

Auswertung von Temperaturmessungen des Berliner Untergrundes über einen Zeitraum von 150 Jahren

Evaluation of underground temperature measurements in Berlin over a period of 150 years

ALEXANDER LIMBERG & ANDREAS HENNING

1 Beginn der Messungen 1869

Grundwassertemperaturmessungen

Mitte des neunzehnten Jahrhunderts grassierte in Mitteleuropa und so auch in Berlin die Cholera mit verheerenden Auswirkungen. Es bestand der Verdacht, dass das Grundwasser Überträger oder sogar Auslöser dafür sein könnte.

Deshalb wurden in Berlin die Grundwasserstände an 30 neu errichteten Grundwassermessstellen gemessen und auch Temperaturmessungen erhoben (Abb. 1). Die monatlichen Aufzeichnungen der Grundwassertemperatur erfolgten von September 1869 bis Ende 1873 (Abb. 2).

Während bei HOBRECHT (1871) die Messmethode zum Grundwasserstand ausführlich beschrieben ist, heißt es zur Grundwasser-Temperaturmessung lediglich: „Mit der Mes-

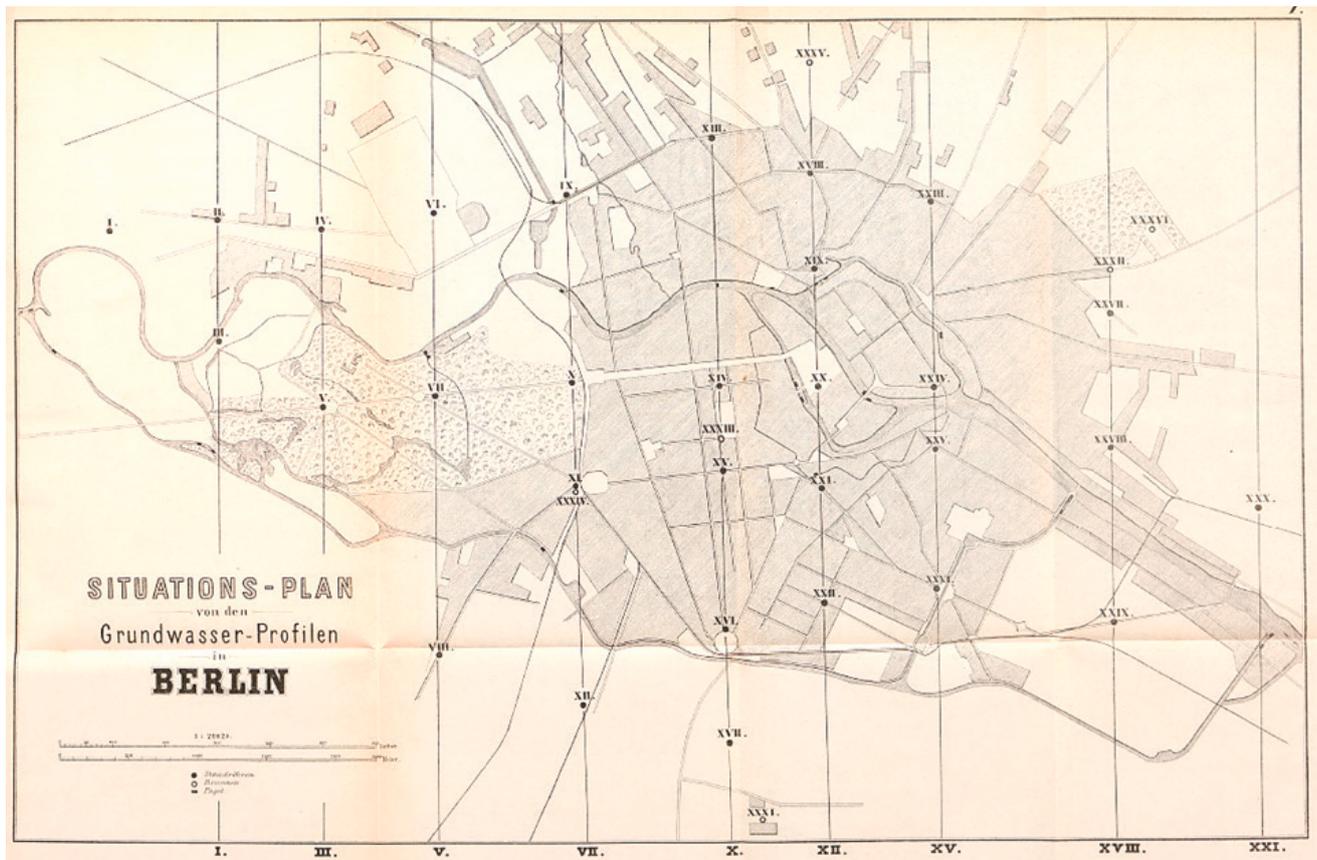


Abb. 1: Lageplan des ersten Grundwassermessnetzes von Berlin von 1869 mit 30 Grundwassermessstellen, an denen auch die Grundwassertemperatur gemessen wurde, außer an Messstelle I.

Fig. 1: Layout plan of the first groundwater monitoring network of Berlin in 1869 with 30 observation wells, where also the groundwater temperature was measured, except observation well no. I.

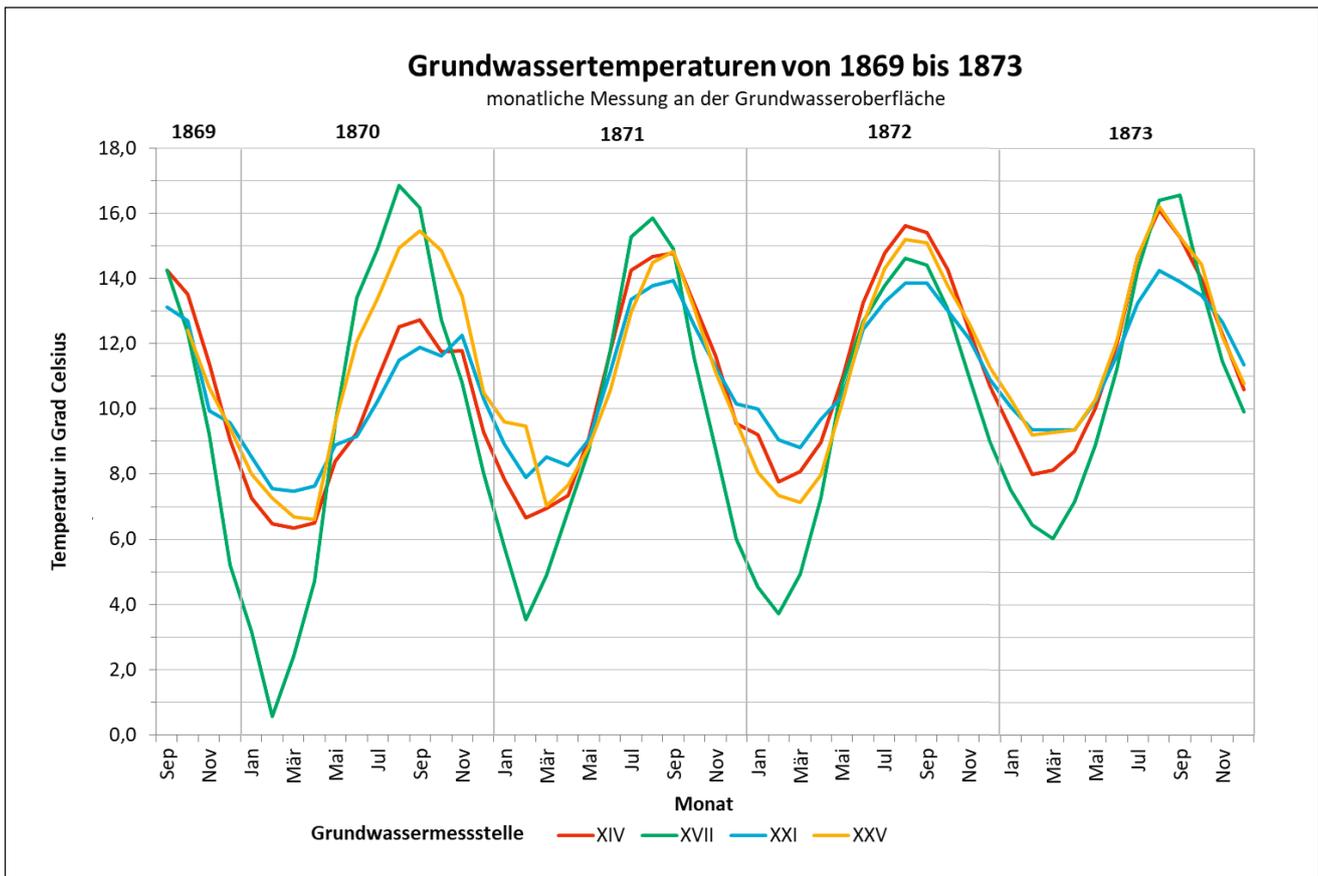


Abb. 2: Grundwassertemperaturganglinien vom September 1869 bis zum Dezember 1873 an vier von 29 Messstellen (Lage der Messstelle s. Abb.1)

Fig. 2: Temperature curves of four from 29 observation points beginning from September 1869 until December 1873, location of the observation points see fig. 1

sung des Grundwasserstandes wird zugleich eine Temperaturmessung vorgenommen.“ (HOBRECHT 1871: S. 259). Wie und in welcher Tiefe gemessen wurde, beschreibt er nicht. Es ist aber davon auszugehen - und die Messergebnisse legen das auch nahe -, dass die Temperaturmessungen an der Grundwasseroberfläche erfolgten. Hobrecht stellte bereits 1871 auswertend fest, „dass die durchschnittlich niedrigste Temperatur des Grundwassers im März, die durchschnittlich höchste im September beobachtet wird.“

Bei allen Messstellen ist qualitativ der gleiche Temperaturjahresgang mit niedrigen Temperaturen im Winter und hohen im Sommer zu beobachten. Es gibt jedoch an gleichen Zeitpunkten z.T. große Temperaturunterschiede, die im Winter, zum Beispiel im Februar 1870 bei $-8,9$ Grad Celsius Oberflächentemperatur, bis zu 7 Kelvin¹ betragen können. Bei der Messstelle XVII betrug der Grundwasserflurabstand zu diesem Zeitpunkt nur $1,2$ m und die Temperatur $0,6$ Grad Celsius während bei der Messstelle XXI bei $3,4$ m Flurabstand $7,6$ Grad Celsius gemessen wurden (Abb. 1 und

2). Diese Differenz ist auf den abnehmenden klimatischen Temperatureinfluss zur Tiefe hin zurückzuführen.

Hobrecht konstatiert im Jahr 1874, dass die Jahresdurchschnittstemperatur aller gemessener Messstellen von 1870 bis 1873 stetig angestiegen ist: von $7,94$ bis auf $8,768$ Grad Reaumur (HOBRECHT 1874: S. 695), das entspricht $6,35$ bis $7,01$ Grad Celsius. Die Jahresmitteltemperatur der Luft war in diesem Zeitraum ebenfalls von $6,9$ auf $8,3$ Grad Celsius nach der BAUR- & BERKELEY-REIHE angestiegen.

