



© SenUV, Alexander Limberg

*Berlin: informierter*

# Festkolloquium 150 Jahre Grundwasserbeobachtung in Berlin von der ersten Messung zum modernen Grundwassermanagement

Kurzfassung der Vorträge

Das Festkolloquium spannt einen Bogen von der ersten Grundwasserbeobachtung vor 150 Jahren über die Entwicklung der Wasserversorgung bis hin zu den modernen digitalen Darstellungsmöglichkeiten hydrogeologischer Daten sowie des 3dimensionalen Untergrundes. Es werden Grundwassergefährdungen beleuchtet, die durch Sulfateintrag oder durch Salzwasseraufstieg hervorgerufen werden. Darüber hinaus werden folgende aktuelle Fragestellungen der Landesgeologie Berlin aufgeworfen: Mit welchen Werkzeugen kann man das Grundwasserökosystem überwachen und bewerten? Welche geophysikalischen Überwachungsmöglichkeiten der geogenen Grundwasserversalzung gibt es? Wie entwickelt sich der anthropogen erwärmte Untergrund, die „Wärmeinsel Berlin“, weiter? Viele Fragen und fundierte Antworten.

22. Mai 2019, 10.30 – 17.00 Uhr  
Umweltforum | Pufendorfstraße | 10249 Berlin

Eine Veranstaltung der  
Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz | Arbeitsgruppe Landesgeologie  
*Alexander Limberg*

# Agenda

- 10:30 **Anmeldung und Get-together**
- 11:00 **Begrüßung**  
*Dr. Monika Kehlbacher, Abteilungsleiterin, Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Berlin (SenUVK)*
- 11:10 **Von der ersten Messung zum modernen Grundwassermanagement**  
*Alexander Limberg, Landesgeologie, SenUVK*
- 11:40 **Entwicklung der Wasserversorgung in Berlin**  
*Jens Feddern, Berliner Wasserbetriebe*
- 12:10 **Sulfateintrag ins Grundwasser, Gefährdung der Trinkwassergewinnung?**  
*Dr. Thomas Taute, Bezirksamt Charlottenburg-Wilmersdorf, Berlin*
- 12:40 **Grundwasser ist Lebensraum – der B-A-E Index als mikrobiologisch-ökologisches Konzept zur Überwachung des Grundwassers**  
*Prof. Christian Griebler, Universität Wien*
- 13:10 **Mittagessen**
- 14:00 **Verbreitung der geogenen Grundwasserversalzung in Berlin und Geophysikalische Methoden zur Überwachung der Süß-/Salzwassergrenze im Grundwasser**  
*Dr. Jens Bölscher, Landesgeologie, SenUVK*  
*Karsten Baumann, Bohrlochmessung – Storkow GmbH*
- 14:30 **Der tiefe Untergrund – das 3D Modell von Brandenburg und Berlin**  
*Christoph Jahnke, LBGR, Brandenburg*
- 15:00 **Landesgeologie goes digital – von der Papierkarte zur Webanwendung**  
*Matthias Schroeder, Landesgeologie, SenUVK*
- 15:30 **Von der Wärmeinsel zur Hitzefalle? – Anthropogener Einfluss auf die Grundwassertemperatur in Berlin**  
*Alexander Limberg, Landesgeologie, SenUVK*
- 16:00 **Buffet zum Ausklang**
- 17:00 **Ende der Veranstaltung**

## Von der ersten Messung zum modernen Grundwassermanagement

150 Jahre Grundwasserbeobachtung in Berlin

Alexander Limberg, Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Berlin  
alexander.limberg@senumvk.berlin.de

Grundwasser ist das Lebenselixier der Stadt Berlin. Als einzige Millionenmetropole Deutschlands gewinnt sie ihr Trinkwasser zu 100 Prozent aus dem Grundwasser und das fast vollständig aus dem eigenen Stadtgebiet. Im Jahr 2018 waren es 235 Millionen Kubikmeter pro Jahr. Diesen Schatz gilt es zu bewahren und zu schützen.

Die Geburtsstunde der Grundwassermessungen in Berlin waren die verheerenden Choleraepidemien Mitte des vorletzten Jahrhunderts. Man hatte das „unterirdische Wasser“ im Verdacht, Krankheitsüberträger zu sein (PETTENKOFER 1857).

Auf Forderung von VIRCHOW (1863) wurden unter dem Berliner Baurat James Hobrecht im Jahr 1869 von September bis November 30 Standrohre von acht Zoll Durchmesser errichtet (Abbildung 1), an denen täglich der Grundwasserstand gemessen wurde (HOBRECHT 1871).

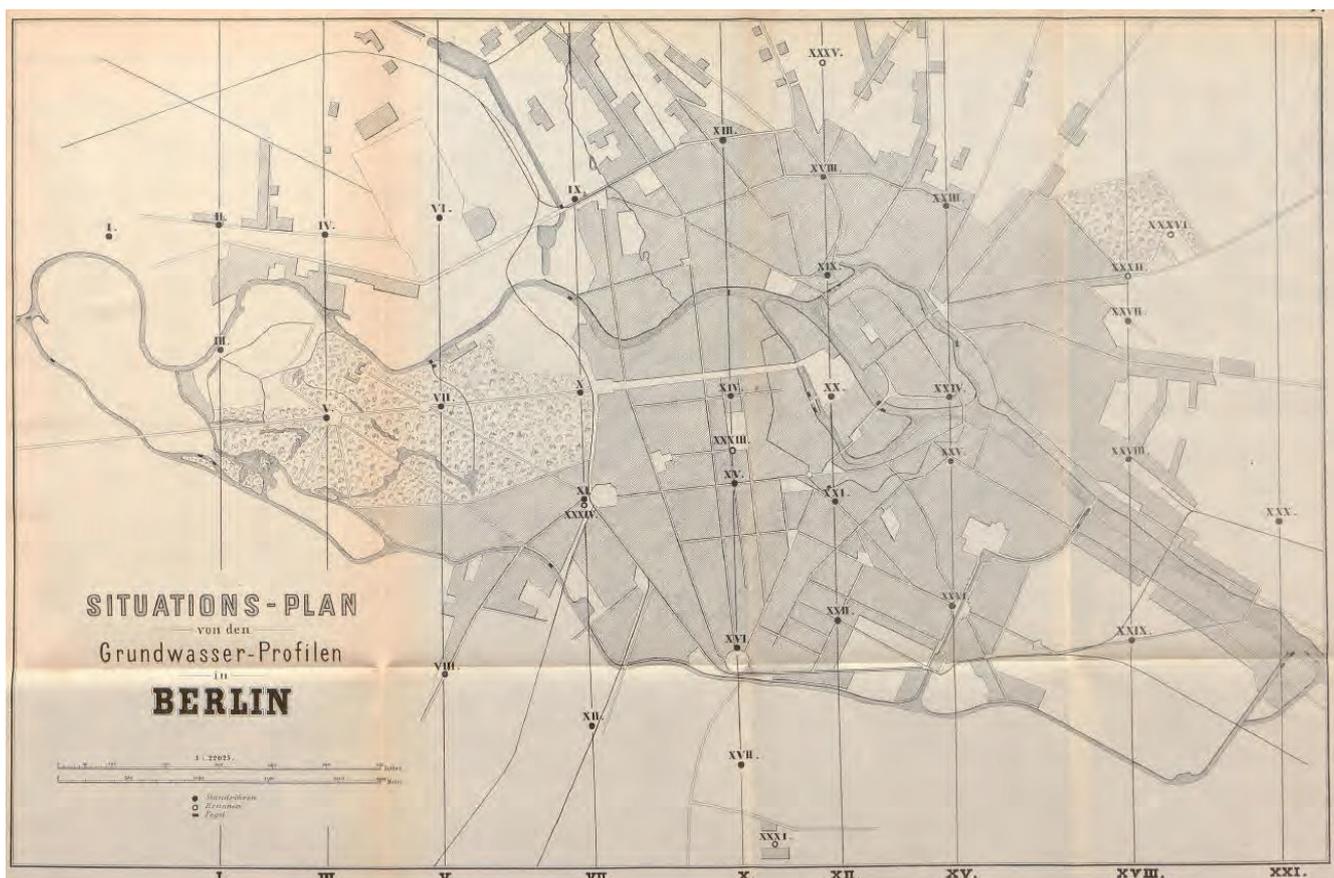
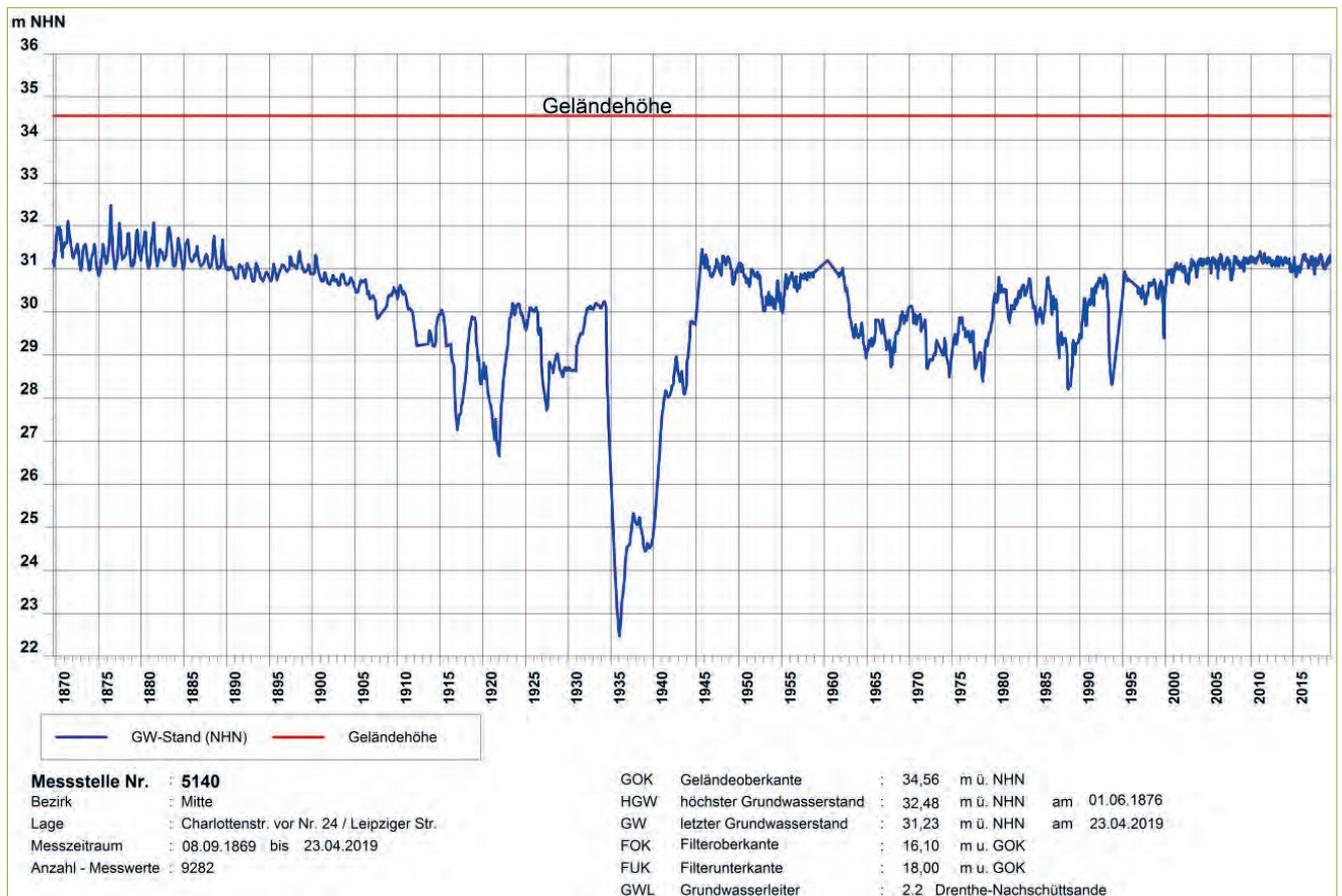


Abbildung 1 Lageplan der 30 Grundwassermessstellen des ersten Grundwassermessnetzes von Berlin im Jahr 1869 (aus HOBRECHT 1871)

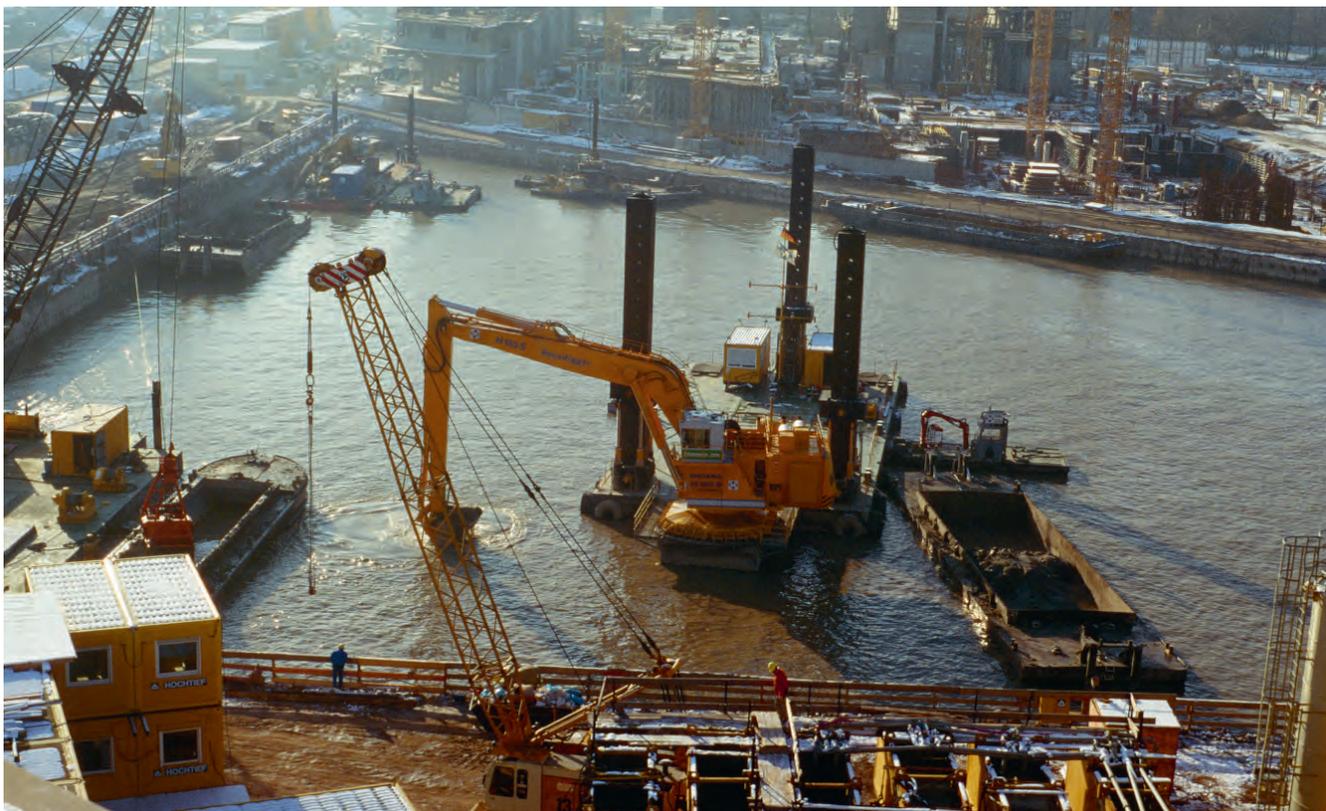
Diese Messungen bildeten damit den Ausgangspunkt der ältesten durchgehenden Beobachtungsreihen des Grundwasserstandes in Deutschland (Abbildung 2).



