

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	19 (2012), 1	S. 81 – 92	15 Abb., 2 Tab., 11 Lit.
------------------------------	---------	--------------	------------	--------------------------

# Veränderung des oberflächennahen Temperaturfeldes von Berlin durch Klimawandel und Urbanisierung

## Variation of the subsoil temperature field in Berlin as a result of climate change and urbanization

ANDREAS HENNING & ALEXANDER LIMBERG

### 1. Beschreibung des Untersuchungsgebietes Geologisch-hydrogeologischer Überblick

Die heutige Oberflächenform Berlins wurde überwiegend durch die Weichsel-Kaltzeit, die jüngste der drei großen quartären Inlandvereisungen, geprägt. Sie hat der Stadt gleichsam ihren morphologischen Stempel aufgedrückt (Abb. 1): Das tiefgelegene, vorwiegend aus sandigen und kiesigen Ablagerungen aufgebaute Warschau-Berliner Urstromtal mit dem Nebental der Panke sowie die Barnim-Hochfläche im Norden und die Teltow-Hochfläche zusammen mit der Nauener Platte im Süden. Beide Hochflächen sind zu weiten Teilen mit mächtigen Geschiebemergeln bzw. Geschiebelehmen der Grundmoränen bedeckt (Abb. 2). Der Grundwasserflurabstand beträgt im Urstromtal nur wenige Meter, während er auf den Hochflächen meist über

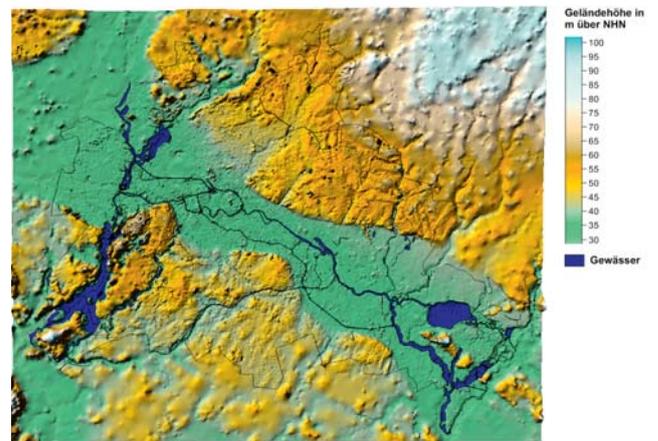


Abb. 1: Morphologische Skizze von Berlin  
Fig. 1: Morphological sketch of Berlin

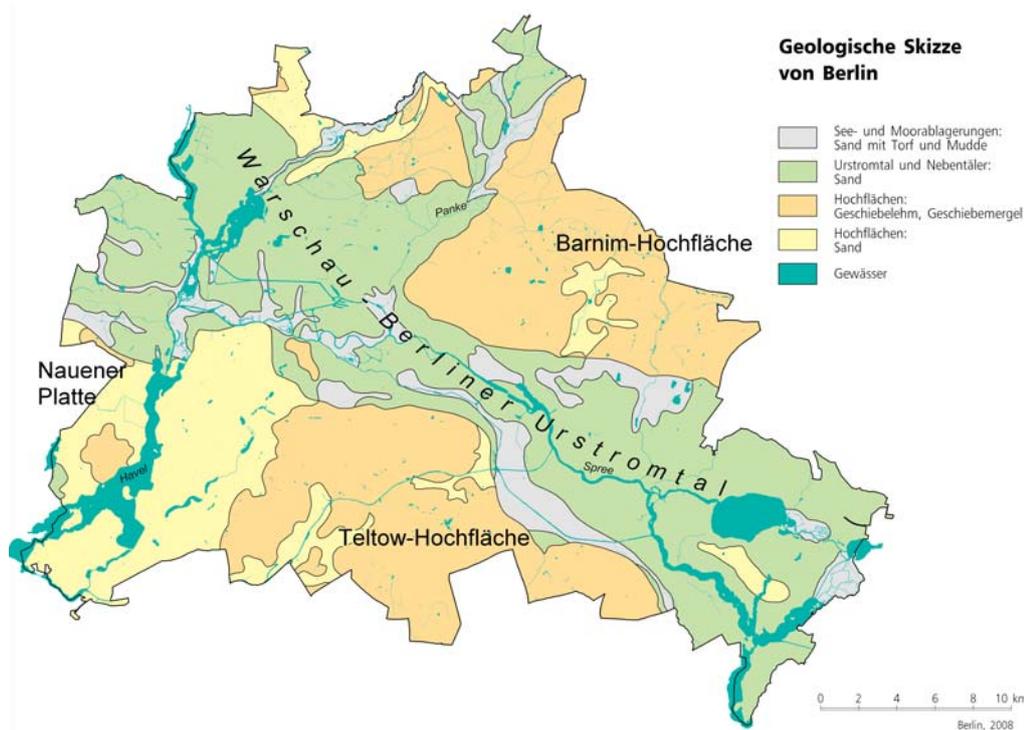


Abb. 2:  
Geologische Skizze  
von Berlin

Fig. 2:  
Geological sketch  
of Berlin

5 bis zu 30 m betragen kann. Die Grundwasserfließrichtung ist in der Regel von den Hochflächen zu den Vorflutern Spree bzw. Havel gerichtet.

Die Mächtigkeit des quartär-tertiären Süßwasserstockwerkes beträgt 150 bis 200 m. Die Barriere zum liegenden Salzwasserstockwerk bildet der etwa 80 m mächtige mitteloligozäne Rupelton.

### Besiedlungsstruktur

Das Land Berlin besitzt eine polyzentrale Besiedlungsstruktur, die durch das Vorhandensein zweier Hauptzentren, mehrerer kleinerer Stadtzentren sowie einem dichten Nebeneinander von Wohnen, Grünflächen, Gewerbe und Industrie charakterisiert ist. Größere Gewerbegebiete und Industrieansiedlungen liegen bevorzugt an den vom Stadtkern radial zum Stadtrand gerichteten Siedlungs- und Entwicklungsachsen sowie an kanalisierten Oberflächengewässern.

Stark vereinfacht lassen sich folgende Unterscheidungen treffen (Abb. 3):

Gebiete

- ohne Besiedlung, überwiegend Vegetation
- mit geringer bis mittlerer Siedlungsdichte und
- mit hoher Siedlungsdichte, Stadtzentren und Industrieansiedlungen.

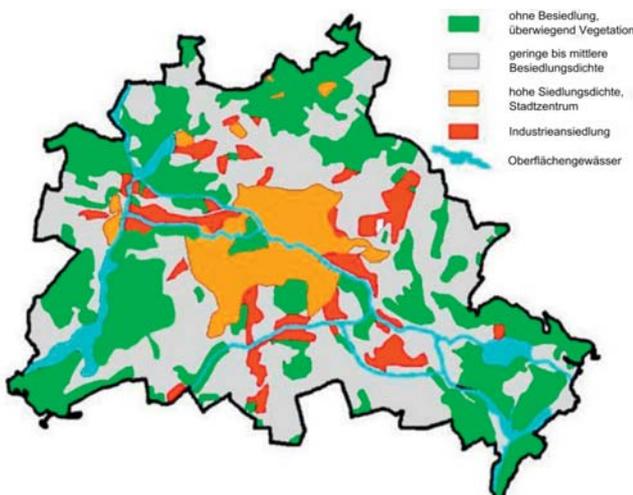


Abb. 3: Flächennutzungs- bzw. Besiedlungsdichtekarte in Anlehnung an den Flächennutzungsplan von Berlin.

Fig. 3: Land use and population density map based on the zoning map of Berlin.

### 2. Messmethode

Seit über 30 Jahren werden in Berlin an tiefen Grundwassermessstellen Temperaturlogs aufgenommen (TRAPP 1983, OTTO 1987) und in einer Datenbank gespeichert. In den 1990er Jahren wurde die erste flächenhafte Temperaturkarte des oberflächennahen Untergrundes von Berlin erstellt (HENNING & LIMBERG 1995).

Die Messungen wurden mit einem Temperaturlichtlot durchgeführt. Der absolute Messfehler, der sich aus der Kalibrierunsicherheit, der Messunsicherheit des Messgeräts und der Messunsicherheit des Messobjekts ergibt – z. B. durch Wärmekonvektion in den Messstellen, lässt sich mit minimal  $\pm 0,3$  °C annehmen.

Zur Erfassung der aktuellen Temperaturverteilung im oberflächennahen Untergrund von Berlin sind im Jahr 2010 an insgesamt 124 Grundwassermessstellen im Land Berlin Temperaturmessungen durchgeführt worden.

Im Rahmen dieser Messkampagne wurden in vier Tiefen und zwar

- 1 m unter Grundwasseroberfläche,
- 20 m unter Geländeoberkante,
- 0 m NHN und
- -10 m NHN

die Grundwassertemperaturen erfasst, die der Temperatur des umgebenen Gebirges entspricht.

