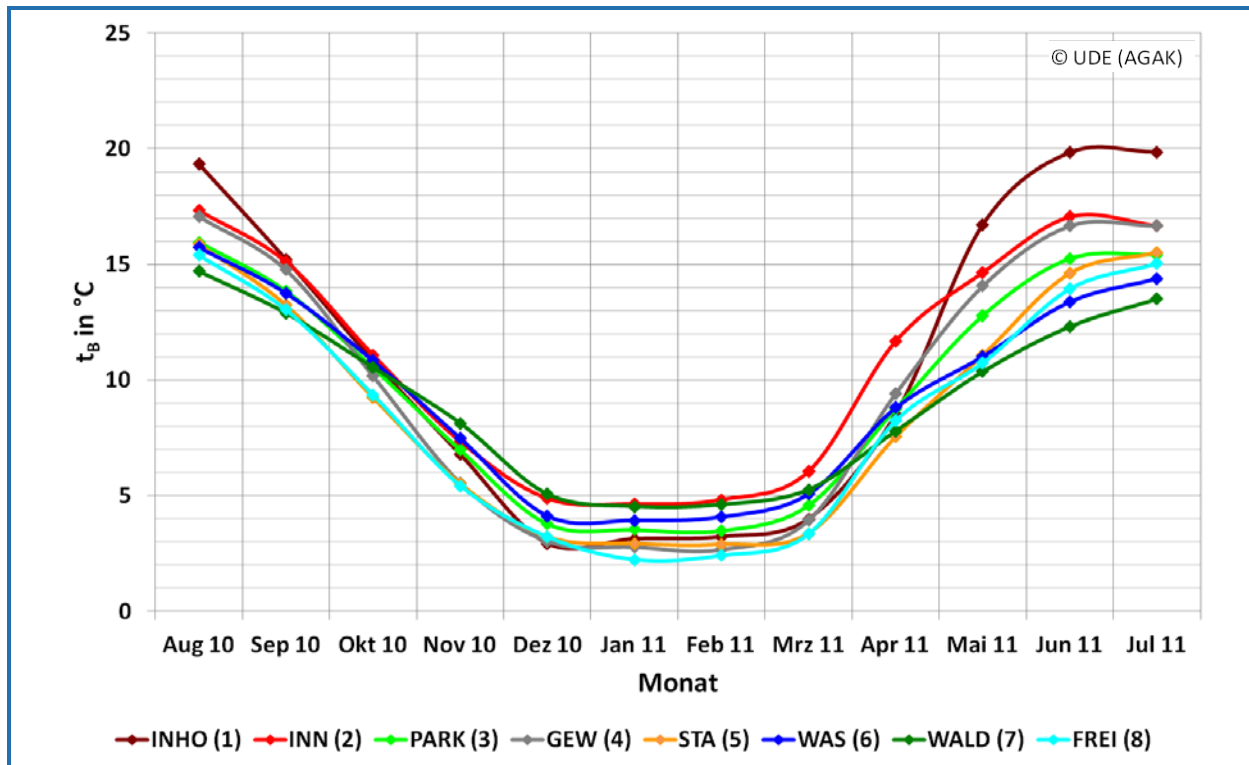


Abb. 14: Absolute Monatsminima aller Profile in °C in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte

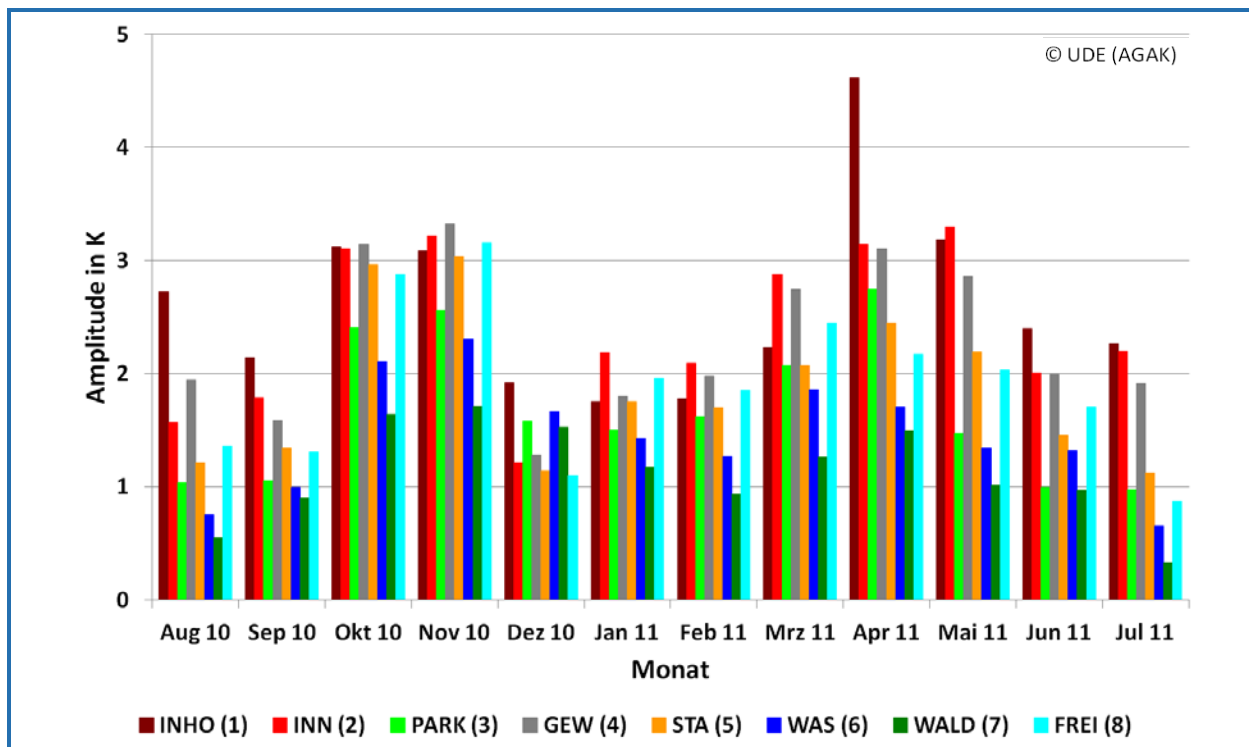


Abb. 15: Absolute Monatsamplituden aller Profile in K in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; berechnet aus dem maximalen und minimalen Stundenmittelwert des entsprechenden Monats

## 4.2 Auswertung der Bodentemperaturen – Vergleich ausgewählter Tiefenstufen

### 4.2.1 Thermische Differenzierung innerhalb der Profile anhand der Betrachtung statistischer Kennzahlen ausgewählter Tiefenstufen im Jahresmittel

Nachfolgend werden die Mittelwerte, Maxima, Minima und Amplituden ausgewählter Tiefenstufen zunächst im Jahresmittel, dann im Jahreszeitenmittel und schließlich im Monatsmittel dargestellt. Dabei ist zu bedenken, dass das Trinkwasserleitungsniveau (TWLN) an den acht Standorten unterschiedlich ist. Da ab 1 m Tiefe jedoch bereits kaum mehr mit tiefenabhängigen Änderungen zu rechnen ist, können die Messergebnisse aus der Tiefe des Trinkwasserleitungsniveaus vergleichend dargestellt werden. Bedingt durch die unterschiedlichen räumlichen Gegebenheiten konnte nicht an allen Standorten jede Tiefe erfasst werden, so dass der Vergleich teilweise auf weniger Standorte reduziert werden muss. Tendenziell lässt sich sagen, dass im Jahresmittel die Temperaturen von den höheren zu den tieferen Schichten, wenn auch nur geringfügig, zunehmen (Tab. 6). Eine Ausnahme bildet die Messstelle Wald (Station 7), wo nahezu Isothermie herrscht bzw. die Temperatur im Trinkwasserleitungsniveau niedriger ist, als in 15 cm. Tab. 6 zeigt ebenfalls die innerhalb der Profile auftretenden Temperaturspannen. So beträgt die Differenz zwischen dem Mittelwert in 15 cm und dem im Niveau der Trinkwasserleitung im Wald (Station 7) (115 cm), wie oben beschrieben, nur 0,2 K, am Stadtrand (Station 5) hingegen über 1 K. Die Innenstadt (Station 2) als Sonderfall zeigt ebenfalls Differenzen von größer 1 K.

© UDE (AGAK)	INHO (1)	INN (2)	PARK (3)	GEW (4)	STA (5)	WAS (6)	WALD (7)	FREI (8)
$t_B$ 15 cm		12,6		12,0	10,3	10,7	10,4	10,2
$t_B$ 30 cm			11,2		10,4	10,8	10,4	10,5
$t_B$ 45 cm	13,5	13,5		12,1	10,7	10,7	10,3	10,6
$t_B$ 70 cm	13,6	14,0	11,3	12,1	10,7	11,0	10,4	10,8
$t_B$ TWLN	13,7	14,5	11,6	12,1	11,2	11,2	10,2	10,8

Tab. 6: Jahresmittelwerte der Bodentemperatur aller Standorte in °C in ausgewählten Tiefen in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011.  $t_{B,TWLN}$ : INHO: 110 cm, INN: 145 cm, PARK: 115 cm, GEW: 195 cm, STA: 115 cm, WAS: 110 cm, WALD: 115 cm, FREI: 145 cm

An den Maximalwerten (Stundenmittel) (Tab. 7) ist zu erkennen, dass einerseits die Temperaturen von den tiefen zu den oberflächennahen Schichten zunehmen, andererseits, wie sehr sich die stark anthropogenen Standorte auch bis in größere Tiefen erwärmen.

© UDE (AGAK)	INHO (1)	INN (2)	PARK (3)	GEW (4)	STA (5)	WAS (6)	WALD (7)	FREI (8)
$t_B$ 15 cm		24,6		28,7	21,2	18,8	17,6	21,2
$t_B$ 30 cm			18,7		20,2	18,1	17,0	18,7
$t_B$ 45 cm	28,8	21,2		22,5	18,9	17,8	16,3	18,2
$t_B$ 70 cm	24,5	20,8	18,0	21,0	18,1	17,2	15,8	17,4
$t_B$ TWLN	23,6	19,9	17,3	18,5	17,8	16,2	14,5	16,4

Tab. 7: Absolute Temperaturmaxima aller Standorte in °C in ausgewählten Tiefen in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte.  $T_{B,TWLN}$ : INHO: 110 cm, INN: 145 cm, PARK: 115 cm, GEW: 195 cm, STA: 115 cm, WAS: 110 cm, WALD: 115 cm, FREI: 145 cm

So weist der Extremstandort Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1) mit einem Stundenmaximum von 23,6 °C in 110 cm Tiefe (TWLN) sogar höhere Bodentemperaturen auf, als die weniger anthropogenen Standorte Stadtrand (Station 5), Gewässer (Station 6), Wald (Station 7) und Freiland (Station 8)

auch in den wärmeren oberflächennahen Schichten. Einen besonders großen Unterschied innerhalb des Profils zeigt Standort 4 (Gewerbe)  $\Delta T_{15\text{ cm} - \text{TWLN}} > 10\text{ K}$ , ein besonders kleiner Unterschied liegt am Standort 6 (Gewässer) mit 2,6 K vor.

Die Stundenminima der Tiefenstufen zeigen ein den Maximaltemperaturen entgegengesetztes Verhalten und nehmen von oben nach unten zu (Tab. 8). Für fünf der acht Stationen findet im Trinkwasserleitungsniveau eine Abkühlung auf Temperaturen zwischen 4,5 °C und 5 °C statt. Ausnahmen bilden die durch die Fernwärmeleitung beeinflusste Station 2 (Innenstadt), Station 6 (Gewässer) als verhältnismäßig warme und Station 8 (Freiland) als verhältnismäßig kühle Station. Trotz des außergewöhnlich kalten Winters bleiben die Temperaturen im Bereich der Trinkwasserleitung über 3 °C und damit deutlich im positiven Wertebereich der Celsius-Skala.

© UDE (AGAK)	INHO (1)	INN (2)	PARK (3)	GEW (4)	STA (5)	WAS (6)	WALD (7)	FREI (8)
$t_{B\ 15\text{ cm}}$		2,3		0,4	0,5	2,1	2,7	0,3
$t_{B\ 30\text{ cm}}$			2,1		1,0	2,7	3,3	0,3
$t_{B\ 45\text{ cm}}$	1,6	4,7		1,6	2,0	3,1	3,9	2,0
$t_{B\ 70\text{ cm}}$	3,2	6,1	3,5	2,5	2,9	4,0	4,6	3,2
$t_{B\ \text{TWLN}}$	4,6	8,7	5,0	5,5	4,6	5,8	5,0	3,3

Tab. 8: Absolute Temperaturminima aller Standorte in °C in ausgewählten Tiefen in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte.  $T_{B\ \text{TWLN}}$ : INHO: 110 cm, INN: 145 cm, PARK: 115 cm, GEW: 195 cm, STA: 115 cm, WAS: 110 cm, WALD: 115 cm, FREI: 145 cm

Tab. 9 zeigt neben der absoluten Größe auch das typische Phänomen der sich mit der Tiefe abschwächenden Temperaturamplitude. Diese reduziert sich bei den Standorten Innenstadt (Station 2) und Gewerbe (Station 4) in der Tiefe der Trinkwasserleitung auf ca. 50 % des Wertes in 15 cm Tiefe; an den Standorten Stadtrand (Station 5), Gewässer (Station 6), Wald (Station 7) und Freiland (Station 8) liegt dieser Wert nur bei 63 %.