2 Bodentemperaturmessungen

Da man glaubte, aus Untersuchungen zur Bodenwärme die Verbreitung und den Verlauf der Cholera besser ableiten zu können (PFEIFFER in VIRCHOW 1873: S. 49), wurden in Berlin 14 Bodentemperaturmessstellen nach Vorgaben von Pfeiffer eingerichtet (HOBRECHT 1874: S. 705):

„Diese sämtlichen Beobachtungsstellen sollen auf der Strasse, dem Hof oder Garten an geeigneter Stelle gemacht werden und zwar so:

1. es wird mit einem gewöhnlichen Brunnenbohrer das verticale Loch für das Beobachtungsrohr gemacht,

¹ Da Temperaturdifferenzen in der Celsius- und Kelvin-Skala übereinstimmen, werden Differenzen vereinbarungsgemäß auch hier in Kelvin angegeben

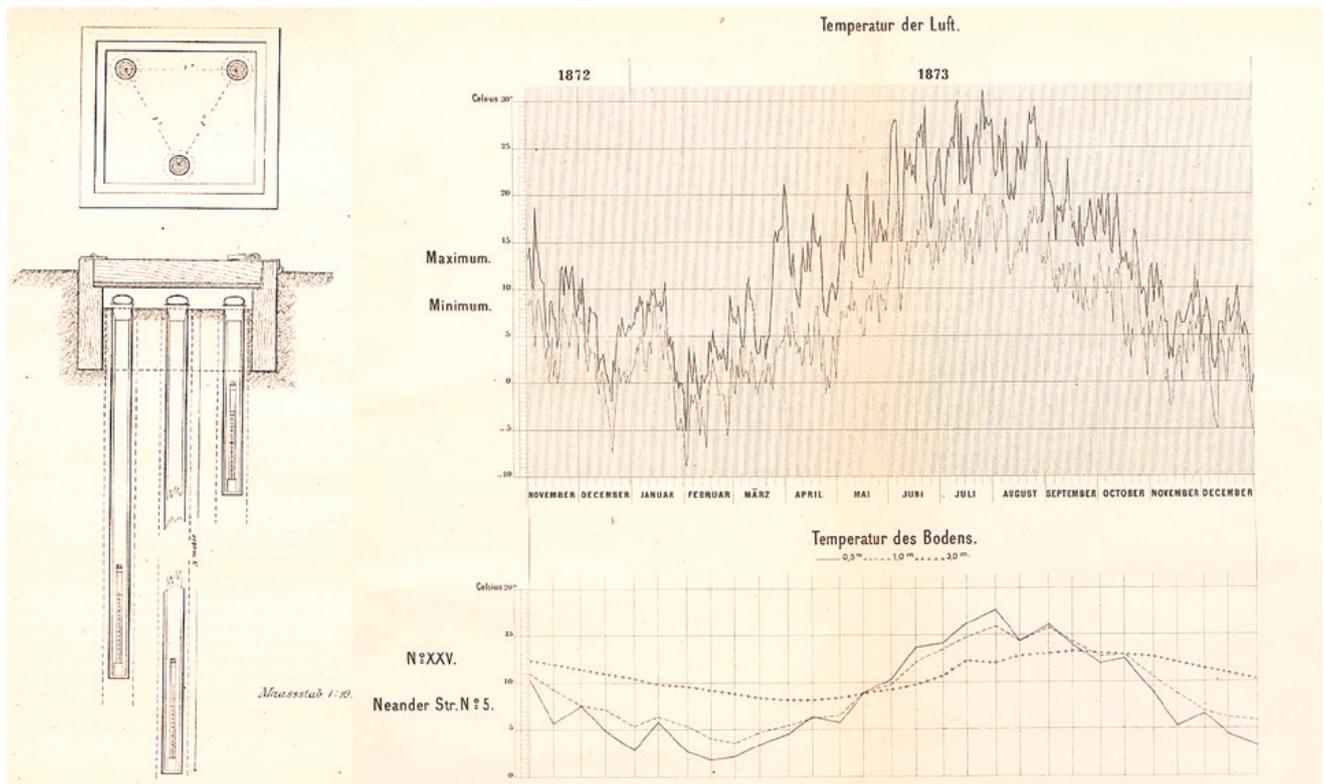


Abb. 3: Aufbau der Bodentemperaturmessstellen (links) und die Ganglinien der 14tägigen Temperaturmessungen in 0,5, 1,0 und 3,0 m Tiefe an der Messstelle (XXV) von November 1872 bis Dezember 1873 (rechts unten) sowie Messungen der Oberflächentemperatur (rechts oben) (Hobrecht 1874), Lage der Messstelle siehe Abb. 4
 Fig. 3: Design of the soil temperature observation point (left) and graph of temperature measurements in a depth of 0.5 m, 1.0 m and 3.0 m during 14 days at a selected observation point (XXV) from November 1872 until December 1873 (bottom right) as well as measurements of the surface temperature (top right) (HOBRECHT 1874). Location of the observation point XXV, see fig. 4

2. demnächst das Rohr eingesetzt,
3. dann der Zwischenraum mit magerem Cementmörtel oder bloss mit Sand, welcher einzuschlämmen ist, ausgefüllt,
4. über den Rohren^{2*)} ist ein Holzkasten so einzusetzen, dass seine obere Fläche (ein Deckel) bindig mit der Terrain – Oberkante ist; der Deckel liegt etwa 1 Dm. über dem Rohrdeckel (Oberkante des Rohrs),
5. die Thermometer sind demnach so zu versetzen, dass die Thermometerkugel (Unterkante der Blechkapsel um die Kugel) genau ½ oder 1 oder 3 M. unter Terrainoberkante liegt,
6. der Zwischenraum zwischen Deckel und Beobachtungsröhr ist mit einem schlechten Wärmeleiter (Decke, Fries, Stroh), auszufüllen.

Die Bodentemperaturmessstellen errichtete man im Stadtkern in der Nähe der vorhandenen Grundwassermessstellen mit denselben Bezeichnungen (Abb. 4). Die Bodentempe-

2 Eine jede Beobachtungsstation besteht aus 3 Rohren, von je 0,5 M. 1 M. und 3 M. Länge, welche in Dreiecksform, mit 1 Fuss Entfernung von einander, abgesenkt werden; siehe die nebenstehende Zeichnung.“ (Abb. 3).

raturen wurden zwischen November 1872 und Dezember 1873 jeweils am 1. und 15. des Monats abgelesen (Abb. 5). Die Abb. 5 zeigt, dass schon damals je nach Messstandort zum gleichen Messzeitpunkt eine Temperaturdifferenz von bis zu 5 Kelvin beobachtet werden konnte, die unter anderem auf unterschiedliche Wärme-flüsse zwischen der Atmosphäre und dem Untergrund in Abhängigkeit vom Bodenaufbau, der Siedlungsstruktur und den daraus resultierenden mikroklimatischen Verhältnissen zurückgeführt werden können.

Legt man die jeweilige Jahresdurchschnittstemperatur zugrunde, wurde in 3 m Tiefe unter der Geländeoberfläche die niedrigste Jahresdurchschnittstemperatur am Standort XXI mit 8,7 Grad Celsius und die höchste Jahresdurchschnittstemperatur am Standort XXVI mit 12,7 Grad Celsius gemessen.

Die Ursache für diese Abweichung lässt sich auf Grundlage der heute zur Verfügung stehenden Informationen zur damaligen Bebauung und Oberflächenversiegelung wie folgt interpretieren:

Die Messstelle XI lag im Bereich des Potsdamer Platzes in unmittelbarer Nähe zum damaligen Potsdamer Bahnhof mit Wohnbebauung und Gewerbe und hat deshalb einen höheren Wärmeeintrag. Die Messstelle XXI dagegen lag zum

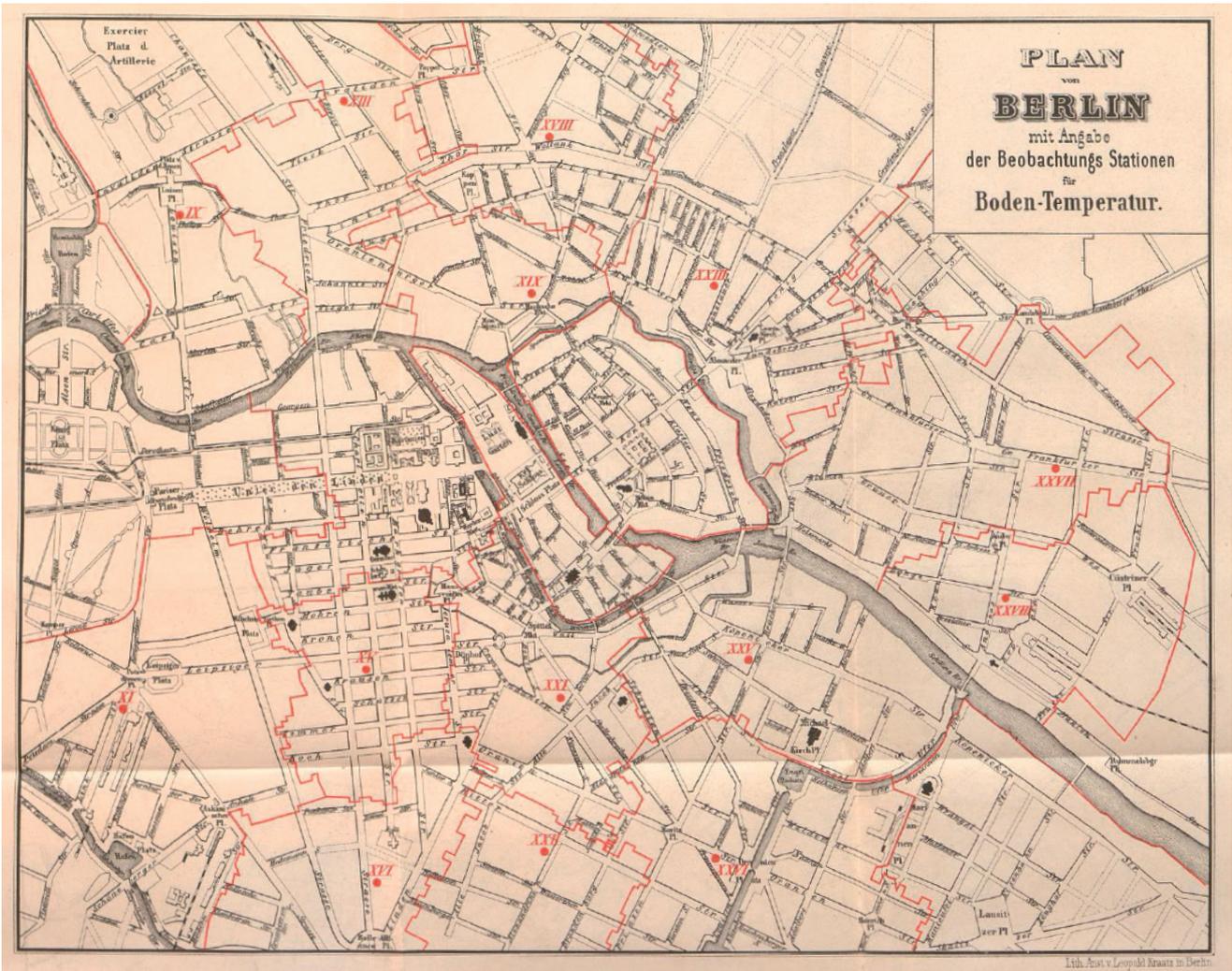


Abb. 4: Beobachtungsstationen der Bodentemperaturen 1872/1873 (nach Hobrecht 1874)

Fig. 4: Location of the observation points for the soil temperature 1872/1873 (modified after Hobrecht 1874)