Zusätzlich werden seit Februar 2008 regelmäßig im zweimonatlichen Rhythmus Temperaturmessungen in speziell eingerichteten Grundwassermessstellen durchgeführt. Diese Messstellen besitzen keinen Filter, sondern bestehen nur aus Vollrohr. Damit können sie annähernd bis zur Geländeoberfläche mit Wasser befüllt werden und erlauben so eine Messung des Temperaturjahresganges mittels eines Temperaturlichtlotes auch im oberflächennahen ungesättigten Bereich, d. h., in der gesamten, durch den Temperaturjahresgang beeinflussten Messstrecke oberhalb der sogenannten neutralen Zone.

### 3. Veränderung des Temperaturfeldes von Berlin Auswirkungen des Klimawandels

Seit Beginn der 1980er Jahre ist im Land Berlin und in dessen Umland ebenso wie auf der gesamten nördlichen Erdhalbkugel ein signifikanter Anstieg der Lufttemperaturen zu beobachten (Abb. 4). Dieser Temperaturanstieg führt zu einer merklichen Störung des Temperaturgleichgewichts im oberflächennahen Untergrund und kann in der Folge die Temperaturmessungen deutlich beeinflussen.

In der Abbildung 4 sind u. a. die Temperaturabweichungen bezogen auf den Referenzmittelwert der Jahre 1961 bis 1990 jeweils als gleitender Mittelwert über 10 Jahre für die Lufttemperatur in 2 m Höhe und die Bodentemperatur in 12 m Tiefe an der Säkularstation Potsdam-Telegrafenberg, kurz Säkularstation Potsdam, dargestellt.

Die Säkularstation Potsdam liegt ca. 30 km südwestlich vom Stadtzentrum von Berlin in der Stadt Potsdam, ca. 600 m außerhalb der bebauten Zone. Sie ist weltweit die einzige meteorologische Station, die über einen Zeitraum von mehr als 100 Jahren ein umfassendes meteorologisches Messprogramm ohne Lücken und ohne Stationsverlegung, Messunterbrechungen und Instrumentenwechsel durchgeführt hat. Neben der Lufttemperatur, Luftdruck und Niederschlag wird auch in einer maximalen Tiefe von 12 m die Bodentemperatur jeweils am Montag um 13 Uhr gemessen.

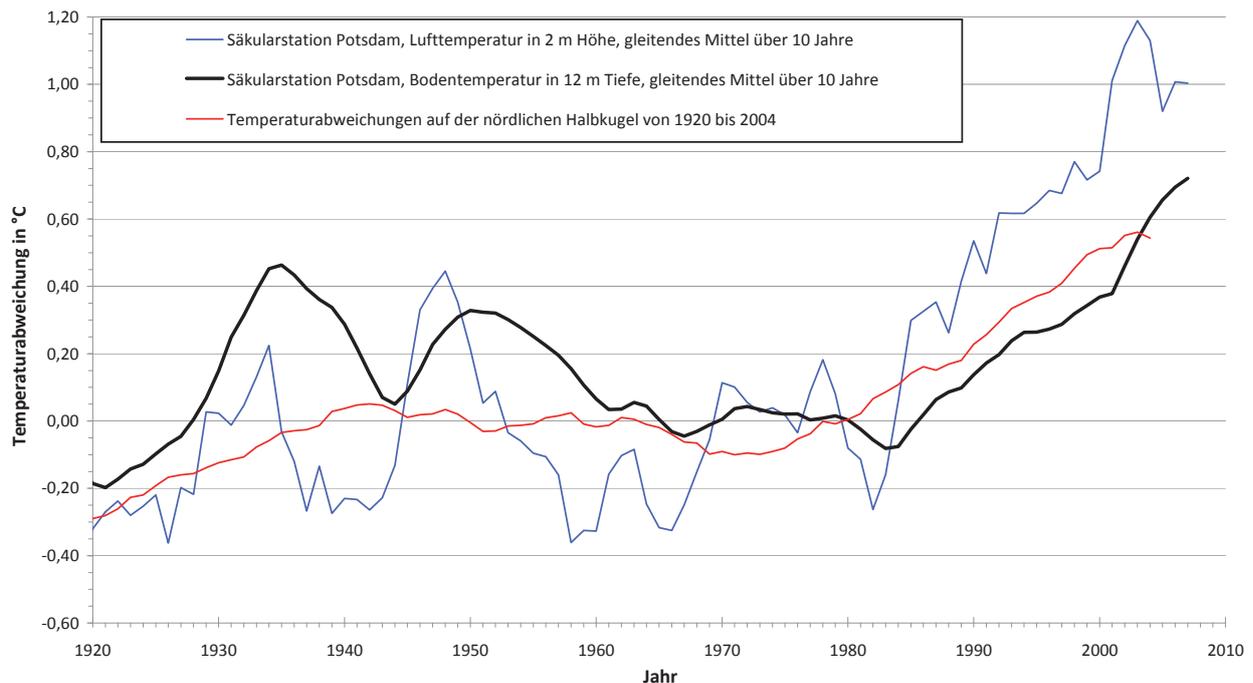


Abb. 4: Temperaturabweichung der Lufttemperatur und der Bodentemperatur in 12 m Tiefe an der Säkularstation Potsdam im Vergleich mit der Temperaturentwicklung auf der der nördlichen Halbkugel von 1920 bis 2004 bezogen auf den Referenzzeitraum 1961 bis 1990 (Datengrundlage WSL 2012 und PIK 2012).

Fig. 4: Temperature variation of air temperature and soil temperature at 12 m depth at the Meteorological Station Potsdam, in comparison with the temperature development of the northern hemisphere from 1920 to 2004 in relation to the reference period from 1961 to 1990.

Aufgrund der Tiefenlage des Messpunktes und der am Standort vorhandenen Bodenbeschaffenheit ist davon auszugehen, dass in dieser Tiefe die saisonalen Temperaturschwankungen weitestgehend bis auf wenige Zehntel Grad abgeklungen sind und die dort gemessene Temperatur annähernd dem Jahresmittel der Oberflächentemperatur entspricht.

Die Abbildung 4 zeigt, dass seit 1980 an der Säkularstation Potsdam ein kontinuierlicher Anstieg der Lufttemperatur und in der Folge auch der Bodentemperatur in 12 m Tiefe zu beobachten ist.

Im Zeitraum 1985 bis 2008 hat sich die Lufttemperatur um rd. 1 °C und die Bodentemperatur in 12 m Tiefe um rd. 0,7 °C erhöht.

Ein Vergleich mit der Temperaturentwicklung auf der nördlichen Halbkugel zwischen 1920 bis 2004 belegt, dass es sich bei dem beobachteten Temperaturanstieg an der Säkularstation Potsdam nicht um eine lokale Anomalie handelt, sondern auf den im Bereich der mittleren und höheren Breiten der nördlichen Hemisphäre zu beobachtenden Klimawandel zurückgeführt werden kann.

Eine deutliche Temperaturbeeinflussung des tieferen Untergrundes, die im Zusammenhang mit der angestiegenen mittleren Oberflächentemperatur steht, ist auch unterhalb der neutralen Zone bei zahlreichen Messstellen im Land Berlin zu beobachten. Die Abbildung 5 zeigt für zwei ausgewählte Messstellen Temperaturprofile, die im Zeitraum zwischen 1984 und 2010 gemessen worden sind.

Schon bei den ersten Messungen in den Jahren 1984 (Messstelle 7063) und 1990 (Messstelle 7213) ist eine deutliche Temperaturveränderung bis in den tieferen Untergrund bis in 60 m (Messstelle 7063) bzw. 100 m (Messstelle 7213) Tiefe zu erkennen. Diese Temperaturveränderungen sind auf die veränderten lokalklimatischen Bedingungen an der Oberfläche zurückzuführen, die auf die zunehmende Urbanisierung im Umfeld der Messstellen zurückzuführen ist.

Bei der Messstelle 7063 konnte dies konkret nachvollzogen werden. Im Zeitraum zwischen 1960 bis 1970 ist in der unmittelbaren Nähe der Messstelle eine größere Wohnanlage errichtet worden. Zuvor war auf diesem Gelände eine Kleingartenanlage vorhanden.

Im anschließenden Beobachtungszeitraum machen sich in den Temperaturprofilen vom August 2000 und Mai 2010 zunehmend die Auswirkungen des Klimawandels bemerkbar, wie in der folgenden Abbildung verdeutlicht wird.

Die Abbildung 6 zeigt, dass im dargestellten Beobachtungszeitraum im Übergangsbereich von der „neutralen“ Zone zum tieferen Untergrund (15 bis 20 m unter Geländeoberkante) ein deutlicher Temperaturanstieg zu beobachten ist, der auf eine Erhöhung der mittleren Oberflächentemperatur zurückgeführt wird.

Ein Vergleich mit den im gleichen Zeitraum in der Säkularstation Potsdam in 12 m Tiefe gemessenen Bodentemperaturen zeigt den Zusammenhang dieser Temperaturentwicklung mit dem allgemein zu beobachtenden Klimawandel auf der nördlichen Hemisphäre (siehe auch Abb. 4).