© UDE (AGAK)	INHO (1)	INN (2)	PARK (3)	GEW (4)	STA (5)	WAS (6)	WALD (7)	FREI (8)
$t_{B\ 15\text{ cm}}$		11,2		14,2	10,4	8,3	7,4	10,4
$t_{B\ 30\text{ cm}}$			8,3		9,6	7,7	6,9	9,2
$t_{B\ 45\text{ cm}}$	13,6	8,3		10,5	8,5	7,4	6,2	8,1
$t_{B\ 70\text{ cm}}$	10,6	7,4	7,2	9,2	7,6	6,6	5,6	7,1
$t_{B\ \text{TWLN}}$	9,5	5,6	6,2	6,5	6,6	5,2	4,7	6,5

Tab. 9: Absolute Jahrestemperaturamplituden aller Standorte in K in ausgewählten Tiefen in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; (berechnet aus  $t_{\text{max, Stundenmittel}}$  und  $t_{\text{min, Stundenmittel}}$ ).  $T_{B\ \text{TWLN}}$ : INHO: 110 cm, INN: 145 cm, PARK: 115 cm, GEW: 195 cm, STA: 115 cm, WAS: 110 cm, WALD: 115 cm, FREI: 145 cm

Abb. 16 zeigt exemplarisch für den Standort Stadtrand (Station 5) den Verlauf der Bodentemperatur im Messzeitraum in verschiedenen Tiefenstufen. Dieser Standort veranschaulicht das typische Verhalten eines Bodens mit dem oben beschriebenen charakteristischen Verhalten: Jahresamplitude, Wetterlagenabhängigkeit, höhere Bodentemperaturen in Oberflächennähe im Sommerhalbjahr, kühlere im Winterhalbjahr.

In Abb. 17 sind die Bodentemperaturen des Trinkwasserleitungsniveaus (standortabhängige Tiefen zwischen 110 und 195 cm) aufgetragen. Sehr deutlich wird erneut die Sonderrolle der Station Innenstadt (Station 2), die im Winter nur wenig abkühlt. Unter der Annahme, dass 20 °C Bodentemperatur eine kritische Marke für die Vermehrung trinkwasserhygienisch relevanter Mikroorganismen sei (VDI 2006), erweisen sich nur die Zeiträume August 2010 und Juni/Juli 2011 am Standort 1 (Innenstadt



(hochversiegelt)) als kritisch. Allein dort werden in einem Zeitraum von ca. 12 Wochen hohe Bodentemperaturen  $> 20\text{ °C}$  in der entsprechenden Tiefe erreicht. Es ist jedoch der Temperaturgradient zwischen Bodentemperatur und Wassertemperatur in der Leitung zu beachten um zu wissen, welches Medium welches in thermischer Hinsicht beeinflusst.

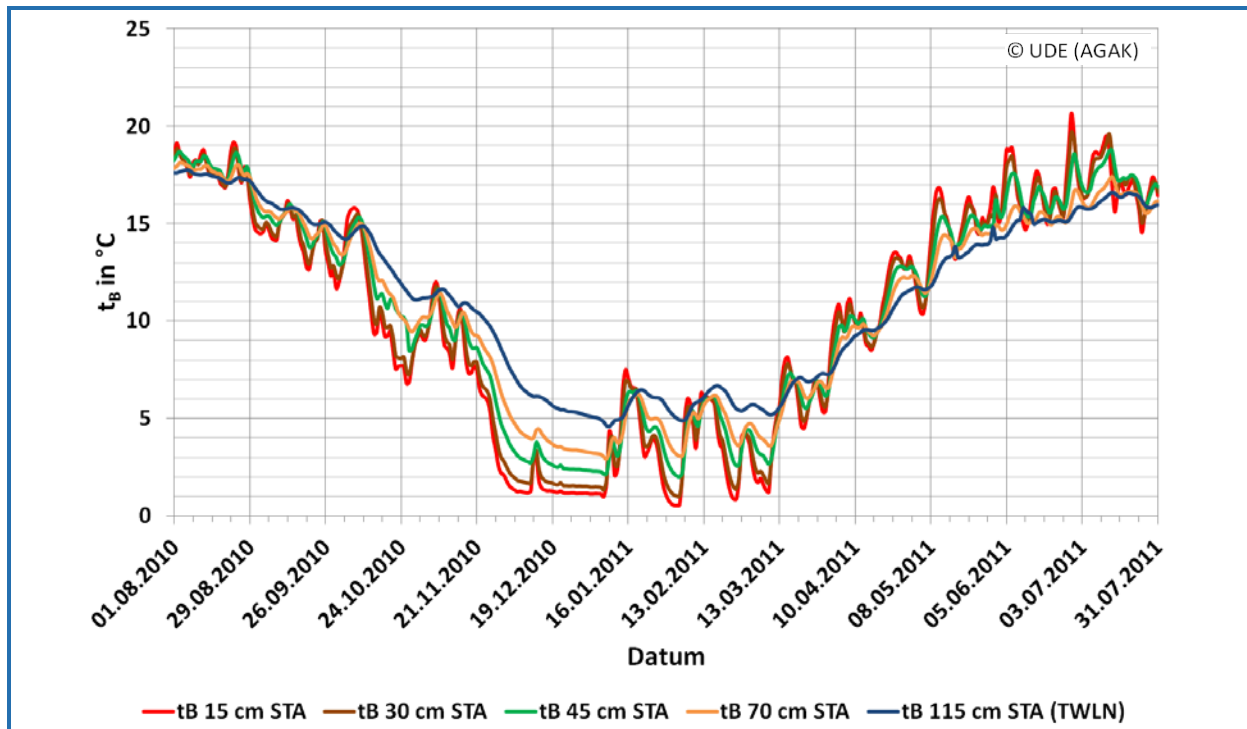


Abb. 16: Jahresgang der Bodentemperatur in  $^{\circ}\text{C}$  am Standort Stadtrand (Station 5), Oberhausen, in allen Tiefen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; Tagesmittelwerte

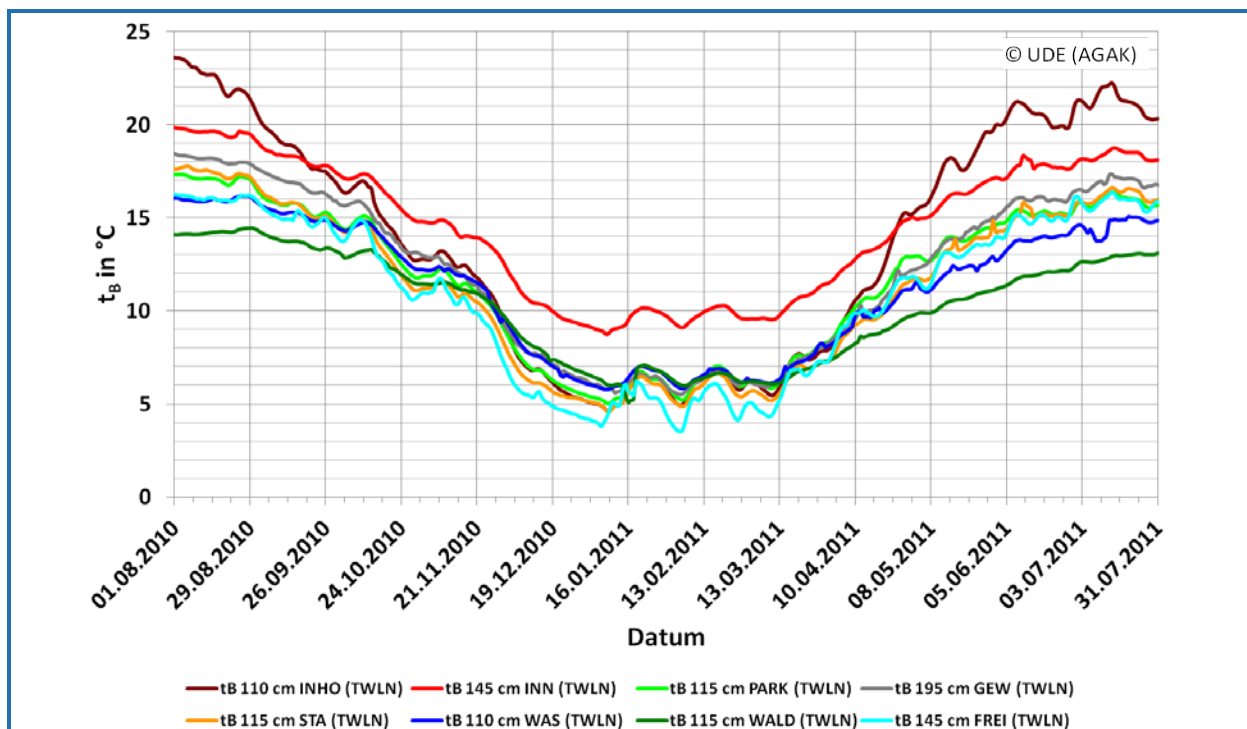


Abb. 17: Bodentemperaturen in  $^{\circ}\text{C}$  in Höhe des Trinkwasserleitungs-niveaus (verschiedene Tiefen zwischen 110 und 195 cm) in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; Tagesmittelwerte

Die Situation, dass Trinkwasserleitungen unter mehrere Dezimeter dicken Schichten aus Schotter, Asphalt oder Teer liegen, dürfte klimatopunabhängig allerdings in weiteren Bereichen der Stadt auftreten. Diese Gebiete weisen damit das höchste thermische Gefährdungspotential auf.

#### 4.2.2 Saisonale thermische Differenzierung innerhalb der Profile anhand der Betrachtung statistischer Kennzahlen ausgewählter Tiefenstufen

Tab. 10 zeigt exemplarisch die Jahreszeitenmittelwerte der Bodentemperaturen im Trinkwasserleitungsniveau. Das bereits grundsätzlich beschriebene Verhalten über die Jahreszeiten setzt sich auch in den einzelnen Tiefen fort: Der Winter ist am kältesten, der Sommer am wärmsten. Herbst und Frühling nehmen mittlere Positionen ein.

Die absoluten Werte zeigen eine weite Spannweite. Unter Nichtberücksichtigung des Standortes 2 (Innenstadt) ist die Temperaturdifferenz zwischen den Standorten im Winter am geringsten (1,8 K) im Sommer am höchsten (8,2 K).

Mittelwerte Trinkwasserleitungsniveau				
© UDE (AGAK)	SON	DJF	MAM	JJA
<b>INHO (1)</b>	15,2	6,1	12,1	21,0
<b>INN (2)</b>	16,2	9,9	13,2	18,2
<b>PARK (3)</b>	13,5	6,2	10,5	15,9
<b>GEW (4)</b>	14,3	6,6	10,3	16,8
<b>STA (5)</b>	13,1	5,8	9,7	16,0
<b>WAS (6)</b>	13,5	6,7	9,6	14,7
<b>WALD (7)</b>	12,4	6,8	8,6	12,9
<b>FREI (8)</b>	12,6	5,1	9,6	15,9

Tab. 10: Jahreszeitenmittelwerte der Bodentemperatur in °C aller Standorte in Oberhausen im Trinkwasserleitungsniveau (Herbst 2010 bis Sommer 2011; 01.09.2010 – 31.08.2011; Stundenmittelwerte)  $t_{B, TWLN}$ : INHO: 110 cm, INN: 145 cm, PARK: 115 cm, GEW: 195 cm, STA: 115 cm, WAS: 110 cm, WALD: 115 cm, FREI: 145 cm

Tab. 11 verdeutlicht am Beispiel des Standortes Freiland (Station 8) den mittleren Verlauf der Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen im Jahreszeitenverlauf. Die in 4.1 in Hinblick auf die Profilmittelwerte beschriebenen Verhaltensmuster (Sommer warm, Winter kalt etc.) finden sich wieder.

Mittelwerte Freiland (8)				
© UDE (AGAK)	SON	DJF	MAM	JJA
<b>t<sub>B</sub> 1 cm</b>	10,6	2,5	10,7	16,9
<b>t<sub>B</sub> 10 cm</b>	10,8	2,7	10,4	16,7
<b>t<sub>B</sub> 15 cm</b>	10,9	2,8	10,4	16,7
<b>t<sub>B</sub> 30 cm</b>	11,7	3,5	10,1	16,5
<b>t<sub>B</sub> 45 cm</b>	12,1	4,0	9,9	16,3
<b>t<sub>B</sub> 70 cm</b>	12,7	5,0	9,6	15,8
<b>t<sub>B</sub> 145 cm (TWLN)</b>	12,6	5,1	9,6	15,9

Tab. 11: Jahreszeitenmittelwerte der Bodentemperatur in °C der Station Freiland (Station 8) in allen Tiefen (Herbst 2010 bis Sommer 2011; 01.09.2010 – 31.08.2011; Stundenmittelwerte)

Zusätzlich wird ersichtlich, dass im Sommerhalbjahr (Frühling und Sommer) die Temperaturen von den höheren Bodenschichten zu den tieferen hin abnehmen, im Winterhalbjahr jedoch ein entgegengesetztes Verhalten vorherrscht. Bezüglich der Maxima zeigen Frühling und Sommer ebenfalls für alle Standorte eine Abnahme mit der Tiefe. In der anderen Jahreshälfte besteht kein einheitlicher Trend. Dem oben beschriebenen Trend der Jahresmittel ist ein synoptischer Einfluss überlagert: Nur gering in den Boden eindringende kurzfristige warme Phasen sorgen für eine Zunahme der Temperaturen in Oberflächennähe, so dass die geringsten Maxima in der Mitte der Profile auftreten. Die Minimumtemperaturen nehmen in den Jahreszeiten Herbst, Winter und Frühling mit zunehmender Tiefe zu und zeigen im Sommer ein uneinheitliches Bild.