**Abbildung 2** 150jährige Grundwasserstandsganglinie der Messstelle 5140 (XV in Abbildung 1) in Berlin Mitte. Der Grundwasserstand ist durch zahlreiche Grundwasserabsenkungen seit 1905 zeitweise stark beeinflusst.

Der Regierungs- und Baurat Denner wies schon 1937 auf große Schäden hin, die hohe Grundwasserentnahmen für die großen Baumaßnahmen in den 1930er-Jahren in der Innenstadt mit Absenkungsbeträgen von bis zu 12 Meter erzeugten (DENNER 1937) (Abbildung 2).

Um solche Schäden zu vermeiden, durften später in den 1990er-Jahren alle Großbaumaßnahmen zum Umbau der neuen Hauptstadt nur noch in Grundwasser schonender Bauweise errichtet werden. So kam für große Gebäudekomplexe, die bis zu 20 Meter tief gegründet sind und damit 17 Meter ins Grundwasser einbinden, hauptsächlich das Trogbauverfahren zum Einsatz (Abbildungen 3 a und b), für die unterirdischen Verkehrswege das Trogbau-, das Caisson- und das Schildvortriebsverfahren. Zur Überwachung der wasserbehördlichen Auflagen wurde ein eigenes Online-Grundwassermanagement eingerichtet.



**Abbildung 3 a** Trogbaugrube am Potsdamer Platz mit Blick vom Weinhaus Huth: Nach Errichtung der Schlitzwand wird das Erdreich vom Ponton aus mit dem Bagger ausgehoben. Im entstandenen Grundwassersee wird mit Tauchern eine Unterwasserbetonsohle gegossen. Foto: Alexander Limberg

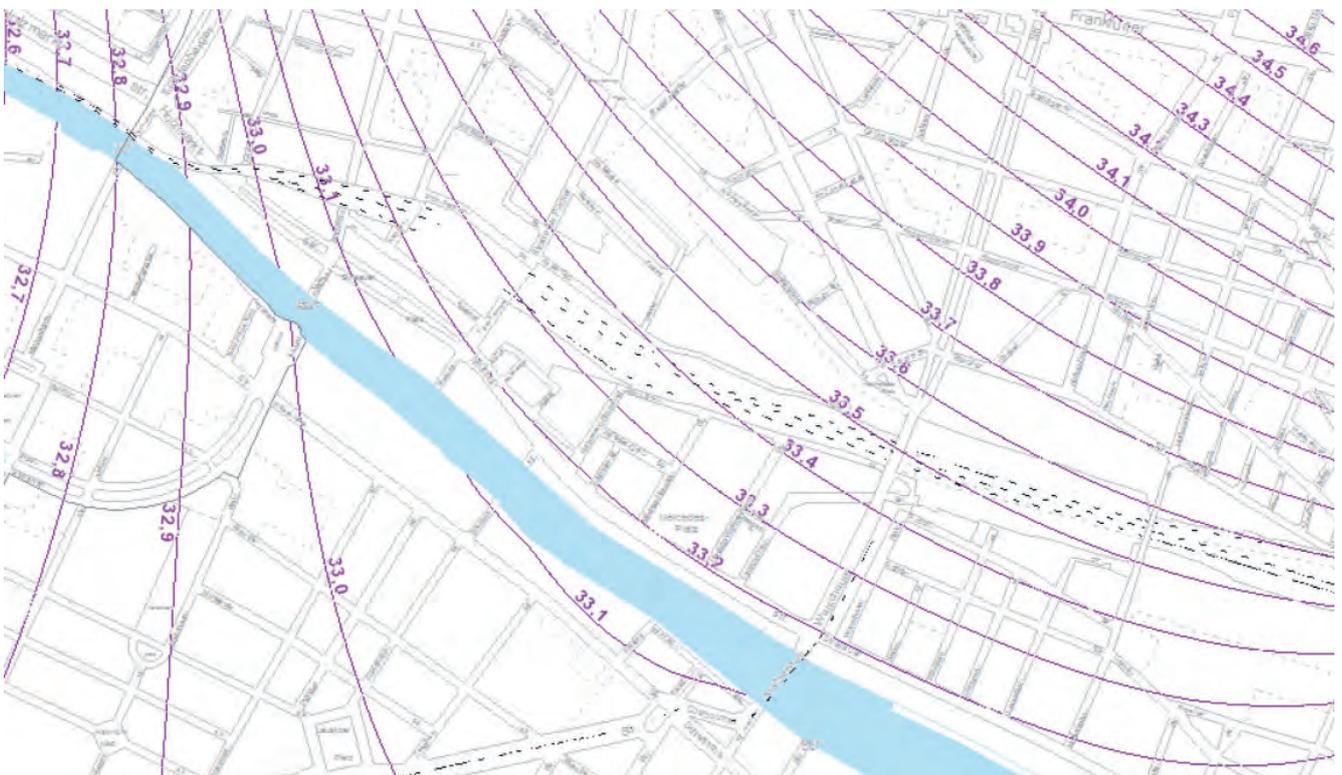


**Abbildung 3 b** Anschließend wird aus dem fertigen Trog das verbliebene Grundwasser gelenzt. Die Baugrubensohle wurde vorher noch mit 20 Meter langen Erdankern gegen Auftrieb (17 Meter Wassersäule!) gesichert. Foto: Alexander Limberg

Die großen Erkundungsprogramme des Süßwasserstockwerks zur Sicherung der Trinkwasservorkommen von Berlin in den 1970er- und 1980er-Jahren führten zu einem großen Erkenntnisgewinn über den Bau des känozoischen Untergrundes. Dieser ist vor allem durch die Ausbildung der pleistozänen Rinnen geprägt, die sich zum Teil tief in den tertiären Untergrund eingeschnitten und stellenweise den 80 Meter mächtigen unteroligozänen Rupelton, der als Barriere zwischen dem Süß- und Salzwasserstockwerk dient, erodiert haben. Auf der Landesfläche sind fünf Erosionsfenster nachgewiesen (LIMBERG et al. 2016). Diese Stellen sind mögliche Aufstiegspfade vom Salzwasser- in das Süßwasserstockwerk. Im Berliner Raum sind im Süßwasserstockwerk vier hydraulisch unterscheidbare Grundwasserleiter (LIMBERG & THIERBACH 2002) ausgebildet. Aktuell besteht das Landesmessnetz des Senates aus rund 1.000 Messstellen, die mit Datenloggern ausgerüstet sind und tägliche Grundwasserstandswerte in die Datenbank liefern. Aktuell sind es 13,5 Millionen Werte.

Auf Grundlage dieser Daten konnte ein modernes Auskunftssystem und ein umfangreiches hydrogeologisches Kartenwerk mit Grundwasserflurabstandskarten und jährlich aktuellen Grundwassergleichplänen sowie tagesaktuellen Grundwasserständen aufgebaut werden, die alle im Internet abrufbar sind.

Weiterhin ermöglichen diese Daten Prognoseberechnungen und Grundwasserströmungsmodellierungen, die zum Beispiel Grundlage für die Erstellung der Karte des „höchsten zu erwartenden Grundwasserstandes“ (zeHGW) war. Der für die Errichtung von Bauwerken mit Kellergeschossen besonders wichtige zeHGW ist ebenfalls online abrufbar (LIMBERG et al. 2015) (Abbildung 4).



**Abbildung 4** Ausschnitt aus der zeHGW Karte. Die Isolinien geben den höchsten zu erwartenden Grundwasserstand in Metern über NN an. (ZU ERWARTENDER HÖCHSTER GRUNDWASSERSTAND (ZEHW), UMWELTATLAS)

## Literatur

- DENNER, J. (1937): Der Grundwasserstand in Berlin. Grundwasserstandsmessungen von 1870 bis 1936 und ihre Bedeutung für Wasserwirtschaft und Wasserrecht. – Zentralblatt der Bauverwaltung 57: 243-251; Berlin
- HOBRECHT, J. (1871): Bericht über die Grundwasser-Verhältnisse in Berlin [16.1.1871]. – In: Reinigung und Entwässerung Berlins. Einleitende Verhandlungen und Berichte..., Heft 5, S. 237-262, 15 Blatt Zeichnungen und 18 Tabellen; Berlin (Hirschwald)
- LIMBERG, A. & J. THIERBACH (2002): Hydrostratigrafie von Berlin – Korrelation mit dem Norddeutschen Gliederungsschema. – Brandenburgische Geowiss. Beitr., 9, 1/2, S. 65-68; Kleinmachnow
- LIMBERG, A., HÖRMANN, U. & H. VERLEGER (2015): Berlins Grundwasserauskünfte jetzt auch online. – Baukammer Berlin, Nachrichten für die im Bauwesen tätigen Ingenieure, 3/2015; Berlin
- LIMBERG, A., JONAS, O & A. KOLBERG (2016): Detektion möglicher Fehlstellen im Rupelton durch Messung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit in tiefen Grundwassermessstellen im Land Berlin. – Brandenburgische Geowiss. Beitr., 23, 1/2, S. 11-15; Cottbus
- PETTENKOFER, M. (1857): Ueberblick über die gesammte örtliche Ausbreitung der Cholera im Königreiche Bayern, nebst weiteren Forschungen und Betrachtungen über die Ursachen der örtlichen Begränzung der Krankheit. – In: MARTIN: Haupt-Bericht...: S. 298-378; München
- VIRCHOW, R. (1863): Ueber die Canalisation von Berlin. Gutachten der wissenschaftlichen Deputation für das Medicinalwesen, 58 S.; Berlin (Hirschwald),
- ZU ERWARTENDER HÖCHSTER GRUNDWASSERSTAND (ZEHGW), UMWELTATLAS: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/i219.htm> (aufgerufen am 9. April 2019)

## Entwicklung der Wasserversorgung in Berlin

*J. Klinger, G. Grützmaker, S. Schimmelpfennig @ J. Feddern,  
Berliner Wasserbetriebe  
jens.feddern@bwb.de*

Bei der Bildung der ersten Siedlungen auf dem Berliner Stadtgebiet ab 1100 vor Christus entwickelt sich der Bedarf nach einer gesicherten Versorgung mit Trinkwasser und es wurden erste Brunnen errichtet. Ab dem 8. Jahrhundert beginnen slawische Stämme sich anzusiedeln und errichten ebenfalls Brunnen. Mit Beginn der Gründung von Dörfern und Burgen im 13. Jahrhundert verändert sich auch der Bedarf der Wasserversorgung und es sind mehr und gleichzeitig verlässlichere Brunnen erforderlich, die zumeist auf öffentlichen Flächen wie zum Beispiel Marktplätzen zu finden waren. Mitte des 16. Jahrhunderts wird in Berlin die erste Wasserkunst errichtet, bestehend aus Druckpumpe, Druckleitung, Behälter und Entnahme- sowie Verteilungsleitungen. Im Jahr 1659 ergibt eine veranlasste Brunnenzählung 51 öffentliche Brunnen in der Stadt.

Bis zu Beginn des 19. Jahrhunderts entwickelt sich Berlin zu einer Großstadt mit stetig wachsender Bevölkerung (1802: 176.837 Einwohner). Bis 1806 wächst die Zahl der öffentlichen Brunnen auf 560. Bautechnisch bestehen inzwischen nahezu alle Brunnen aus einer gemauerten Wand und besitzen eine Tiefe von circa 5 Meter bei einem durchschnittlichen Durchmesser von 1,5 Meter. Durch die wachsende Bevölkerung und eine fehlende Kanalisation nimmt jedoch die Verschmutzung der dicht besiedelten Gebiete immer weiter zu. Die Folge sind fatale hygienische Zustände auf den Straßen der Stadt. Eine private Aktiengesellschaft, die „Berlin Waterworks Company“ beginnt im Jahr 1853 mit dem Bau des ersten Berliner Wasserwerkes. Die offizielle Inbetriebnahme des Wasserwerkes Stralauer Tor, das Oberflächenwasser zu „brauchbarem Wasser“ aufbereitete, erfolgte dem Vertrag nach am 1. Juli 1856.

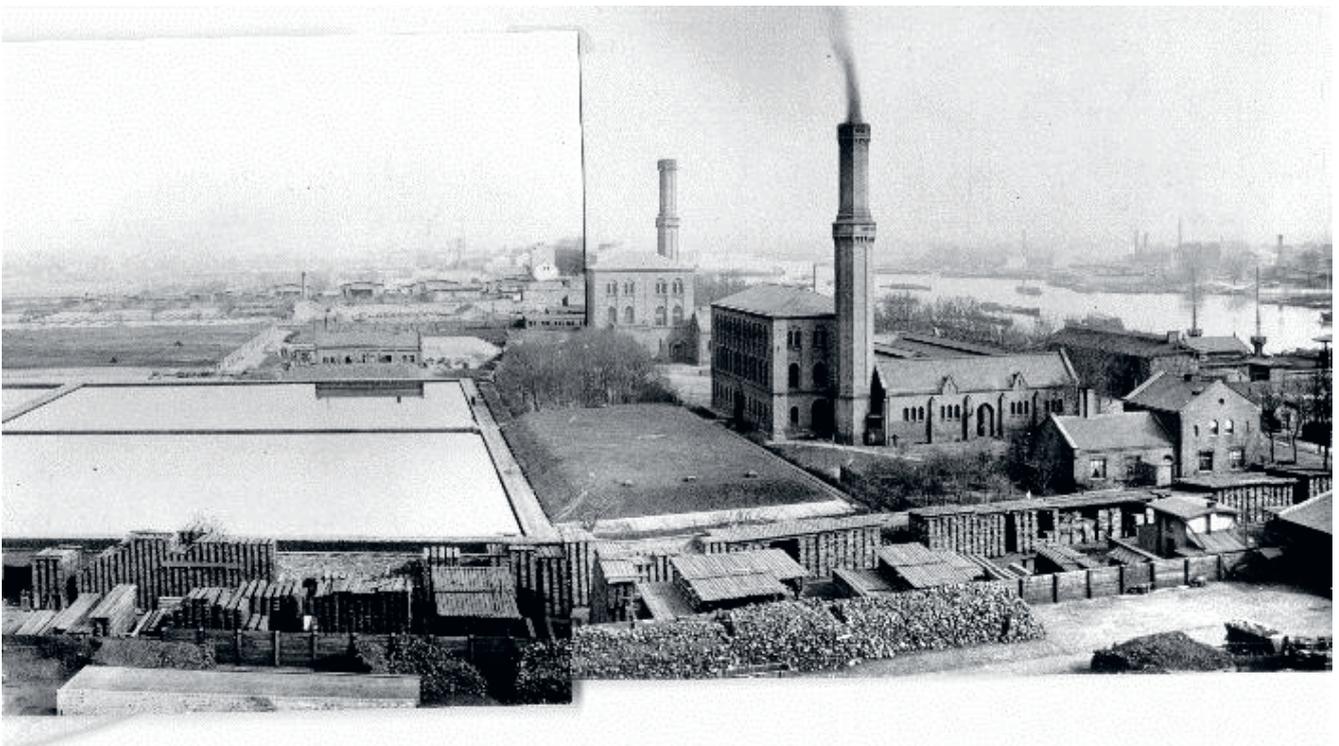


Abbildung 1 Wasserwerk vor dem Stralauer Tor 1888.