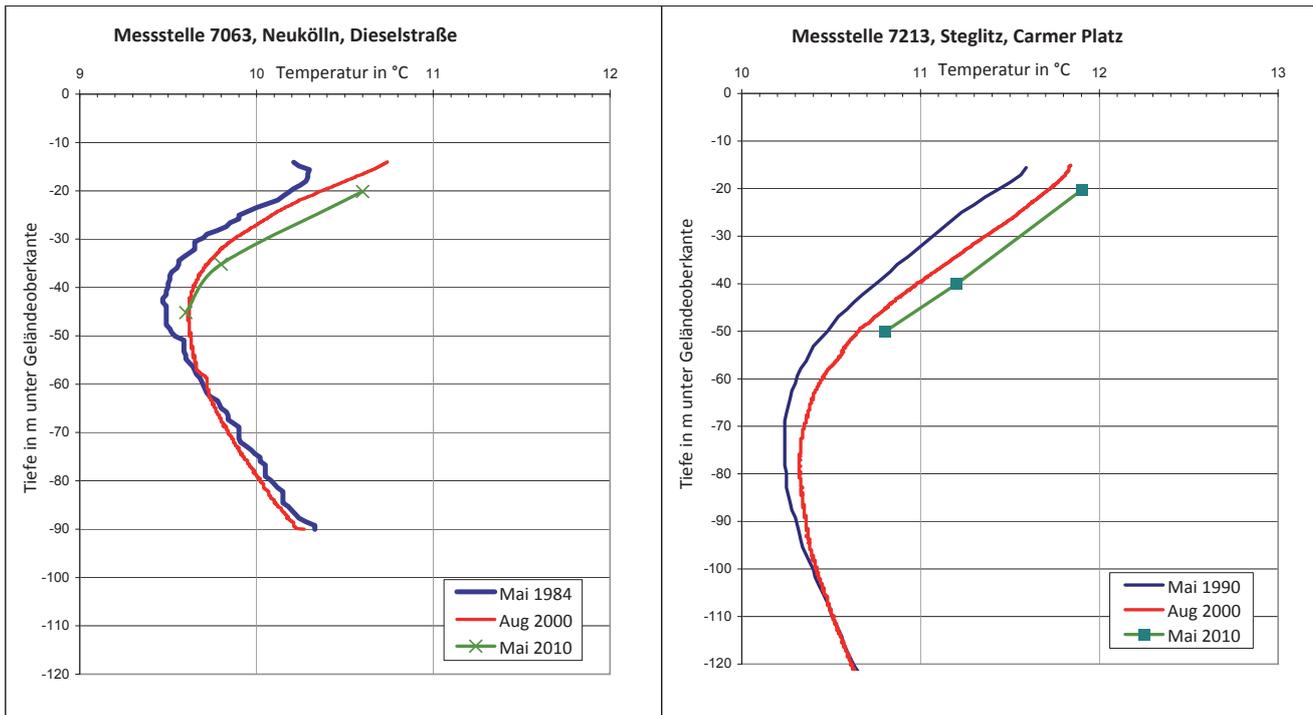


Abb. 5: Ausgewählte Temperaturprofile von zwei Messstellen im Land Berlin, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten in den letzten 26 Jahren gemessen worden sind.

Fig. 5: Selected temperature profiles of two observation wells in the city of Berlin, measured at different times in the last 26 years.

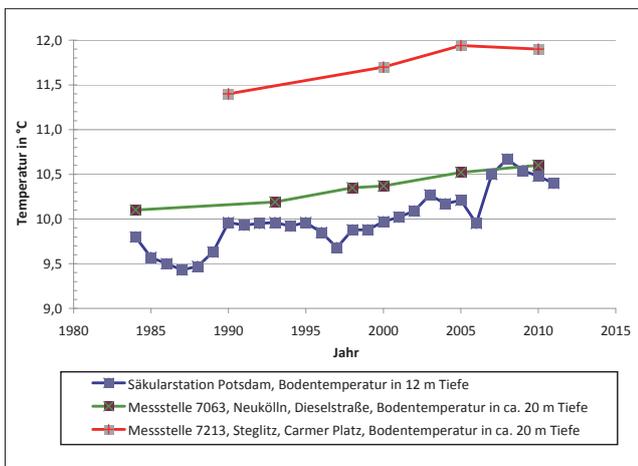


Abb. 6: Bodentemperaturen in ausgewählten Messstellen im Land Berlin und an der Säkularstation Potsdam.

Fig. 6: Soil temperature in selected observation wells in the city of Berlin and at the Meteorological Station Potsdam.

Durch einfache analytische Modellrechnungen für eine konduktive Wärmeausbreitung in den Untergrund lässt sich dieser Temperaturanstieg auch theoretisch nachvollziehen. Dabei werden zwei Randbedingungen für den Oberflächentemperaturanstieg zu Grunde gelegt:

- a) Ein plötzlicher Oberflächentemperatursprung in der Vergangenheit (zum Beispiel durch eine Bebauung und/oder Oberflächenversiegelung).

- b) Ein linearer Temperaturanstieg, der ab einem bestimmten Zeitpunkt begonnen hat (zum Beispiel die Temperaturentwicklung im Zusammenhang mit dem allgemeinen Klimawandel).

Analytische Lösungen für die Wärmeleitungsgleichung unter den oben aufgeführten Randbedingungen sind in CARSLAW & JAEGER (1959) zu finden. In der Abbildung 7 sind beispielhaft für die Messstelle 7063 Modellkurven berechnet worden. Zu beachten ist, dass für die Berechnung nur ein Ein-Schichtfall berücksichtigt werden kann und dieser Sachverhalt bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

Ausgehend von einer mittleren Oberflächentemperatur von ca. 8,45 °C und einer plötzlichen Temperaturerhöhung um 1,8 K (ein sogenannter Temperatursprung) wurde der Temperaturverlauf mit der Tiefe nach einem Modellierungszeitraum von 12 Jahren und im Anschluss mit einem linearen Temperaturanstieg von ca. 0,024 K/a (entspricht ca. 0,62 K im Zeitraum zwischen 1984 bis 2010) und einem weiteren Modellierungszeitraum von 16 und 26 Jahren berechnet.

Vor dem Hintergrund der Messgenauigkeit bei den Temperaturmessungen und den vereinfachten Modellannahmen bei den Kurvenanpassungen konnte eine gute Übereinstimmung der berechneten Modellkurven mit den tatsächlich gemessenen Temperaturprofilen erreicht werden. Auf Grundlage des einfachen Modells kann die Temperatureinflussung bis in den tieferen Untergrund in ca. 60 m Tiefe durch die veränderten klimatischen Bedingungen an der Oberfläche nachvollzogen werden.

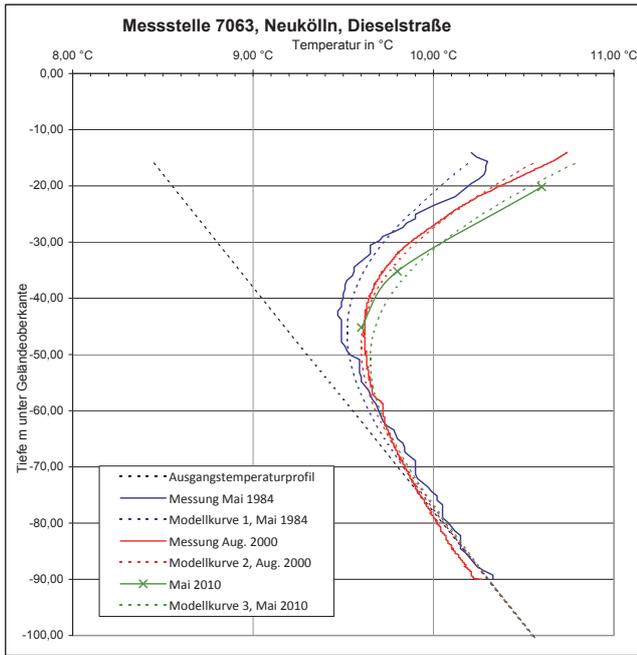


Abb. 7: Ergebnis einfacher Modellrechnungen zur konduktiven Wärmeausbreitung in den Untergrund für einen plötzlichen Oberflächen-temperaturanstieg (Temperatursprung) in der Vergangenheit (Modellkurve 1) und einem anschließenden linearen Temperaturanstieg (Modellkurven 2 und 3).

Fig. 7: Result of simple model calculations of conductive heat propagation in the ground for a sudden rise in surface temperature (step change) in the past (model curve 1) followed by a linear temperature increase (model curves 2 and 3).