#### 4.2.3 Thermische Differenzierung innerhalb der Profile anhand der Betrachtung statistischer Kennzahlen ausgewählter Tiefenstufen im Monatsmittel

Die monatweise Betrachtung des Temperaturverhaltens der einzelnen Tiefenstufen liefert ein genaueres Bild, als die Aggregation auf Jahreszeitenmittelwerte. Der Verlauf der Monatsmittelwerte zeigt grundsätzlich an allen Standorten ein ähnliches Verhalten, jedoch in unterschiedlichen Temperaturbereichen. In Abb. 18 ist exemplarisch dieses Verhalten für den Standort Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1) dargestellt.

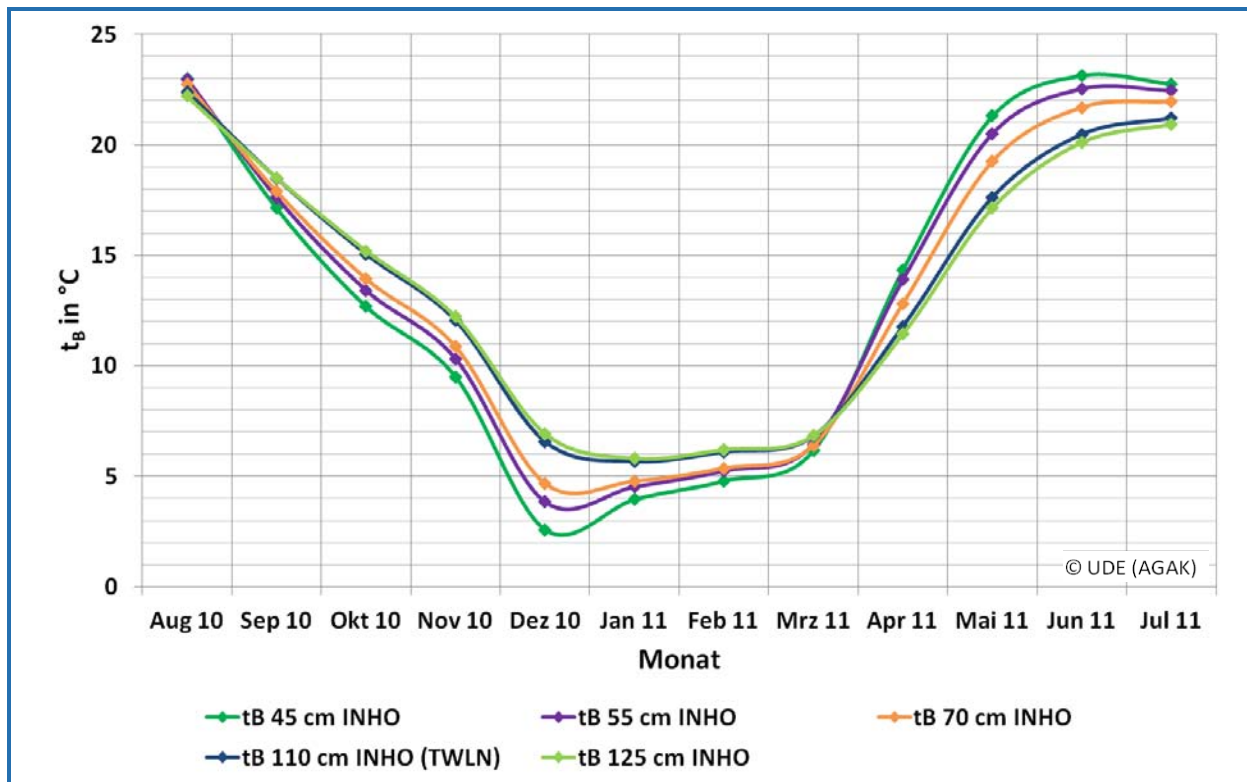


Abb. 18: Verlauf der Monatsmittelbodentemperaturen in °C in allen Tiefenstufen am Standort Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1) in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte

Vom Monat August 2010 bis zum Monat September 2010 findet eine Umkehr der Temperaturrangfolge statt: Im August weisen die einzelnen Tiefen mit zunehmender Oberflächennähe auch zunehmende Temperaturen auf, im September ist es entgegengesetzt. Von März 2011 bis April 2011 findet wiederum eine Umkehr statt – ab April sind die oberflächennahen Schichten erneut die wärmeren. Der beschriebene Richtungswechsel im Temperaturgradienten ist auch maßgeblich für die Richtung des Bodenwärmestroms. Einer etwas längeren Phase der Wärmeabgabe an die Atmosphäre (ca. 7 Monate) steht eine etwas kürzere Phase des Wärmegewinns des Bodens entgegen (ca. 5 Monate). Dies spiegelt sich auch im Jahresmittel der gemessenen Bodenwärmeströme wider, welches an allen

betrachteten Standorten eine leichte Wärmeabgabe des Bodens an die Atmosphäre zeigt (nicht dargestellt). Allen Standorten gemeinsam ist auch die starke Spreizung der Temperaturen im Dezember, sowie – jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt – eine deutliche frühjährliche Spreizung der Temperaturen im Mai.

Leicht versetzte Zeitpunkte der Umkehr des Temperaturgradienten zeigen Gewerbe (Station 4) (Umkehr des Temperaturgradienten bereits im März 2011) und Wald (Station 7) (erste Umkehr des Temperaturgradienten erst im September 2010, Rückumkehr bereits im März 2011).

### 4.3 Auswertung der Bodentemperaturen – diurnaler Temperaturverlauf

#### 4.3.1 Diurnaler Temperaturverlauf – ausgewählte Standorte und Tiefen

Der diurnale Verlauf der Bodentemperaturen innerhalb des Messzeitraums zeigt an den meisten Standorten, wie in Abb. 19 für den Wald (Station 7) dargestellt, ein sehr ausgeglichenes Bild. Es treten nur sehr kleine Amplituden auf, die Sommermaxima und Winterminima heben sich im Jahresverlauf fast vollständig auf und die Kurven der einzelnen Tiefenstufen schwanken um den Jahresmittelwert der Profile.

Im Vergleich der diurnalen Temperaturverläufe in 15 cm und 45 cm Tiefe zueinander ist zu sehen (Abb. 20 und Abb. 21), dass ein erkennbarer Tagesgang in 15 cm Tiefe stattfindet, in 45 cm Tiefe dieser jedoch für die meisten Standorte kaum mehr zu beobachten ist.

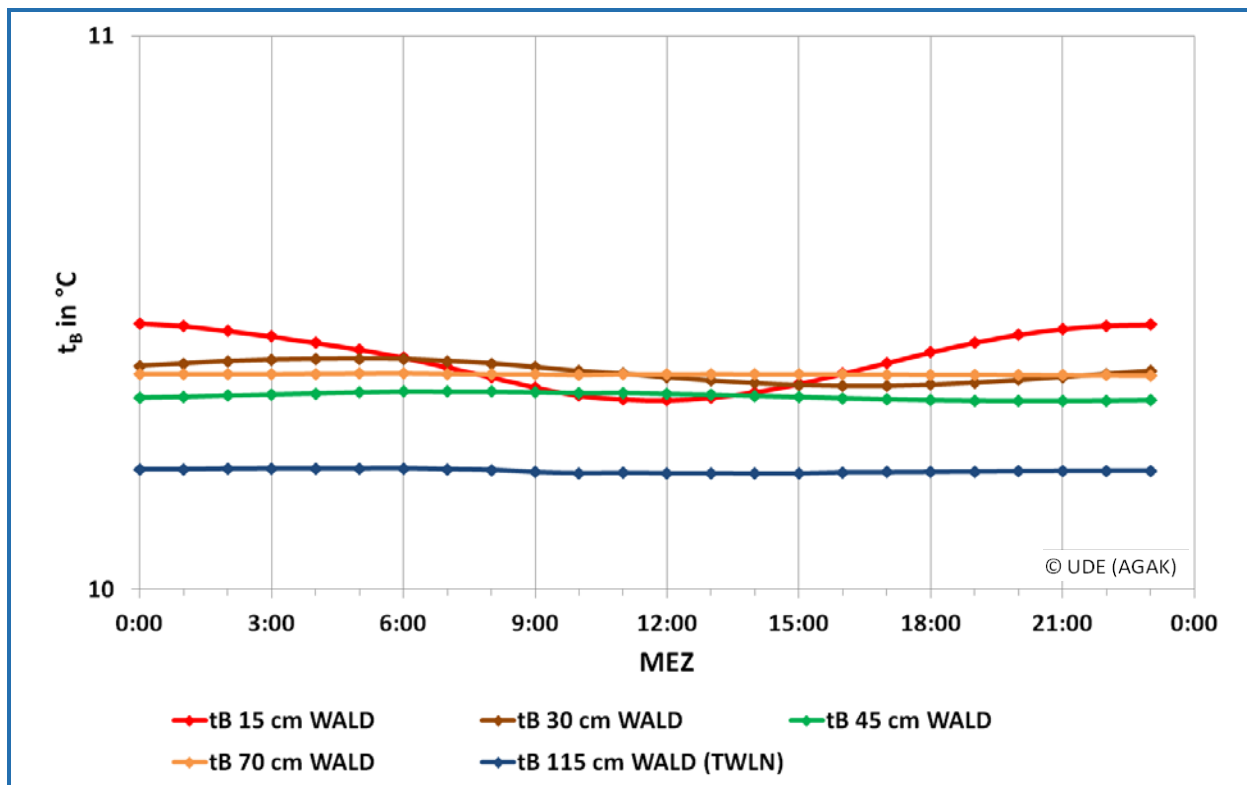


Abb. 19: Mittlerer diurnaler Bodentemperaturverlauf in °C am Standort Wald (Station 7) in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte

Abb. 21 zeigt zusätzlich die Rangfolge der Erwärmung der Standorte in entsprechender Tiefe: beide Innenstadtstandorte (Stationen 1 und 2) unterscheiden sich wenig und sind am wärmsten, gefolgt von Gewerbe (Station 4), Park (Station 3), Wasser (Station 6), Stadtrand (Station 5) und Freiland (Station 8). Der Standort Wald (Station 7) befindet sich auf dem letzten Platz.

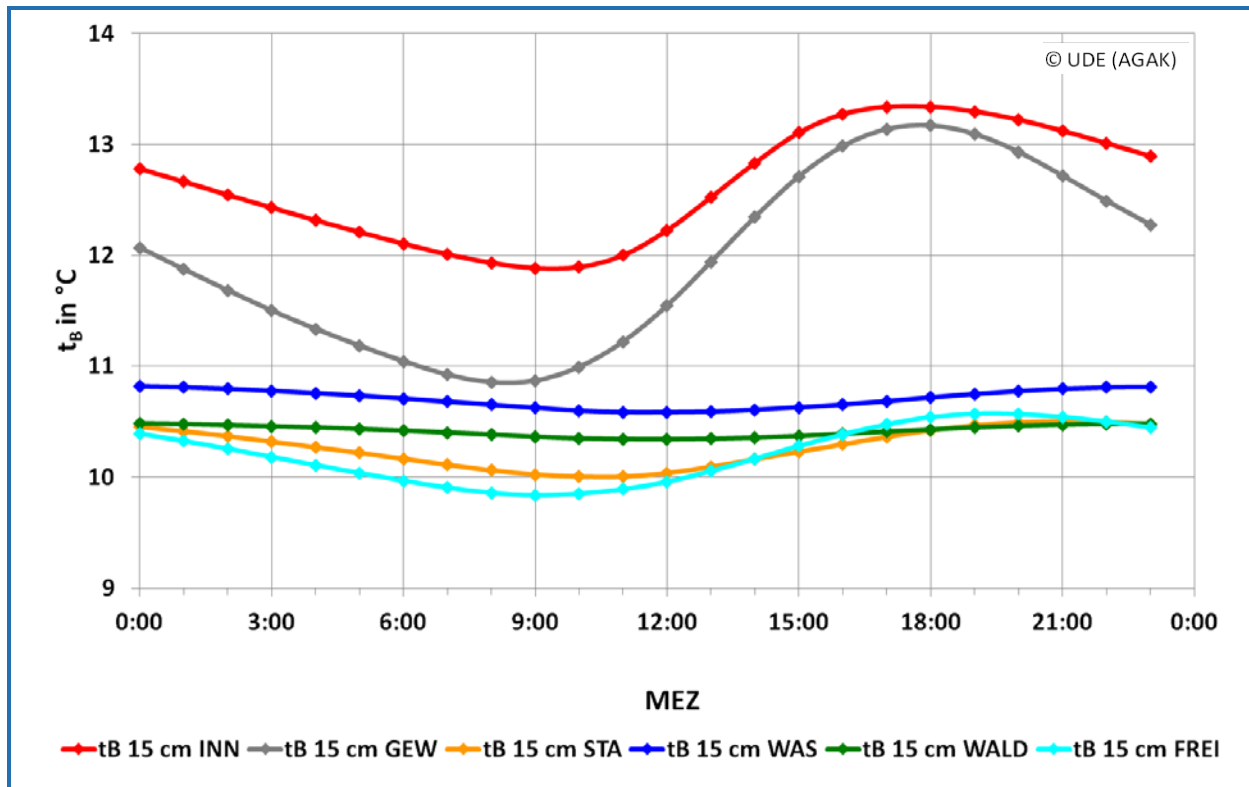


Abb. 20: Mittlerer diurnaler Bodentemperaturverlauf in °C an sechs Standorten in 15 cm Tiefe in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte

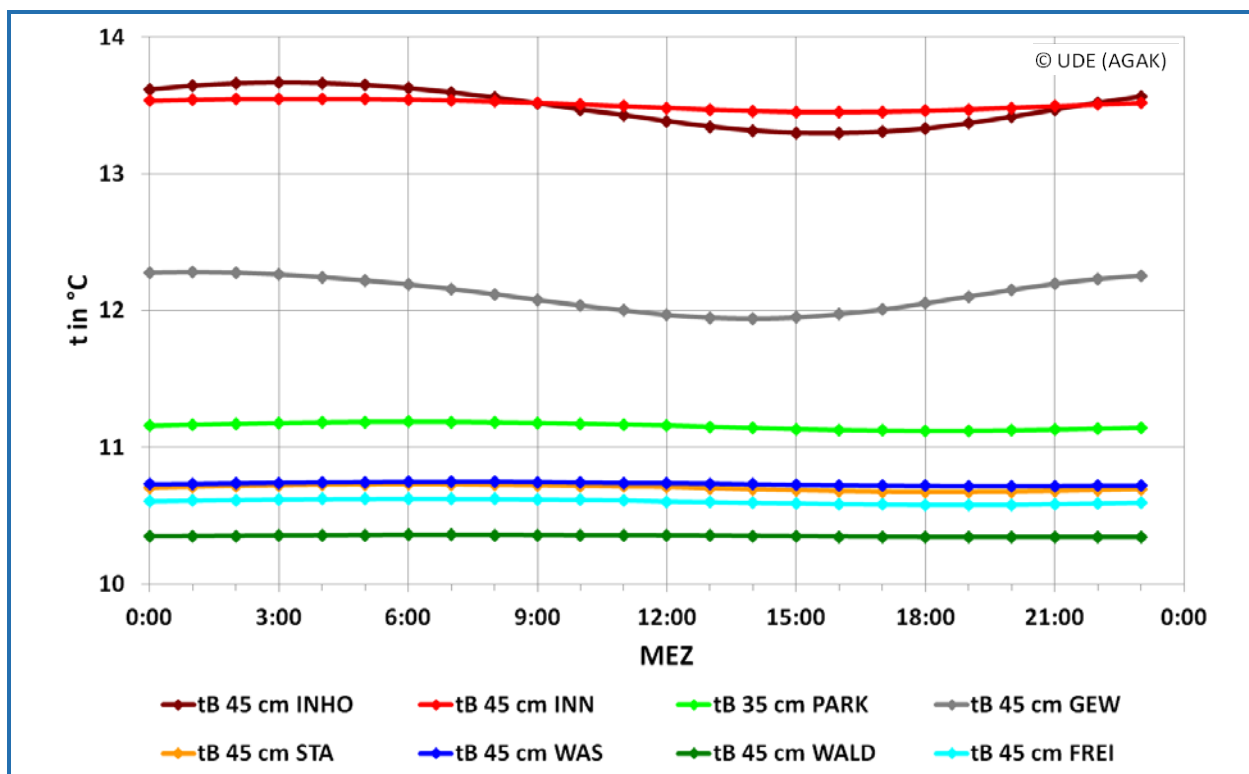


Abb. 21: Mittlerer diurnaler Temperaturverlauf an allen Standorten in Oberhausen in 45 cm Tiefe im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte (für PARK (Station 3) wird die Tiefe 35 cm dargestellt, da 45 cm nicht vorliegt)

#### 4.4 Auswertung der Schachttemperatur: Korrelationen von Schacht- und Lufttemperatur, Schacht- und Bodentemperatur sowie Luft- und Bodentemperatur

Korrelationen der Schacht- mit der Lufttemperatur ergaben verhältnismäßig gute Ergebnisse, die an allen Standorten sehr ähnlich sind ( $0,7 < r^2 < 0,9$ ). Die Korrelation der Schachttemperatur mit den Bodentemperaturen desselben Standorts in den verschiedenen Tiefen ist ebenfalls sehr gut und ergab für alle Standorte ab 15 cm Tiefe mindestens ein  $r^2$  von 0,94. Unterhalb einer Tiefe von 15 cm beträgt der Unterschied zwischen den  $r^2$  von beispielsweise  $t_{\text{Schacht}}$  vs  $t_{-30 \text{ cm}}$  oder  $t_{\text{Schacht}}$  vs  $t_{-45 \text{ cm}}$  maximal 0,05, so dass nicht von einer Tiefenabhängigkeit unterhalb 15 cm auszugehen ist. Für Korrelationen der Schachttemperatur mit Bodentemperaturdaten aus geringeren Tiefen sinkt das  $r^2$  bis auf 0,87 ab, was auf den wachsenden Einfluss der Atmosphäre mit einer schlechteren Korrelation von Luft- und Bodentemperaturen (s.u.) zurückzuführen sein dürfte.

Die Korrelation der Lufttemperatur mit den verschiedenen Tiefenstufen im Boden zeigen insgesamt  $r^2$ -Werte um 0,8, wobei sich die Werte mit zunehmender Oberflächennähe verbessern.

Die äußerst gute Korrelation der Schachttemperatur mit den Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen zeigt, dass die Temperatur im Trinkwasserschacht durch die Boden- und nicht durch die Lufttemperatur bestimmt wird. Dies erklärt auch die im Winter, bei ansonsten schneebedecktem Boden, schneefreien Schachtdeckel: Der im Winter verhältnismäßig warme Boden erwärmt die Luft im Schacht, die somit über dem Gefrierpunkt liegt und den Schnee auf den Schachtdeckeln zum Schmelzen bringt.

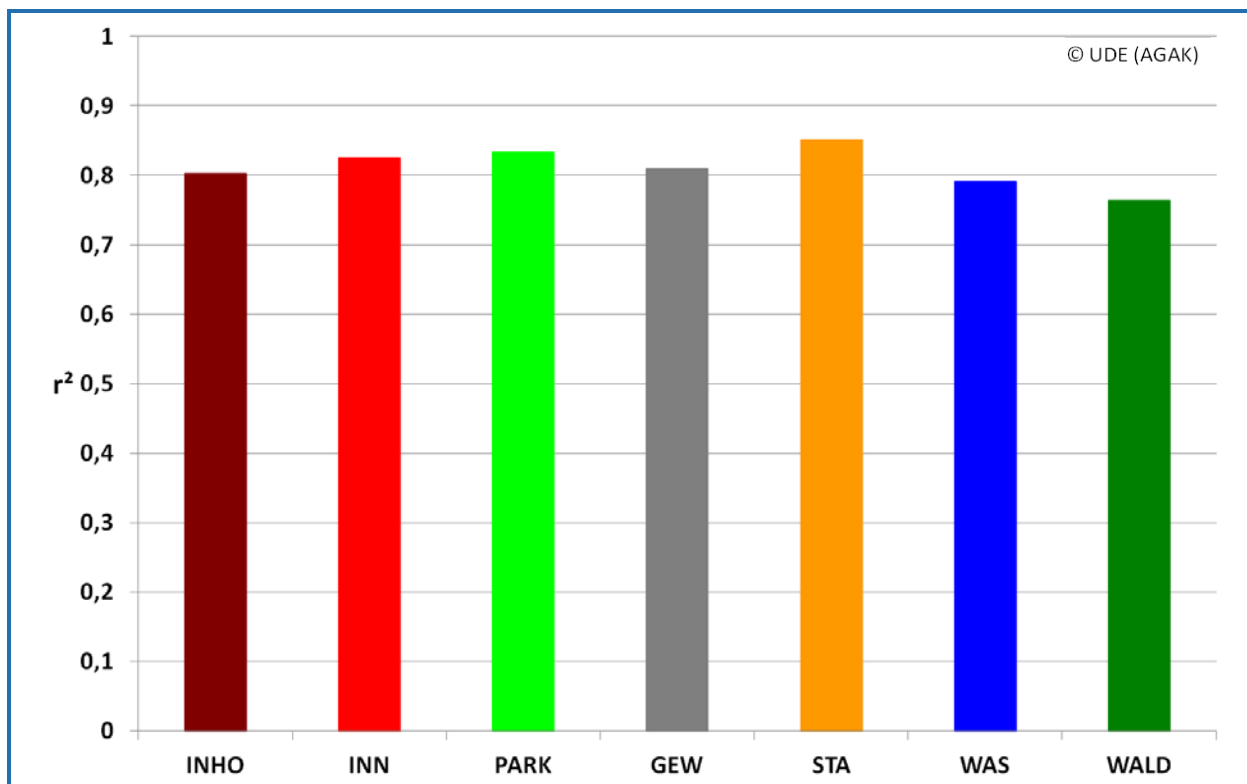


Abb. 22: Bestimmtheitsmaße der Korrelation Lufttemperatur (3-4 m ü. Gr.) versus Schachttemperatur (0,5 m u. Gr.) an sieben Standorten in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte

## 4.5 Auswertung der Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchte an den exemplarisch untersuchten Standorten Innenstadt (Station 2) und Freiland (Station 8) weist ein sehr differenziertes Bild auf (Abb. 23, Abb. 24). An beiden Standorten kommen Werte bis zu 30 Volumenprozent vor, jedoch in einer sehr unterschiedlichen Zeit-Tiefen-abhängigen Verteilung. Am Standort Innenstadt (Station 2) werden mit Ausnahme einer Episode im Winter die höchsten Werte in Tiefen bis 15 cm, also im Ah-Horizont des Bodens erreicht (Abb. 23). Darunter besteht das Profil aus Sand, der nur geringe Wasserspeicherkapazitäten aufweist. Hinzu kommen die hohen Temperaturen im Boden, die das eingetragene und kapillare Wasser schnell wieder verdunsten dürften. Die Episode Ende Dezember 2010, mit Wassergehalten von bis zu 30 Volumenprozent in ca. 30 cm Tiefe entspricht einer Phase der Schneebedeckung und Schneeschmelze, die den Wassergehalt kurzfristig stark erhöht haben.

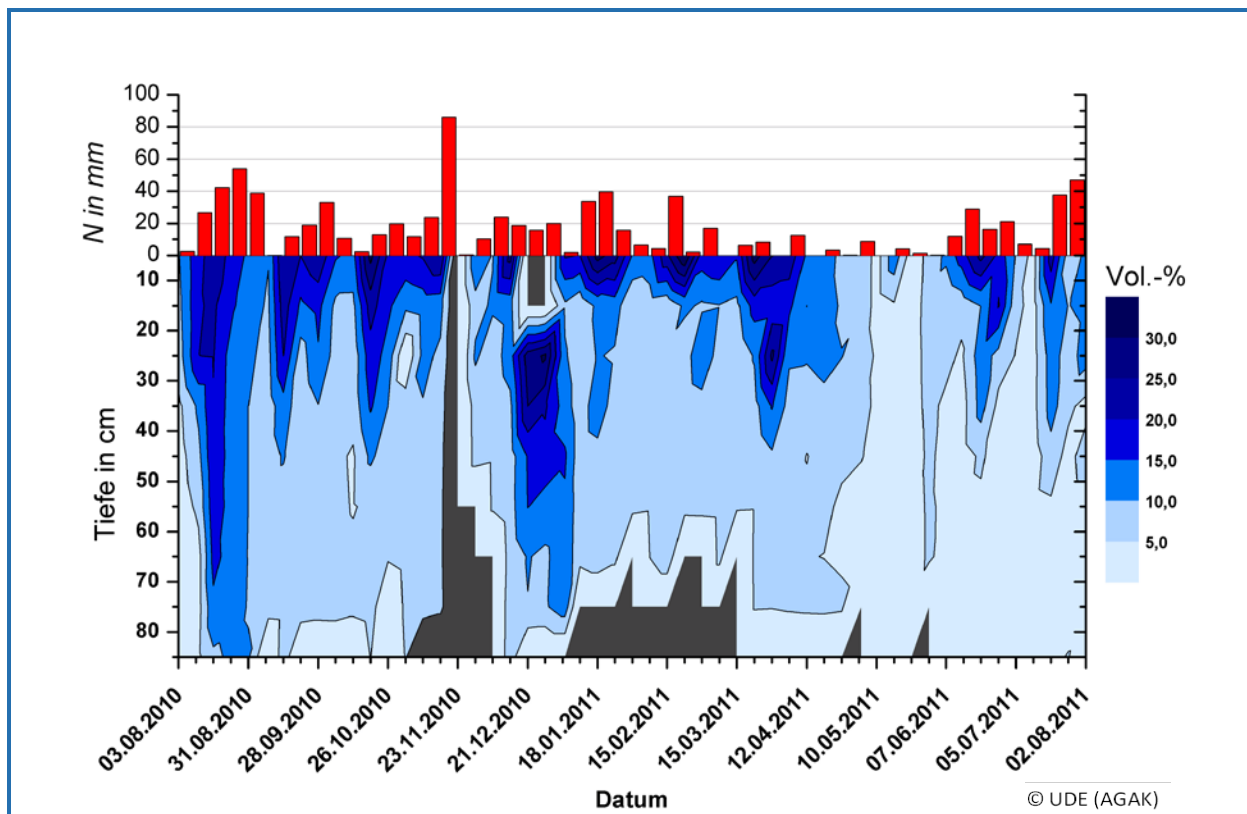


Abb. 23: Volumetrische Bodenfeuchte am Standort Innenstadt (Station 2) sowie Wochensummen des Niederschlages der Station Buschhausen in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; wöchentliche Bestimmung. Für graue Bereiche liegen keine Daten vor

Demgegenüber steht der Standort Freiland (Station 8), der eine räumlich andere Verteilung der Bodenfeuchte sowie insgesamt wesentlich höhere Werte aufweist (Abb. 24). Hier werden hohe Werte im humosen Ah-Horizont zwischen 5 und 20 Volumenprozent vorgefunden, höhere Werte bis über 30 Volumenprozent finden sich jedoch im stark lehmigen und immer wieder durch das Grundwasser beeinflussten Go-Horizont.