Am 11. Dezember 1872 ermächtigt Kaiser Wilhelm I den Minister für Handel und Inneres die Rechte an der Wasserversorgung vom Staat an die Stadt Berlin zu übertragen. Mit Blick auf die wachsende Stadt ergab sich großer Handlungsbedarf. Am 20. Mai 1874 legte Henry Gill einen Projektvorschlag vor, der die Versorgung von 1,5 Millionen Einwohnern mit 140 Litern Wasser je Tag und Einwohner vorsah. Die 210.000 Kubikmeter je Tag sollten zu ein Drittel am Ufer des Tegeler Sees und zu zwei Drittel am Nordufer des Müggelsees mittels Uferfiltration gewonnen werden. Außerdem bekam der Prenzlauer Berg ein abgetrenntes Hochstadtnetz. Die Umsetzung erfolgte zeitnah, so dass in den Jahren 1879 beziehungsweise 1893 die Wasserwerke Tegel und Friedrichshagen in Betrieb gingen. Gleichzeitig wurde das Wasserwerk am Stralauer Tor aufgrund seiner mangelhaften Wasserqualität außer Betrieb genommen. Durch die noch fehlende Belüftung am Wasserwerk Tegel kommt es zunächst zu großflächigen Braunwasser Beschwerden. Nach intensiver Forschungsarbeit wurden Eisen und Mangan als Ursache ausgemacht und die Belüftung als Aufbereitungsstufe in den Wasserwerken eingeführt.

Bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts erreichte die Wasserversorgung in Berlin eine Spitzenleistung von 216.000 Kubikmeter je Tag. In den Jahren von 1904 bis 1910 erfolgte jedoch ein weiterer, starker Anstieg des Wasserbedarfes um mehr als das Doppelte. Infolge wurden bis 1916 insgesamt 14 große Wasserwerke in Betrieb genommen, von denen viele heute noch existieren (Abbildung 2). Bis 1930 ergab sich nun ein System aus 12 Wasserwerken, zwei Zwischenpumpwerken, drei Überpumpwerken, drei Laboren zur Sicherung der Wasserqualität und einem Rohrnetz von circa 3.710 Kilometer Länge.

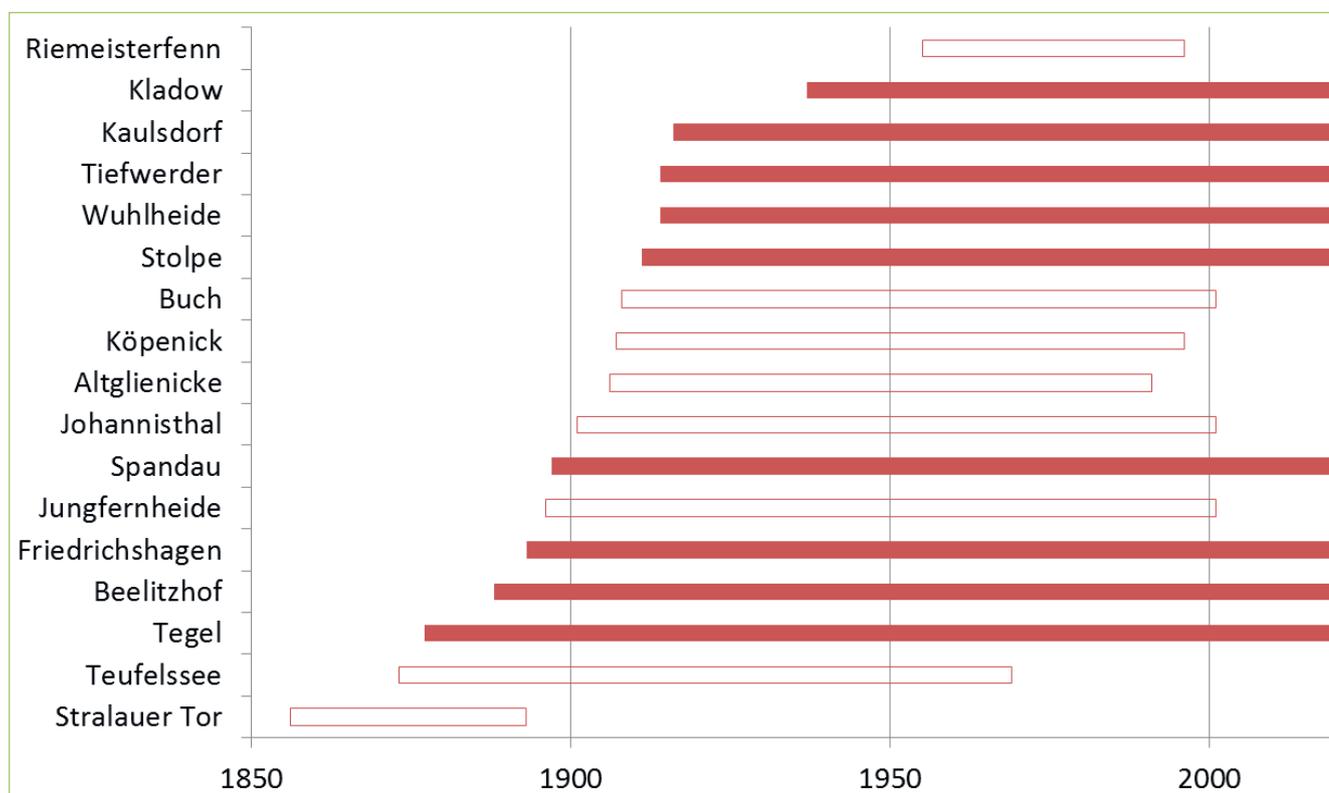


Abbildung 2 Betriebszeit ausgewählter Wasserwerke in Berlin (Daten aus Bärthel 1997).

Im zweiten Weltkrieg erfolgte die Sicherung der Wasserversorgung zum Teil durch Zwangsarbeiter und es wurden keine strategisch relevanten Anlagen zerstört, so dass auch bei Kriegsende noch ein relativ stabiler Normalbetrieb gefahren werden konnte. Viel größer waren die Probleme beim Wiederaufbau. Nötiges Material, Kohle und auch Fahrzeuge fehlten um den Wiederaufbau zu bewältigen. Durch die Teilung der Stadt kommt es zudem zu Streit zwischen den Sektoren und infolge dessen im Juli 1950 zur Schließung von Schiebern an den Sektorengrenzen. Der Wassernot in Westberlin wird daraufhin durch die Neuerrichtung eines Wasserwerks begegnet: im Jahr 1955 nach nur 16 Monaten Bauzeit geht das Wasserwerk Riemeisterfenn in Betrieb.

Durch die Wiedervereinigung Deutschlands 1990 und die damit verbundenen wirtschaftlichen Umbrüche kommt es bei stagnierenden Bevölkerungszahlen zu einem starken Rückgang des Wasserbedarfs um rund 40 Prozent in den folgenden Jahren (Abbildung 3) und einige Wasserwerke der inzwischen teilprivatisierten Berliner Wasserbetriebe gehen außer Betrieb.

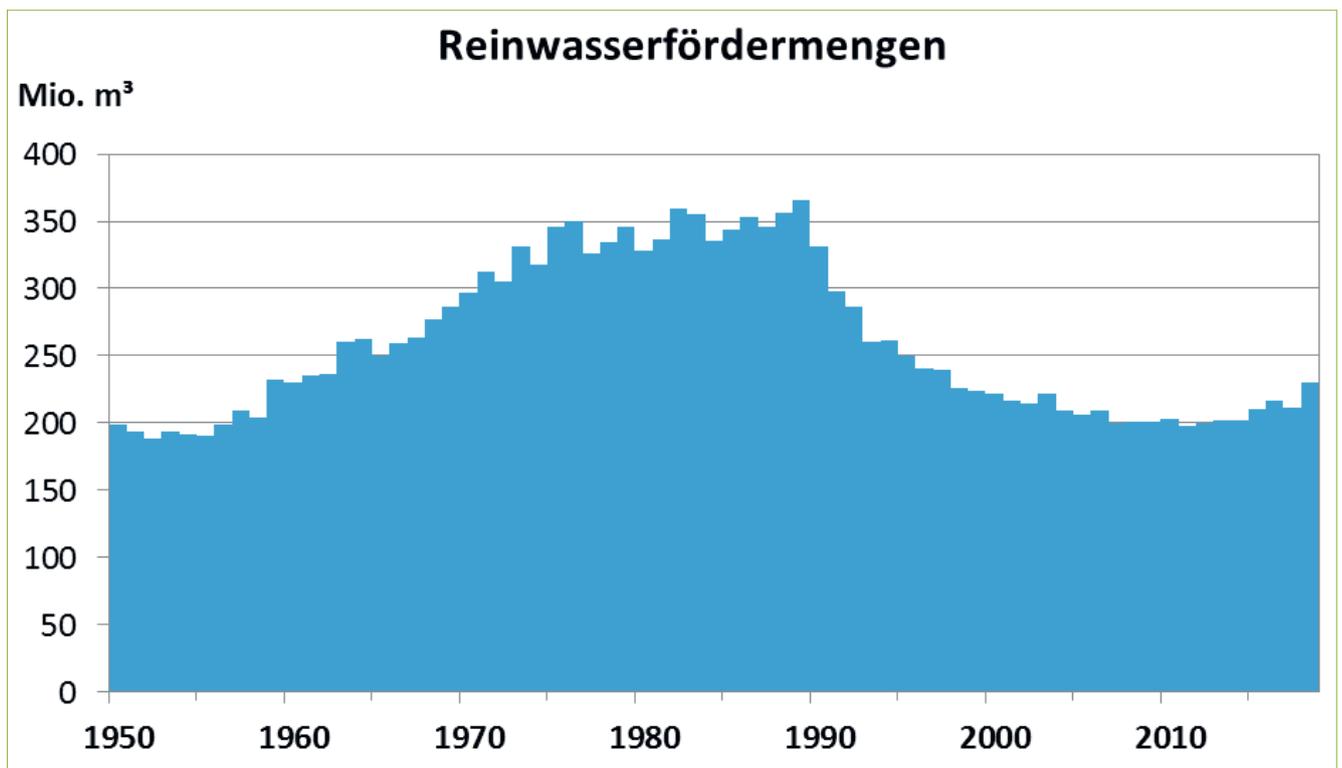


Abbildung 3 Entwicklung des Wasserbedarfs Berlins seit 1950.

Nach der Rekommunalisierung 2012 wird inzwischen aus neun Wasserwerken jährlich wieder so viel Trinkwasser gefördert wie in den 1960er-Jahren (Abbildung 3). Das Wasser entstammt weiterhin zu circa 90 Prozent dem durch Uferfiltrat und künstlicher Grundwasseranreicherung ergänzten Grundwasser des Stadtgebietes und kann aufgrund der hohen Qualität der Wasserressourcen wie vor 100 Jahren naturnah – allein mittels Belüftung und Filtration – zu Trinkwasser aufbereitet werden.

### Literatur

BÄRTHEL, H. (1997): Wasser für Berlin. – Hrsg. Berliner Wasserbetriebe, Verlag für Bauwesen; Berlin

## Sulfat im Berliner Grundwasser, Gefährdung der Trinkwassergewinnung?

*Dr. Thomas Taute, Bezirksamt Charlottenburg-Wilmersdorf von Berlin*

*thomas.taute@charlottenburg-wilmersdorf.de*

Die zum Teil sehr hohe Sulfatbelastung im Berliner Grundwasser infolge sehr heterogener Belastungsquellen hat dazu geführt, dass nach der Bestandserfassung zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie die meisten Berliner Grundwasserkörper den guten chemischen Zustand verfehlt haben. Die Ursache für die hohen Sulfatkonzentrationen wird in komplexen Beziehungen zwischen verschiedenen Schwefelquellen, Eintragspfaden und im Boden ablaufenden Prozessen gesehen.

Die Senatsverwaltung für Umwelt beauftragte seit 2009 mehrere Vorhaben zur Identifizierung aller Sulfatquellen, Bestimmung der Mobilisierungs- und Verlagerungsmechanismen und die qualitative und quantitative Erfassung sämtlicher Eintragspfade in das Grundwasser. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sind Bewirtschaftungs- und Sanierungsstrategien abzuleiten.

Zur Ermittlung der bestehenden Sulfatquellen und möglichen Senken und deren Einfluss auf das Grundwasser im Berliner Stadtgebiet wurden die Daten sämtlicher verfügbaren Gütemessstellen bearbeitet. Dies beinhaltete:

1. Zeitreihenanalysen an 706 Messstellen.
2. Erstellung und Vergleich von Stichtagskarten (1995, 2002 und 2008) auf Basis der oben genannten GW-Messstellen.
3. Identifizierung der unterschiedlichen Sulfatquellen und Bewertung des Einflusses auf das Berliner Grundwasser.
4. Identifizierung von insgesamt 19 Sulfat-Hot-Spots aus der Karte der Sulfatkonzentrationen im Hauptgrundwasserleiter (Abbildung 1),
5. Zuordnung zu Reaktionstypen mit Hilfe von Untersuchungen der hydrochemischen Beschaffenheit und stabiler Schwefel-Isotopen.

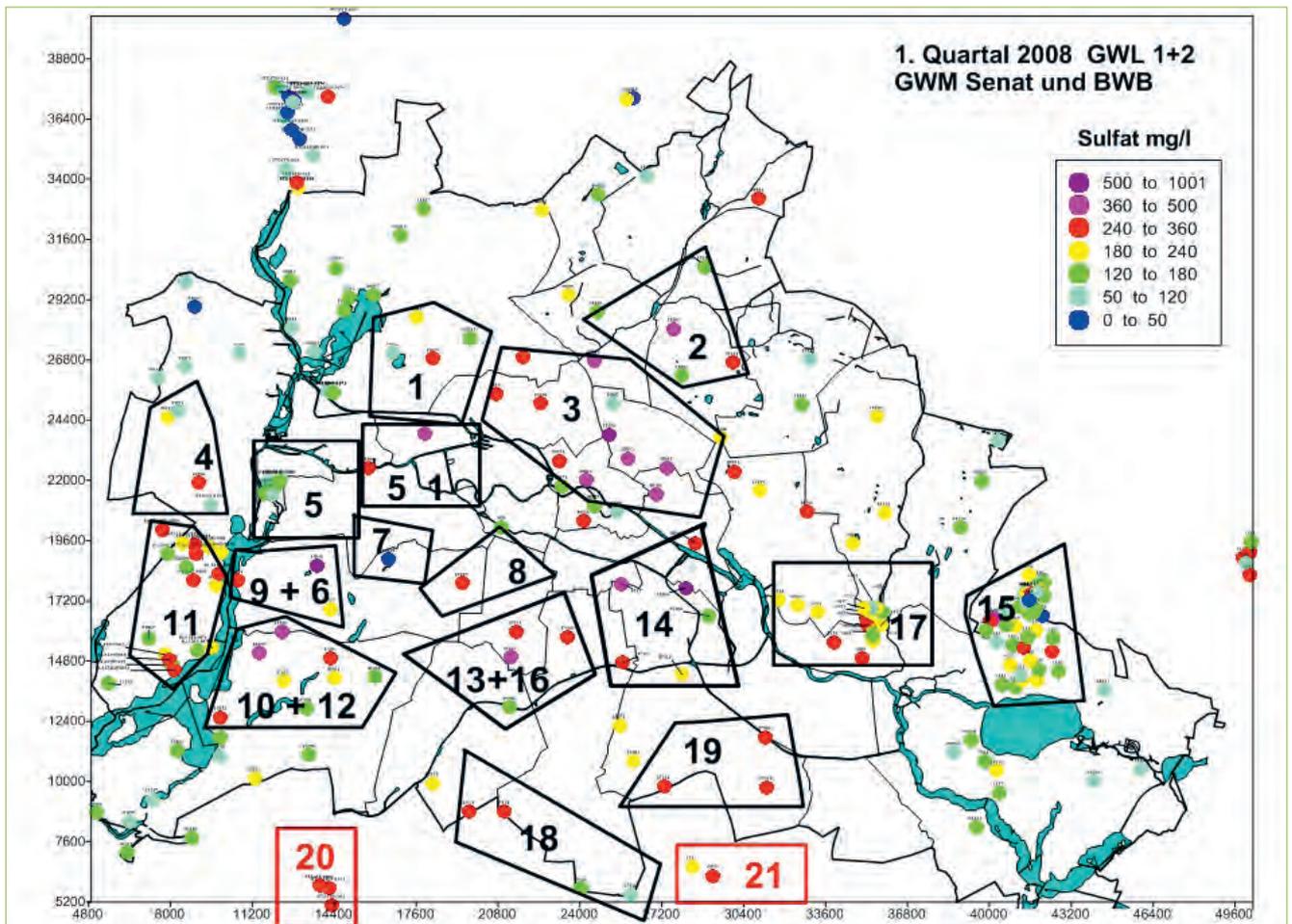


Abbildung 1 Verteilung der Sulfatkonzentrationen im Grundwasserleiter 1 und 2 im Jahr 2008 mit Lage der Hot-Spots (KNAPPE et al. 2010)