### Auswirkung der Urbanisierung

Neben den klimatischen Veränderungen, die auf den Klimawandel zurückgeführt werden können, müssen zusätzlich lokale Temperaturveränderungen berücksichtigt werden, die im Zusammenhang mit der städtischen Nutzung stehen. Die stadtklimatischen Verhältnisse werden sehr stark durch die thermischen Eigenschaften der Oberflächenbebauung und -nutzung geprägt und beeinflussen in der Folge die mittlere Bodenoberflächentemperatur. Sehr viele Einzelparameter an der Grenzfläche Luft/Erde beeinflussen das thermische Mikro- bzw. Lokalklima. Die Farbe, Zusammensetzung, Oberflächenrauigkeit, Bedeckung, der Versiegelungsgrad, der Wasserhaushalt sowie die Ausrichtung zum solaren Strahlungseinfall urbaner Oberflächen entscheiden darüber, wie viel Energie aufgenommen und in der Bausubstanz „gespeichert“ bzw. von dieser an die Atmosphäre bzw. den Untergrund abgegeben wird.

Ein besonderer Parameter in der städtischen Energiebilanz ist nach SEDLBAUER & KRUS (2009) der Bodenwärmefluss. Dabei ist zu beachten, dass der Bodenwärmefluss nicht nur den Wärmefluss in den oberflächennahen Untergrund, sondern auch den in die Gebäudemasse umfasst.

Das System Baukörper und oberflächennaher Untergrund bildet aufgrund der thermischen Eigenschaften der städtischen Baumaterialien wie Asphalt, Stahl und Beton einen riesigen thermischen Speicher, der sich am Tag aufheizt und die Energie über Nacht wieder abgibt. Hier ist die Ursache für die städtische Überwärmung zu suchen.

Eine maßgebliche Beeinflussung des Stadtklimas erfolgt auch durch die Verdunstung (siehe auch KUTTLER 2004). Da die Verdunstung mit einem erheblichen Energieaufwand verbunden ist, steht diese Energie für die Erwärmung der Atmosphäre bzw. des Untergrundes nicht mehr zur Verfügung. Die Abbildung 8 soll beispielhaft diesen Zusammenhang verdeutlichen:

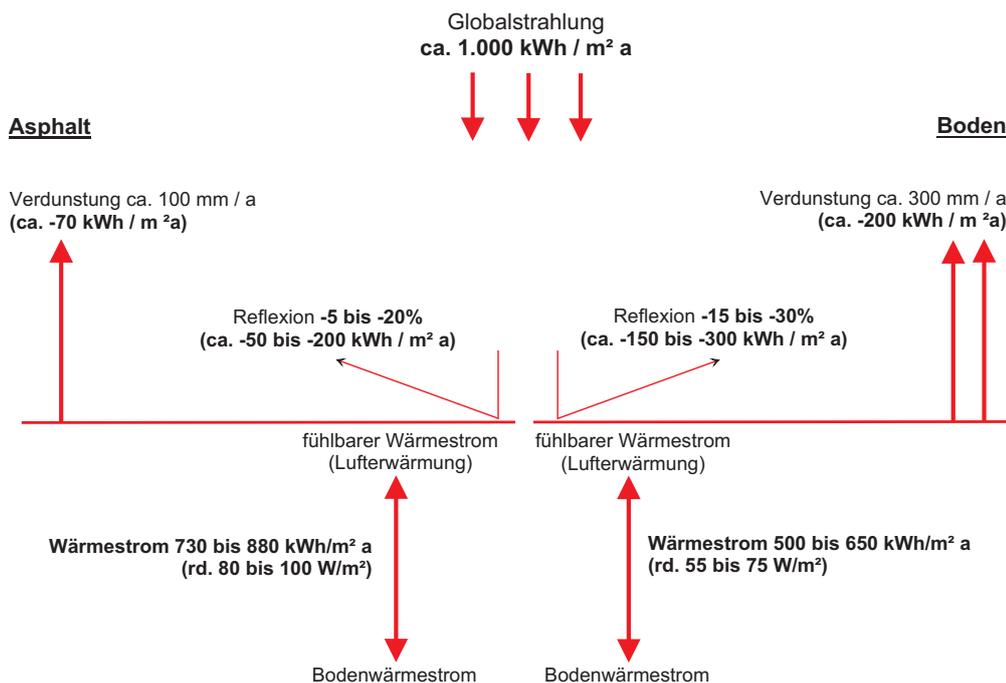


Abb. 8: Auswirkungen unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheiten auf den Energieeintrag am Beispiel einer Asphaltoberfläche und eines bewachsenen Bodens (nach KUTTLER 2004).

Fig. 8: Effects of different surface conditions on the energy input by the example of an asphalt surface and a vegetated soil (after KUTTLER 2004).

Ihr kann entnommen werden, dass es aufgrund von Reflexion und Verdunstung zu einer deutlichen Reduzierung der eingestrahelten Energiemenge kommt. Auf einer Asphaltfläche werden z. B. rd. 2/3 weniger Wasser verdunstet als über einem bewachsenen Boden. Dies führt in der Summe mit anderen Faktoren dazu, dass bei einer Asphaltfläche rd. 80 % der eingestrahelten Jahresenergie und bei einer bewachsenen Bodenoberfläche rd. 60 % für die Boden- und Lufterwärmung zur Verfügung stehen können (siehe auch KUTTLER 2004).

Die Oberflächentemperatur hängt demnach von zahlreichen Faktoren ab. Grundsätzlich ist es nicht möglich, die Oberflächentemperatur, d. h. an der Grenzfläche Luft/Erde direkt zu messen.

Theoretisch könnte die Oberflächentemperatur rechnerisch abgeschätzt werden. Für sehr einfache Gegebenheiten und Randbedingungen, wie z. B. eine Wiese mit Temperaturen oberhalb von 0 °C und ohne Schneebedeckung ist dies möglich. Städtische Gebiete weisen jedoch eine Vielzahl von Randbedingungen auf, die durch einen Wechsel von Grünflächen mit sehr stark bebauten und versiegelten Flächen sowie Baukörpern in unterschiedlicher Flächenausdehnung und Höhe geprägt sind. Die Verhältnisse sind sehr komplex, so dass allein schon die Datenaufnahme sehr aufwändig ist und eine realistische rechnerische Abschätzung praktisch nicht ermöglicht.

Einen Hinweis für die Verteilung der mittleren Oberflächentemperatur und somit der Temperaturverteilung in der „neutralen Zone“ kann z. B. das langjährige Mittel der Lufttemperatur geben. Für das Land Berlin liegen dafür Informationen im digitalen Umweltatlas Karte 04.05 „Stadtklimatische Zonen“ vor (Ausgabe 2001; Abb. 9).

Die Karte 04.05 „Stadtklimatische Zonen“ stellt die Wirkungen der baulichen Nutzungen (berücksichtigt werden Veränderungen bis zum Jahr 2002), der Verteilung und Struktur der nicht bebauten Flächen sowie des Reliefs auf die Klimaparameter im Vergleich zum unbeeinflussten Freiland dar.

Insgesamt sind für die Karte 04.05 sechs stadtklimatische Zonen definiert worden, die von „keiner Veränderung“ über

„geringe Veränderungen“ bis zu einer „hohen Veränderung“ des Klimas im Vergleich zu Freilandverhältnissen reichen. Die Abbildung 9 zeigt den engen Zusammenhang zwischen der bestehenden Bebauung und der horizontalen Ausdehnung der „Wärmeinsel“.

Der zentrale Bereich Berlins mit hoher Verkehrsdichte und dichter Bebauung hebt sich deutlich ab. Die im Zentrum auch vorhandene auffällige Temperaturniedrigung ist auf eine große Grünfläche (den Großen Tiergarten) zurückzuführen. Unveränderte bzw. unbeeinflusste Zonen findet man

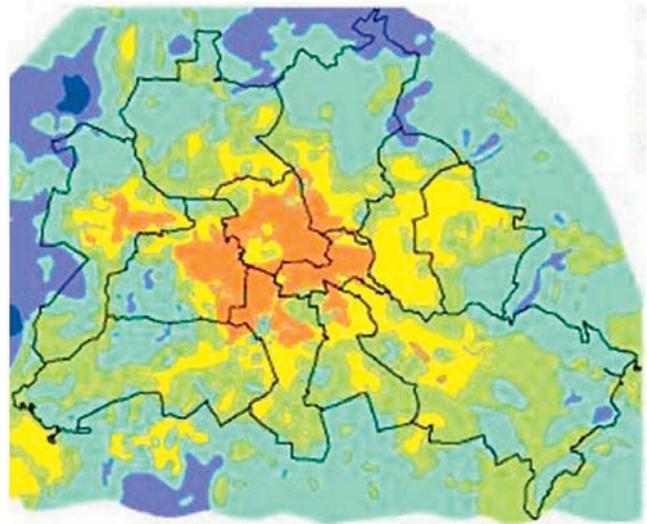


Abb. 9: Stadtklimatische Verhältnisse im Vergleich zu Freilandverhältnissen (Legende siehe Tab. 1); (Auszug aus dem digitalen Umweltatlas Berlin, Karte 04.05 „Stadtklimatische Zonen“, Ausgabe 2001).