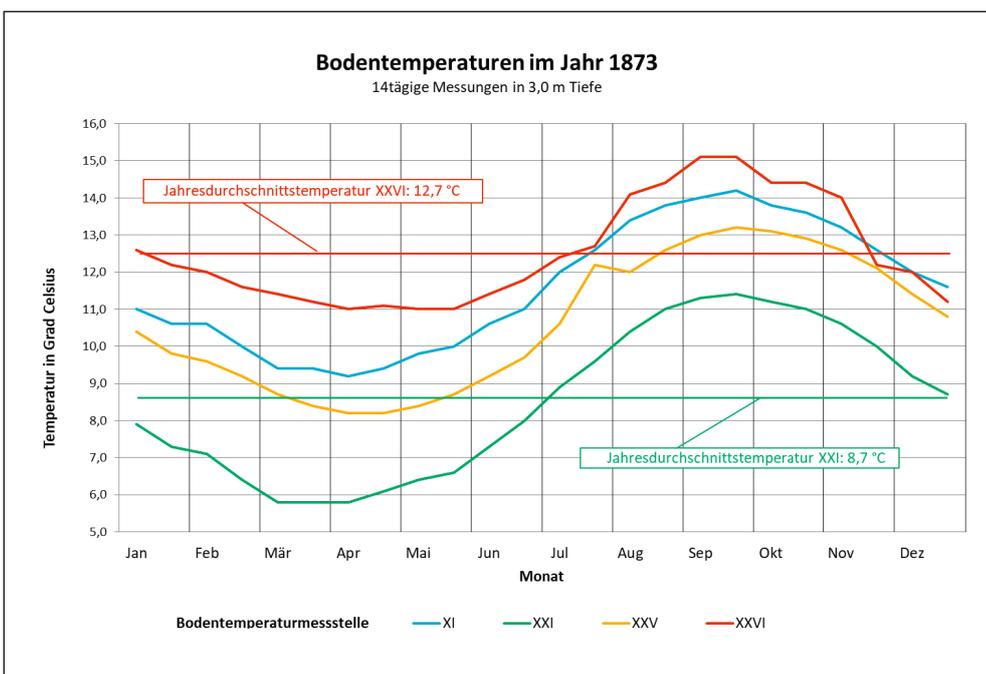


Abb. 5: Temperaturjahresgang in 3 m Tiefe unter der Geländeoberfläche im Jahr 1873 in vier von 14 Bodentemperaturmessstellen in Berlin, Lage der Messstellen siehe Abb. 4

Fig. 5: Temperature curve of year in a depth of 3 m below ground level for the measurements of 1873 in four from 14 observation points in Berlin, location of the observation points see fig. 4

Zeitpunkt der Messung in einem sogenannten Mischgebiet mit einem kleinen Anteil an Gartenbauflächen. Im Jahr 1850 wurde dieser Bereich jedoch noch annähernd vollständig als Gartenbaufläche ausgewiesen.

Es ist zusätzlich zu beachten, dass schon 1870 bei Lufttemperaturmessungen festgestellt worden ist (VIRCHOW, 1873: 47), dass je nach Lage des Messstandorts größere Temperaturunterschiede festzustellen sind: Bei Temperaturmessungen zwischen dem 1. Dezember 1869 bis zum 1. Mai 1880 wurde an höher gelegenen Stellen in der Umgebung Berlins, am Prenzlauer Tor, am Halleschen Tor und an der Tempelhofer Chaussee durchschnittlich tiefere Temperaturen mit teilweise größeren Temperaturschwankungen gemessen als in der Niederstadt.

3 Die Temperaturfelderkundungen in Berlin ab den 1970er Jahren bis heute

Seit den 1970er Jahren wurde das Berliner Temperaturfeld im Untergrund systematisch erkundet. In allen tiefen Grundwassermessstellen der damals durchgeführten Erkundungsbohrprogramme im ehemaligen Westteil des Stadtgebiets wurden Temperaturlogs oft bis über 100 m Tiefe gemessen (TRAPP 1983) und (OTTO 1987).

Die Messungen wurden überwiegend mit regelmäßig kalibrierten Temperaturlichtloten vorgenommen, deren Messgenauigkeit 0,1 Grad Celsius beträgt. Der Durchmesser der Sonden betrug nur 20 mm, so dass in allen Grundwassermessstellen problemlos gemessen werden konnte. In der Regel wurden in den Temperaturlogs jeden Meter ein Messwert erhoben, in Tiefen ab 50 bis 60 m alle 5 m.

Nach dem Fall der Berliner Mauer im Jahr 1989 wurde die flächenhafte Temperaturerfassung des Untergrundes auf ganz Berlin ausgedehnt (HENNING & LIMBERG 1995 und 2012).

Neben den vorhandenen tiefen Grundwassermessstellen

wurden unter anderem an ausgewählten Orten im Stadtgebiet spezielle Messstellen errichtet.

Es handelt sich dabei um filterlose mit Wasser gefüllte Rohre, die es ermöglichen, die Untergrundtemperatur bis an die Geländeoberkante zu messen und so die Amplitude und die Eindringtiefe der jahreszeitlichen Beeinflussung, den sogenannten Temperaturkelch zu ermitteln (HENNING & LIMBERG 2012). Die im Zuge der Messungen gewonnenen Temperaturdaten wurden ausgewertet und auf Karten dargestellt, die die Verteilung der Grundwassertemperatur in unterschiedlichen Tiefen im Untergrund von Berlin zeigen (Abb. 6) (GRUNDWASSTERTEMPERATUR 2015, UMWELTATLAS).

4 Ausgewählte Messergebnisse der oberflächennahen Temperaturmessungen bis ca. 20 m Tiefe

Um die Temperaturentwicklung im oberflächennahen Untergrund von 1873 bis heute nachvollziehen zu können, müssen die vorhandenen Aufzeichnungen der Lufttemperatur im Stadtgebiet berücksichtigt werden.

Für Berlin existiert eine der längsten Messreihen der Lufttemperatur weltweit. Die ersten Wetteraufzeichnungen begannen in Berlin schon im Jahr 1677 (CUBASCH & KADOW 2011).

Neben diesen Datensätzen gibt es zusätzliche Messdaten aus regelmäßigen Lufttemperaturmessungen und Klimabeobachtungen im Stadtgebiet von Berlin, die zu einem späteren Zeitpunkt einsetzen, wie zum Beispiel an den Messstellenstandorten Dahlem, Tempelhof, Tegel und Alexanderplatz. Die Abbildung 7 zeigt, dass an den einzelnen Messstellenstandorten deutliche Unterschiede in den jeweiligen mittleren Jahreslufttemperaturen zu beobachten sind. Bezogen auf den Messstandort Dahlem (FU) liegen an der Station Tempelhof und Tegel die Jahreslufttemperaturen im Mittel

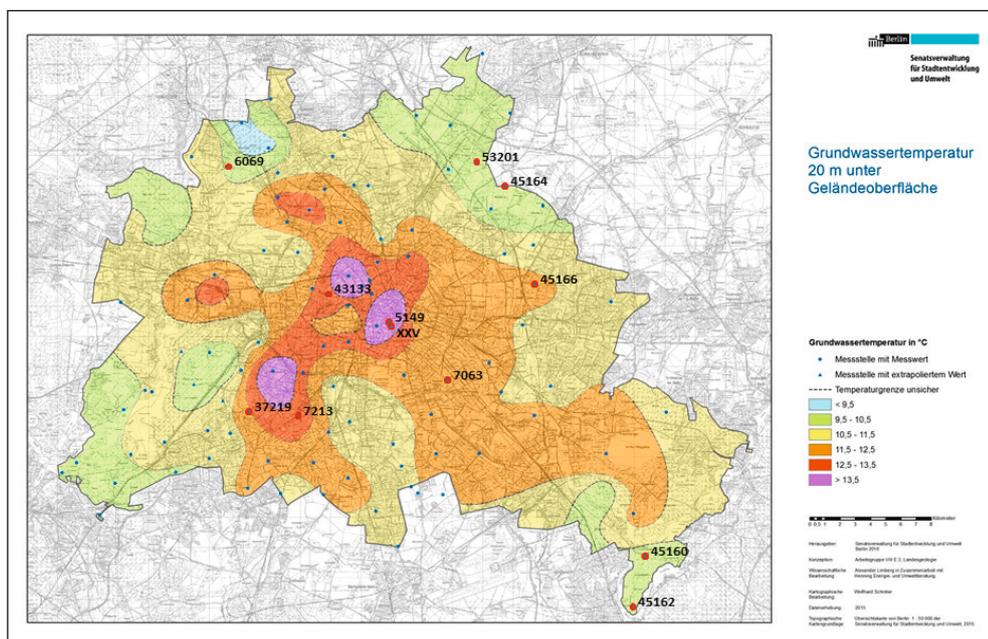


Abb. 6: Karte der Grundwassertemperatur 20 m unter Geländeoberfläche im Jahr 2015 mit ausgewählten Temperaturmessstellen

Fig. 6: Map of the groundwater temperature 20 m below ground level in 2015 with selected temperature observation points

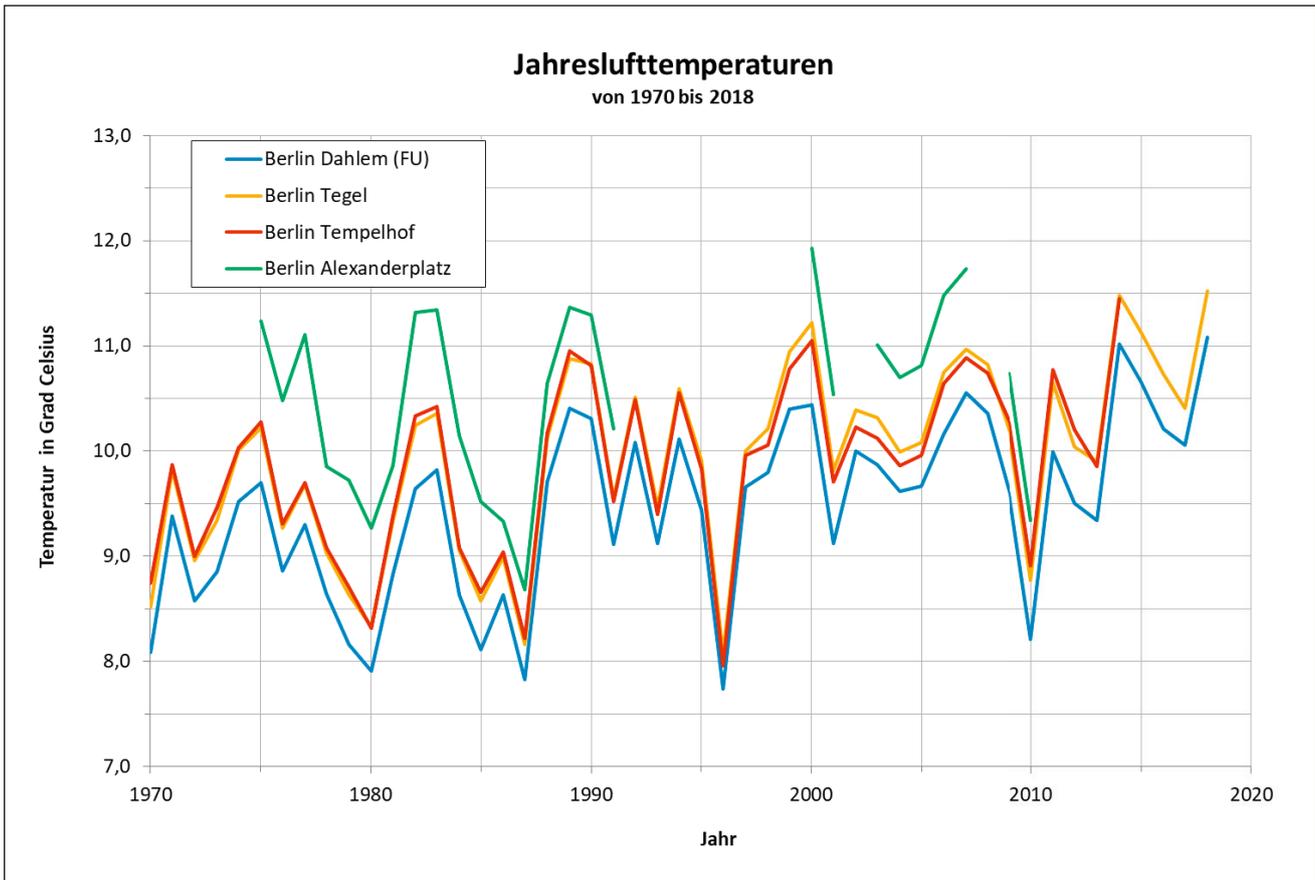


Abb. 7: Jahreslufttemperaturen in Grad Celsius in Dahlem (FU) und für drei weitere ausgewählte Messstationen im Land Berlin zwischen 1970 bis 2018

Fig. 7: Annual temperatures of the air in degrees Celsius in Dahlem (FU) and 3 other selected monitoring stations in Berlin from 1970 to 2018

um ca. +0,4 Grad Celsius und an der Messstation Berlin Alexanderplatz im Mittel um ca. +1,3 Grad Celsius höher. Um den langjährigen Trend der Lufttemperaturen zu verdeutlichen, wurde das 9jährige gleitende Mittel der Lufttemperaturen im Zeitraum zwischen 1850 und 2018 gebildet. In der Abbildung 8 ist für die Messstationen Dahlem (FU) und Tempelhof das 9jährige gleitende Mittel der Lufttemperaturen in Grad Celsius zwischen 1850 bzw. seit Beginn der jeweiligen Messaufzeichnung und 2010 dargestellt.