Abb. 23 und Abb. 24 zeigen zusätzlich zur Bodenfeuchte die im Untersuchungsgebiet aufgezeichneten Wochensummen des Niederschlages der Station Oberhausen Buschhausen der EG/LV (siehe 3.2). Dabei wurden die Niederschlagssummen der dem Auslesetermin der Bodenfeuchte vorausgegangenen Woche verwendet, da diese den Feuchtegehalt zum Auslesezeitpunkt bestimmen. Es ist kein deutlicher Zusammenhang zwischen Niederschlagssumme und Bodenfeuchte ersichtlich, wie auch die Statistik bestätigt. So ergibt ein Test auf Signifikanz der Korrelation von Profilbodenfeuchte und Wochensumme des Niederschlages lediglich für den Innenstadtstandort (Station 2) einen signifikanten

Zusammenhang. Bei der Betrachtung der Korrelation der Bodenfeuchte in einzelnen Tiefenstufen und den Wochensummen des Niederschlags ergibt sich weder am einen noch am anderen Standort ein signifikanter Zusammenhang.

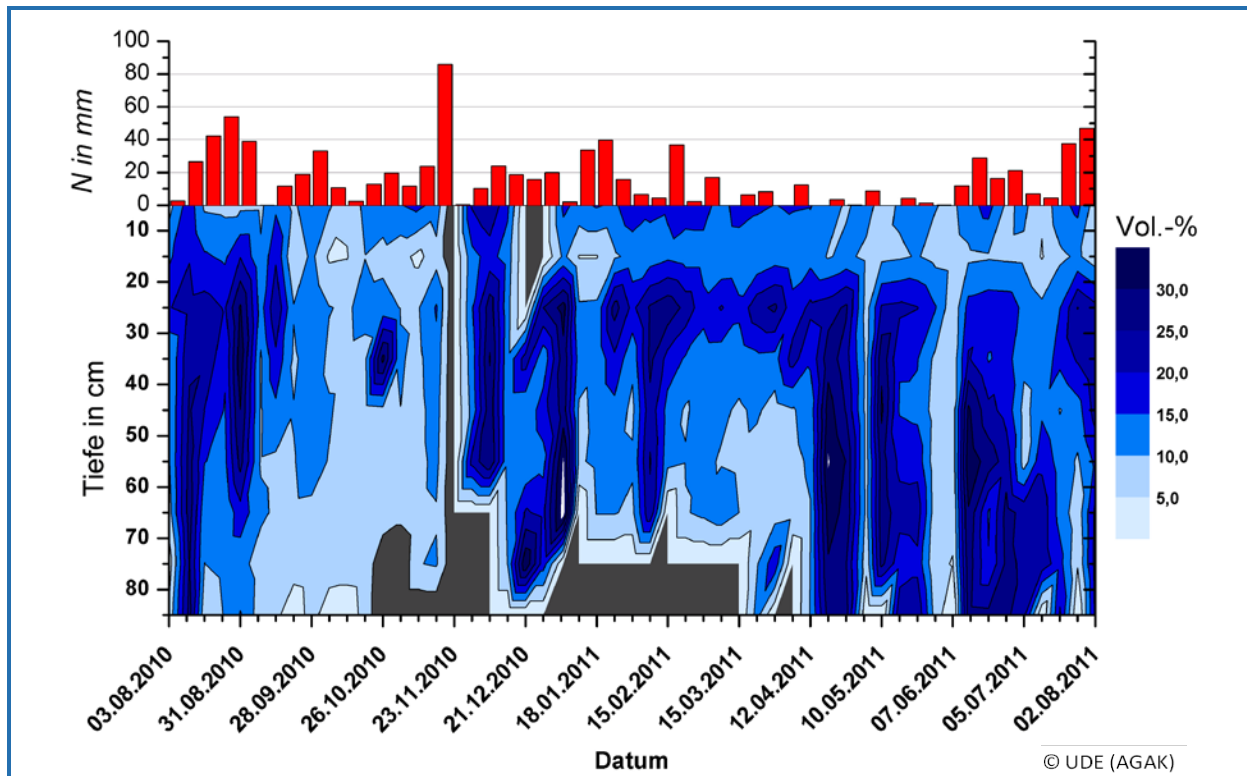


Abb. 24: Volumetrische Bodenfeuchte am Standort Freiland (Station 8) sowie Wochensummen des Niederschlags der Station Buschhausen in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; wöchentliche Bestimmung. Für graue Bereiche liegen keine Daten vor

Bei keinem der beiden Profile kann im betrachteten Zeitraum ein typischer Jahresgang der Bodenfeuchte beobachtet werden, der durch eine Auffüllung des Bodenwasserspeichers im Winterhalbjahr und dessen Aufbrauch im Sommerhalbjahr gekennzeichnet ist. Einflüsse markanter meteorologischer Ereignisse und standortspezifische Unterschiede hingegen sind ersichtlich, wie der bereits erwähnte Schneefall und die folgende Schneeschmelze gezeigt haben. Markant sind auch die Auswirkung der relativ warmen und trockenen Monate April 2011 und Mai 2011. Diese erschöpfen am Standort Innenstadt (Station 2) deutlich den Bodenwasserspeicher, wohingegen es am Standort Freiland (Station 8) zu kapillarem Aufstieg zu kommen scheint, was hohe Bodenfeuchtegehalte zur Folge hat.

#### 4.6 Auswertung der Bodenwärmeströme

Die Ergebnisse der Bodenwärmestrommessungen ( $Q_B$ ), zeigt Abb. 25. Die Größenordnung des Bodenwärmestroms in Richtung Boden und in Richtung Atmosphäre reicht an den Standorten Innenstadt (Station 2), Gewässer (Station 6), Wald (Station 7) und Freiland (Station 8) von  $-10 \text{ W/m}^2$  bis  $10 \text{ W/m}^2$  im Stundenmittel und ist damit verhältnismäßig niedrig. Davon heben sich die Standorte Stadtrand (Station 5) und vor allem Gewerbe (Station 4) deutlich ab. An der Messstelle Gewerbe (Station 4) werden zu Spitzenzeiten der Einstrahlung über  $110 \text{ W/m}^2$  im Stundenmittel erreicht, demgegenüber nächtliche Ausstrahlungsmaxima von höchstens  $40 \text{ W/m}^2$  stehen. Die Erklärung liegt, wie unten beschrieben, in der unterschiedlichen Beschattung.



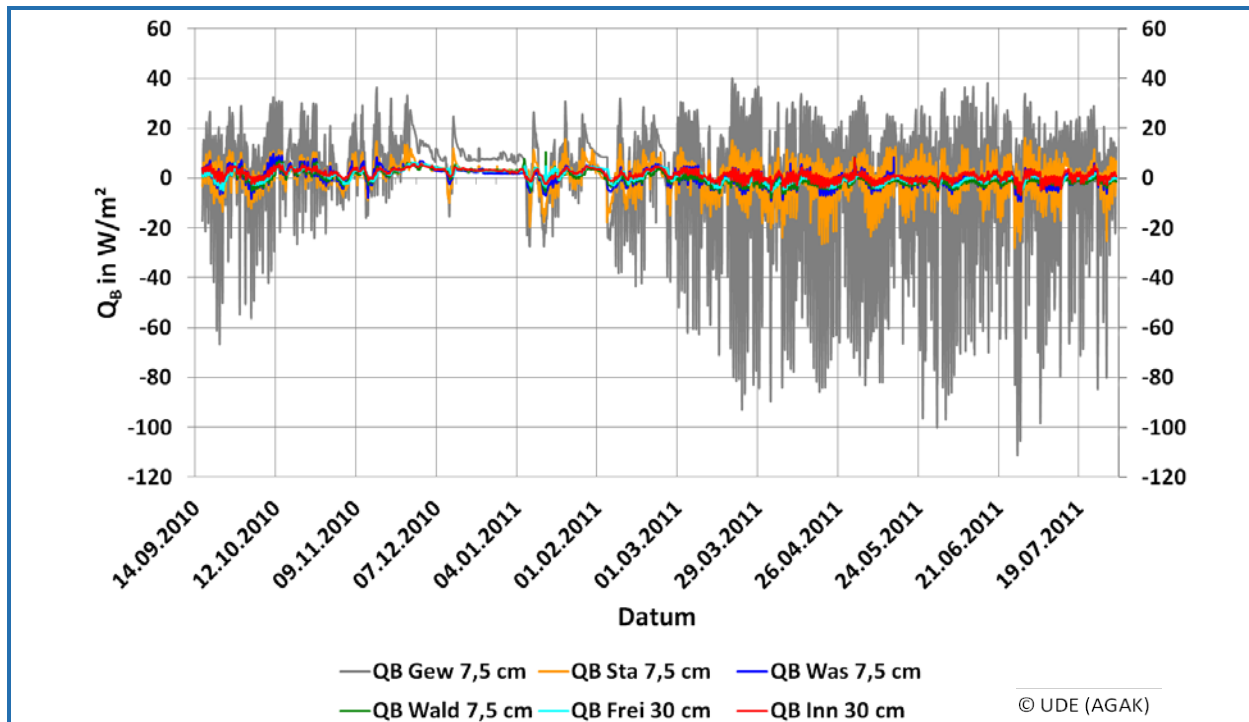


Abb. 25: Bodenwärmeströme in  $W/m^2$  an den Standorten Innenstadt (Station 2), Freiland (Station 8) (beide in 30 cm Tiefe), Gewerbe (Station 4), Stadtrand (Station 5), Gewässer (Station 6) und Wald (Station 7) (alle in 7,5 cm Tiefe) in Oberhausen (14.09.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte). Positive Werte bedeuten, dass der Wärmestrom aus dem Boden in die Atmosphäre gerichtet ist, negative Werte bedeuten, dass er aus der Atmosphäre in den Boden gerichtet ist

Den diurnalen Verlauf der Bodenwärmeströme in den zwei Tiefenstufen zeigt Abb. 26.

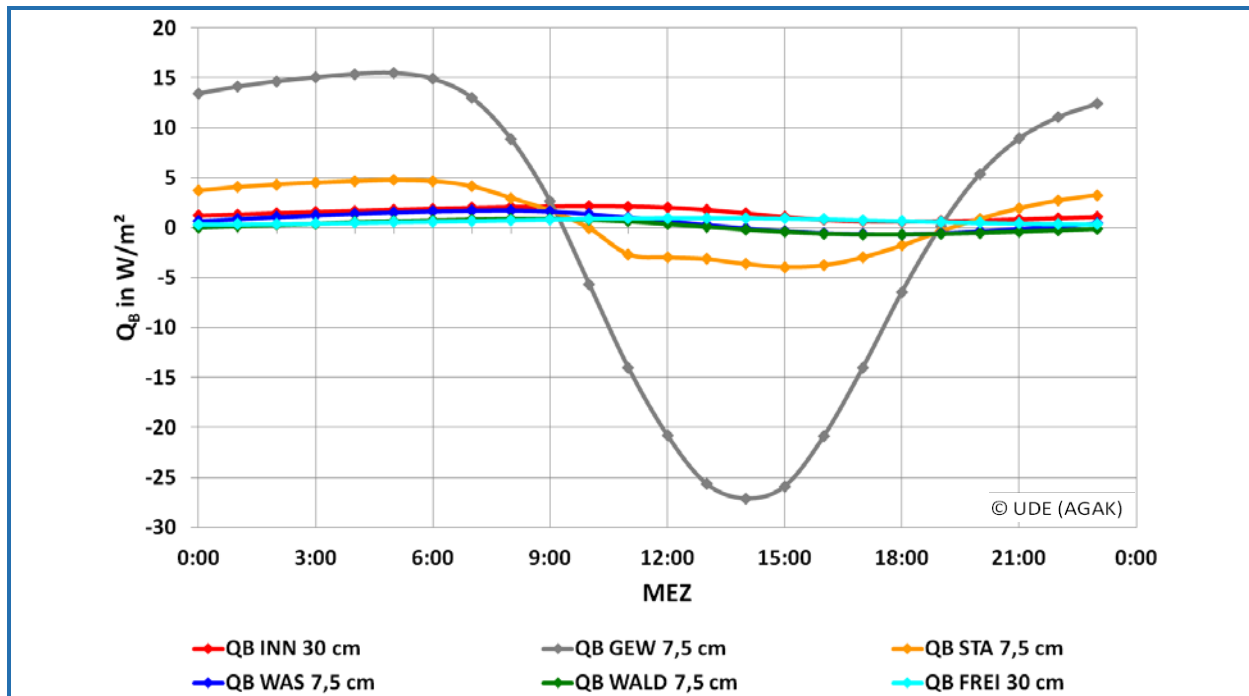


Abb. 26: Diurnaler Verlauf des Bodenwärmestroms in  $W/m^2$  an den Standorten Innenstadt (Station 2), Freiland (Station 8) (beide in 30 cm Tiefe), Gewerbe (Station 4), Stadtrand (Station 5), Gewässer (Station 6) und Wald (Station 7) (alle in 7,5 cm Tiefe) in Oberhausen (14.09.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte). Positive Werte bedeuten, dass der Wärmestrom aus dem Boden in die Atmosphäre gerichtet ist, negative Werte bedeuten, dass er aus der Atmosphäre in den Boden gerichtet ist

Sie verdeutlicht den sehr schwachen Tagesgang an allen Standorten bis auf Gewerbe (Station 4), der ein Ausstrahlungsmaximum von gut 15 sowie ein Einstrahlungsmaximum von ca.  $-27 \text{ W/m}^2$  erreicht. Alle anderen Standorte in vergleichbarer Tiefe (7,5 cm) zeigen Werte zwischen 5 und  $-5 \text{ W/m}^2$ . Der Bodenwärmestrom an den Standorten Innenstadt (Station 2) und Freiland (Station 8), gemessen in 30 cm Tiefe und hier noch unkorrigiert, d.h. nicht um den Speicherterm ( $Q_s$ ) ergänzt (siehe Abschnitt 3.3), zeigt durchgehend positive Werte, ist also dauerhaft aus dem Boden heraus in Richtung Atmosphäre gerichtet (Abb. 26).