Fig. 9: Urban climatic conditions compared to open field conditions (see legend table 1); (Excerpt from the digital Berlin Environmental Atlas, map 4:05 "Urban climate zones", edition 2001).

Veränderungen gegenüber Freilandverhältnissen	Langjähriges Mittel der Lufttemperatur in °C (1961 bis 1990)	geschätzte Bodenoberflächentemperatur in °C
 hohe Veränderungen	> 10,1	> 11,1°C ± 0,5
 mäßige Veränderungen	9,2 bis 10,1	10,2 ± 0,5 bis 11,1 ± 0,5
 geringe Veränderungen	8,6 bis 9,2	9,6 ± 0,5 bis 10,2 ± 0,5
 sehr geringe Veränderungen	7,6 bis 8,6	8,6 ± 0,5 bis 9,6 ± 0,5
 keine Veränderungen	6,9 bis 7,6	7,9 ± 0,5 bis 8,6 ± 0,5
 keine Veränderungen (geländeklimatische Extremlage)	< 6,9	< 7,9 ± 0,5

Tab. 1: Stadtklimatische Zonen – Langjähriges Mittel der Lufttemperatur (Auszug aus dem digitalen Umweltatlas Berlin, Karte 04.05 „Stadtklimatische Zonen“, Ausgabe 2001) und geschätzte Bodenoberflächentemperatur.

Tab. 1: Urban climate zones – longtime average of air temperature (taken from the digital Berlin Environmental Atlas, map 4:05 "Urban climate zones", 2001 edition) and estimated soil surface temperature.

am Stadtrand im Bereich von moorigen Niederungen und in Waldgebieten.

In der Tabelle 1 wird deutlich, dass im langjährigen Mittel zwischen 1961 bis 1990 die Lufttemperatur im zentralen Stadtgebiet („hohe Veränderungen“) gegenüber Freilandverhältnissen („keine Veränderungen“) um mehr als 2,5°C erhöht ist.

Aus der Verteilung der Lufttemperatur TL (in 2 m Höhe) kann die mittlere Oberflächentemperatur T0 (auf der Gebietsoberfläche) abgeschätzt werden. Nach ZOTH (1986) gilt für die Temperatur an der Gebietsoberfläche unter ungestörten Verhältnissen folgender Erfahrungswert:

$$TL + 1 \text{ °C} = (T0 \pm 0,5) \text{ in °C.}$$

Mit Bezug auf die Abbildung 9 lassen sich für die saisonal unbeeinflusste Zone in 15 bis 20 m Tiefe Untergrundtemperaturen zwischen rd. 8 °C bei „ungestörten“ Freilandverhältnissen und mehr als 11°C im zentralen städtischen Bereich abschätzen.

Es ist zu beachten, dass in der Karte 04.05 „Stadtklimatische Zonen“ aufgrund des gewählten Betrachtungszeitraums zwischen 1961 bis 1990 der Temperaturanstieg durch den allgemeinen Klimawandel in der nördlichen Hemisphäre nicht berücksichtigt ist.

### Jahreszeitlicher Temperaturgang

Um die Veränderungen der stadtklimatischen Verhältnisse in der Temperatur des oberflächennahen Untergrundes

besser zu detektieren, werden seit Februar 2008 regelmäßig im zweimonatlichen Rhythmus Temperaturmessungen in speziell eingerichteten Grundwassermessstellen durchgeführt (siehe auch Kap. 2). In der Abbildung 10 ist im Überblick für den Beobachtungszeitraum Februar 2008 bis März 2010 der Temperaturjahresgang für ausgewählte Messstellen in unterschiedlichen stadträumlichen Lagen dargestellt.

In Abhängigkeit von den klimatischen Veränderungen gegenüber Freilandverhältnissen sind unterschiedliche Temperaturen im Übergangsbereich von der neutralen Zone zum tieferen Untergrund, die mit der mittleren Bodenoberflächentemperatur korreliert sind, zu beobachten.

Die Abbildung 10 zeigt für den Beobachtungszeitraum Februar 2008 bis März 2010 die Temperaturen in der neutralen Zone, die gleichzeitig den durchschnittlichen Jahrestemperaturen an der Grenzfläche Luft/Erde entsprechen. In Abhängigkeit von der jeweils stadtklimatischen Lage wurden in der neutralen Zone Temperaturen zwischen rd. 8,5 und 11,5 °C beobachtet.

Ein Beispiel für den Temperaturverlauf im oberflächennahen Untergrund in einer stadtklimatischen Zone mit „sehr geringen“ Veränderungen zeigt die Abbildung 11.

Der Messstellenstandort im Südosten Berlins ist durch einen hohen Grün- und Freiflächenanteil mit gleichzeitig geringer Versiegelung gekennzeichnet. Der oberflächennahe Untergrund baut sich bis in 20 m Tiefe überwiegend aus Feinsanden auf, der Grundwasserflurabstand beträgt ca. 4 m.

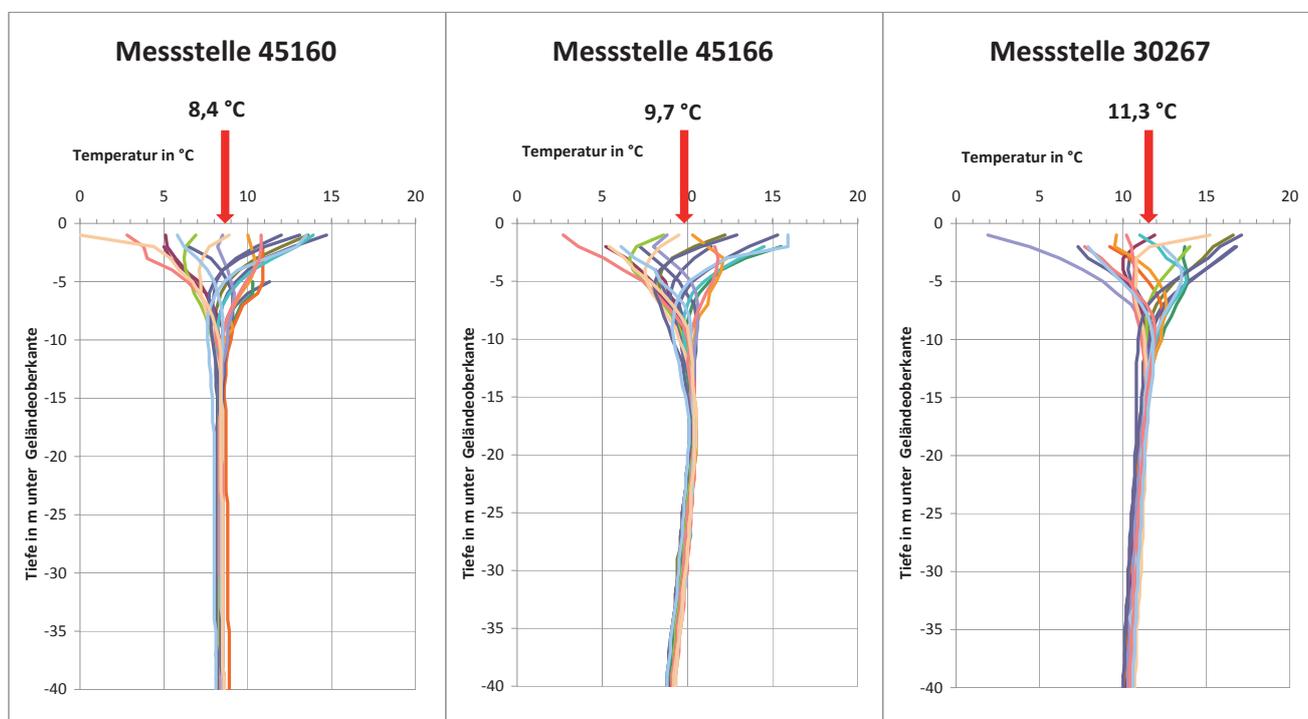


Abb. 10: Temperaturjahresgang in Abhängigkeit von der stadträumlichen Lage im Beobachtungszeitraum Februar 2008 bis März 2010.

Fig. 10: Seasonal temperature variation depending on the location in the city in the period from February 2008 to March 2010.

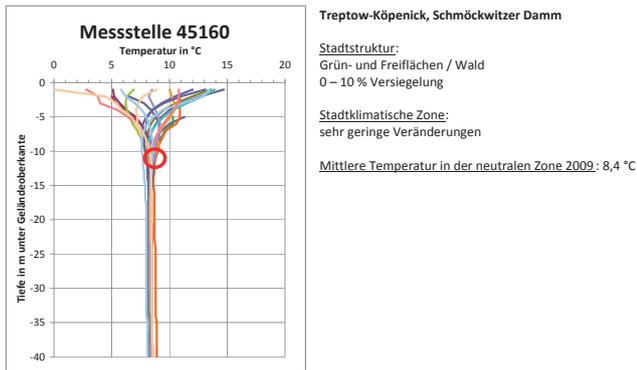


Abb. 11: Temperaturjahresgang in einer stadtklimatischen Zone mit einer „sehr geringen“ Veränderung.