Ergebnisse:

1. Als potentielle **Sulfatquellen** wurden die im Folgenden aufgezählten Quellentypen identifiziert:
  - a. Eintrag aus Gipslösung durch Grundwasserneubildung aus der hauptsächlich im Bereich des urbanen Zentrums Berlins als diffus verteilte Trümmerschuttablagerungen im anthropogenen Aufschüttungshorizont.
  - b. Als extreme Sonderform des vorgenannten Typs sind die Trümmerschuttberge in der Peripherie anzusehen.
  - c. Die Freisetzung von Sulfat bei der Oxidation sulfidischer, organogener Bodenbestandteile aus ehemaligen Rieselfeldern,
  - d. sowie aus degradierenden Niedermooren.
  - e. Freisetzung von Sulfat durch die Oxidation geogener Sulfide aufgrund von großräumigen GW-Absenkungen im Bereich der Absenktrichter der Wasserwerke.
  - f. Anreicherung von Sulfat im Sickerwasser durch atmosphärische Deposition in Zeiten hoher  $\text{SO}_2$ -Konzentrationen durch Rauchgas.
  - g. Aufstieg von Tiefenwässern die durch Gipslösung zum Beispiel der Zechstein- oder Keuper-Gipse hohe Sulfatkonzentrationen zeigen.

## 2. Zuordnung zu Reaktionstypen:

Anhand des Verhältnisses der stabilen Schwefelisotope  $S^{32}/S^{34}$  im Vergleich zum internationalen Standard [ $\delta S^{34}$  (vs. V-CDT) ‰] können die wichtigsten Reaktionstypen passend zu den oben genannten Quellentypen voneinander unterschieden werden.

- Gipslösung aus Trümmerschutt (Zechsteingipse) (1. & 2.) zeigt eine Signatur von + 7 bis + 12 ‰.
- Lösung oxidiertes Sulfide (Typ 3., 4. & 5.) zeigt eine Signatur von - 10 bis + 5 ‰.
- Atmosphärische Depositionen von  $SO_2$  (Typ 6) zeigen eine Signatur zwischen 0 und + 2 ‰.
- Verhältnisse mit mikrobieller Sulfatreduktion, wie sie in den Tiefenwässern mit gelösten Gipsen auftreten (Typ 7) zeigen Signaturen zwischen + 10 und + 50 ‰.
- Darüber hinaus existieren natürlich alle möglichen Mischsignaturen zwischen circa + 10 bis - 10 ‰.

## 3. Zeitreihenanalyse der identifizierten Hot-Spots.

In Zeitreihenanalysen einer Vielzahl von Grundwassermessstellen im Berliner Stadtgebiet zeigen sich nur sehr geringe Änderungen, so hat sich der Mittelwert in den sechs Jahren von 2002 bis 2008 insgesamt von 204 auf 194 Milligramm pro Liter gesenkt. Die weitere Entwicklung wird auf der Veranstaltung vorgestellt. Dabei zeigte sich, dass in über 70 Prozent der Messstellen die Sulfatkonzentrationen seit 2002 rückläufig oder stagnierend sind (vergleiche Abbildung 2).

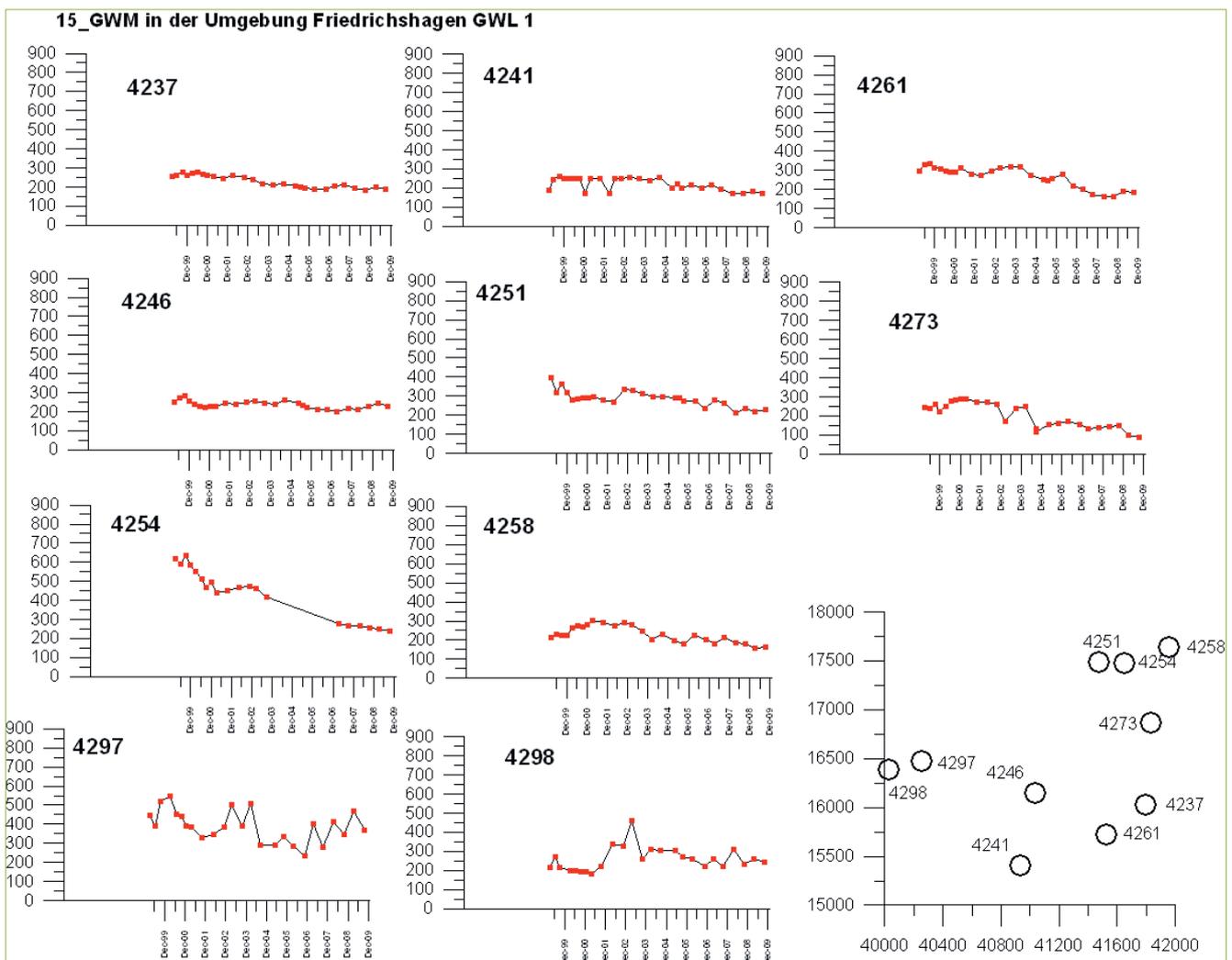


Abbildung 2 Zeitreihenanalysen ausgewählter GWM im 1. GWL Untersuchungsgebietes 15 und Lage der GWM (KNAPPE et al. 2010).

Jedoch zeigen die übrigen 30 Prozent steigende Konzentrationen, darunter viele in Bereichen weit oberhalb des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung (240 Milligramm pro Liter), zum Beispiel im Grunewald im landseitigen Anstrom der Brunnengalerie „Großes Fenster“ mit Konzentrationen um 1.000 Milligramm pro Liter. Auch die als eine der großen Sulfatanomalien anzusehende Fahne der Trümmerschuttdeponie „Teufelsberg“ befindet sich noch zum Großteil auf dem Weg (Sickerwasser) ins Grundwasser. Und die Fahnen spitze hat noch lange nicht die Trinkwasserbrunnen der Galerien des Wasserwerkes Tiefwerder erreicht. Der größte Anteil der Grundwassermessstellen mit rückläufigen Sulfatkonzentrationen sind den urbanen Bereichen mit diffuser Trümmerschuttquellenverteilung zuzuordnen. Da ein Großteil des dort vorhandenen Gipses bereits ins Grundwasser ausgetragen wurde und durch intensive Bauaktivität der betroffene Boden nach und nach entfernt wird, ist hier für die Zukunft auch nicht mehr mit steigenden Konzentrationen zu rechnen. Ähnliches gilt auch für die ehemaligen Rieselfelder am Rande des Stadtgebietes.

Erstaunlicherweise scheinen die Niedermoorgebiete im Grunewald keinen signifikanten Einfluss auf die Sulfatkonzentration des Grundwassers vor Ort zu haben. Vermutlich ist das auch auf deren schlechte hydraulische Anbindung ans Grundwasser zurückzuführen.

Die steigenden Sulfat-Konzentrationen im Grundwasser sind vor allem Bereichen mit Trümmerschuttdeponien mit hohen Flurabständen zuzuordnen. Hier besteht aufgrund der immensen Verzögerung durch lange Verweilzeiten im Sickerwasser auch das höchste Potenzial zu langanhaltenden Zunahmen der Konzentrationen in deren Fahnen. Leider sind diese Fahnen oft nur sehr unzureichend durch die bestehenden Grundwassermessstellen repräsentiert (zum Beispiel im Grunewald).

Auch die Oxidation feinverteilter, geogener Sulfide in der Grundwasser-Oszillationszone der Absenktrichter der Wasserwerke scheint nicht von signifikantem Einfluss, da dieser Prozess mit massiver Versauerung des Grundwassers einhergeht, welche jedoch nicht beobachtet wird.

Letztendlich kann auch ein Anstieg der Sulfatkonzentration durch aufsteigendes Tiefenwasser ausgeschlossen werden, da diese Wässer im Berliner Raum soweit reduziert sind, dass sie nur noch Konzentrationen im Bereich von unter 10 Milligramm pro Liter Sulfat aufweisen.

In allen Berliner Forschungsprojekten zur Uferfiltration zeigte sich, dass auf dem Wege des Oberflächenwassers als Uferfiltrat zum Brunnen keine signifikante Sulfatreduktion stattfindet. Dies bedeutet, dass Sulfatkonzentrationen oberhalb der 240 Milligramm pro Liter-Marke durch landseitiges Grundwasser verdünnt werden müsste. Da jedoch der überwiegende Anteil des Rohwassers aus Uferfiltrat besteht (die Uferfiltratanteile der drei größten Wasserwerke Berlins liegen bei 60 bis 80 Prozent) ist der Verdünnungseffekt durch landseitiges GW limitiert.

Solange das Oberflächenwasser der Spree, welches Berlin erreicht, Konzentrationen unterhalb des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung von 240 Milligramm pro Liter nicht übersteigt, kann eine Gefährdung der Trinkwasserversorgung durch Sulfat ausgeschlossen werden.

### Literatur

KNAPPE, A., TAUTE, T. & A., PEKDEGER (2010): Sulfatkonzentrationen im Berliner Grundwasser-Identifizierung der relevanten Sulfatquellen und Sulfatsenken. 30 S., Forschungsbericht; FU Berlin.



**Helmholtz Zentrum münchen**  
German Research Center for Environmental Health



## **Grundwasser ist Lebensraum – der B-A-E Index als mikrobiologisch-ökologisches Konzept zur Überwachung des Grundwassers**

*Christian Griebler, Universität Wien – Department für Limnologie & Bio-Ozeanographie, Wien, Österreich; christian.griebler@univie.ac.at*

*Helmholtz Zentrum München – Institut für Grundwasserökologie, Neuherberg, Deutschland; griebler@helmholtz-muenchen.de*

### **Zusammenfassung**

Grundwasser zählt zu unseren wichtigsten Gütern. Ungleich den Oberflächengewässern werden Grundwässer bislang nur in Ausnahmefällen unter Berücksichtigung ökologischer Kriterien untersucht, bewertet und überwacht. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektekonsortiums GroundCare wurden verschiedene Werkzeuge für eine ökologische Überwachung und Bewertung von Grundwasserökosystemen entwickelt. Die so entstandene Tool-Box enthält unter anderem ein mikrobiologisches Bewertungskonzept auf Basis einfach zu bestimmender Kenngrößen (Biomasse, Aktivität und Energie). Dieses Werkzeug bildet wesentliche Grundlage eines ökologischen Bewertungssystems für Grundwasserökosysteme, welches in Anlehnung an die ökologische Bewertung von Oberflächengewässern, wie sie in der EU-WRRL verankert ist, entwickelt wurde.

### **Einleitung**

Das Grundwasser versorgt uns täglich mit einer unserer wichtigsten Lebensgrundlagen – dem Trinkwasser. Doch nicht nur für den Menschen, auch für eine Vielzahl einzigartiger Lebewesen, welche in und von ihm leben, ist das Grundwasser von existenzieller Bedeutung. Das Grundwasser zu schützen, muss daher priorisiert und konsequent umgesetzt werden – ähnlich, wie dies seit einigen Jahren bei allen anderen Gewässertypen (Standgewässern, Fließgewässern, und auch Feuchtgebieten) gehandhabt wird.

Seit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL 2000) ist beispielsweise die flächendeckende Überwachung des ökologischen Zustands von Oberflächengewässern in der EU gesetzlich vorgeschrieben. Mehr noch, die Gewässer müssen vor schädlichen Eingriffen und Zustandsverschlechterung bewahrt werden und es wird – bis auf bestimmte Ausnahmen – ein guter ökologischer Zustand angestrebt. Wengleich Oberflächengewässer mit dem Grundwasser in Verbindung stehen und von diesem abhängig sind, und obwohl das Grundwasser von der Grundwasser-Tochtrichtlinie (EG-GWRL 2006) als eigenständiger Lebensraum anerkannt wurde, ist ein vergleichbarer Schutz für Grundwasserökosysteme bislang nicht gewährleistet. Einer der Gründe hierfür lag darin, dass Grundwasserlebensräume und Ihre Organismengemeinschaften lange Zeit für zu wenig erforscht galten und keine geeigneten Bewertungskriterien für deren ökologischen Zustand zur Verfügung standen. Um letzterem zu begegnen, wurde im Jahr 2015 das Verbundprojekt GroundCare ins Leben gerufen. Zentrales Ziel von GroundCare war es, geeignete ökologische Kriterien und Indikatoren zu identifizieren, anhand derer der ökologische Zustand von Grundwasserökosystemen er-

mittelt werden kann. Auf Basis mikrobiologischer, faunistischer und ökotoxikologischer Messgrößen wurde anschließend ein ökologisches Bewertungssystem für Grundwasserökosysteme erarbeitet, welches sich an der Bewertung von Oberflächengewässern, wie sie in der EG-WRRL verankert ist, orientiert. Zur Durchführung und Anwendung dieses Systems wird zurzeit ein Leitfaden erstellt; der aktuelle Stand der Arbeiten wird nachfolgend vorgestellt.