Als Ergebnis zeigen sich in den Wochenmitteln der Bodenwärmeströme im Sommerhalbjahr große Nettogewinne für den Standort Gewerbe (Station 4) (Abb. 27), was sich in den bereits beschriebenen hohen Bodentemperaturen widerspiegelt.

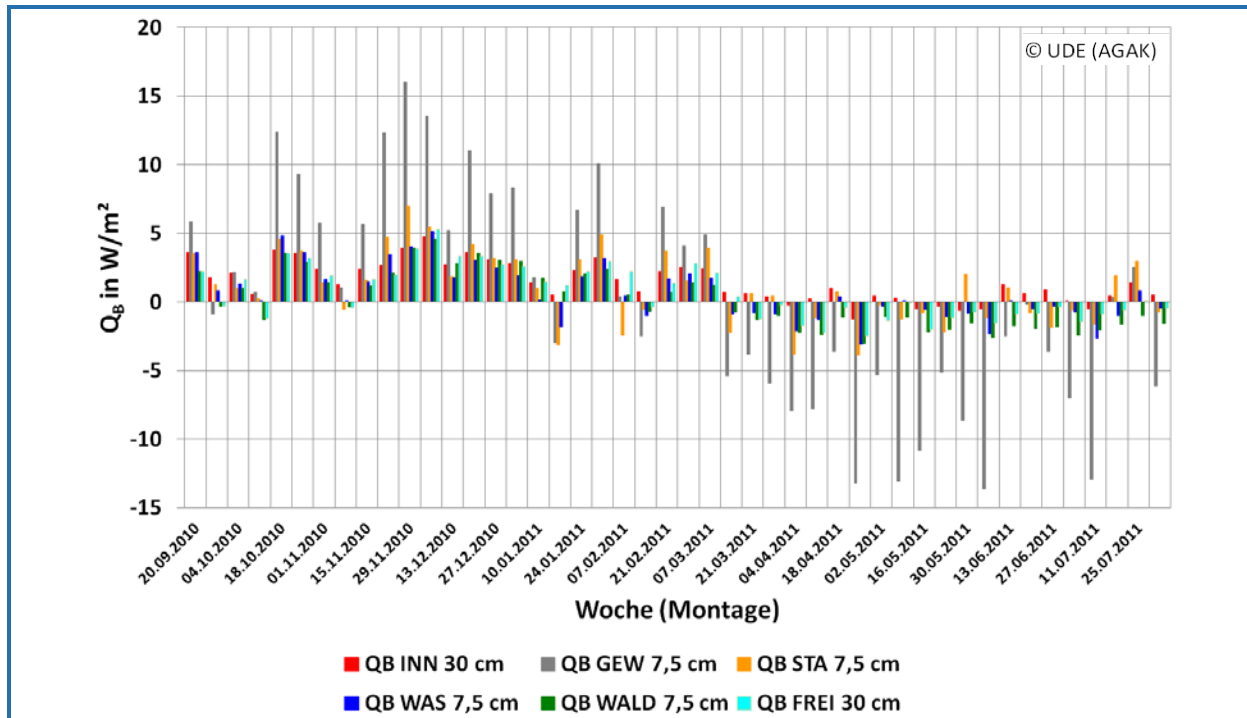


Abb. 27: Wochenmittel der Bodenwärmeströme in  $\text{W/m}^2$  an den Standorten Innenstadt (Station 2), Freiland (Station 8) (beide in 30 cm Tiefe), Gewerbe (Station 4), Stadtrand (Station 5), Gewässer (Station 6) und Wald (Station 7) (alle in 7,5 cm Tiefe) in Oberhausen (14.09.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte). Positive Werte bedeuten, dass der Wärmestrom aus dem Boden in die Atmosphäre gerichtet ist, negative Werte bedeuten, dass er aus der Atmosphäre in den Boden gerichtet ist

Die wichtigsten Faktoren, die an den Untersuchungsstandorten den Bodenwärmestrom bestimmen, sind die Beschattung und der Bodenaufbau. Wie aus Tab. 2 ablesbar, sind fast alle Standorte eher stark beschattet, so dass die Strahlungsumsatzfläche in die Höhe verlegt ist und nur ein Bruchteil der eingestrahlten Energie zur Absorption durch den Boden zur Verfügung steht. Der Stadtrand (Station 5) ist nur teilbeschattet, weswegen dieser verhältnismäßig hohe Werte erreicht, der Standort Gewerbe (Station 4) ist hingegen völlig unbeschattet. Bei diesem Standort spielt zusätzlich der Bodenaufbau eine wichtige Rolle: Es handelt sich um einen künstlich angelegten Boden aus zwei Horizonten mit eingesetzter Pedogenese, die einen dritten Horizont hervorgebracht hat. Zwischen dem jAh/C- und dem jC-Horizont befindet sich offensichtlich eine Sperrschicht (kein natürlicher Übergang der thermischen und hydrologischen Eigenschaften), so dass der jAh/C-Horizont die Wärme aufnimmt, sie aber nicht in größere Tiefen weiterleiten kann.

Die korrigierten, d.h. um den Speicherterm ( $Q_s$ ) ergänzten Bodenwärmeströme (siehe Abschnitt 3.3) für die Standorte Innenstadt (Station 2) und Freiland (Station 8) sind in Abb. 28 und Abb. 29 zu sehen. Sie zeigen deutliche Größenunterschiede, wobei die Werte an der Station Innenstadt (Station 2) systematisch, insbesondere jedoch Ende März und Ende Mai zu hoch erscheinen.

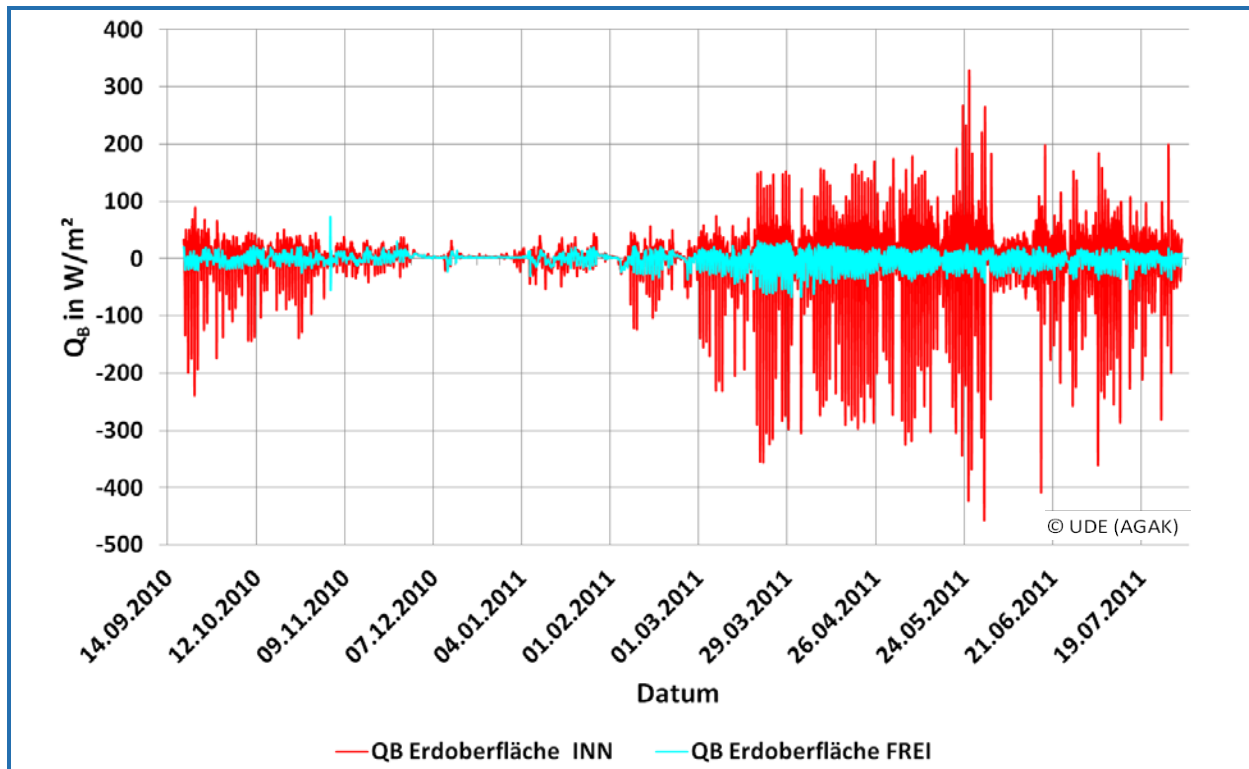


Abb. 28: Um den Speicherterm ( $Q_s$ ) korrigierte mittlere Bodenwärmeströme in  $W/m^2$  an den Standorten Innenstadt (Station 2) und Freiland (Station 8) in Oberhausen (14.09.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte). Positive Werte bedeuten, dass der Wärmestrom aus dem Boden in die Atmosphäre gerichtet ist, negative Werte bedeuten, dass er aus der Atmosphäre in den Boden gerichtet ist

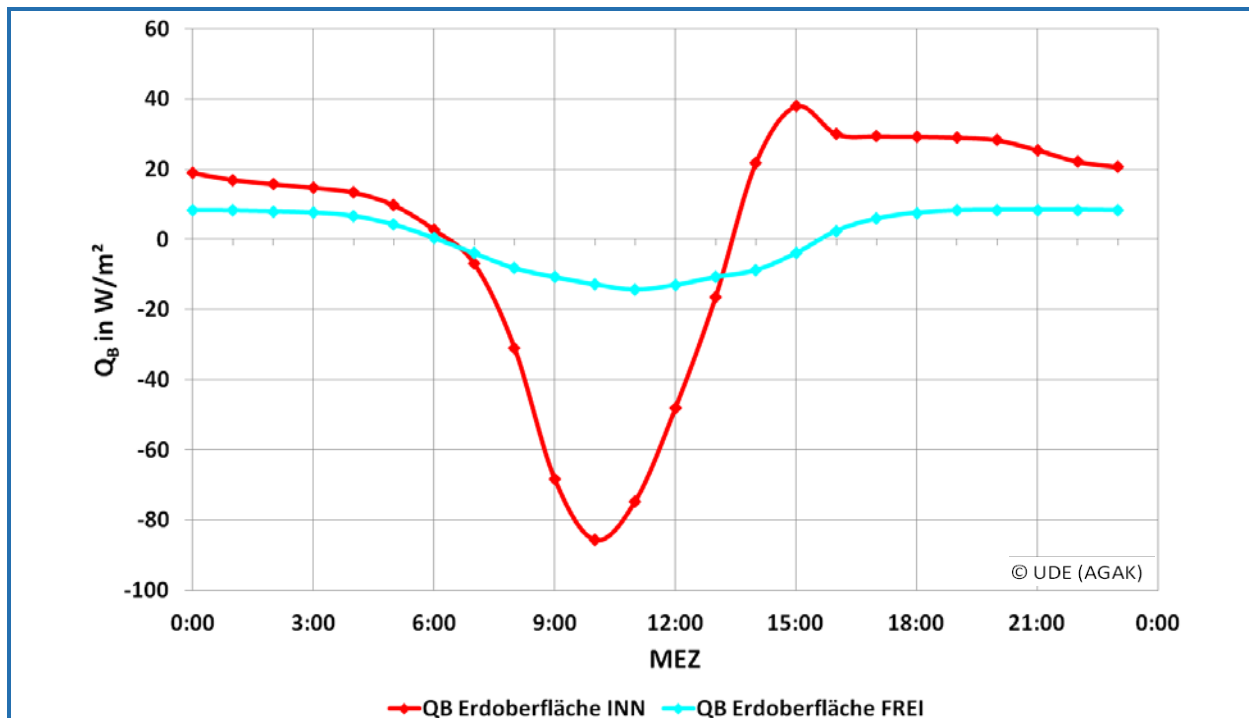


Abb. 29: Diurnaler Verlauf des um den Speicherterm ( $Q_s$ ) korrigierten Bodenwärmestroms in  $W/m^2$  an den Standorten Innenstadt (Station 2) und Freiland (Station 8) in Oberhausen (14.09.2010 – 31.07.2011; Stundenmittelwerte). Positive Werte bedeuten, dass der Wärmestrom aus dem Boden in die Atmosphäre gerichtet ist, negative Werte bedeuten, dass er aus der Atmosphäre in den Boden gerichtet ist

Hier werden in den Boden gerichtete Werte von über  $300 \text{ W/m}^2$  im Stundenmittel berechnet, während am Standort Freiland (Station 8) Ende März maximal  $80 \text{ W/m}^2$  erreicht werden. Im Gegensatz zu den direkten Messungen in 7,5 cm Tiefe wird an den Stationen Innenstadt (Station 2) und Freiland (Station 8) der Bodenwärmestrom allerdings bis an die Oberfläche korrigiert, so dass deutlich höhere Werte erwartet werden konnten. In die Berechnung gehen unter anderem die Bodentemperaturwerte der 1-cm-Sonde ein, die einen großen Einfluss haben dürften. So wurden am Innenstadtstandort (Station 2) im Extremfall Temperaturen von über  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  gemessen.