Fig. 11: Seasonal temperature variation in an urban climatic zone with a "very slight" change.

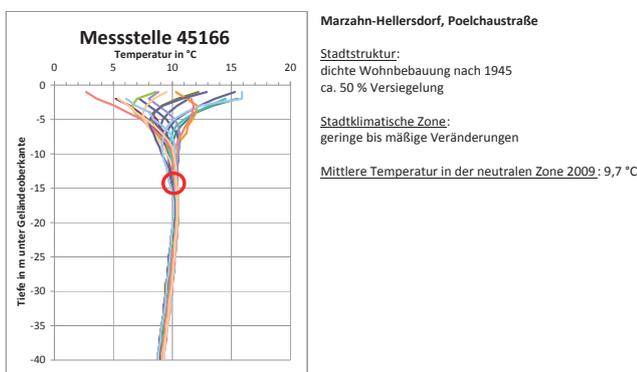


Abb. 12: Temperaturjahresgang in einer stadtklimatischen Zone mit „geringer“ bis „mäßiger“ Veränderung.

Fig. 12: Seasonal temperature variation in an urban climatic zone with a "slight" to "moderate" change.

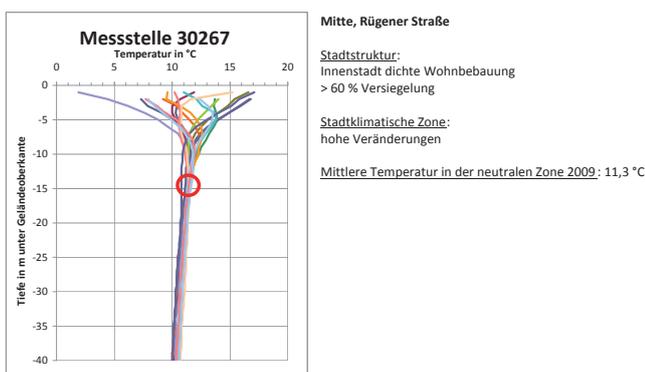


Abb. 13: Temperaturjahresgang in einer stadtklimatischen Zone mit „hoher“ Veränderung.

Fig. 13: Seasonal temperature variation in an urban climatic zone with a "high" change.

Die Temperatur im Übergangsbereich von der neutralen Zone zum tieferen Untergrund in ca. 12 bis 14 m Tiefe liegt im Mittel bei ca. 8,4 °C.

In der Abbildung 12 ist ein Beispiel für den Temperaturverlauf im oberflächennahen Untergrund in einer stadtklimatischen Zone mit „geringer“ bis „mäßiger“ Veränderung dargestellt.

Der Messstellenstandort am östlichen Randbereich von Berlin weist eine dichte Wohnbebauung auf, die nach 1945 errichtet worden ist. Die Flächenversiegelung ist mit rd. 50 % anzusetzen. Der oberflächennahe Untergrund baut sich bis in 28 m Tiefe überwiegend aus Geschiebemergel auf. Die Temperatur im Übergangsbereich von der neutralen Zone zum tieferen Untergrund in ca. 12 m Tiefe liegt im Mittel bei ca. 9,7 °C. Unterhalb der „neutralen“ Zone zeigt sich eine deutliche Beeinflussung des tieferen Untergrundes durch die Temperaturverschiebung an der Oberfläche. Im Gegensatz zu dem üblichen Temperaturanstieg mit einem Gradienten von rd. 3 K/100 m nimmt die Temperatur bis in eine Tiefe von mindestens 40 m weiter ab. Der Umkehrpunkt, das heißt die Tiefe, ab der die Temperatur wieder ansteigt liegt zwischen 50 und 60 m unter Geländeoberkante. Die Temperaturprofile zeigen, dass der Temperaturangleich im tieferen Untergrund noch nicht abgeschlossen ist. Mit zunehmender Zeit wird sich der tiefere Untergrund weiter erwärmen.

Die Abbildung 13 zeigt einen Temperaturverlauf im oberflächennahen Untergrund in einer stadtklimatischen Zone mit „hoher“ Veränderung. Der Messstellenstandort befindet sich am nordöstlichen Rand der Innenstadt mit dichter Wohnbebauung. Die Flächenversiegelung beträgt mehr als 60 %. Der oberflächennahe Untergrund baut sich bis in 30 m Tiefe aus einer Wechsellagerung mit Feinsand und Geschiebemergel auf. Die Temperatur im Übergangsbereich von der neutralen zur geothermischen Zone in ca. 14 m Tiefe liegt im Mittel bei ca. 11,3 °C. Auch hier zeigt sich unterhalb der „neutralen“ Zone eine deutliche Beeinflussung des tieferen Untergrundes durch die Temperaturverschiebung an der Oberfläche. Der Umkehrpunkt liegt hier in einer Tiefe zwischen 60 und 70 m unter Geländeoberkante. Mit zunehmender Zeit wird sich auch hier der tiefere Untergrund weiter erwärmen.

Ein Vergleich der thermischen Kennziffern (Tab. 2) für die Temperaturen in 3 m unter Geländeoberkante:

- minimale Temperatur,
- maximale Temperaturen und
- Temperaturamplitude,

zeigt die stadtklimatisch bedingten Unterschiede. In 3 m Tiefe unter Geländeoberkante ist mit einer zunehmenden stadtklimatischen Veränderung, u. a. mit einer deutlichen Erhöhung der maximalen Temperatur und der Temperaturamplituden zu rechnen.

Messstelle	Bezugstiefe unter Geländeoberkante	Minimum Temperatur	Maximum Temperatur	Mittlere Temperatur	Maximale Amplitude
45160	3 m	5,4 °C	11,5 °C	8,6 °C	3,0 °C
45166	3 m	6,4 °C	13,1 °C	9,6 °C	3,5 °C
30267	3 m	7,9 °C	15,9 °C	11,8 °C	4,2 °C

Tab. 2: Ausgewählte thermische Kennziffern für die Temperaturen 3 m unter Geländeoberkante.

Tab. 2: Selected thermal indicators for the temperature 3 m below ground level.

Gegenüber Freilandverhältnissen führt die unterschiedliche Energiebilanz an der Grenzfläche Luft/Erdoberfläche dazu, dass mehr Wärmeenergie in die darunterliegenden Bodenschichten eingetragen wird. Über das Jahr betrachtet sind die jeweiligen Wärmebilanzen (Wärmeeintrag zu Wärmeabtrag) ausgeglichen.

**Karte des oberflächennahen Temperaturfeldes von Berlin**

Im Jahr 2010 wurden an 124 Grundwassermessstellen im Land Berlin in definierten Tiefen flächenhaft Temperaturmessungen durchgeführt. Auf Grundlage dieser Messungen ist die Ausbildung der Untergrundtemperaturen u. a. für die Bezugshorizonte

- 20 m unter Geländeoberkante und
- 0 m NHN

dargestellt.

In der Abbildung 14 ist die Temperaturverteilung für den Bezugshorizont 20 m unter Geländeoberkante im Land Berlin dargestellt. Mit Bezug auf die aufgezeichneten Temperaturjahresgänge kann angenommen werden, dass in dieser

Tiefe der Einfluss der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen weitestgehend abgeklungen ist.

Die Temperaturen schwanken zwischen kleiner 8,5 °C im Stadtrandbereich und mehr als 12,5 °C im dicht bebauten Innenstadtbereich bzw. in den Industriegebieten. Vom Stadtrand zum Stadtzentrum hin ist tendenziell ein Temperaturanstieg zu beobachten. Es zeigen sich jedoch folgende Unterschiede:

Während der Temperaturverlauf von Nordosten gesehen einen kontinuierlichen Anstieg zum Stadtzentrum hin zeigt, ist insbesondere vom Süden aus gesehen das Temperaturfeld durch das Auftreten von mehreren kleineren positiven und negativen Temperaturanomalien gekennzeichnet, die auf größere Grünflächen, Nebenzentren oder Industriegebiete zurückgeführt werden können.