Der Verlauf der Lufttemperatur in Dahlem (FU) weist in dem Zeitraum zwischen 1850 bis ca. 1980 mehr oder weniger große Schwankungen auf. Ein eindeutiger Trend ist dabei nicht zu beobachten. Die mittlere Lufttemperatur in diesem Zeitraum liegt bei rd. 9 Grad Celsius. Erst nach ca. 1980 ist ein signifikanter deutlicher Temperaturanstieg zu beobachten. An der Messstation Tempelhof ist im Prinzip der gleiche Trend zu beobachten, jedoch verläuft dieser auf einem anderen Temperaturniveau.

Die Ursache für die gemessenen unterschiedlichen Lufttemperaturen an den unterschiedlichen Standorten der Messstationen ist auf die jeweiligen unterschiedlichen stadtklimatischen Verhältnisse und ab ca. 1985/1990 vermutlich auf den sich vollziehenden globalen Klimawandel zurückzuführen.

Die stadtklimatischen Verhältnisse werden sehr stark durch die thermischen Eigenschaften der Oberflächenbebauung und -nutzung geprägt und beeinflussen in der Folge die mittlere Bodenoberflächen- und Lufttemperatur.

Dabei ist zu beachten, dass an Wetterstationen die mittlere Lufttemperatur (T_L) in der Regel in ca. 2 m Höhe über der Erdoberfläche ermittelt wird. Diese unterscheidet sich jedoch von der Temperatur an der Gebietsoberfläche. Unter ungestörten Verhältnissen gilt nach ZOTH & HÄNEL (1988) folgender Erfahrungswert:

$$T_L + 1 \text{ C} = (T_0 \pm 0,5) \text{ in Grad Celsius}$$

Die Temperatur an der Gebietsoberfläche liegt also schon unter ungestörten Verhältnissen um ca. 0,5 bis 1,5 Grad Celsius höher als die Lufttemperatur in ca. 2 m Höhe über der Erdoberfläche.

Hinzu kommen gerade in urbanen Gebieten viele weitere Einzelparameter an der Grenzfläche Luft / Erde, die das lokale thermische Mikroklima beeinflussen.

Die Farbe, Zusammensetzung, Oberflächenrauigkeit, Bedeckung, der Versiegelungsgrad, der Wasserhaushalt sowie die Ausrichtung zum solaren Strahlungseinfall urbaner Oberflächen entscheiden darüber, wie viel Energie aufge-

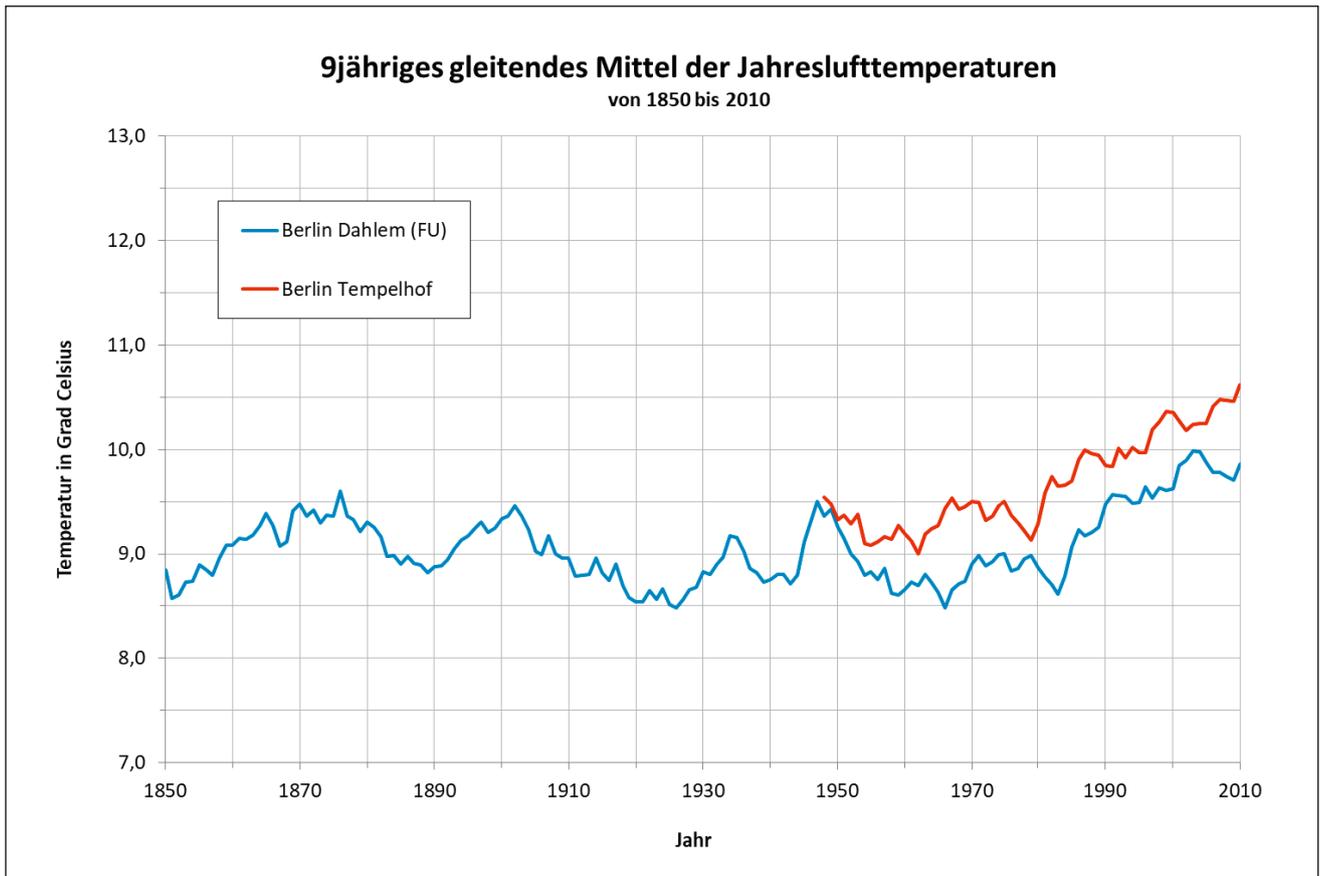


Abb. 8: 9jähriges gleitendes Mittel der Lufttemperaturen in Grad Celsius für Dahlem (FU) und Tempelhof zwischen 1850 bzw. seit Beginn der Messaufzeichnungen und 2010

Fig. 8: 9-year mean of the air temperatures in degrees Celsius at Dahlem (FU) and Tempelhof from 1850 respectively from the beginning of the recording until the year 2010

nommen und in der Bausubstanz gespeichert bzw. von dieser wieder abgegeben wird.

Zum Beispiel heizen sich tagsüber begrünte Areale weniger auf als Beton und Asphaltflächen, in denen tagsüber Energie gespeichert und nachts als Wärme abgegeben wird. Meteorologen messen Lufttemperaturunterschiede von bis zu 10 Grad Celsius auf verhältnismäßig geringen räumlichen Distanzen. Neben den thermischen Eigenschaften der städtischen Oberfläche prägen auch die hydrologischen Eigenschaften wie Abfluss, Infiltration, Verdunstung sowie Versickerung von Niederschlagswasser das lokale thermische Mikroklima.

Vor diesem Hintergrund wurde von STEWART & OKE (2012) für urbane Gebiete das sogenannte Local Climate Zones (LCZ) - Konzept entwickelt.

Das Local Climate Zones Konzept klassifiziert städtische und natürliche Umgebungen in Klassen, die sich durch ihre Oberflächenparameter unterscheiden, zum Beispiel Bebauungsdichte, Gebäudeverteilung und -typen, Himmelssichtfaktor, Höhe der Rauheitselemente und anthropogener Wärmefluss. Jede Local Climate Zone hat einen spezifischen Bereich dieser Parameter und das Konzept unterscheidet zwischen zehn „städtischen“ oder bebauten und sieben „natürlichen“ Local Climate Zones, die auch miteinander kombiniert werden können (s. a. STEWART & OKE, 2012).

Die Größe bzw. Fläche, die diese Local Climate Zones einnehmen kann relativ gering sein. So ist aus Lufttemperaturuntersuchungen im Stadtgebiet von Berlin bekannt (FENNER et al. 2017), dass Local Climate Zones mit einem relativ geringen Radius von 50 m um einen Messpunkt herum zu einem geringeren Fehler führen, als mit größeren Radien von 250 m wie sie von STEWART & OKE (2012) in ihrer Veröffentlichung vorschlagen. Die beispielhafte Anwendung dieses Klassifizierungssystems auf ausgewählte Bodentemperaturmessstellen im Land Berlin kommt zu der in Tab. 1 dargestellten Einteilung. Die Abbildung 9 zeigt die in 6 m Tiefe unter der Geländeoberfläche gemessenen Temperaturverläufe. Diese täglichen Messwerte wurden mit automatisch aufzeichnenden Datenloggern erhoben, deren Messgenauigkeit ebenfalls 0,1 Grad Celsius beträgt.

Die gemessenen Temperaturverläufe zeigen eine deutliche Abhängigkeit von ihrer jeweiligen Lage im städtischen Umfeld. Für einen Vergleich der Temperaturmessbefunde wurden folgende thermische Kennziffern bezogen auf die jeweilige Messtiefe unter Geländeoberkante gebildet:

- minimale Temperatur
- maximale Temperatur
- Mittelwert aller gemessenen Temperaturen
- Temperaturamplitude A.