Der Vergleich des diurnalen Verlaufs der korrigierten Bodenwärmeströme (siehe Abb. 29) mit Werten aus CHRISTEN and VOGT (2004) für Basel zeigt für den Innenstadtstandort (Station 2) größtenteils eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung. Im Vergleich mit einem ruralen Standort sind die Werte für den Standort Freiland (Station 8) in Oberhausen immer noch niedriger. Dies ist vermutlich durch den relativ hohen Vegetationsanteil im Vergleich zum offenen Umlandstandort in Basel zu erklären.

An allen Standorten ist der Einfluss der geschlossenen Schneedecke im Dezember 2010 zu sehen (siehe Abb. 25). Die hohe Albedo des Schnees verhindert jegliche Energieaufnahme des Bodens, so dass die Wärmeflussplatten nur eine konstante Energieabgabe in Richtung der Atmosphäre registrieren. Diese liegt an allen Standorten bis auf den Standort Gewerbe (Station 4) tiefenunabhängig bei ca.  $3 \text{ W/m}^2$ .

#### 4.7 Unterirdische Wärmeinsel der Stadt Oberhausen

Über die statistische Auswertung von Bodentemperatur, Bodenwärmestrom und Bodenfeuchte hinaus wurden Erkenntnisse zur unterirdischen Wärmeinsel (Abb. 30 und Abb. 31) sowie zum oberflächennahen, im Boden enthaltenen, Energiegehalt (Tab. 12) gewonnen.

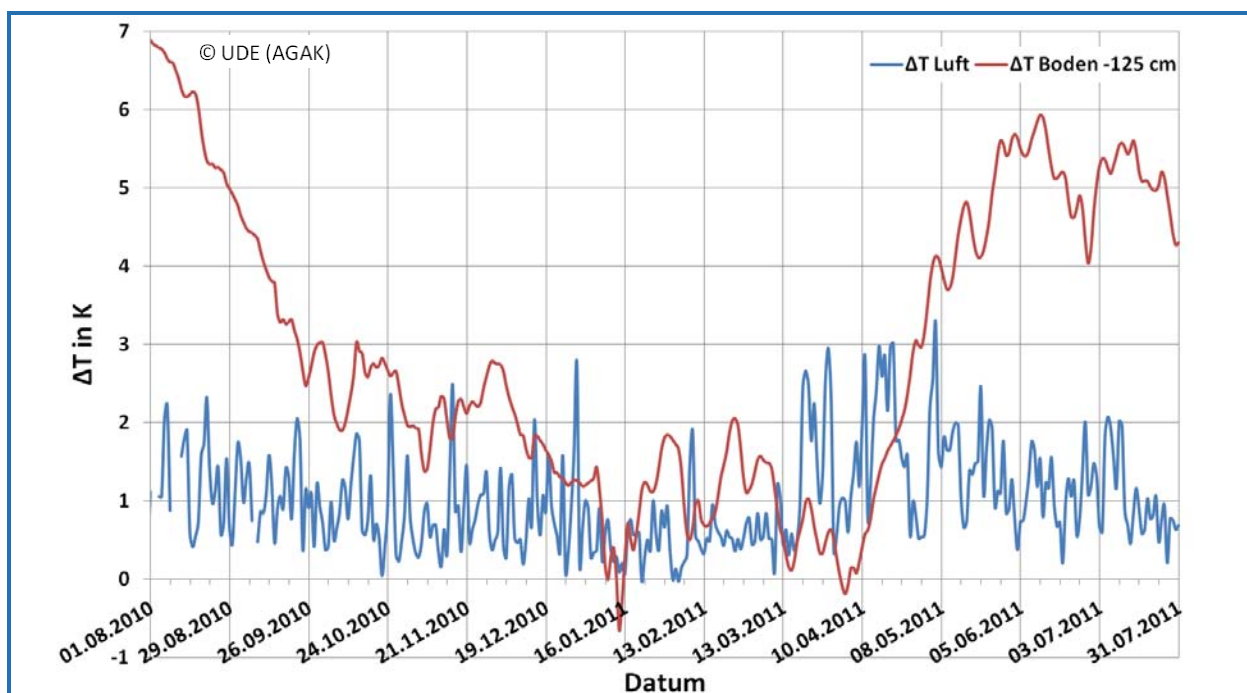


Abb. 30: Vergleich der oberirdischen mit der unterirdischen UHI dargestellt als Differenz der Stationen Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1) und Freiland (Station 8) ( $t_{a \text{ INHO (Station 1)}} \text{ minus } t_{a \text{ FREI (Station 8)}}$ ,  $t_{B \text{ INHO (Station 1) (125 cm)}} \text{ minus } t_{B \text{ FREI (Station 8) (125 cm)}}$ ) in K in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; Tagesmittelwerte. ( $t_{B \text{ FREI (Station 8) (125 cm)}}$  ist interpolierter Wert zwischen  $t_{B \text{ FREI (Station 8) (70 cm)}}$  und  $t_{B \text{ FREI (Station 8) (145 cm)}}$ )

Die Intensität der Bodenwärmeinsel ( $t_{B \text{ Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1)}} - t_{B \text{ Freiland (Station 8)}}$ ) und der oberirdischen Wärmeinsel ( $t_{a \text{ Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1)}} - t_{a \text{ Freiland (Station 8)}}$ ) (UHI = Urban Heat Island) als Tagesmittelwerte zeigt Abb. 30.

Die Bodenwärmeinsel (dargestellt als punktuelle Differenz der Messpunkte Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1) und Freiland (Station 8)) ist besonders im Sommer 2010 mit bis zu 7 K sehr deutlich ausgeprägt. Sie lässt zum Winter hin stark nach und erreicht ihr Minimum Anfang April. Ab diesem Zeitpunkt gewinnt der stark versiegelte Boden gegenüber dem Freilandboden mehr Energie; die Steigung der Temperaturkurve ist an Station 1 (Innenstadt (hochversiegelt)) mehr als doppelt so stark wie an Station 8 (Freiland). Das Boden-UHI-Minimum tritt erst auf, wenn die oberirdische UHI sich schon fast auf ihrem Jahresmaximum befindet. Dies verdeutlicht die starke Verzögerung der Bodenerwärmung. Ein zweites Temperaturmaximum wird Anfang bis Mitte Juni 2011 mit knapp 6 K erreicht.

Die oberirdische UHI ist im Tagesmittel weniger deutlich ausgeprägt. Sie nimmt zum Winter hin leicht ab, schwankt (mit wetterlagenabhängigen Ausnahmen) in den Wintermonaten zwischen 0 und 1 K, nimmt dann ab Mitte März stark zu und erreicht ihr Jahresmaximum von gut 3 K Anfang Mai. Den Rest des Messzeitraums schwankt sie, bei leicht abnehmender Tendenz, um 1 K.

Das UHI-Minimum im Boden ist gegenüber dem der Luft um fast einen Monat verschoben. Es wird Anfang April erreicht, nach einer Phase, in der der Freilandstandort (Station 8) sich stärker erwärmte, als der Innenstadtstandort (hochversiegelt) (Station 1). Dies führt dazu, dass beide einen Tag lang annähernd gleich warm sind und dadurch die Stadt-Umland-Differenz bis fast auf 0 K sinkt. Danach erwärmt sich der hochversiegelte Innenstadtstandort (Station 1) wieder deutlich stärker als das Freiland (Station 8) und die UHI-Intensität im Boden steigt an. Die geringste Boden-UHI-Intensität tritt daher nicht zum Zeitpunkt der kältesten Böden auf, sondern bereits in einer Phase der Bodenerwärmung.

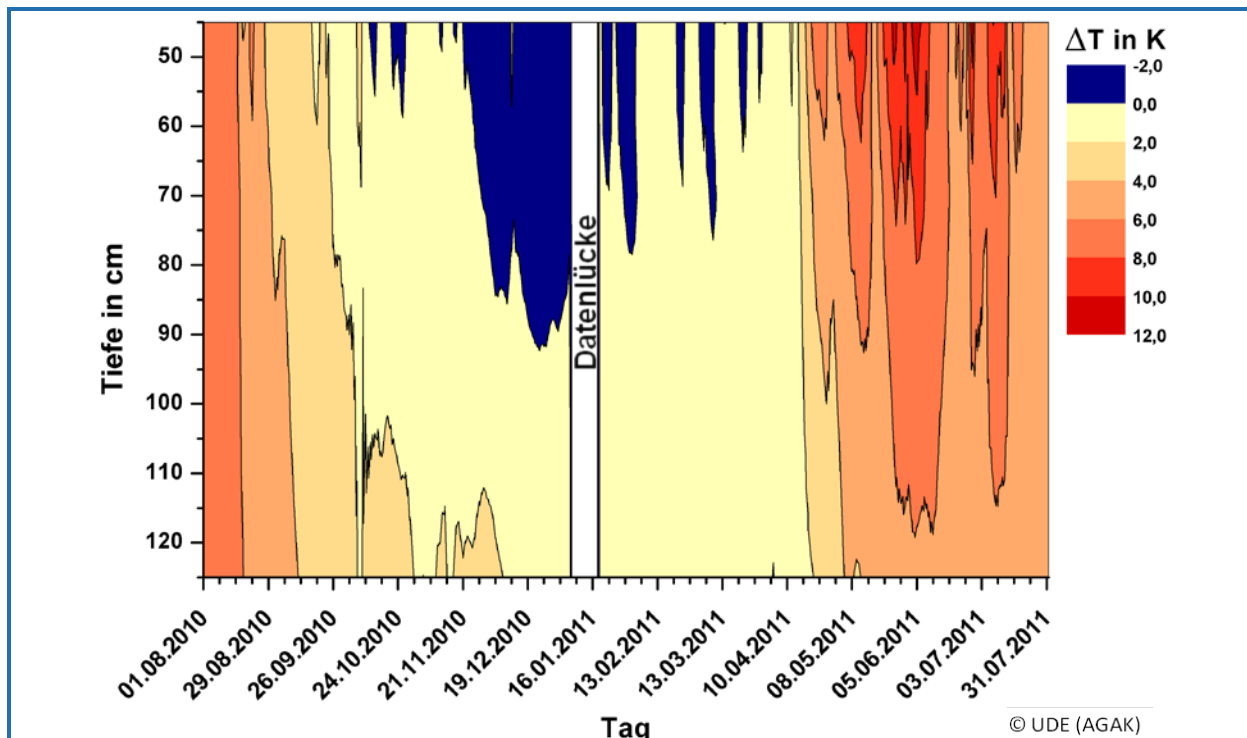


Abb. 31: Thermoisoplethendiagramm der unterirdischen UHI dargestellt als Temperaturdifferenz der Stationen Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1) und Freiland (Station 8) ( $t_{B \text{ INHO (Station 1)}} - t_{B \text{ FREI (Station 8)}}$ ) in K in Tiefen zwischen 45 cm und 125 cm in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; Tagesmittelwerte. Negative Werte deuten auf eine wärmere Freilandstation hin

Abb. 30 zeigt außerdem, dass die oberirdische UHI nicht durch die unterirdische UHI bestimmt wird, da die jeweiligen Maxima stark versetzt auftreten. Die oberirdische UHI reagiert direkt auf Schönwetterlagen, die unterirdische UHI prägt sich in unterschiedlicher Intensität mit dem Sonnenstand bzw. der Jahreszeit deutlich verzögert aus. Der erwärmte Boden konserviert die Wärme, beeinflusst dann aber nicht so drastisch die Lufttemperatur, wie beispielsweise die Schönwetterperiode im Frühjahr 2011 (vgl. Kap.3.2).