Das stark bebaute und versiegelte Stadtzentrum wird von einer 11,5 °C-Isolinie eingeschlossen. Die im Stadtzentrum zu beobachtende Wärmeinsel mit Temperaturen von mehr als 12,5 °C wird durch den Großen Tiergarten, einer großen Grünfläche im Innenstadtbereich, durchbrochen. Innerhalb dieser Wärmeinsel sind – wie aus lokalen Untersuchungen bekannt ist – punktuelle Anomalien mit Temperaturen von über 13 °C zu beobachten. Die höchsten Temperaturen wer-

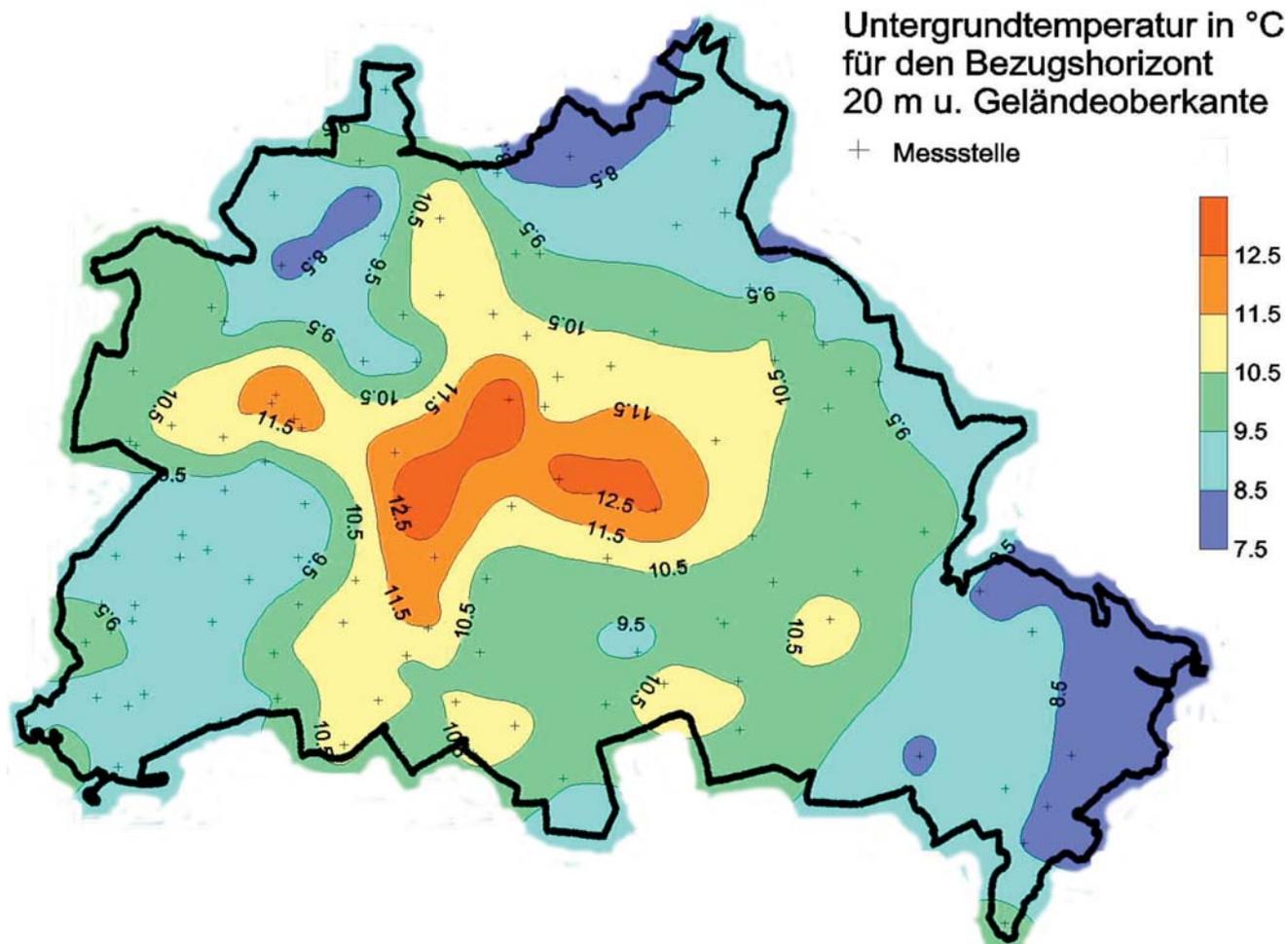


Abb.14: Untergrundtemperatur für den Bezugshorizont 20 m unter Geländeoberkante im Jahr 2010.  
Fig. 14: Subsurface temperature for the reference horizon 20 m below ground level in 2010.

den in der Nähe von Kühlwassereinleitungen der Heizkraftwerke gemessen.

Unterhalb der ausgedehnten Waldgebiete im Südosten, Norden, Nordwesten und Südwesten des Landes Berlin liegen die Temperaturen im Bereich von 9 °C bzw. darunter. Ferner fallen negative Temperaturanomalien im Stadtgebiet von weniger als 10 °C mit Bereichen zusammen, die sich durch einen hohen Vegetationsanteil auszeichnen, wie z. B. der Britzer Garten.

Generell ergeben sich im dicht besiedelten Innenstadtbereich gegenüber dem Freiland Temperaturerhöhungen im Grundwasser von mehr als 4 K.

Auf jeden Fall wird eine positive Korrelation mit den stadtklimatischen Zonen in Abbildung 9 deutlich.

Die Temperaturverteilung für den Bezugshorizont 0 m NHN im Land Berlin ist in Abbildung 15 dargestellt. Das entspricht in Abhängigkeit von der Geländeoberkante einem Tiefenhorizont zwischen rd. 30 m im Bereich des Berliner Urstromtals und bis max. rd. 70 m auf den angrenzenden Hochflächen. In diesen Tiefen kann eine Beeinflussung durch die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen ausgeschlossen werden. Es zeigen sich jedoch auch hier die langfristig anhaltenden Temperaturänderungen der Ober-

flächentemperatur, die z. B. durch eine veränderte bauliche Entwicklung oder klimatische Veränderungen verursacht werden.

Auch bei dieser Kartendarstellung schwanken die Temperaturen zwischen kleiner 8,5 °C im Stadtrandbereich und mehr als 11,5 °C im dicht bebauten Innenstadtbereich.

#### 4. Ausblick

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Temperaturmessungen, dass im Stadtgebiet von Berlin und dies besonders im zentralen Bereich, der Untergrund und damit auch das Grundwasser deutlich erwärmt ist. Allgemein ist im dicht besiedelten Innenstadtbereich gegenüber dem Freiland eine Temperaturerhöhung von mehr als 4 K zu beobachten.

Auch langfristig ist mit einer weiteren tiefgreifenden Erwärmung oder auch Abkühlung des oberflächennahen und des tieferen Untergrundes und somit des Grundwassers zu rechnen.

Gründe dafür sind

- die aktuell ablaufenden globalen klimatischen Veränderungen,

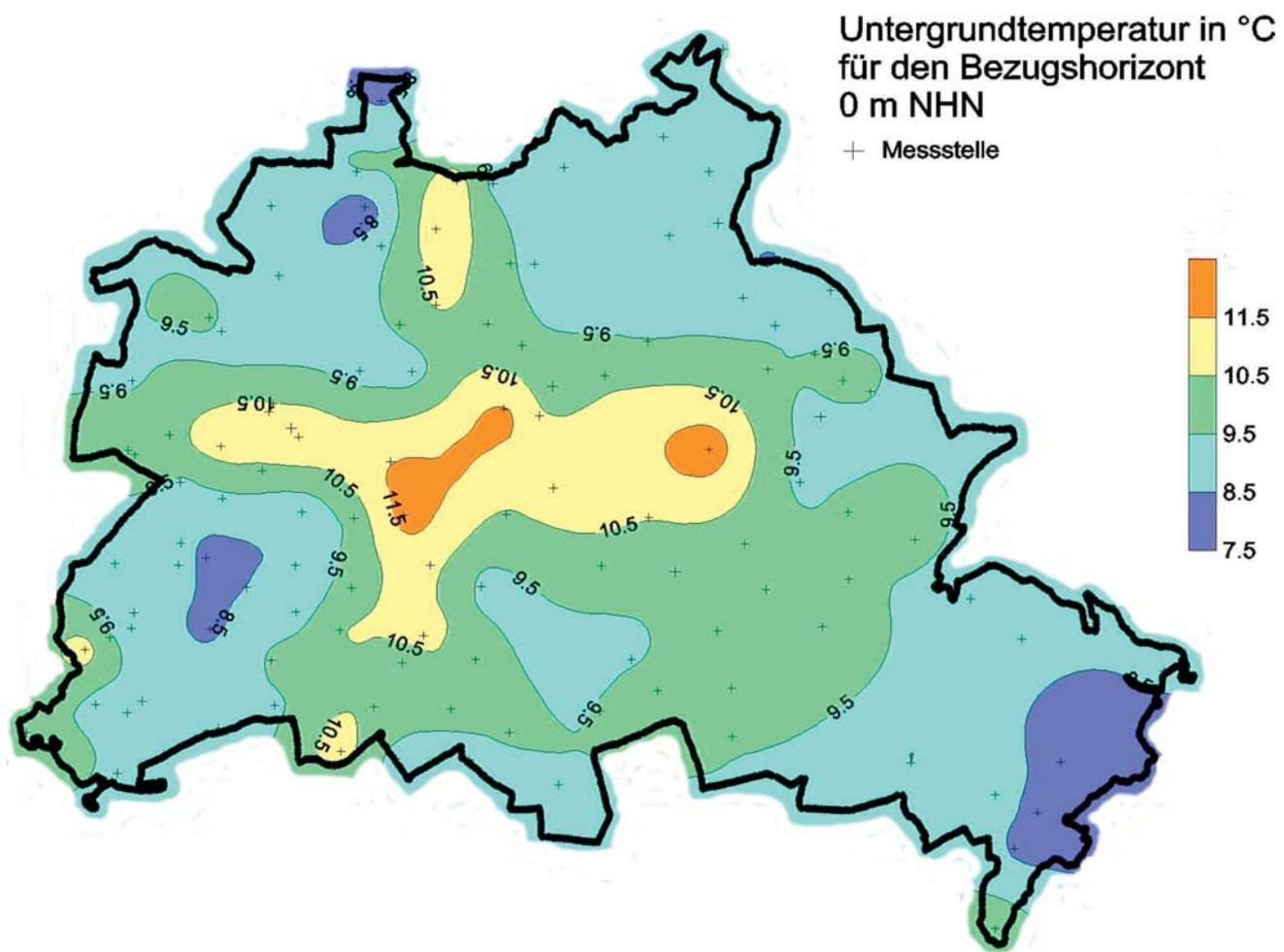


Abb. 15: Untergrundtemperatur für den Bezugshorizont 0 m NHN im Jahr 2010.