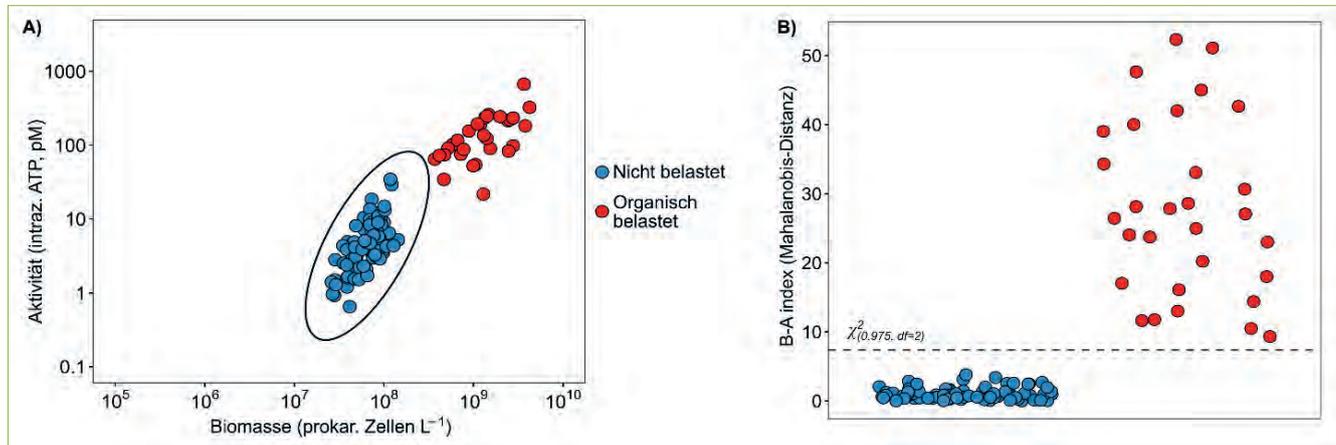
### Das Biomasse-Energie-Aktivität (B-E-A) Konzept

Grundwässer und Aquifere sind immer von Mikroorganismen besiedelt (GRIEBLER & LUEDERS 2009). Diese ubiquitäre Präsenz macht sie zu idealen Kandidaten für eine ökologische Bewertung und zu möglichen Indikatoren für eine langfristige Überwachung. Da es wegen der immensen Diversität in den mikrobiellen Gemeinschaften und der enormen funktionellen Redundanz, trotz moderner molekularer Methoden, schwierig ist, einzelne Mikroorganismen bzw. phylogenetische Gruppen als Indikatoren anzuwenden, schlagen wir vor sich für einen Routineansatz auf integrierende mikrobielle Messgrößen zu konzentrieren. Besonders geeignet hierfür sind die mikrobielle Biomasse, deren Aktivität, und optional die Energie, die dieser Biomasse in Form des assimilierbaren, organischen Kohlenstoffs (AOC) zu Verfügung steht. Mittels einer kombinierten Analyse dieser Messgrößen durch robuste multivariate Schätzverfahren können Grundwasserkörpern regionalspezifische Signaturen zugeordnet werden und Störungen in Form von Abweichungen von dieser regionalspezifischen Signatur (einem Normzustand) aufgespürt werden.

Insgesamt wurden bislang Daten von elf Standorten aus ganz Deutschland (von Mittenwald im Süden bis Ratzeburg im Norden) untersucht. Die mikrobielle Biomasse wurde mittels Durchflusszytometrie ermittelt. Intrazelluläres ATP wurde mittels eines kommerziell verfügbaren Kits (BacTiterGlo Microbial Cell Viability Assay; Promega, Madison, WI, USA) gemessen. AOC-Konzentrationen wurden indirekt über die Zunahme der mikrobiellen Biomasse in einer Grundwasserprobe über einen Inkubationszeitraum von 30 Tagen im Labor unter in situ-nahen Bedingungen ermittelt. Eine detaillierte Beschreibung der Methoden findet sich in GRIEBLER et al. (2018). Die kombinierte, multivariate Analyse dieser Parameter erfolgte über die Berechnung der Mahalanobis Distanz mittels des robusten Schätzverfahrens Fast-MCD (ROUSSEEUW & VAN DRIESSEN 1999). In unseren Analysen wurden drei Beispiele für Störungen von Grundwassersystemen untersucht: organische Belastung mit Kohlenwasserstoffen, Belastungen durch erhöhten Oberflächenwassereintrag ins Grundwasser, und Belastungen als Folge von landwirtschaftlicher Bewirtschaftung. In allen drei Fällen konnten Störungen zuverlässig anhand der kombinierten, multivariaten Analyse aufgespürt werden. Abbildung 1A zeigt exemplarisch anhand eines Beispiels von organisch belastetem Grundwasser aus der Region Düsseldorf, dass die belasteten Proben eindeutig eine erhöhte mikrobielle Biomasse sowie Aktivität aufweisen und sich dadurch deutlich von Proben ohne organische Belastung aus der gleichen Region abheben. Durch das multivariate Analyseverfahren wurde anhand der Verteilung der Proben entlang der beiden dargestellten Parameter ein Indexwert errechnet (Biomasse-Aktivität (kurz B-A)-Index), der einer bestimmten statistischen Verteilung (Chi<sup>2</sup>-Verteilung) folgt, wodurch sich ein statistischer Grenzwert festlegen lässt.

In Abbildung 1B ist deutlich zu sehen, dass alle belasteten Proben diesen Grenzwert deutlich überschreiten, was anzeigt, dass für diese Proben eine signifikante Abweichung von dem für diese Region zu erwartendem Normzustand vorliegt. Ähnliche Ergebnisse ergaben sich auch für die beiden anderen untersuchten Belastungsszenarien und unter zusätzlicher Berücksichtigung des Energieparameters. Zusätzlich konnten wir zeigen, dass die kombinierte multivariate Analyse der Parameter Störungen deutlich sensibler und zuverlässiger anzeigt als univariate Einzelbetrachtungen der Parameter. Des Weiteren ergab die Analyse von naturnahen

Grundwasserkörpern aus unterschiedlichen Region Deutschlands, dass sich die multivariaten B-A-E Signaturen zwischen den Regionen signifikant voneinander unterscheiden können. Demzufolge kann sich der zu erwartende Normzustand von Region zu Region unterscheiden. Für die Praxis bedeutet das, dass die mikrobiologisch-ökologische Bewertung durch das B-A-E Verfahren unter Berücksichtigung der regionalspezifischen Gegebenheiten erfolgen sollte.



**Abbildung 2** A) Verteilung von organisch-belasteten Proben (rot) und Proben ohne organische Belastung (blau) entlang der Parameter Biomasse und Aktivität aus der Region Düsseldorf. B) B-A-Index-Wert aus der kombinierten multivariaten Analyse beider Parameter; die gestrichelte Linie zeigt den statistischen Grenzwert bei einem 97,5 Prozent Konfidenzniveau abgeleitet von einer Chi2-Verteilung mit 2 Freiheitsgraden.

### Schlussfolgerungen

Das hier vorgestellte B-A-E Konzept bietet ein solides und zu gleich einfaches Verfahren für die ökologische Bewertung von Grundwasserökosystemen auf Basis mikrobiologischer Messgrößen und ist universell unter verschiedenen hydrogeologischen Bedingungen anwendbar.

### Danksagung

GroundCare ist Teil der Fördermaßnahme „Regionales Wasser-Ressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland“ (ReWaM) im Förderschwerpunkt „Nachhaltiges Wassermanagement“ (NaWaM) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung.

## Literatur

- (EU-GWRL) Europäische Grundwasserrichtlinie (2006): Richtlinie 2006/118/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, Amtsblatt der Europäischen Union L 372 (19) vom 27. Dezember 2006.
- (EU-WRRL) Europäische Wasserrahmenrichtlinie (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, Amtsblatt der Europäischen Union L327(1) vom 22. Dezember 2000.
- GRIEBLER, C. & LUEDERS, T. (2009): Microbial biodiversity in groundwater ecosystems. *Freshwater Biology* 54, 649-677.
- GRIEBLER, C., HUG, K., FILLINGER, L., MEYER, A., AVRAMOV, M. (2018): Der B-A-E Index – Ein mikrobiologisch-ökologisches Konzept zur Bewertung und Überwachung von Grundwasser. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 62(6), 378-386.
- ROUSSEEUW, P.J. & VAN DRIESSEN, K. (1999): A Fast Algorithm for the Minimum Covariance Determinant Estimator. *Technometrics* 41(3), 212-223.

## Verbreitung der geogenen Grundwasserversalzung in Berlin

*Dr. Jens Bölscher, Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Berlin  
jens.boelscher@senumvk.berlin.de*

### Einleitung

Zur Umsetzung des im Wasserhaushaltsgesetz und im Berliner Wassergesetz verankerten Grundsatzes des vorsorgenden Grundwasserschutzes sowie einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung werden in Berlin Messnetze im Rahmen des informationsorientierten Grundwasser-Monitorings betrieben. Hiermit lassen sich mögliche Beeinträchtigungen frühzeitig erkennen und Maßnahmen im Sinne eines vorsorgenden Grundwasserschutzes treffen. Informationen dieser Messnetze zum Grundwasserstand und zur -beschaffenheit dienen auch dazu, die in Berlin aus dem eigenen Stadtgebiet betriebene und qualitativ hochwertige Wasserversorgung langfristig sicherzustellen.

Der vorbeugende Schutz des Grundwassers hat eine hohe umweltpolitische Priorität. Für einen erfolgreichen Grundwasserschutz sind die systematische und flächenhafte Erfassung sowie die Bewertung der Grundwasserbeschaffenheit unverzichtbar. Ein Grundwasser-Monitoring-System muss Erkenntnisse über die natürliche Beschaffenheit der Grundwasserressource sowie die Möglichkeit einer rechtzeitigen Gefahrenerkennung und -abwehr liefern.

### Überwachung der Grundwassergüte

Auf Basis der rechtlichen Grundlagen wird zur Beurteilung der Grundwasserbeschaffenheit seit mehreren Jahrzehnten ein landesweites Grundwassergütemessnetz durch die Berliner Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz betrieben (Referat II B – Wasserwirtschaft, Wasserrecht und Geologie). Der Aufbau des Messnetzes ist so konzipiert, dass detaillierte Aussagen über die Qualität des Grundwassers in Abhängigkeit von naturräumlichen und zeitlichen Verhältnissen getroffen werden können.

Hydrochemische Analysen auch tiefer liegender Grundwasserleiter wurden zwischen den 1970er- und 1990er-Jahren im Rahmen des Bohrprogramms Nord und Süd in den westlichen Bezirken erhoben. Darüber hinaus wurden in den östlichen Bezirken umfangreiche Erkundungen hinsichtlich der Sicherstellung der Wasserversorgung durchgeführt.

Zur Charakterisierung der geogenen Versalzung liegen flächenhaft Datensätze vor, die neben der chemischen Beschaffenheit auch die spezifische elektrische Leitfähigkeit beinhalten. Hierüber lassen sich in Verbindung mit der NaCl-Konzentration Aussagen zum Mineralisation der Wässer treffen. Seit 2013 erfolgte zudem im Rahmen von Sonderuntersuchungen der Senatsverwaltung die zusätzliche jährliche Untersuchung von mehr als 30 ausgesuchten Messstellen hinsichtlich der geogenen Versalzungsproblematik. In Ergänzung hierzu wurden von SCHRAMM (2018) die im Rahmen der Bohrprogramme Nord und Süd durchgeführten bohrlochphysikalischen Messungen (Ausbaukontrolle) ausgewertet, um eine Karte der geogenen Versalzung im Berliner Untergrund zu erstellen.

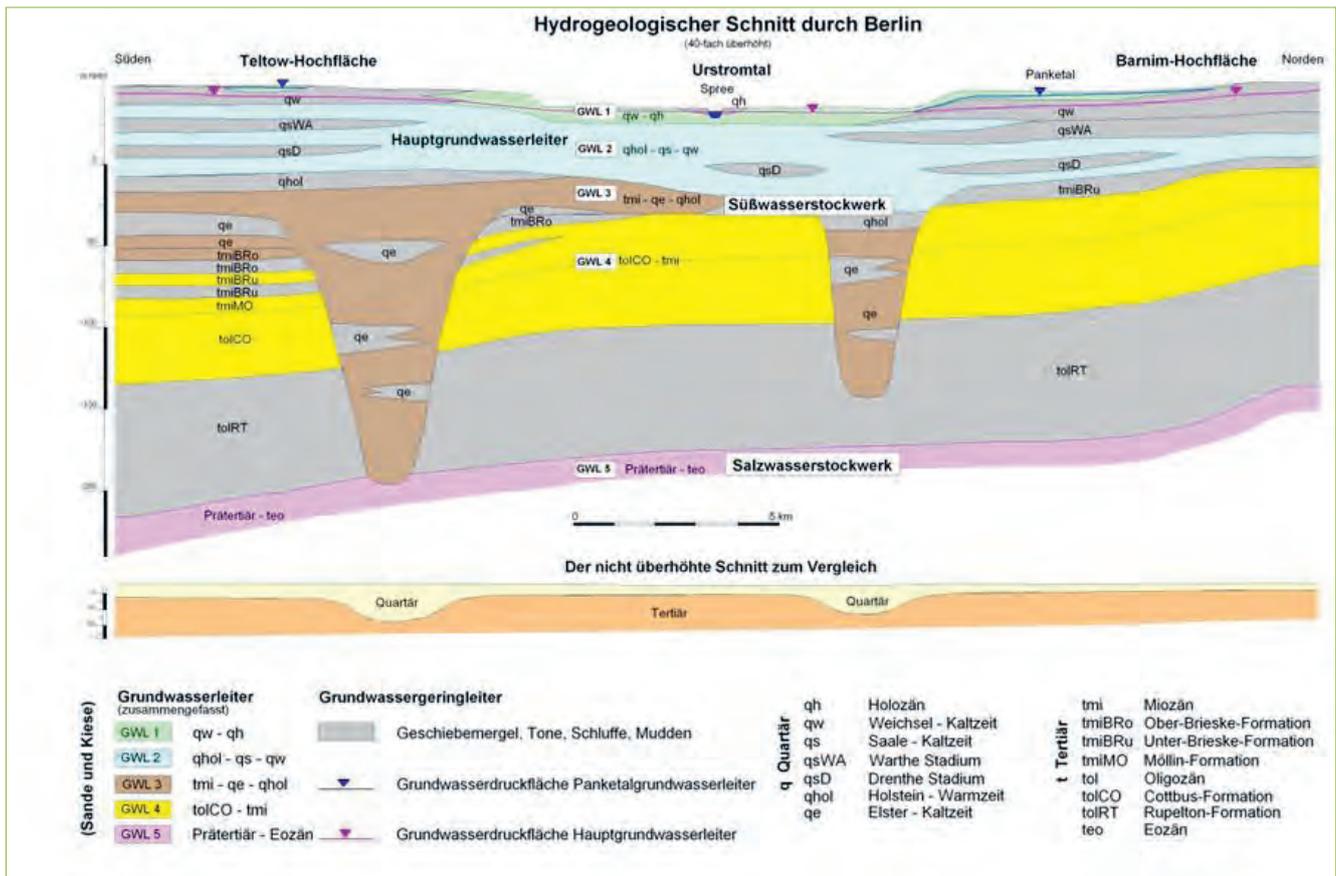
### Geogene Grundwasserversalzung

Die Versalzungsgrenze kann nach GRUBE et al. (2000) mit einer spezifischen elektrischen Leitfähigkeit von  $> 2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$  ( $25^\circ\text{C}$ ) beziehungsweise einem Chloridgehalt von  $> 250 \text{ mg/l}$  und / oder  $240 \text{ mg/l}$  Sulfat und gegebenenfalls einer Gesamtmineralisation von  $> 1.000 \text{ mg TDS/l}$  (TDS = total dissolved solids, Gesamtlösungsinhalt) angegeben werden. Darüber hinaus dürfen nach bestehender Trinkwasserverordnung (TRINKWV 2016) beziehungsweise Grundwasserverordnung (GRWV 2010) die Chlorid- beziehungsweise Sulfatkonzentrationen einen Wert von  $250 \text{ mg/l}$  nicht überschreiten. Die Trinkwasseranalysen der Berliner Wasserbetriebe zeigen im Mittel Konzentrationen deutlich unter  $100 \text{ mg/l}$  Chlorid beziehungsweise unter  $120 \text{ mg/l}$  Sulfat (BWB 2019A).