Messstelle	Local Climate Zone	Beschreibung	Anthropogene Heizleistung ¹⁾
43133	LCZ 2	Dichter Mix aus mittelgroßen Gebäuden (3–9 Stockwerke), wenige oder keine Bäume, Landbedeckung größtenteils asphaltiert, Baustoffe aus Stein, Ziegel, Fliesen und Beton	< 75 W/m ²
37294	LCZ 5	Offene Anordnung von mittelgroßen Gebäuden (3–9 Stockwerke), Überfluss an durchlässiger Landbedeckung (niedrige Pflanzen, einzelne Bäume), Baustoffe aus Beton, Stahl, Stein und Glas	< 25 W/m ²
53201	LCZ 6 _D	Offene Anordnung von flacheren Bauten (1–3 Stockwerke), Überfluss an durchlässiger Landbedeckung (niedrige Pflanzen, einzelne Bäume), Baumaterialien aus Holz, Ziegeln, Stein, Fliesen und Beton, in Kombination mit offener Graslandschaft, wenige oder keine Bäume, die Zonenfunktion ist natürliches Grasland, Landwirtschaft oder Stadtpark	< 25 W/m ²
45166	LCZ 6 _C	Offene Anordnung von flacheren Bauten (1–3 Stockwerke), Überfluss an durchlässiger Landbedeckung (niedrige Pflanzen, einzelne Bäume), Baumaterialien aus Holz, Ziegeln, Stein, Fliesen und Beton in Kombination mit einer offenen Anordnung von Büschen, Sträuchern und kurze, waldige Bäume, Landbedeckung meist durchlässig (nackter Boden oder Sand), Zonenfunktion ist natürliches Buschland oder Landwirtschaft	< 25 W/m ²
45164	LCZ D	Offene Graslandschaft, wenige oder keine Bäume, die Zonenfunktion ist natürliches Grasland, Landwirtschaft oder Stadtpark	0
45160	LCZ A	Leicht bewaldete Landschaft mit Laub- und/oder immergrünen Bäumen, Landbedeckung meist durchlässig (niedrige Pflanzen), Zonenfunktion ist natürlicher Wald, Baumkultivierung oder Stadtpark	0
45162	LCZ B	Dicht bewaldete Landschaft mit Laub- und/oder immergrünen Bäumen, Landbedeckung meist durchlässig (niedrige Pflanzen), Zonenfunktion ist Naturwald, Baumpflege oder Stadtpark	0

¹⁾ Mittlere jährliche Wärmestromdichte (W/m²) aus Kraftstoffverbrennung und menschlicher Tätigkeit (Transport, Raumkühlung/-heizung, industrielle Verarbeitung, menschlicher Stoffwechsel). Variiert signifikant mit Breitengrad, Jahreszeit und Bevölkerungsdichte

Tab. 1: Berechnungsergebnisse im Überblick, Lage der Messstellen s. Abb. 6

Tab. 1: Results of calculation in summary, location of the observation wells see fig. 6

Ein Vergleich der thermischen Kennziffern zeigt die stadtklimatisch bedingten Unterschiede. Tendenziell ist ein Anstieg der maximalen Temperaturen und Temperaturmittelwerte mit zunehmender stadtklimatischer Veränderung entsprechend der jeweiligen Local Climate Zones zu beobachten (Tab. 2).

Der Anstieg der Temperaturmittelwerte in 6 m unter der Geländeoberfläche in Abhängigkeit vom Grad der Veränderung gegenüber Freilandverhältnissen bzw. der LCZ-Klasse ist auf eine veränderte Energiebilanz an der Gebietsoberfläche zurückzuführen. So sind zum Beispiel bei einer Oberflächenversiegelung durch Bebauung die hydrologischen Eigenschaften wie Abfluss, Infiltration, Verdunstung sowie die Versickerung von Niederschlagswasser verändert. Bei einem erhöhten Abfluss ist die Verdunstungsrate und in der Folge die Verdunstungskälte kleiner und es erhöht sich der Boden- und Luftwärmestrom. In solchen Gebieten kann vor allem während des Sommerhalbjahrs mehr Wärmeenergie in die darunterliegenden Bodenschichten eingetragen werden. Zusätzlich überwiegen in den stark bebauten und

damit hochverdichteten Bereichen mit keinen bis wenigen Grün- und/oder Wasserflächen auch die potenziellen Wärmequellen wie durch Sonne aufgeheizte Baukörper oder Asphaltflächen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich dicht bebaute Gebiete (LCZ 2, 5 und 6) schneller aufheizen als naturbelassene (LCZ A, B und D).

Die Bodentemperaturmessstellen aus dem Jahr 1872/1873 sind heute nicht mehr vorhanden. In räumlicher Nähe der ehemaligen Messstelle XXV liegt ca. 150 m vom ehemaligen Messstandort die Messstelle 5149, in der aktuell Temperaturmessdaten erfasst werden.

Ein Vergleich der Temperaturmessbefunde aus dem Jahr 1872/1873 aus der Messstelle XXV mit aktuellen Messdaten aus dem Jahr 2018/2019 der Messstelle 5149 zeigt deutliche Unterschiede im Temperaturverlauf (s. Abb. 10).

Die Abb. 10 zeigt die Messergebnisse in den unterschiedlichen Messtiefen. Aus diesen Messdaten bzw. berechneten Minimum- und Maximumtemperaturen wurde der Temperaturkelch bis zum neutralen Punkt in ca. 15 m Tiefe abgeschätzt.

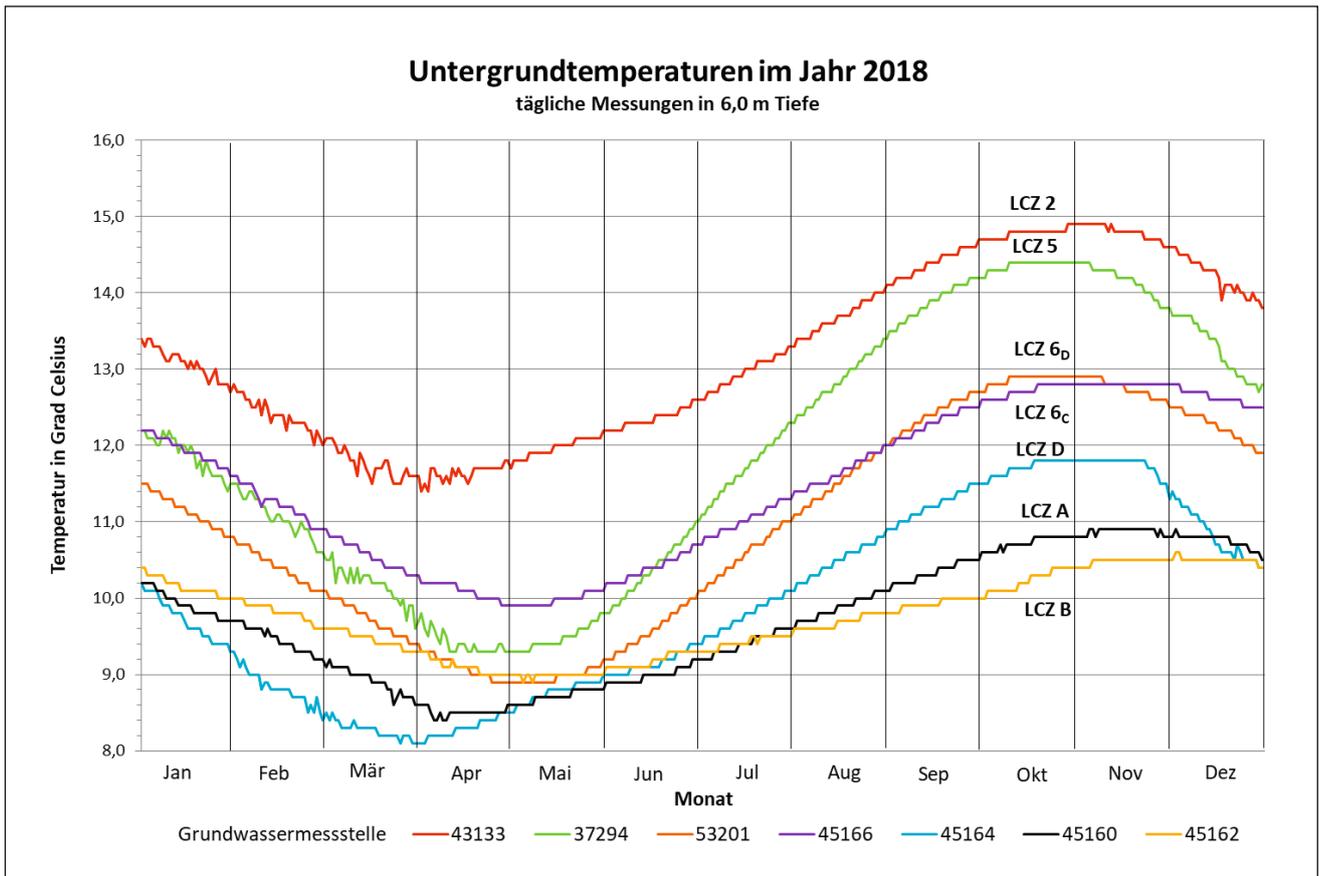


Abb. 9: Gemessener Temperaturjahresgang in 6 m unter der Geländeoberfläche für unterschiedliche Messstellen und Zuordnung zu einer Local Climate Zone (LCZ), Lage der Messstellen s. Abb. 6

Fig. 9: Measured temperature curve in 6 m below ground level for different observations wells and classification to a Local Climate Zone (LCZ), location of the observation points see fig. 6

Messstelle	LCZ	Bodenaufbau	mittlere Bodentemperatur	Amplitude	Dämpfung	mittl. Temp. -3,0 m u. Gelände	mittl. Temp. -6,0 m u. Gelände
43133	LCZ 2	Sand	13,0 C	19,0 K	2,6	12,68 C	13,17 C
37294	LCZ 5	Sand	12,0 C	19,0 K	3,0	12,14 C	11,89 C
53201	LCZ 6 _b	Geschiebemergel	11,0 C	19,5 K	2,7	11,37 C	10,95 C
45166	LCZ 6 _c	Geschiebemergel	11,5 C	19,5 K	2,3	11,35 C	11,45 C
45164	LCZ D	Geschiebemergel	10,0 C	19,0 K	2,5	10,45 C	9,90 C
45160	LCZA	Sand	9,7 C	12,5 K	2,5	9,64 C	9,71 C
45162	LCZ B	Sand	9,7 C	10,0 K	2,2	9,70 C	9,75 C

Tab. 2: Berechnungsergebnisse im Überblick, Lage der Messstellen s. Abb. 6

Tab. 2: Results of calculation in summary, location of the observation wells see fig. 6

Durch die Anwendung des Superpositionsprinzips auf die linearen Gleichungen ist es möglich, auch mehrere Änderungen bei den Temperaturverhältnissen wie zum Beispiel Temperatursprünge nachzuvollziehen. Unter anderem zeigten MENBERG et al. (2014) durch Vergleiche zwischen gemessenen Grundwassertemperaturen und Modellergebnissen, dass einfache analytische Lösungen zur Modellierung des Einflusses beobachteter und prognostizierter Klimaveränderungen anwendbar sind.

Für die Modellierungen können zum Beispiel zwei mögliche Randbedingungen für den Anstieg der Oberflächentemperatur angewendet werden. Die eine Randbedingung berücksichtigt einen Sprung der Oberflächentemperatur, d.h. einen Temperaturanstieg in einem kurzfristigen Zeitraum, wie dieser zum Beispiel durch eine Bebauung, Oberflächenversiegelung oder die Inbetriebnahme einer Wärmequelle verursacht wird (Abb. 11). Die andere Randbedingung legt einen linearen Temperaturanstieg zugrunde, der aktuell durch den Klimawandel verursacht wird (Abb. 12).

Wie in Abbildung 8 gezeigt, ist ab ca. 1985/1990 bei allen zugrunde gelegten Messstationen ein kontinuierlicher Anstieg der mittleren Lufttemperatur zu beobachten, der vermutlich auf den sich vollziehenden globalen Klimawandel zurückzuführen ist.

Im Hinblick auf die zukünftige langfristige Entwicklung ist von einem weiteren Temperaturanstieg auszugehen. Das zeigen die Prognosen aus Klimamodellberechnungen aus den Sachstandsberichten des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

In den IPCC-Sachstandsberichten werden Befunde aus wissenschaftlichen Untersuchungen zu den vielfältigen Ursachen für die Emissionen von Treibhausgasen von mehr als 50 Wissenschaftlern aus 18 Ländern gesammelt und ausgewertet. Aus den Befunden wurden Szenarien und Prognosen für die zukünftige Entwicklung des Klimas abgeleitet.

In Hinblick auf die zukünftige Temperaturentwicklung lässt sich auf Grundlage dieser Szenarien feststellen, dass entsprechend den Klimamodellberechnungen die Temperatur bis zum Ende des Jahrhunderts um 2,5 bis 3,5 Grad Celsius bzw. sogar bis 4,5 Grad Celsius zunehmen kann.

Legt man für die Zukunft das Szenario A1B zugrunde, welches eine ausgewogene Nutzung aller Energiequellen bedeutet, kann zwischen dem Jahr 2030 bis 2100 die mittlere Lufttemperatur um ca. 0,043 Kelvin pro Jahr ansteigen. Dieser Wert wurde im Folgenden für die Prognoseberechnungen der zukünftigen Untergrundtemperaturen herangezogen.