Fig. 15: Subsurface temperature for the reference horizon 0 m NHN in 2010.

- der noch nicht abgeschlossene Temperaturangleich der zurückliegenden mikroklimatischen Veränderung,
- die fortschreitende Urbanisierung und
- aktuell in den letzten Jahren die verstärkte thermische Nutzung des Untergrundes.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich im dicht besiedelten Innenstadtbereich gegenüber dem Freiland Temperaturerhöhungen im Untergrund von mehr als 4 K ergeben können und dieser somit deutlich erwärmt ist. Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang mit den stadtklimatischen Verhältnissen und den Durchschnittstemperaturen an der Oberfläche. Dies belegen auch die Ergebnisse der regelmäßigen Untersuchungen an ausgewählten Temperaturmessstellen in unterschiedlichen stadtstrukturellen Lagen.

Allgemein zeigt die oberflächennahe Temperaturverteilung im Land Berlin einen Zusammenhang mit der Verteilung von Industrieansiedlungen, Abwärmeproduzenten, Oberflächenversiegelung, Freiflächen und anthropogen erwärmter Oberflächengewässer (siehe auch HENNING 1990). Unter Berücksichtigung des Grundwasserströmungsfeldes kann davon ausgegangen werden, dass diese Faktoren einen wesentlichen Einfluss auf die Veränderung der Grundwassertemperatur haben. Da es in der Stadt in der Regel zu einer Häufung dieser Faktoren kommt, überlagern sich die Einflussgrößen gegenseitig.

### Zusammenfassung

Das Temperaturfeld im oberflächennahen Untergrund wird durch den geothermischen Energievorrat in großer Tiefe und durch die mittlere Jahrestemperatur an der Erdoberfläche, d. h. der Grenzfläche Luft/Erde bestimmt. Im Gegensatz zur konstanten Erdwärmestromdichte ist die mittlere Jahrestemperatur an der Erdoberfläche von den lokal vorherrschenden klimatischen Bedingungen abhängig, die gerade in den letzten 100 Jahren einerseits durch die globalen Klimaveränderungen, aber andererseits auch durch eine zunehmende Urbanisierung im Land Berlin einer stetigen Veränderung unterzogen sind.

Die mittlere Oberflächentemperatur stellt daher für die Bewertung des Temperaturfeldes bis in mehr als 100 m Tiefe eine wesentliche Größe dar. Gerade in den letzten Jahrzehnten ist eine zunehmende Beeinflussung der Untergrundtemperatur durch eine veränderte mittlere Oberflächentemperatur in einzelnen Temperaturprofilen im Land Berlin zu beobachten.

Auf Grundlage von Langzeituntersuchungen kann gezeigt werden, dass aufgrund der fortschreitenden baulichen Entwicklung, aber auch der allgemeinen klimatischen Veränderungen von einer weiteren tief greifenden Erwärmung des jahreszeitlich beeinflussten (bis 20 m Tiefe) und des oberflächennahen Untergrundes (bis 100 m Tiefe) und somit auch des Grundwassers auszugehen ist.

Die Untergrundtemperaturen können bis in größere Tiefen sehr stark durch die veränderten lokalen klimatischen Veränderungen des letzten Jahrhunderts beeinflusst sein.

Zurzeit ist im Land Berlin zu beobachten, dass im Gegensatz zum sonst üblichen „ungestörten“ Temperaturanstieg ab ca. 15 bis 20 m Tiefe mit ca. 3 K/100 m, die Untergrundtemperatur aufgrund der Temperaturerhöhung an der Oberfläche bis in größere Tiefen von mehr als 60 m abnimmt, um erst dann wieder anzusteigen. Dieser Temperaturverlauf ist charakteristisch für den noch nicht abgeschlossenen Temperaturangleich im tieferen Untergrund. Mit zunehmender Zeit wird sich bei unverändert wirkenden Oberflächentemperaturrandbedingungen der Untergrund weiter erwärmen.

### Summary

The temperature field in the shallow subsurface is determined by the amount of heat in great depth and the mean annual surface temperature at the interface air/earth. In contrast to the constant terrestrial heat flow, the mean annual surface temperature depends on the local climatic conditions that have changed in the last 100 years, on one hand because of the global climate change but on the other hand also by increasing urbanization in the state of Berlin.

The mean annual surface temperature is a significant size to evaluate the temperature field up to more than 100 m depth. In recent decades, an increasing change in the measured underground temperatures of different boreholes can be observed due to the influence of the variations in the mean annual surface temperature in the state of Berlin.

On the basis of long-term studies it can be shown that due to the urbanization, but also to the general climatic change, a drastic warming of the seasonally influenced soil (up to 20 m depth) and shallow subsurface (up to 100 m depth) and therefore of the groundwater is assumed.

The subsurface temperatures up to greater depths are highly influenced by the local climatic changes of the last century. At the present time it can be observed in several boreholes in Berlin that the normal linear soil temperature increases by approx. 3 K/100 m from a depth of around 20 m, decreases up to 60 m and then rises again. This temperature profile is characteristic of a thermal state which is not yet in an equilibrium in the deeper subsoil. With increasing time and an unchanged influence of surface temperature conditions, the warming of the subsurface will proceed.

### Literatur

CARSLAW, H. S. & J. C. JAGER (1959): *Conduction of Heat in Solids*. – S. 63, 2nd Edition, Oxford (Clarendon Press)

HENNING, A. (1990): *Bedeutung von Temperaturmessungen in Grundwasserbeobachtungsrohren für Hydrologie und Erdwärmennutzung*. – Diplomarbeit Institut für Angewandte Geophysik, Petrologie und Lagerstättenkunde der Technischen Universität Berlin, S. 87, Berlin (unveröff.)

- HENNING, A. & A. LIMBERG (1995): Das Grundwasser-Temperaturfeld von Berlin. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **2**, 1, S. 97 – 104, Kleinmachnow
- KUTTLER, W. (2004): Stadtklima, Teil 1: Grundzüge und Ursachen. – UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox. **16**, 3, S. 187 – 199, Landsberg, Ft. Worth (ecomede verlagsgesellschaft AG & Co. KG)
- OTTO, R. (1987): Hydrochemie, Thermometrie und Fließverhältnisse des Grundwassers in den südöstlichen Stadtbezirken von Berlin (West) - Neukölln, Kreuzberg, Tempelhof, Schöneberg. – Berliner geowiss. Abh. **88**, 115 S., Berlin
- PIK (2012): Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, Säkularstation Potsdam-Telegrafenberg; zugegriffen: 02. April 2012, <http://www.klima-potsdam.de/>
- SEDLBAUER, K. & M. KRUS (2009): Bauphysik. – Skript zur Vorlesung Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Freilandversuchsstelle Holzkirchen (unveröff.)
- TRAPP, CH. (1983): Beschaffenheit und hydrogeologische Zusammenhänge des tieferen Grundwassers im nördlichen Stadtgebiet von Berlin (West). – Berliner geowiss. Abh. **44**, 79 S., Berlin
- UMWELTATLAS BERLIN: Karte 04.05 „Stadtklimatische Zonen, zugegriffen am 02. April 2012, <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/>
- WSL (2012): Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL); zugegriffen: 02. April 2012, <http://www.wsl.ch>
- ZOTH, T. A. & R. HÄNEL (1988): Appendix.– In: R. HÄNEL, L. RYBACH & L. STEGENA (ed.): Handbook of Terrestrial Heat Flow Determinations, Kluwer, S. 449 – 466, Hannover

**Anschrift der Autoren:**

Andreas Henning  
Energie- und Umweltberatung  
Rothenbücherweg 53 a  
14089 Berlin  
[andreas.henning@henning-umwelt.de](mailto:andreas.henning@henning-umwelt.de)

Alexander Limberg  
Geologie und Grundwassermanagement,  
Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz  
Brückenstraße 6  
10179 Berlin  
[alexander.limberg@senstadtum.berlin.de](mailto:alexander.limberg@senstadtum.berlin.de)