Die Berliner Wasserbetriebe fördern mehr als  $200 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$  Rohwasser aus neun Wasserwerken (unter anderem Friedrichshagen, Tegel, Beelitzhof), deren Brunnengalerien sich an das zuletzt weichseleiszeitlich geprägte Berlin-Warschauer Urstromtal und die Nordost-Südwest verlaufende Havelseerinne im Südwesten der Stadt anlehnen.  $650$  Brunnen – zwischen  $30$  und  $140$  Meter tief – gewährleisten die Wasserversorgung der Stadt (BWB 2019B). Die Wassergewinnung wird zu mehr als  $50$  Prozent über Uferfiltrat (Müggelsee, Tegeler See, Untere Havelseekette) gesichert.  $30$  Prozent des Trinkwassers werden über Grundwasserneubildung gewonnen. Ein kleiner Teil entstammt der künstlichen Grundwasseranreicherung (BERLINER SENATSVERWALTUNG FÜR GESUNDHEIT, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, BERLINER WASSERBETRIEBE 2008).

Daher bedürfen insbesondere im Berliner Hauptgrundwasserleiter (GWL 2) Veränderungen in der Leitfähigkeit und der Salzkonzentration einer regelmäßigen Überwachung und Kontrolle. Darüber hinaus ist es jedoch wichtig zu verstehen, wie es zu Versalzungen der Grundwasserkörper kommen kann, welche Rolle anthropogene Einflussfaktoren spielen und welcher grundsätzlichen Dynamik die tieferen salzigeren Wässer des fünften GW-Leiters (GWL 5, Salzwasserstockwerk) unterliegen.

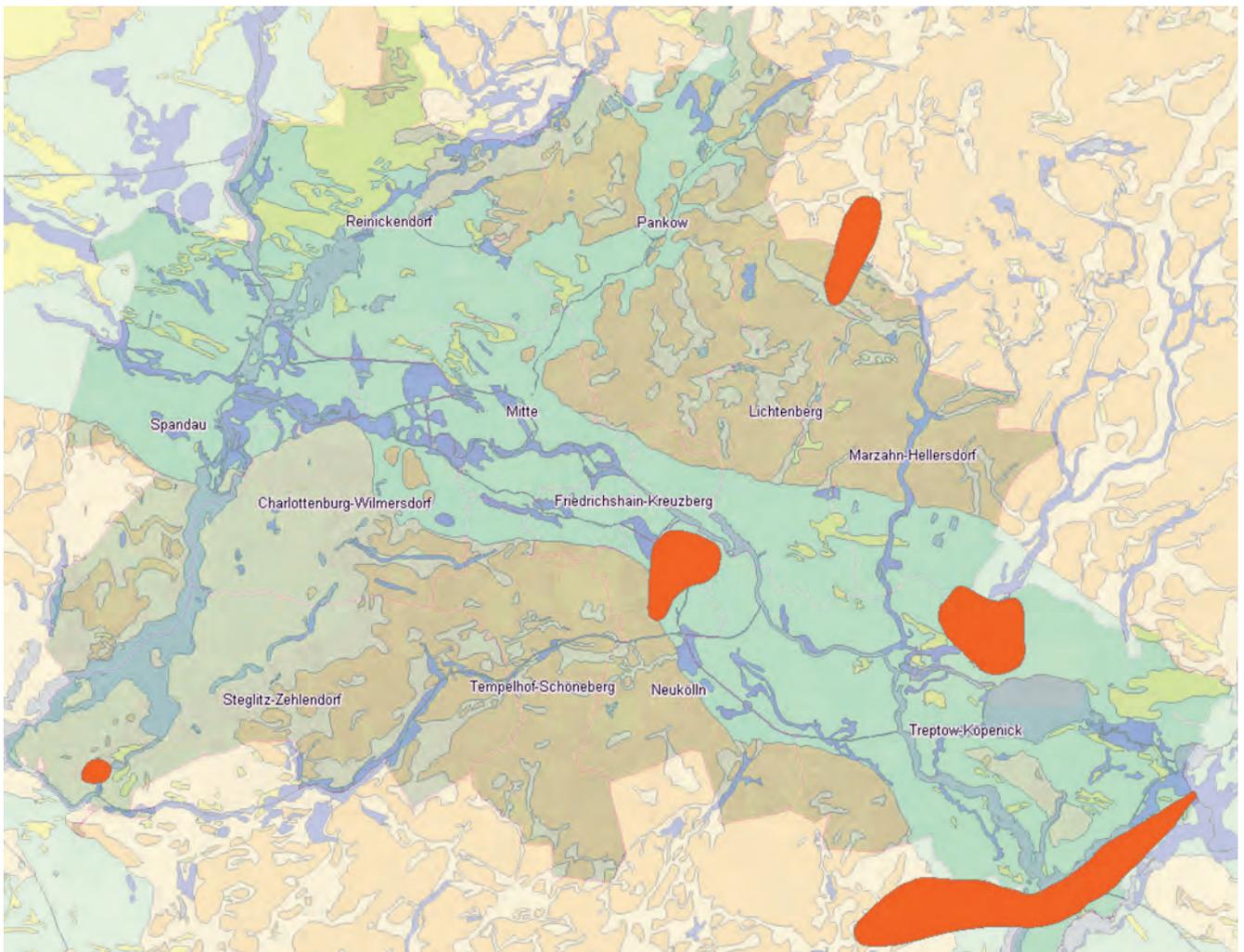
Der geologische Profilschnitt der Abbildung 1 zeigt in diesem Kontext exemplarisch, dass der unteroligozäne Rupelton in Berlin flächendeckend in einer durchschnittlichen Tiefe von etwa  $100$  Meter NHN und mit einer Mächtigkeit von rund  $80$  Metern die Süßwasser führenden känozoischen Sedimente gegen die Salzwasser führenden tieferen Prärupel-Schichten abschirmt. Schmelzwasserrinnen aus dem Elsterglazial haben den Rupelton entweder teilweise oder an einigen Stellen vollständig erodiert. Durch diese Fenster bestehen hydraulische Kurzschlüsse zu den tieferen Schichten (Abbildung 2), die durch saline Tiefenwässer der Zechsteinsalze beeinflusst sind.



**Abbildung 1 Hydrogeologischer Schnitt durch Berlin (LIMBERG & THIERBACH 2002)**

Die Besonderheit dieser Fenster besteht darin, dass geogen bedingte salinare Wässer entlang von Druckgradienten (HOTZAN 2017) in die Süßwasserstockwerke gelangen und dort die Salzkonzentration soweit erhöhen können, dass es für die weitere Nutzung als Trinkwasser unbrauchbar wird. Dies ist insbesondere in Bereichen, bei denen eine Überdeckung durch die bindigen Sedimente des Holstein fehlt, besonders problematisch. Stellen an denen „oberflächennah“ geogene Versalzungserscheinungen nachgewiesen werden konnten, befinden sich insbesondere südlich des Müggelsees. Aber auch in weiten Teilen im Süden Berlins konnten unterhalb der Holstein-Sedimente geogene Versalzungserscheinungen nachgewiesen werden (SCHRAMM 2018).

Neben der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers wird mit Hilfe von geophysikalischen Bohrlochmessungen die spezifische elektrische Leitfähigkeit beschrieben und gibt Hinweis auf die Verbreitung der geogenen Versalzungserscheinungen (SCHRAMM 2018).



**Abbildung 2** Bekannte Rupelton-Fehlstellen mit hydraulischem Kontakt von Süß- und Salzwasserstockwerken in Berlin nach LIMBERG et al. (2016)

In der Vergangenheit konnten an den bekannten Fenstern (Abbildung 2) Anzeichen geogener Grundwasser-  
 versalzung beobachtet werden. Unklar ist jedoch, welche Dynamik aufsteigende Salzwasserströme haben,  
 beispielsweise hinsichtlich des Einflusses von Dichteffekten. Diese Prozesse werden überlagert durch wech-  
 selnde Intensitäten der Rohwasserförderung der Brunnengalerien der Wasserwerke, welche möglicherweise  
 auch Migrationspfade salinärer Wässer aktiviert haben. Vor dem Hintergrund einer Nutzungsintensivierung  
 der Grundwasserressourcen ist es notwendig, die Einflussfaktoren und die Dynamik geogener Grundwasser-  
 versalzungerscheinungen zu analysieren und die Prozesse besser zu verstehen. Dies gilt umso mehr hin-  
 sichtlich des wasserwirtschaftlichen Managements der in Berlin eng verzahnten Systeme Oberflächenwasser,  
 Grundwasser und Abwasser.

## Literatur

- BERLINER SENATSWERWALTUNG FÜR GESUNDHEIT, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, BERLINER WASSERBETRIEBE (2008): Wasserversorgungskonzept Berlin 2040. Pressekonferenz am 15. Mai 2008; [http://www.bwb.de/de/assets/downloads/wvk2040\\_pk.pdf](http://www.bwb.de/de/assets/downloads/wvk2040_pk.pdf). Abruf 29. April 2019.
- BERLINER WASSERBETRIEBE (2019a): <http://www.bwb.de/de/1133.php>. Abruf 29. April 2019.
- BERLINER WASSERBETRIEBE (2019b): <http://www.bwb.de/de/961.php>. Abruf 29. April 2019.
- GRUBE, A.; WICHMANN, K., HAHN, J., NACHTIGALL, K. H. (2000): Geogene Grundwasserversalzung in den Porren-Grundwasserleitern Norddeutschlands und ihre Bedeutung für die Wasserwirtschaft. Veröffentlichungen TZW Karlsruhe Band 9; Karlsruhe.
- GRWV (2010): „Grundwasserverordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1513), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 4. Mai 2017 (BGBl. I S. 1044) geändert worden ist“.
- HOTZAN, G. (2017): Ergebnisse von Untersuchungen zur Identifikation und Verbreitung salinärer Wässer im Raum Müllrose. – Brandenburgische Geowiss. Beitr., 24, 1/2, S. 103 – 109; Cottbus.
- LIMBERG, A. & THIERBACH, J. (2002): Hydrostratigrafie von Berlin – Korrelation mit dem Norddeutschen Gliederungsschema. – Brandenburgische Geowiss. Beitr., 9, 1/2, S. 65 – 68; Kleinmachnow.
- LIMBERG, A., JONAS, O & KOLBERG, A. (2016): Detektion möglicher Fehlstellen im Rupelton durch Messung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit in tiefen Grundwassermessstellen im Land Berlin. – Brandenburgische Geowiss. Beitr., 23, 1/2, S. 11-15. Cottbus.
- SCHRAMM, T. (2018): Grundwasserversalzung im Raum Berlin – Eine Gefährdung für die Trinkwasserversorgung? 106 S., Masterarbeit; BTU Cottbus (unveröffentlicht).
- TRINKWV (2016): „Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 3. Januar 2018 (BGBl. I S. 99) geändert worden ist“.

## Geophysikalische Methoden zur Überwachung der Süß-/Salzwassergrenze im Grundwasser

*Dipl.-Geologe Karsten Baumann, Bohrlochmessung – Storkow GmbH  
baumann@blm-storkow.de*

### Einführung

Monitoringmethoden zur Grundwasserversalzung in Grundwassermessstellen und Brunnen schaffen eine Datengrundlage sowohl für eine wirtschaftlich optimale Fahrweise einer potenziell gefährdeten Brunnengalerie als auch für die Planung neuer Brunnenstandorte. Für den Wasserwerker ist deshalb die Beobachtung der Veränderungen der Süß-/Salzwassergrenze an seinem Standort über die Zeit ein sehr wichtiges Steuerungselement. Auch im Zusammenhang mit der weiter zunehmenden Erderwärmung und dem Ausbleiben von Niederschlägen durch den Klimawandel sowie der damit verbundenen geringeren Grundwasserneubildung, ist es von großer Bedeutung, flächenhaft die Verbreitung von Salzwasser im Untergrund zu beobachten.

Die verbreitetste Monitoringmethode beruht darauf, dass die elektrische Leitfähigkeit der Porenflüssigkeit mit wachsender Menge von darin gelösten Mineralen gesetzmäßig, also berechenbar, zunimmt (destilliertes Wasser zum Beispiel hat eine elektrische Leitfähigkeit von Null). Wenn man zugleich vereinfachend annimmt, dass das untersuchte Gestein nur aus zwei Komponenten, den praktisch nicht leitfähigen Gesteinskörper und den wassergefüllten Gesteinsporen mit je nach Salinität des Porenwassers variierender Leitfähigkeit besteht, kann man letztlich die Mineralisation des Porenwassers aus den elektrischen Widerstandsmessungen errechnen, vorausgesetzt man kennt die Porosität des Gesteins, die ebenfalls eine Variable ist. Die Porosität kann mittels der geophysikalischen Messprogramme für Locker- beziehungsweise Festgestein (siehe weiter unten) sehr genau berechnet werden.

Es wird zahlenmäßig ein Wert bestimmt, der der Summe aller im Porenwasser gelösten Kationen und Anionen entspricht, umgerechnet auf die zugehörige Leitfähigkeit eines nur aus NaCl bestehenden Elektrolyten = NaCl-Äquivalentgehalt (mg/kg). Der ermittelte Zahlenwert liegt meist zwischen Abdampfrückstand und Glührückstand. Eine charakteristische Änderung des elektrischen Widerstandes des Porenwassers ergibt sich dabei nicht nur bei geogenen Einflüssen, sondern auch bei anthropogenen Wasserverunreinigungen.