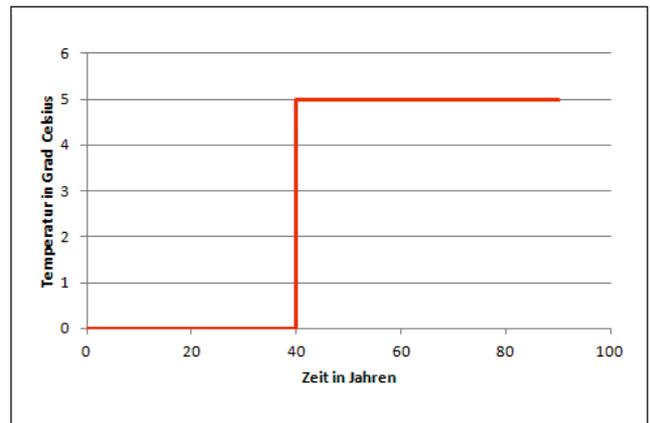


Abb. 11: *Temperatursprung, kurzfristiger Temperaturanstieg zum Beispiel durch eine Bebauung, Oberflächenversiegelung oder die Inbetriebnahme einer Wärmequelle*

Fig. 11: *Short-term increase of temperature, for example due to building, surface sealing or the initial operation of a heat source*

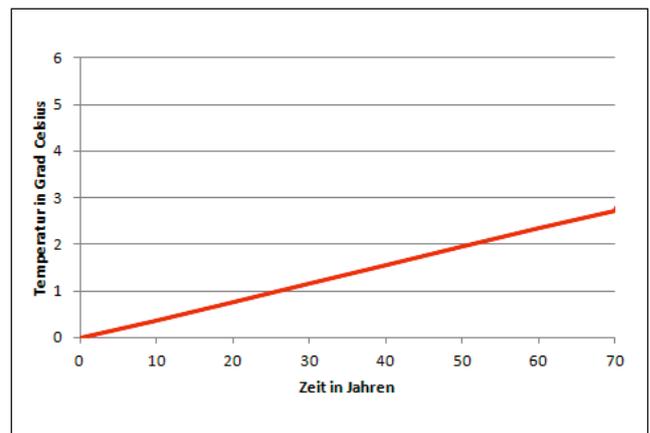


Abb. 12: *Linearer Temperaturanstieg, zum Beispiel der Temperaturanstieg in Städten durch zunehmende Urbanisierung oder den allgemeinen Klimawandel*

Fig. 12: *Linear temperature increase, for example in cities due to increasing urbanization or the general climate change*

Messstelle	Standort	Local Climate Zone	Messzeitpunkte
6069	Reinickendorf, Heiligenseestraße	LCZ 6 _c	Oktober 1978, Oktober 1999 und Juli 2017
7063	Neukölln, Dieselstraße	LCZ 5	Mai 1984, August 2000 und Juli 2017
7213	Steglitz-Zehlendorf, Carmer Platz	LCZ 2	Mai 1990, August 2000 und Juli 2017

Tab. 3: *Beobachtete Messstellen, Lage der Messstellen s. Abb. 6*

Tab. 3: *Observed observation wells, location of the observation wells see fig. 6*

6069 - Reinickendorf, Heiligenseestraße

Die Messstelle 6069 liegt im Nordwesten von Berlin, in einem Übergangsbereich einer Einfamilienhausbebauung zu einem Waldgebiet. Das entspricht der Local Climate Zone 6_C (Lage der Messstelle s. Abb. 6).

Die in den Jahren 1978, 1999 und 2017 gemessenen Temperaturverläufe zeigen tiefgreifende Veränderungen der Untergrundtemperaturen in diesem Zeitraum (Abb. 13). Gegenüber den angenommenen „ungestörten“ Verhältnissen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts hat sich im Laufe der Zeit die Untergrundtemperatur bis in ca. 60 m Tiefe erwärmt. Ausgehend von einer mittleren Untergrundtemperatur in der „neutralen“ Zone in ca. 15 m Tiefe von

ca. 7,9 Grad Celsius wurde bei der letzten Messung eine Temperatur von ca. 9,6 Grad Celsius gemessen (Differenz ca. 1,7 Kelvin).

Vergleiche der gemessenen Temperaturverläufe mit den Ergebnissen aus analytischen Berechnungen zeigen, dass es zu mehreren Zeitpunkten Änderungen bei den Temperaturverhältnissen (in diesem Fall Temperatursprünge) gegeben haben muss.

Vor dem Hintergrund der Messgenauigkeit bei den an der Messstelle 6069 durchgeführten Temperaturmessungen und trotz der vereinfachenden Modellannahmen konnte eine gute Übereinstimmung der berechneten Modellkurven mit den tatsächlich zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessenen Temperaturprofilen erreicht werden.

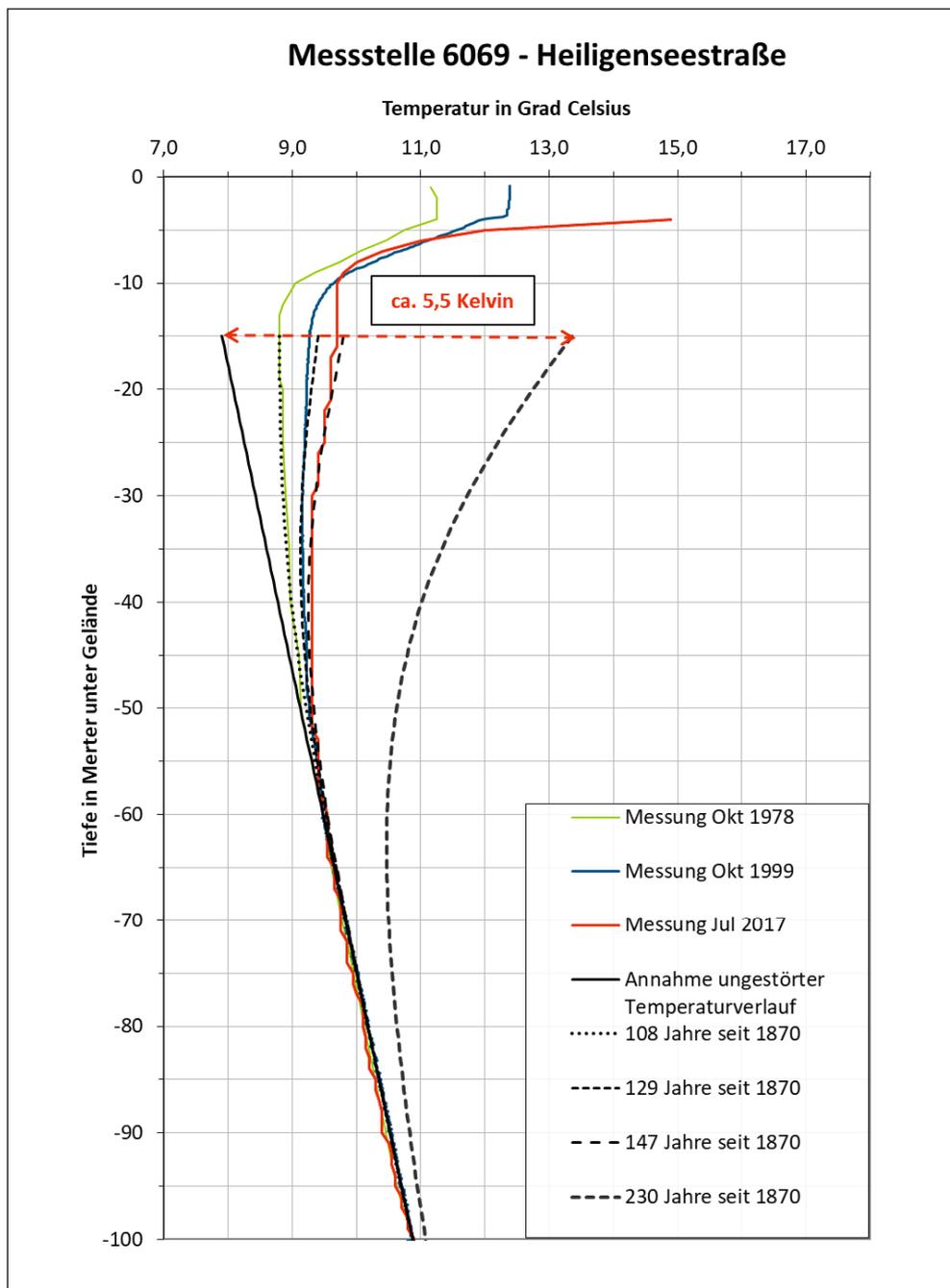


Abb. 13: Messbefunde und Ergebnisse der analytischen Berechnungen für die Messstelle 6069, Berlin Heiligensee, Heiligenseestraße

Fig. 13: Result of the analytical calculations at the observation well 6069 in Berlin Heiligensee, Heiligenseestraße

In Hinblick auf die zukünftige Temperaturentwicklung im Untergrund wurde ausgehend von der letzten Messung im Jahr 2017 ein linearer Temperaturanstieg an der Oberfläche von 0,04 Kelvin pro Jahr bis zum Jahr 2100 unterstellt und eine Prognoseberechnung durchgeführt.

Abb. 13 zeigt, dass für die Zukunft im Jahr 2100 von einem weiteren tiefgreifenden Temperaturanstieg im Untergrund ausgegangen werden kann, der bis in Tiefen von ca. 100 m unter der Geländeoberfläche reicht. Im Vergleich zu dem angenommenen anthropogen „unbeeinflussten“ Zustand im Jahr 1870 liegt die Temperatur in der neutralen Zone im Jahr 2100 um ca. 5,5 Grad Celsius höher.

7063 – Neukölln, Dieselstraße

Die Messstelle 7063 liegt in einem städtisch geprägten Gebiet mit einer Zeilenbebauung und Kleingartenkolonien im zentralen Bereich von Berlin. Das entspricht der Local Climate Zone 5 (Lage der Messstelle s. Abb. 6).

Auch hier zeigen die in den Jahren 1984, 2000 und 2017 gemessenen Temperaturverläufe tiefgreifende Veränderungen der Untergrundtemperaturen (Abb. 14). Gegenüber den angenommenen „ungestörten“ Verhältnissen im 19. Jahrhundert hat sich im Laufe dieses Zeitraums der Untergrund bis in ca. 90 Meter Tiefe erwärmt und erfasst größere Tiefen als bei der Messstelle 6069 (Abb. 13).