Abb. 31 veranschaulicht die Überwärmung des Stadtbodens im Tiefenbereich 45 cm bis 125 cm im Vergleich der Standorte Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1) und Freiland (Station 8). Die Überwärmung tritt besonders im Sommer 2011 eher in den geringeren Tiefen auf. In größerer Oberflächennähe ist auf Grund der Materialeigenschaften des Stadtstandortes mit stärkeren Unterschieden zu rechnen. Im Winter sind vor allem Tiefen > 1 m am Standort 1 (Innenstadt (hochversiegelt)) wärmer, als im Umland; in Bereichen < 1 m ist der Freilandstandort (Station 8) wärmer.

#### 4.8 Oberflächennaher Bodenenergiegehalt der Stadt Oberhausen

Die anthropogenen Böden Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1) und Gewerbe (Station 4) sind wie bereits geschildert, insbesondere im Sommer wärmer als die weniger stark versiegelten Böden und enthalten daher auch mehr Energie. Für eine Berechnung der positiven Energiedifferenz (= Mehr-energie) (X) der Stadtböden im Vergleich zum relativ kühlen Standort Wald (Station 7) wurde wie folgt vorgegangen:

$$X = \zeta \times \Delta T \times V \quad \text{Gl. 1}$$

Dabei ist:

X in J = Positive Energiedifferenz bezogen auf den Waldstandort (Station 7)

$\zeta$  in J/(m<sup>3</sup> K) = Wärmekapazitätsdichte, bodenspezifischer Wert

$\Delta T$  in K = mittlere, auf den Messzeitraum bezogene Temperaturdifferenz eines Standortes zum Wald (Station 7)

V in m<sup>3</sup> = betrachtetes Bodenvolumen (1 km<sup>2</sup> \* 1 m Tiefe)

Die anthropogene Überwärmung des Stadtbodens sorgt dafür, dass dieser einen Energiespeicher darstellt. Unter Verwendung der mittleren Temperaturdifferenz zum Wald (Station 7) und der standortspezifischen Wärmekapazitätsdichten (ZMARSLY et al. 2007) lässt sich die mittlere, in einer 1 km<sup>2</sup> großen und 1 m mächtigen Bodenschicht enthaltene Überschuss-Energie jedes Klimatops berechnen (Tab. 12). Die Werte zeigen, dass in den stark anthropogenen Standorten (insbesondere unter versiegelten Flächen) wesentlich mehr Energie im Boden enthalten ist. Der Boden am Gewerbestandort (Station 4) enthält 4,5-mal mehr Energie als der Freilandstandort (Station 8), der Standort Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1) mehr als zehnmal so viel.

© UDE (AGAK)	INHO (1)	PARK (3)	GEW (4)	STA (5)	WAS (6)	Frei (8)
$\Delta T$ in K	3,2	1	1,8	0,4	0,6	0,3
$\text{kJ}/(1 \text{ km}^2 * 1 \text{ m})$	$9,0 * 10^9$	$2,1 * 10^9$	$3,8 * 10^9$	$1,5 * 10^9$	$1,2 * 10^9$	$8,5 * 10^8$
$\text{kWh}/(1 \text{ km}^2 * 1 \text{ m})$	$2,5 * 10^6$	$5,8 * 10^5$	$1,1 * 10^6$	$4,2 * 10^5$	$3,4 * 10^5$	$2,4 * 10^5$

Tab. 12: Mittlere potentielle positive Energiedifferenz der Klimatope in Oberhausen bezogen auf den Waldstandort (Station 7) im Messzeitraum 01.08.2010 – 31.07.2011; bezogen auf den obersten  $\text{km}^2$  Boden

## 5 Fazit

Die Untersuchungen der zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Bodentemperaturen in Oberhausen zeigen klassische Muster des thermischen Verhaltens von Böden mit zum Teil erheblichen standortspezifischen Modifikationen. So sind alle Standorte durch einen sinusförmigen Temperaturverlauf im Jahresgang, Abschwächung der Amplituden und phasenverschobene Maxima mit zunehmender Tiefe sowie einen jahreszeitlichen Wechsel der Temperaturgradienten gekennzeichnet. Anthropogenen Standorten mit sommerlichen Extremtemperaturen stehen quasi natürliche Standorte mit deutlich geringeren Bodentemperaturen entgegen. Die standortspezifischen Verläufe sind dabei jedoch stark durch Umfeldeigenschaften geprägt, wie Vegetationsbestand (Beschattung), Bodenaufbau oder Versiegelungsgrad. Gute Beispiele sind die Standorte Innenstadt (Station 2), Gewerbe (Station 4) und Freiland (Station 8). Am erstgenannten beeinflusst eine Fernwärmeleitung die Bodentemperaturen, am zweitgenannten führen der Mangel an Schatten sowie ein anthropogener Boden mit ungünstigen thermischen Eigenschaften zu hohen Bodentemperaturen. Am Freilandstandort (Station 8) hingegen werden auf Grund starker Beschattung und eines relativ feuchten Bodens nur sehr geringe Temperaturen gemessen.

Die Jahresmittelwerte der Profilttemperaturen zeigen eine Rangfolge, wie man sie grundsätzlich von Klimatopen erwarten würde (je stärker menschlich beeinflusst, desto wärmer, je naturnäher, desto kühler) und die sich zu großen Teilen mit der Rangfolge der Lufttemperatur der Klimatope in Oberhausen deckt. Trotz der Heterogenität von Böden im urbanen Raum kann daher von einer Beeinflussung der Bodentemperaturen durch die Klimatope ausgegangen werden.

Oberhausen bildet eine stark ausgeprägte unterirdische Wärmeinsel aus. Diese oberflächennah, vor allem unter versiegelten Flächen, enthaltene Energie bietet ein Potenzial zur Energiegewinnung über Wärmepumpen, deren Nutzung weiter erforscht werden sollte.

Im Niveau der Trinkwasserleitungen traten im Messzeitraum lediglich an einem Standort (Station 1 (Innenstadt (hochversiegelt))) für ca. zwölf Wochen Temperaturen von  $> 20 \text{ °C}$  auf. Der betroffene Standort liegt in einer gepflasterten (vollversiegelten) Straße. In den meisten Klimatopen dürften die Trinkwasserleitungen im Bereich der Verkehrsinfrastruktur, d.h. unter versiegelten Flächen wie Stein, Schotter oder Asphalt, liegen. Derartige Bereiche sind demnach klimatopunabhängig am stärksten von sommerlicher Erwärmung betroffen und bilden im Sinne der trinkwasserhygienischen Fragestellung die Gebiete mit dem größten Gefährdungspotenzial.

## 6 Literaturverzeichnis

- AG BODEN (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover. 4. Auflage.
- ARNFIELD, A. J. (2003): Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. In: International Journal of Climatology 23: 1 – 26.
- ASAEDA, T. and TANH CA, V. (1993): Heating of paved grounds and its effect on the near surface atmosphere. In: Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales (Proceedings of the Yokohama Symposium, Juli 1993). IAHS Publ. 212.
- BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ (2001): Verordnung über den Gebrauch von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV 2001). [http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/trinkwv\\_2001/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/trinkwv_2001/gesamt.pdf) (10.01.2012).
- CHRISTEN, A. and VOGT, R. (2004): Energy and radiation balance of a central European city. In: International Journal of Climatology 24 (11), 1395 – 1421.
- DIN (1964): DIN 19671-1 Erdbohrgeräte für den Landeskulturbau; Rillenbohrer, Rohrbohrer. Beuth, Berlin.
- DIN (1973): DIN 19683-2 Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Physikalische Laboruntersuchungen - Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach Vorbehandlung mit Natriumpyrophosphat. Beuth, Berlin.
- DIN (2010): DIN 18125-2 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 2: Feldversuche. Beuth, Berlin.
- DIN ISO (2002): DIN ISO 11277 Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden. Beuth, Berlin.
- DWD (DEUTSCHER WETTERDIENST) 2011: Klimadaten Deutschland.  
[http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=dwdwww\\_klima\\_umwelt\\_klimadaten\\_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima\\_\\_Umwelt%2FKlimadaten%2Fkldaten\\_\\_kostenfrei%2Fausgabe\\_\\_mittelwerte\\_\\_akt\\_\\_node.html%3F\\_\\_nnn%3Dtrue](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimadaten%2Fkldaten__kostenfrei%2Fausgabe__mittelwerte__akt__node.html%3F__nnn%3Dtrue) (27.07.2011).
- DWD 2010/2011: Witterungsreport Express. Offenbach 2010-2011. – Ausgaben 08/2010 bis 07/2011.  
<http://www.dwd.de/wr> (31.10.2011).
- EG/LV (EMSCHERGENOSSENSCHAFT/LIPPEVERBAND) (Hrsg.) 2011: Niederschlagsdaten der Station Oberhausen-Buschhausen für den Referenzzeitraum 1961-1990, sowie die Messperiode Aug 2010 bis Jul 2011.
- FERGUSON, G. and WOODBURY, A. (2007): Urban heat island in the subsurface. In: Geophysical Research Letters 34.
- FLEMMING, H.-C. (Hrsg.) (2002): Erfassung des Wachstums und des Kontaminationspotenzials von Biofilmen in der Verteilung von Trinkwasser. IWW-Schriftenreihe Bd. 36, 422 S.
- FOKEN, T. (2006): Angewandte Meteorologie. Mikrometeorologische Methoden. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 2. Auflage.



- HALVERSON, H. and HEISLER, G. (1981): Soil Temperatures under Urban Trees and Asphalt. In: US Department of Agriculture, Forest Service: Research Paper NE-481.
- IT.NRW (Information und Technik Nordrhein-Westfalen) (2011a): Geoinformationszentrum. <http://www.gis4.nrw.de/DienstlisteInternet/> (31.05.2011).
- IT.NRW (Information und Technik Nordrhein-Westfalen) (2011b): Landesdatenbank NRW. <http://www.it.nrw.de/statistik/a/index.html>
- KIESE, O. (1988): Die Bedeutung verschiedenartiger Freiflächen für die Kaltluftproduktion und die Frischluftversorgung von Städten. In: Naturschutz und Landschaftsplanung (früher: Landschaft und Stadt) 20 (2): 67 – 71.
- KORTH A., HENNING, L. und WRICKE, B. (2007): Erhöhte Koloniezahlen im Trinkwasserverteilungssystem – Ursachen und Gegenmaßnahmen. Bbr Fachmagazin für Brunnen und Leitungsbau 58 (12), 78 – 83.
- KUTTNER, W. (2011): Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 2, Maßnahmen; Climate change in urban areas, Part 2, Measures. – In: *Environmental Sciences Europe (ESEU)*, Springer open, Doi: 10.1186/2190-4715-23-21, 1 – 15.
- PAGEL, R., BACHMANN, J. und HARTGE, K.-H. (1993): Auswirkung unterschiedlicher Nutzung und Versiegelung auf den Jahresgang von Temperatur und Feuchte in Stadtböden. In: Mitteilungen der dt. bodenkundlichen Gesellschaft (72): 1387-1390.
- RVR (Regionalverband Ruhr) (Hrsg.) (2007): Gesamtstädtische Klimaanalyse – Stadt Oberhausen.
- SAFER, F. (2006): Surveillance and control of microbiological stability in drinking water distribution networks. Funded by EC-contract EVK1-CT-2002-00108.
- SAVVA, Y., POUYAT, R. GROFFMAN, P. and HEISLER, G. (2010): Effects of Land Use and Vegetation Cover on Soil Temperature in an Urban Ecosystem. In: *Soil Science Society of America Journal* 74 (2): 469 – 480.
- SCHIEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P. (2009): Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum, Berlin, Heidelberg. 16. Auflage.
- SCHLICHTING, E., BLUME, H.-P. und STAHR, K. (2011): Bodenkundliches Praktikum. Spektrum, Berlin, Heidelberg. 3. Auflage.
- STEWART, I. and OKE, T. (2009): Newly developed „thermal climate zones“ for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer. In: Eighth Symposium on the Urban Environment, 10. January – 15. January 2009, Keystone, Co, USA.
- TANIGUCHI, M., T. UEMURA and JAGO-ON, K. (2007): Combined Effects of Urbanization and Global Warming on Subsurface Temperature in Four Asian Cities. In: *Vadose Zone Journal* 6 (3): 591 – 596
- UHL, W., SCHAULE, G. and GIMBEL, R. (2001): Preventing bacterial regrowth in old distribution systems. IWA World Water Congress, Berlin, Oct 15-19, 2001.
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2003): VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 – Umweltmeteorologie – Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. VDI, Düsseldorf.

VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2006): VDI-Richtlinie 6023, Blatt 1 – Hygiene in Trinkwasserinstallationen – Anforderungen an Planung, Ausführung, Betrieb und Instandhaltung. VDI, Düsseldorf.

WERNER, P. C. und GERSTENGARBE, F.-W. (2010): Katalog der Großwetterlagen Europas 1881-2009. In: PIK Report Nr. 119.

WINGENDER, J. and FLEMMING, H.-C. (2004): Contamination potential of drinking water distribution network biofilms. In: Water Science and Technology 49 (11-12), 277-286.

ZHU, K., BLUM, P., FERGUSON, G., BALKE, K.-D. and BAYER, P. (2010): The geothermal potential of urban heat islands. In: Environmental Research Letters 5: 1 – 6

ZMARSLY, E., KUTTLER, W. und PETHE, H. (2007): Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen. UTB, Stuttgart. 3. Auflage



**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***