### Salinitätsberechnung des Grundwassers in Aufschlussbohrungen

Es sei hier ausdrücklich darauf hingewiesen, dass aus der Messung von elektrischer Leitfähigkeit und Temperatur (SAL/TEMP) in der offenen Bohrung nicht auf eine mögliche Versalzung des Grundwassers geschlossen werden kann. Hier werden ausschließlich die Parameter der Bohrspülung erfasst, die mit der Mineralisation der Grundwässer nicht korrespondieren. Als Korrekturgröße für die weiteren Berechnungen sind diese Parameter jedoch unerlässlich. Prinzipiell ist die Berechnung der Grundwassermineralisation nur in weitestgehend schluff- und tonfreien Schichten möglich. Um die Versalzung des Grundwassers aus den Messungen berechnen zu können, braucht man ein Messprogramm, das folgende Verfahren enthält:

Lockergestein:

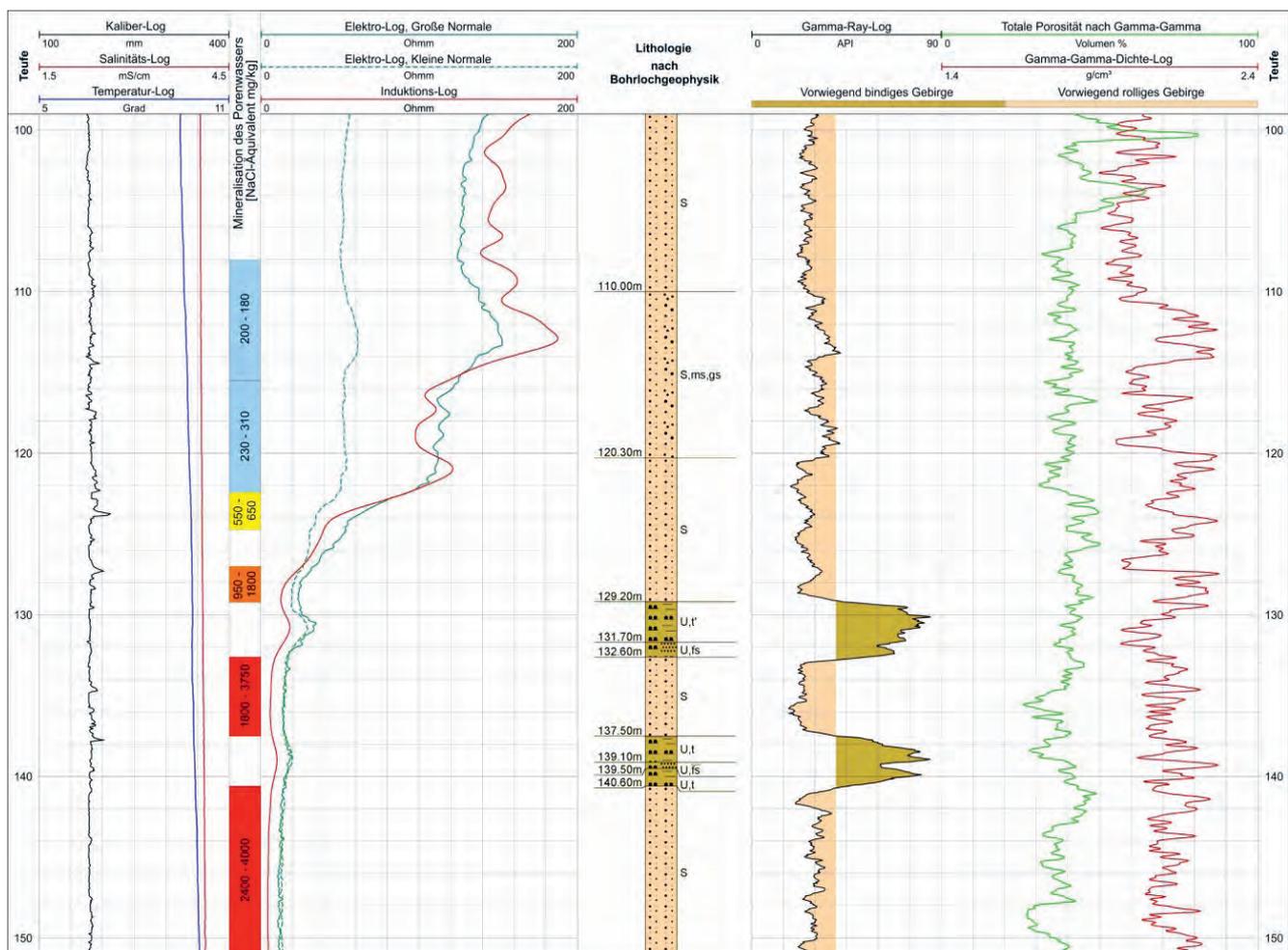
**Tabelle 1** Auszug aus /2/, Tabelle A.1 – Empfohlene Messprogramme für offene, temporär verrohrte/teilverrohrte Bohrungen im Lockergestein

Aufgabenstellung	Messverfahren
Lithologie/Stratigrafie (einschließlich Bestimmung der Anteile von rolligen, bindigen und organischen Bestandteilen), Porosität und Schichtwassermineralisation	CAL, GR, FEL, EL oder IL, SAL/TEMP, GG.D, NN

Festgestein:

**Tabelle 2** Auszug aus /2/, Tabelle B.1 – Empfohlene Messprogramme für offene, temporär verrohrte/teilverrohrte Bohrungen im Festgestein

Aufgabenstellung	Messverfahren
Porengrundwasserleiter (Sedimentite): Bohrlochgeometrie, Lithologie/Stratigrafie, Porosität/Tongehalt/ Schichtwassermineralisation	CAL, GR, FEL, EL oder IL, SAL/TEMP GG.D, NN, FWS



**Abbildung 1** Berechnung der Versalzung in einer Aufschlussbohrung (Quelle: Blm-Storkow GmbH)

In den in Abbildung 1 dargestellten Messungen einer Aufschlussbohrung ergab die Berechnungen der Porenwassermineralisationen von Geländeoberkante (GOK) bis circa 122 Meter nutzbares Süßwasser, darunter eine nur bis 132 Meter reichende Übergangszone und unterhalb dieser Teufe nur noch Salzwasserführung, bei der bis zur Teufe von 150 Meter bereits circa 4.000 mg/kg NaCl-Äquivalentgehalt erreicht wurden.

### Monitoring der Süß-/Salzwassergrenze in Grundwassermessstellen und Brunnen

An zahlreichen Wasserwerksstandorten aber auch in Landesmessnetzen erfolgt die raumzeitliche Überprüfung der Süß-/Salzwassergrenze auf der Grundlage induktiver Messungen des elektrischen Widerstands des Gebirges. Vor dem Messstellenausbau sollte für die Kalibrierung der nachfolgenden Monitoringmessungen immer eine Vermessung der Aufschlussbohrung, entsprechend der in den Tabellen 1 oder 2 für „Lockergestein“ oder „Festgestein“ aufgeführten Messprogramme erfolgen. Weiterhin ist eine geophysikalische Untersuchung der ausgebauten Grundwassermessstelle zur genauen Kalibrierung des Einflusses des Ringraums auf die Induktionslog Messung sinnvoll. Hierfür sollte folgendes Messprogramm durchgeführt werden.

**Tabelle 3** Messprogramm zur Überprüfung von neu errichteten Grundwassermessstellen

Aufgabenstellung	Messverfahren
Befahrbarkeit mit Messsonden, Dichtheit der Rohrverbindungen, Nachweis der Lage von Ringraumabdichtungen, Abgleich der Nullmessung für Salinitätsbestimmung mit der Messung in der Aufschlussbohrung	CAL, SGL, FEL, IL, SAL/TEMP GG.D oder RGG.D, NN

Die Besonderheit der induktiven elektrischen Widerstandsmessung beruht darauf, dass diese Messanordnung auf elektromagnetischer Basis funktioniert, es sich also letztlich um das aus der Hochfrequenztechnik vertraute Sender-/Empfänger-Prinzip handelt. Da im Gegensatz zu den üblichen Widerstandsmessungen das Messsignal hauptsächlich aus einem Bereich deutlich außerhalb des ausgebauten Ringraumes und der durch die Bohrspülung infiltrierte Zone stammt (je nach Spacing der Sonde etwa 0,3 bis 1,5 Meter von der Bohrlochachse entfernt), sind die erhaltenen Messwerte für das unverfälschte Porenwasserprofil charakteristisch. Selbst in Bereichen oberhalb des Wasserspiegels sind mit dieser Technik hochgenaue Widerstandsbestimmungen problemlos möglich. Voraussetzung hierzu sind allerdings Messstellen mit elektrisch nicht leitendem Ausbau (PVC, HDPE, Obo etc.). Es sollte auch auf die Verwendung von metallischen Zentralisatoren und auf Wickeldrahtfilter verzichtet werden. Nicht von Bedeutung bei diesen Messungen ist die Lage der Filterstrecke, da die Messung induktiv durch die Rohre, das heißt auch durch die Vollrohre hindurch, erfolgt. Es kann, wie vielfach praktiziert, auch vollständig auf einen Filter verzichtet werden.

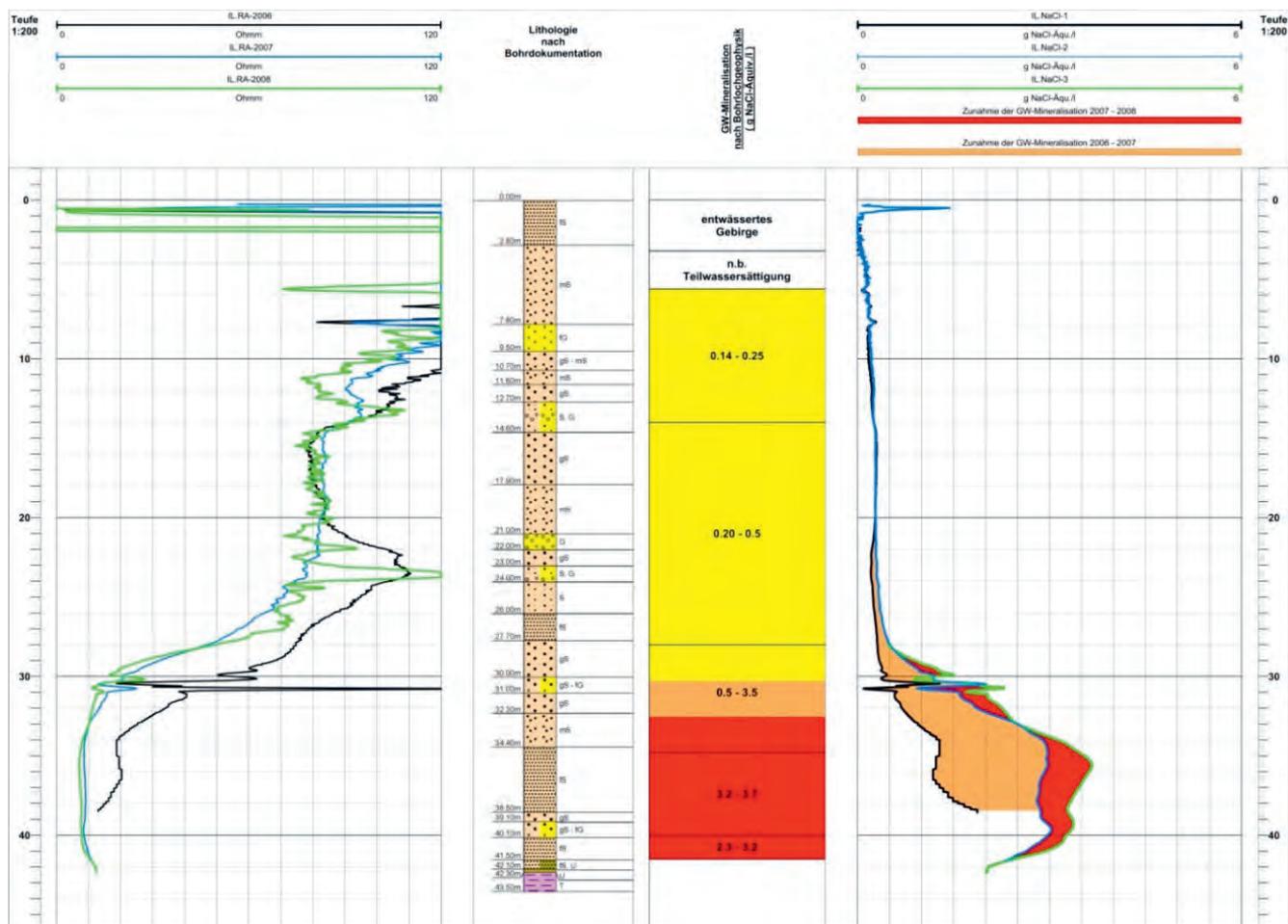
Mittels der Induktionslogmethode ist es möglich, die Salinität des Porenwassers in sämtlichen aufgeschlossenen Grundwasserleitern eines Standortes gleichzeitig über ihre jeweilige komplette Mächtigkeit, trotzdem aber auch teufenselektiv, mit einem Auflösungsvermögen von deutlich unter einem Meter, kostengünstig zu überwachen. Analog wie bei der Aufschlussmessung sind die Messungen der Temperatur und der elektrischen Leitfähigkeit (SAL/TEMP) des in der Grundwassermessstelle befindlichen Wassers zur Korrektur notwendig. Weil die Salzwasserfronten sich in der Praxis nicht nur vertikal von unten nach oben bewegen, sondern innerhalb der Grundwasserleiter mit dem hydraulischen und dem gravitativen Gradienten entsprechend der angebotenen Durchlässigkeiten auch horizontal zu den Brunnen verlagern, sind die mit der hier beschriebenen Methodik gewonnenen Datenreihen auch für mathematische Modellierungen der zeitlichen Entwicklung eines Standortes wichtig. Durch zeitlich gestaffelte Wiederholungsmessungen in ausgebauten Bohrungen oder speziellen Beobachtungsrohren können Monitoringmessungen zur zeitlichen Veränderlichkeit der Salinität des Grundwassers ausgeführt werden.

Der auch heute noch anzutreffenden Meinung, dass mit der Messung von Leitfähigkeit und Temperatur (SAL/TEMP) in einer Grundwassermessstelle die Lage der Süß-/Salzwassergrenze bestimmt werden kann, muss ausdrücklich widersprochen werden. Die Schichtung des Wassers in einer Grundwassermessstelle korrespondiert in den seltensten Fällen mit der Schichtung im Gebirge. Dies erklärt sich schon daraus, dass mit dem Anpumpen der Messstelle (zum Beispiel Klarpumpen nach der Fertigstellung) nur noch Wasser aus dem Filterbereich im Rohr zu finden ist, ein Angleich mit den tatsächlichen Gebirgsverhältnissen jedoch nicht mehr erfolgt.

Um die Versalzung des Grundwassers in seiner Dynamik verfolgen zu können, braucht man ein Messprogramm, das folgende Verfahren enthält:

**Tabelle 4** Auszug aus /2/, Tabelle C.1 – Empfohlene Messprogramme für Brunnen und Grundwassermessstellen

Aufgabenstellung	Messverfahren
Bestimmung der Süß-/Salzwassergrenze im Gebirge	IL, SAL/TEMP



**Abbildung 2** Salzwassermonitoring durch induktive Messungen in einer Grundwassermessstelle (Quelle: BIm-Storkow GmbH)

In der Abbildung 2 sind Induktions-Log Messungen (IL) einer Grundwassermessstelle nahe eines Wasserwerksstandorts dargestellt. Auf der rechten Seite erfolgte die Umrechnung der Messungen in NaCl-Äquivalentgehalte. Die Messungen wurden in den Jahren 2006, 2007 und 2008 ausgeführt. Es zeigt sich über die 3 Jahre ein Anstieg der Salzwasserfront um etwa 8 Meter. Der Ausschlag bei etwa 30,5 Meter ist auf einen metallischen „Störkörper zurück zu führen. Es handelt sich wahrscheinlich um einen Zentralisator, der mit einer Madenschraube oder metallischem Spannband befestigt wurde.