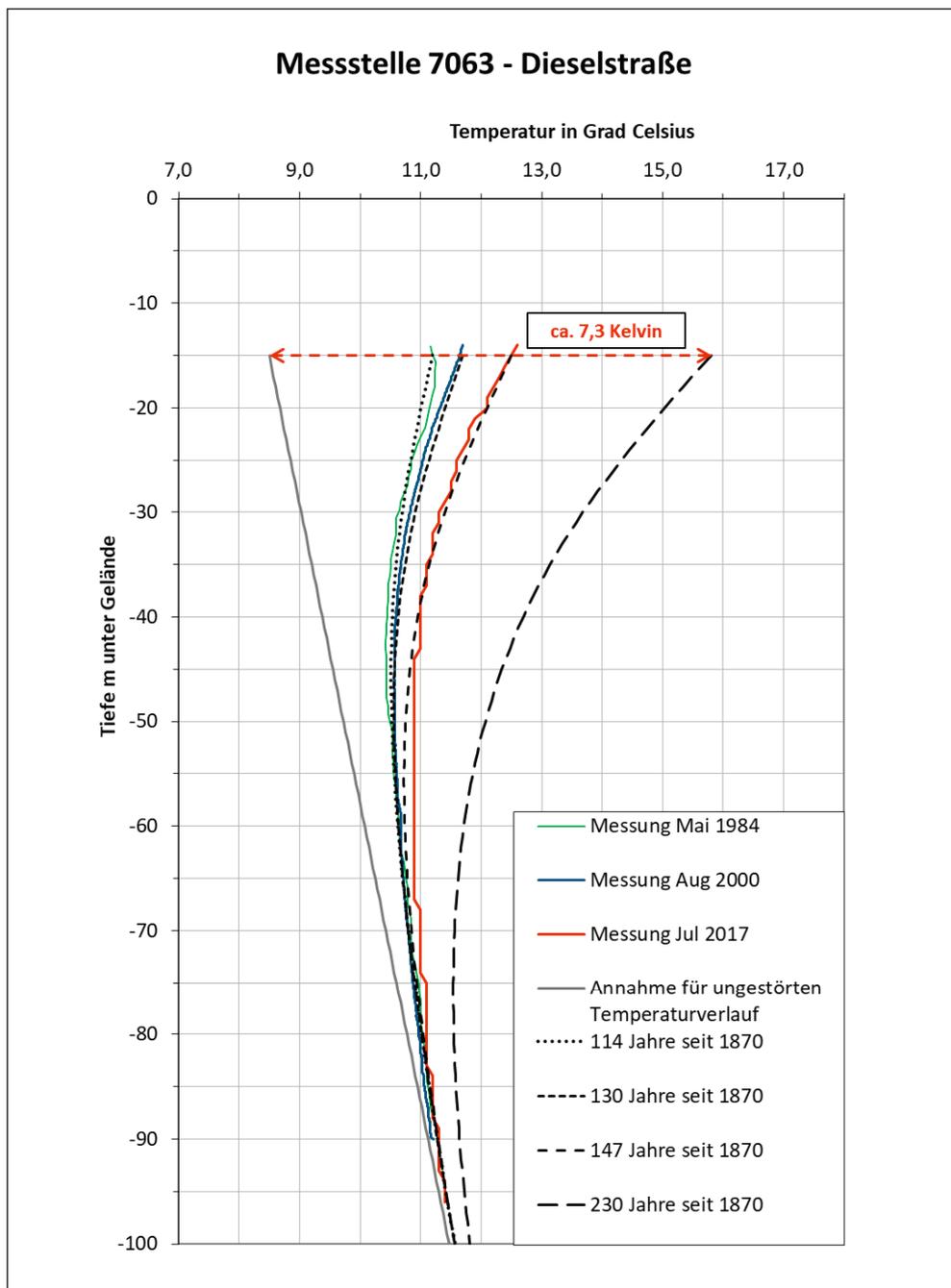


Abb. 14:
Messbefunde und Ergebnisse der analytischen Berechnungen für die Messstelle 7063, Berlin Neukölln, Dieselstraße

Fig. 14:
Result of the analytical calculations at the observation well 7063 in Berlin Neukölln, Dieselstraße

Ausgehend von einer mittleren Untergrundtemperatur in der „neutralen“ Zone in ca. 15 m Tiefe von ca. 8,5 Grad Celsius wurde bei der letzten Messung eine Temperatur von ca. 12,5 Grad Celsius gemessen (Differenz ca. 3 Kelvin).

Vergleiche der gemessenen Temperaturverläufe mit den Ergebnissen aus analytischen Berechnungen ergaben auch hier, dass es zu mehreren Zeitpunkten Änderungen bei den Temperaturverhältnissen (Temperatursprünge) gegeben haben muss. Diese sind vermutlich auf Veränderungen des Lokalklimas durch die in der Nähe errichtete Wohnbebauung zurückzuführen. Im Jahr 1953 war direkt am Messstellenstandort keine Bebauung vorhanden. Vermutlich wurde ein in der Nähe stehendes Gebäude im 2. Weltkrieg zerstört. Zwischen 1962 bis 1974 baute man östlich des Messstellenstandorts auf dem ehemaligen Gelände einer Kleingartenkolonie mehrstöckige Häuser und Parkplätze.

Auch bei dieser Messstelle wurde im Hinblick auf die zukünftige Temperaturentwicklung im Untergrund ausgehend von der letzten Messung im Jahr 2017 ein linearer Temperaturanstieg an der Oberfläche von 0,04 Kelvin pro Jahr bis zum Jahr 2100 unterstellt und eine Prognoseberechnung durchgeführt. Abbildung 14 zeigt, dass für die Zukunft im Jahr 2100 von einem weiteren tiefgreifenden Temperaturanstieg im Untergrund ausgegangen werden kann, der bis in Tiefen von mehr als 100 m unter der Geländeoberfläche reichen wird. Im Vergleich zu dem angenommenen anthropogen „unbeeinflussten“ Zustand im Jahr 1870 liegt die Temperatur in der neutralen Zone um ca. 7,3 Grad Celsius höher.

7213 – Steglitz-Zehlendorf, Carmer Platz

Die Messstelle 7213 liegt im innerstädtischen Bereich, der durch eine Block- und Zeilenbebauung und einen sehr hohen Versiegelungsgrad geprägt ist. Das entspricht der Local Climate Zone 2 (Lage der Messstelle s. Abb. 6).

Die in den Jahren 1990, 2000 und 2017 gemessenen Temperaturverläufe zeigen, wie bei den anderen Messstellen, auch hier tiefgreifende Veränderungen der Untergrundtemperaturen (Abb. 15). Gegenüber den angenommenen „ungestörten“ Verhältnissen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts hat sich die Untergrundtemperatur bis in deutlich mehr als 100 m Tiefe erwärmt und weist somit schon zum jetzigen Zeitpunkt eine noch größere anthropogene Temperaturveränderung in der Tiefe auf als bei den anderen Messstellen 6069 und 7063. Ausgehend von einer mittleren Untergrundtemperatur in der „neutralen“ Zone in ca. 15 m Tiefe von ca. 8,5 Grad Celsius wurde bei der letzten Messung eine Temperatur von ca. 13,4 Grad Celsius gemessen. Die Temperaturdifferenz beträgt somit ca. 4,9 Kelvin.

Bei dieser Messstelle konnte im Rahmen der einfachen analytischen Berechnungen bisher keine befriedigende Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Temperaturverläufen erreicht werden, insbesondere für die Temperaturkurve, die im Jahr 2017 gemessen worden ist.

Vermutlich lassen sich die Verläufe der Oberflächentemperatur nicht ohne weiteres mit Temperatursprüngen beschreiben. Die Messkurven zeigen, dass es auch bei dieser

Messstelle an der Oberfläche zu mehreren Zeitpunkten Änderungen bei den Temperaturverhältnissen gegeben hat. In den Messdaten der Messung aus dem Jahr 2017 deutet sich an, dass es hier möglicherweise auch eine geringe Abkühlung der Oberflächentemperatur gegeben hat.

Auch an dieser Messstelle wurde ausgehend von der letzten Messung im Jahr 2017 ein linearer Temperaturanstieg an der Oberfläche von 0,04 Kelvin pro Jahr bis zum Jahr 2100 unterstellt und eine Prognoseberechnung durchgeführt.

Abbildung 15 zeigt, dass für die Zukunft im Jahr 2100 von einem weiteren tiefgreifenden Temperaturanstieg im Untergrund ausgegangen werden kann, der bis in Tiefen von mehr als 100 Meter unter der Geländeoberfläche reichen kann. Im Vergleich zu dem angenommenen anthropogen „unbeeinflussten“ Zustand im Jahr 1870 liegt die Temperatur in der neutralen Zone um ca. 9 Grad Celsius höher und erreicht ca. 17,5 Grad Celsius.

Ausblick

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Temperaturmessungen aus einem Zeitraum von rund 150 Jahren im Stadtgebiet von Berlin, dass sich der Untergrund und damit auch das Grundwasser in dieser Zeit deutlich erwärmt haben.

Auch langfristig ist vor dem Hintergrund des allgemeinen Klimawandels aber auch der zunehmenden Bebauungsdichte und dem Wegfallen von Grünflächen und damit auch veränderten hydrologischen Eigenschaften der Oberflächen von einer weitergehenden tiefgreifenden Erwärmung des oberflächennahen und des tieferen Untergrundes und somit des Grundwassers zu rechnen.

Mit der neutralen Zone als Bezugsebene für die mittlere Oberflächentemperatur in ca. 15 m Tiefe unter der Geländeoberfläche ist im Vergleich aktueller Temperaturmessungen mit den im Jahr 1873 ermittelten Messwerten ein Temperaturanstieg von bis zu 5 Kelvin belegbar. Damit kann eine deutliche Erwärmung des Untergrundes festgestellt werden.

Gleichzeitig erwärmt sich auch zunehmend der tiefere Untergrund, dies belegen die Temperaturlogs, die seit den 1970er Jahren im Land Berlin zu unterschiedlichen Zeitpunkten in ausgewählten Messstellen aufgenommen worden sind. Die anthropogen bedingten Veränderungen erreichen Tiefen von mehr als 150 m unter der Geländeoberkante.

Die in unterschiedlichen Teilen des Stadtgebiets aufgenommenen Temperaturdaten belegen auch einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen stadtstrukturellen Lagen und den daraus resultierenden stadtklimatischen Verhältnissen (Local Climate Zones).

Für die Zukunft ist von einem weiteren Anstieg der Untergrundtemperaturen auszugehen. Die Prognosen zeigen, dass ein Temperaturanstieg in der neutralen Zone im Vergleich zu dem anthropogen unbeeinflussten Zustand im Jahr 1870 von bis zu 8 Kelvin möglich ist. Dies ist jedoch sehr stark davon abhängig, wie sich insbesondere die mittleren Oberflächentemperaturen bedingt durch den zukünftigen Klimawandel entwickeln werden.

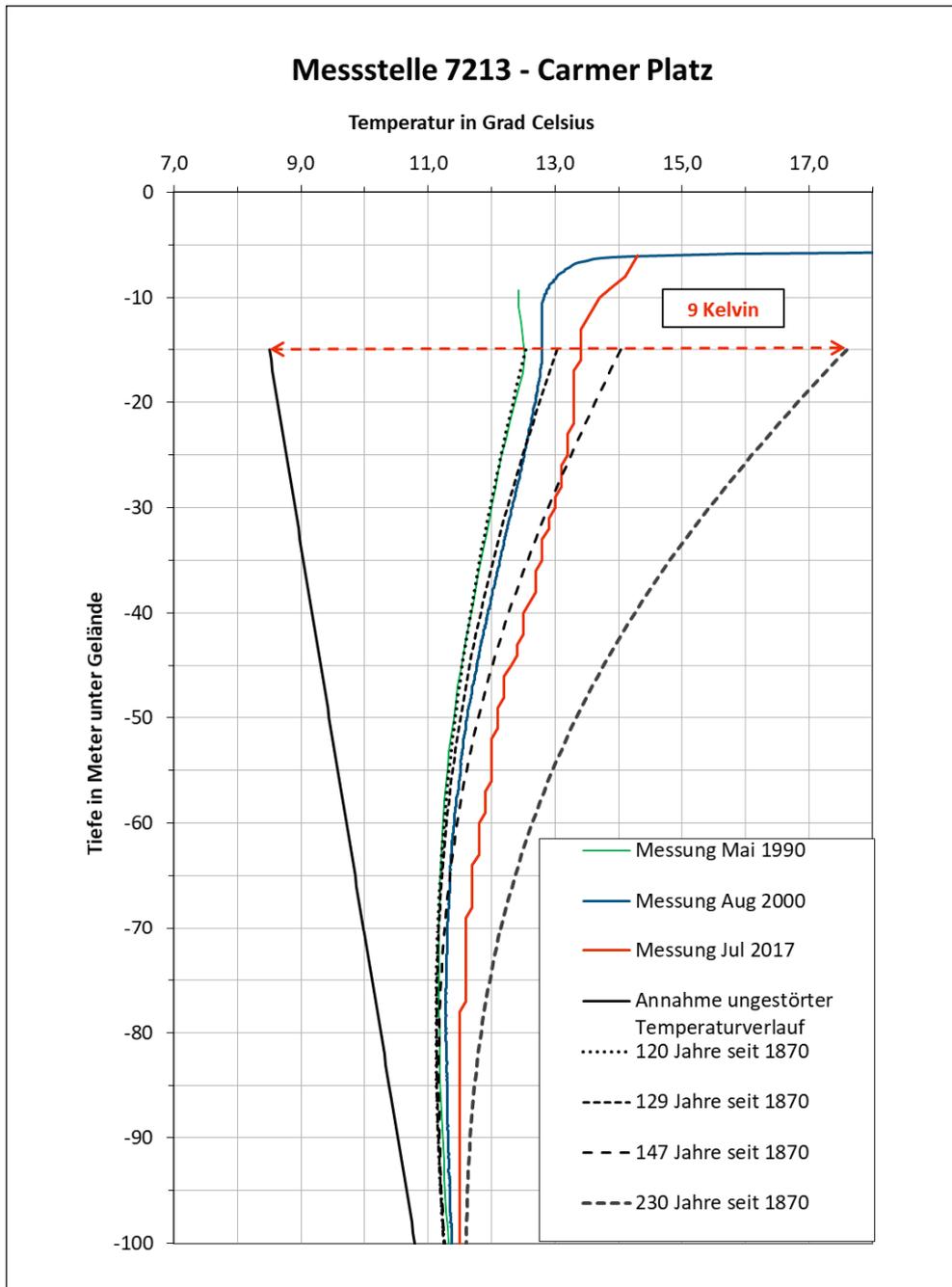


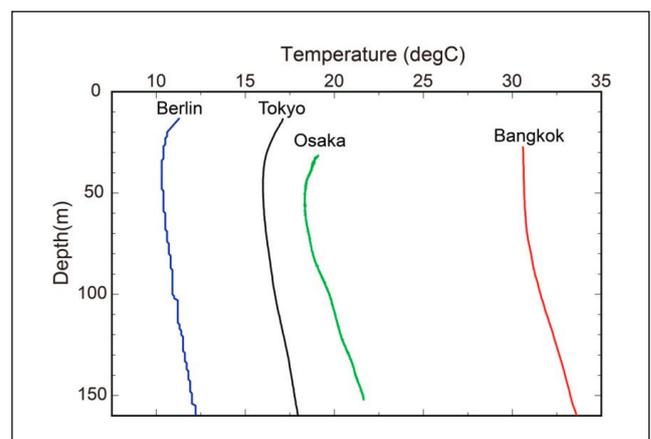
Abb. 15: Messbefunde und Ergebnisse der analytischen Berechnungen für die Messstelle 7213, Berlin Steglitz-Zehlendorf, Carmer Platz

Fig. 15: Result of the analytical calculations at the observation well 7213 in Berlin Steglitz, Carmer Platz

Vergleicht man die Temperaturmessungen aus Berlin mit Messergebnissen aus Ballungsräumen in Asien, die in gleicher Weise beeinflusst sind (Abb. 15), sind für Berlin Temperaturverhältnisse im Untergrund zu erwarten, wie diese heute schon zum Beispiel im Großraum Tokyo gemessen werden.

Abb. 16: Urbane Erwärmung des Untergrundes in vier Städten Asiens und Europas (HAMAMOTO et al. 2017)

Fig. 16: Urban warming of the subsurface in four cities in Asia and Europe (HAMAMOTO et al. 2017)



Zusammenfassung

Vor 150 Jahren, im Jahr 1896, wurde mit ersten flächenhaften Messungen der Grundwassertemperatur in Berlin begonnen. Im Jahr 1872/1873 führte man bis in eine maximale Tiefe von 3 m unter der Geländeoberfläche die ersten Bodentemperaturmessungen an unterschiedlichen Orten im damaligen Stadtzentrum durch. Je nach Messstandort konnten schon damals Temperaturdifferenzen von bis zu 5 Kelvin in derselben Tiefe beobachtet werden, die unter anderem auf unterschiedliche Wärmeflüsse zwischen der Atmosphäre und dem Untergrund in Abhängigkeit von Bodenaufbau, Siedlungsstruktur und den daraus resultierenden mikroklimatischen Verhältnissen zurückgeführt werden können.

Ein Vergleich mit aktuellen Messdaten aus dem Jahr 2018/2019 an den gleichen Messstandorten und einer Abschätzung der durchschnittlichen Temperatur in der neutralen Zone zeigt, dass in den letzten rd. 150 Jahren bis heute die durchschnittlichen Temperaturen in der neutralen Zone zwischen ca. 2,3 Grad Celsius und ca. 4,5 Grad Celsius angestiegen sind.

Die Ursache dafür ist in der ständig zunehmenden baulichen Entwicklung und damit verbundenen regionalen klimatischen Veränderung im Land Berlin zu sehen.

Zunehmend wirken sich auch die langfristigen globalen Klimaveränderungen auf die Untergrundtemperaturen in Richtung einer weiteren tiefgreifenden Erwärmung aus. Dies belegen auch Temperaturmessungen, die seit den 1970er Jahren in tiefen Grundwassermessstellen im Land Berlin durchgeführt worden sind.

Auf Grundlage von einfachen analytischen Modellen ist die Entwicklung der Untergrundtemperaturen an unterschiedlichen Orten im Land Berlin rekonstruiert worden.

Mit zusätzlichen Annahmen zur Klimaentwicklung bis zum Jahr 2100 wurde zusätzlich eine Prognose für die zukünftige Temperaturentwicklung des Untergrundes vorgenommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich der oberflächennahe Untergrund (bis 100 m Tiefe) und somit auch das Grundwasser weiter signifikant erwärmen werden.

Bezogen auf die Untergrundtemperatur in der neutralen Zone in ca. 15 m unter der Geländeoberfläche ist für den dicht besiedelten Innenstadtbereich davon auszugehen, dass im Jahr 2100 der Temperaturanstieg im Vergleich zu dem anthropogen unbeeinflussten Zustand im Jahr 1870 bis zu 9 Kelvin betragen kann. Die Temperatur im Boden bzw. Grundwasser in der neutralen Zone kann sich unter den angenommenen Randbedingungen von derzeit ca. 13 Grad Celsius auf bis zu ca. 17 bis 18 Grad Celsius erhöhen.

Summary

150 years ago, in the year 1869, in Berlin extensive measurements of the groundwater temperature were started. In 1872/1873, the first soil temperature measurements were

conducted up to a maximum depth of 3 m below ground level at different locations in the city center of Berlin. Depending on the measuring location, temperature differences of up to 5 Kelvin could be observed at the same depth, which can be attributed, among other things, to different heat fluxes between the atmosphere and the subsurface depending on the soil structure, the settlement structure and the resulting microclimatic conditions.

A comparison with current measurement data from the year 2018/2019 at the same measuring locations and an estimation of the average temperature in the neutral zone shows that the average temperatures in the neutral zone in the last approx. 150 years have risen between about 2.3 degrees Celsius and about 4.5 degrees Celsius.

The reason for this can be found in the constantly increasing structural development and the associated regional climate change in the state of Berlin.

Increasingly, long-term global climate changes are also showing an effect on underground temperatures towards a further profound warming. This is also confirmed by temperature measurements that have been carried out since the 1970s in deep groundwater observation wells in the state of Berlin.

Based on simple analytical models, the development of background temperatures at different locations in the state of Berlin has been reconstructed.

With additional assumptions about the climatic changes up to the year 2100, a prognosis for the future temperature development of the subsurface was made.

The results show that the shallow subsurface (up to 100 m depth) and therefore also the temperature of the groundwater will continue to warm up significantly.

Related to the subsurface temperature in the neutral zone about 15 m below ground level, it can be assumed for the densely populated inner city area that in the year 2100 the temperature increase can reach up to 9 Kelvin in comparison with the anthropogenic unaffected state of 1870. The temperature of the soil or the groundwater in the neutral zone will increase from the current approx. 13 degrees Celsius to approx. 17 up to 18 degrees Celsius under the assumed boundary conditions.

Literatur

BAUR- & BERKELEY-REIHE: Seite „Zeitreihe der Lufttemperatur in Deutschland“. – In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 1. August 2019, 18:33 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Zeitreihe_der_Lufttemperatur_in_Deutschland&oldid=190956588 (Abgerufen: 21. August 2019, 05:57 UTC)

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

CUBASCH, U. & C. KADOW. (2011): The change of the global climate and regional climate aspects of Berlin and Brandenburg. – *Die Erde* 142 (1/2)

- FENNER, D., MEIER, F., BECHTEL, B., OTTO, M. SCHERER, D. (2017): Intra and inter 'local climate zone' variability of air temperature as observed by crowd sourced citizen weather stations in Berlin, Germany. – *Meteorologische Zeitschrift*, PrePub DOI 10.1127/metz/2017/0861, 2018
- GRUNDWASSERTEMPERATUR 2015 (AUSGABE 2916), UMWELTATLAS: www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/kc214.htm (aufgerufen am 20.8.2019)
- HAMAMOTO, H., BLUM, P., BENZ, S., LIMBERG, A., TANIGUCHI, M., MIYAKOSHI, A., ARIMOTO, H., GOTO, S., M. YAMANO (2017): Reconstruction of the Thermal Environment Evolution from Subsurface Temperature Distribution in and around in four cities of Asia and Europe. – Abstract of JpGU-AGU Joint Meeting 2017, MZZ40-P02, Tokyo
- HENNING, A & A. LIMBERG (1995): Das Grundwasser-Temperaturfeld von Berlin. – *Brandenbg. geowiss. Beitr.* **2**, 1, S. 97–104
- HENNING, A & A. LIMBERG (2012): Veränderung des oberflächennahen Temperaturfeldes von Berlin durch Klimawandel und Urbanisierung. – *Brandenbg. geowiss. Beitr.* **19**, 1, S. 81–92
- HOBRECHT, J. (1874): Bericht über die Grundwasserverhältnisse in Berlin, die Wasserstände der Spree, den Regenfall in Berlin und die Boden-Temperatur-Messungen [Fe. 1874]. – In: *Reinigung und Entwässerung Berlins. Einleitende Verhandlungen und Berichte...*, Heft 12B, S. 682–707, Berlin (Hirschwald)
- MENBERG, K., BLUM, P., KURYLYK, B. L., BAYER, P. (2014): Observed groundwater temperature response to recent climate change – *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **18**, 4453–4466, <https://doi.org/10.5194/hess-18-4453-2014>
- OTTO, R. (1987): Hydrochemie, Thermometrie und Fließverhältnisse des Grundwassers in den südöstlichen Stadtbezirken von Berlin (West) – Neukölln, Tempelhof, Schöneberg. – *Berliner geowiss. Abh.* **44**, 79 S., Berlin
- STEWART, D. & T OKE (2012): Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. – *Bulletin of the American Meteorological Society* **93**, 12, 1879–1900
- TRAPP, C. (1983): Beschaffenheit und hydrogeologische Zusammenhänge des tieferen Grundwassers im nördlichen Stadtgebiet von Berlin (West). – *Berliner geowiss. Abh.*, **88**, 115 S.
- VIRCHOW, R. (1873): *Reinigung und Entwässerung Berlins. – Generalbericht über die Arbeiten der städtischen gemischten Deputation für die Untersuchung der auf die Kanalisation und Abfuhr bezüglichen Fragen. – 182 S., Berlin (Hirschwald)*
- ZOTH, T. A. & R. HÄNEL (1988): Appendix. – In: R. HÄNEL, RYBACH, L. STEGENA, L. (ed.): *Handbook of Terrestrial Heat Flow Determinations.* – Kluwer, S. 449–446, Hannover

Anschrift der Autoren

Andreas Henning
Energie & Umweltberatung
Rothenbücherweg 53 a
14089 Berlin

Alexander Limberg
Heidenheimer Straße 4
13467 Berlin