### Literatur

- /1/ Baumann, K., Burde, B., Liebau, Ch. (2004): Monitoringmethoden für Wasserwerksstandorte mit Salzwassergefährdung; bbr Wasser, Kanal- & Rohrleitungsbau, Nr. 11 und 12/2004, wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn
  
- /2/ DVGW-Arbeitsblatt W 110 (Neufassung, Veröffentlichung voraussichtlich in 2019): Bohrlochgeophysik in Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen; wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn

## Der tiefe Untergrund – das 3D Modell von Brandenburg und Berlin

*Christoph Jahnke, Maik Schilling, Andreas Simon, Thomas Höding, Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR)*  
*christoph.jahnke@lbgr.brandenburg.de*

Der 2010 beschlossene Umbau der Energieversorgung in Deutschland, die „Energiewende“ stellt in Verbindung mit den Klimaschutzzielen nicht nur große Herausforderungen an CO<sub>2</sub>-intensive Industrien und den Ausbau der erneuerbaren Energien, sondern erfordert auch eine Analyse und Erschließung der Nutzungsmöglichkeiten des unterirdischen Raumes (Energiespeicher, Geothermie, Lagerung von Abfällen) einschließlich Aussagen zur Nutzungssicherheit und Nutzungskonkurrenz. Umfangreiche, belastbare und detaillierte Informationen zum tieferen Untergrund sind dabei unabdingbar.

Im Rahmen des EFRE – geförderten Projekts „Brandenburg 3D (B3D)“ wurde im Jahr 2013 beim Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) ein flächendeckendes geologisches 3D-Modell für Brandenburg und Berlin erstellt. Das in Form von Bohrungen, seismischen Profilen und geologischen/geophysikalischen Karten vorliegende Wissen über den tieferen Untergrund wurde nach einheitlichen Kriterien und Formaten zusammengefasst und dokumentiert. Im Zuge der Arbeiten wurde eine Vielzahl von bis dahin nur analog vorliegenden Daten in ein digitales Format überführt. Aufgrund des begrenzten Zeitumfanges des Projektes und des damaligen Standes der archivarischen Aufarbeitung konnte 2013 jedoch nur ein Teil des vorliegenden Datenbestandes aufbereitet und berücksichtigt werden. Basierend auf diesen Ausgangsdaten wurde ein erstes, an seismischen Reflexionshorizonten orientiertes 3D-Modell des tiefen Untergrundes von Brandenburg und Berlin aufgebaut, das die geologischen Verhältnisse von der Basis der Lockergesteine des Känozoikums bis zum sedimentären Rotliegenden in Tiefen von etwa 200 bis > 5.000 Meter unter der Geländeoberfläche darstellt. Das Modell basiert ganz wesentlich auf dem „Regionalen Geophysikalischen Kartenwerk der DDR, Tiefenlinienkarten seismischer Reflektoren“ (Reinhardt et al. 1970-1990, Reinhardt 1993) und wurde durch Daten von etwa 600 digital erfassten Tiefbohrungen präzisiert (i.w. Bohrungen der KW-Erkundung in Brandenburg der 1950er- bis 1980er-Jahre). Das Modell beinhaltet die Tiefenlagen von 12 markanten seismischen Reflexionshorizonten und das regionale Störungsinventar im Prä- und Postsalinär.

Für Berlin konnten im Projekt „Brandenburg 3D“ nur wenige Daten genutzt werden, sodass dieses Modell nur eine erste Überblicksdarstellung der Verhältnisse des tieferen Untergrundes im Raum Berlin gibt.

Zusätzlich wurde eine Dateninfrastruktur aufgebaut, welche eine interne Arbeitsplattform, einen Infrastruktorknoten für Zugriffe und eine Internetanwendung für die Präsentation des Modells mittels OGC-konformer Webservices über ein Online-Portal im Internet beinhaltet („Brandenburg 3D“, [http://www.geo.brandenburg.de/Brandenburg\\_3D/client/portal/index.html](http://www.geo.brandenburg.de/Brandenburg_3D/client/portal/index.html), Abbildung 1). Für die Internet-Darstellung wird dabei derselbe Viewer genutzt wie für das Geologische Landesmodell von Berlin, das die känozoischen Schichtenfolgen darstellt (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, <http://berlin.geo-3d.de/berlin3d/portal/>). Beide Modelle ergänzen sich so inhaltlich wie technisch.

Eine zusammenfassende Darstellung des Projektes „B3D“ und seiner Ergebnisse geben Schilling et al. (2018).

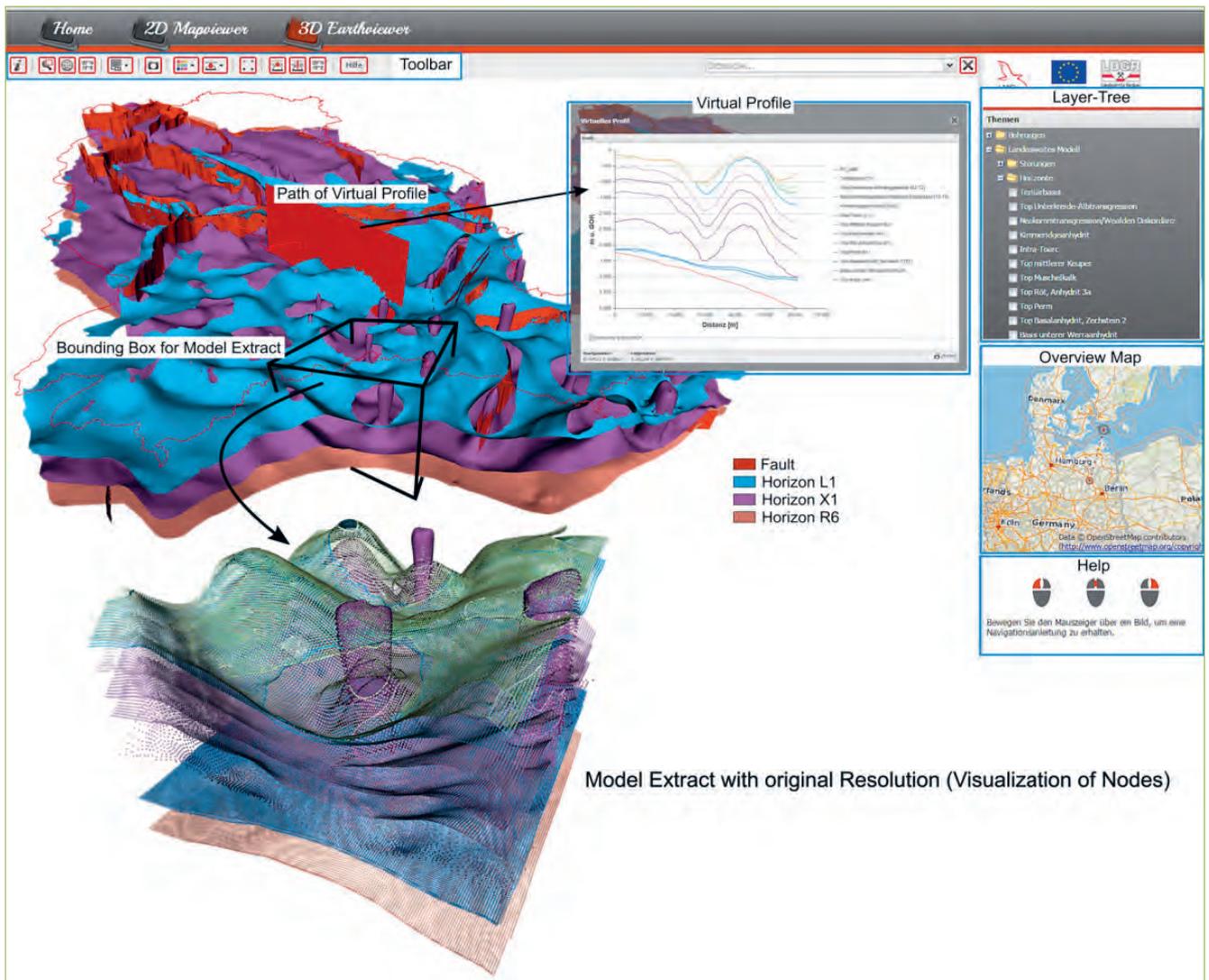


Abbildung 1 3D-Viewer des web-portals Brandenburg 3D mit Menü-Führung, Visualisierungsmöglichkeiten und Erstellung virtueller geologischer Profilschnitte

Seit 2014 erfolgt eine Neu- und Weiterbearbeitung des Modells „B3D“ im Rahmen des Projektes „Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraumes Untergrund des Norddeutschen Beckens (TUNB)“, eine Kooperation der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und der geologischen Dienste der Bundesländer Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Berlin, Hamburg, Bremen (gefördert durch die BGR, [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung\\_tieferer\\_Untergrund\\_CO2Speicherung/Projekte/Nutzungspotenziale/Laufend/TUNB.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Projekte/Nutzungspotenziale/Laufend/TUNB.html)). Ziel ist die bundesländerübergreifende Bereitstellung und Harmonisierung des Wissens über den tiefen geologischen Untergrund in einem digitalen, grenzüberschreitend abgestimmtem, strukturgeologischen 3D-Modell des Norddeutschen Beckens. Auch ein Anschluss an existierende bzw. derzeit entwickelte Modelle in benachbarten EU-Staaten (Dänemark, Niederlanden und Polen) und der deutschen Nordsee ist in Bearbeitung.

Das an seismischen Reflektoren orientierte Modell B3D wird um eine Reihe von stratigraphischen Horizonten erweitert und in Brandenburg/Berlin je nach regionaler Situation bis zu 23 Horizonte (Tabelle 1) sowie das regionale Störungsinventar umfassen. Die Datenbasis wird vervollständigt und wird die verfügbaren Bohrungen, die das Präkänozoikum erreichen, enthalten (circa 1.500; Kartierungsbohrungen, Bohrungen der verschiedenen Rohstofferkundungen, Bohrungen der Untergrundspeicherung, Geothermie-Bohrungen), sowie Informationen von circa 2.200 seismischen Profilen und Auswertungen von diversen Rohstofferkundungsberichten berücksichtigen.

Für das Land Berlin steht ebenfalls eine erweiterte Datenbasis an Bohrungen als auch Seismik zur Verfügung, die den Aufbau eines detaillierteren Modells gestattet.

Die Arbeiten dauern noch an und werden Mitte 2019 abgeschlossen. Der Vortrag präsentiert den aktuellen Stand des Modells im Raum Berlin.

**Tabelle 1**      **Horizonte des erweiterten Brandenburger 3D-Modells (*fett-kursiv* bisher im Model „B3D“ modellierte Horizonte).  
Bezeichnung der seismischen Reflektoren nach Reinhardt et al. (1970 bis 1990)**

System	Serie	Stratigraphischer Horizont	Seismischer Reflektor
Paläogen	Oligozän	Basis Rupelton	A1
	Quartär-Paläozän	<b>Basis Känozoikum</b>	<b>T1</b>
Kreide	Oberkreide	<b>Basis Oberkreide</b>	<b>B2/T2</b>
	Unterkreide	<b>Basis Unterkreide</b>	<b>T3/T4</b>
Jura	Malm	<b>im Kimmeridge/Oxford</b>	<b>E1/E2</b>
		Basis Malm	
	Dogger	Basis Dogger	DB
Lias		<b>Intra-Toarc</b>	<b>L1</b>
		Basis Lias	L4
Trias	Keuper	Basis Rhätkeuper	K1
		<b>Top Oberer Gipskeuper</b>	<b>K2</b>
		Basis Keuper	
	Muschelkalk	Top Hauptmuschelkalk	M1
		im Mittleren Muschelkalk	M2/M2'
		Basis Muschelkalk	M3
Buntsandstein		<b>Top Salinarröt</b>	<b>S1</b>
		Basis Oberer Buntsandstein (Basis Salinarröt)	S2
		Basis Mittlerer Buntsandstein	
Perm	Zechstein	<b>Top Zechsteinsalinar</b>	<b>X1</b>
		<b>Top Basalanhydrit, Staßfurt-Formation</b>	<b>Z1</b>
		<b>Basis Werraanhydrit</b>	<b>Z3</b>
		Basis Zechsteinsalinar	
Rotliegend		<b>Basis sedimentäres Rotliegendes</b>	<b>H6/R6</b>

## Literatur

- Reinhardt, H.-G. & Gruppe Regionales Kartenwerk (etwa 1970 bis 1989): Regionales geophysikalisches Kartenwerk der DDR. Tiefenlinienkarten der Rx-Horizonte. VEB Geophysik Leipzig; Leipzig (unveröffentlicht).
- Reinhardt, H.-G. (1993): Structure of Northeast Germany: Regional Depth and Thickness Maps of Permian to Tertiary Intervals Compiled from Seismic Reflection data. – In: Spencer, A. M. (ed.): Generation, Accumulation and Production of Europe's Hydrocarbons III, Special Publication of the European Association of Petroleum Geoscientists, No. 3: 155-165; Berlin-Heidelberg (Springer-Verlag).
- Schilling, M., Simon, A., Jahnke, C. & Höding, T. (2018): Brandenburg 3D – Das geologische 3D Modell Brandenburgs im Internet veröffentlicht. Brandenburg. Geowiss. Beitr. 25 (2018), 1/2; Cottbus.

## Landesgeologie goes digital – von der Papierkarte zur Webanwendung

*Matthias Schroeder, Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz  
matthias.schroeder@senumvk.berlin.de*

### Aus dem analogen Zeitalter

Die Geologie ist zu allererst eine beobachtende und explorierende Wissenschaft des physischen Erdkörpers. Geologinnen und Geologen bearbeiten den Erdkörper überaus handfest mit Geologenhammer, mit Meißeln und Bohrern, um dem Gestein seine Geschichte (Information) zu entlocken. Durch anschließende Analysen und Interpretationen werden Erkenntnisse gewonnen und vor allem in geologischen Karten festgehalten. Eine erste geologische Karte von Berlin und Umgebung wurde Mitte des 19. Jahrhunderts im kleineren Maßstab von Rudolph von Bennigsen-Förder erstellt. Die erste detaillierte geologische Karte vom gesamten Berliner Stadtgebiet entstand 1879 im Maßstab 1:10.000 (LOSSEN 1879). Die Herstellung des amtlichen geologischen Landeskartenwerkes in Berlin erfolgte somit seit der Einrichtung der Preußischen Geologischen Landesanstalt ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhundert, und entsprach mit den dafür verwendeten Werkzeugen immer auch der jeweiligen technischen Entwicklung. Erschienen zunächst einfarbige und später handkolorierte Kartenblätter auf Papier und Karton, die später durch erste Drucke von Farblithographien ersetzt wurden, begann man schnell mit der systematischen geologischen Landesaufnahme im einheitlichen Maßstab von 1:25.000. Über ein Jahrhundert lang war die kartographische Verarbeitung der geologischen Landesaufnahme geprägt durch Tuschezeichnungen mit Ziehfeder und Gravur-Techniken und deren photographische Reproduktion. Erst mit der Einführung der ersten PCs an den Arbeitsplätzen in den 1980er-Jahren, verschob sich ganz allmählich diese rein analoge Methodik hin zu einer digitalen Arbeitsweise. Ein bedeutender Meilenstein für die Berliner Landesgeologie ist in diesem Zusammenhang die Einführung einer geologischen Datenbank durch die GeODin Software Anfang der 1990er-Jahre. In über 20 Jahren wurde der komplette Datenbestand computerlesbar digitalisiert. Damit war es der Landesgeologie erstmals möglich, Bohrungsdaten, Messstelleninformationen, Profilschnitte etc. systematisch digital zu bearbeiten und zu verwalten. Über die Verwendung eines geologischen Datenmodells konnten die Daten untereinander verknüpft und so semantisch in Beziehung gesetzt werden. Die Einführung von Geoinformationssystemen (GIS) beziehungsweise die Nutzung von GIS-Software war ein weiterer Schritt in der Digitalisierung der analogen Arbeitsprozesse.

### Die Digitalisierung

Seit vielen Jahren werden bereits das Geoportal Berlin und der Umweltatlas für die Veröffentlichungen von digitalen geologischen Informationen und Daten genutzt. Über standardisierte Webdienste wird die Geologie Berlins durch Kartendarstellungen angeboten und bei Bedarf erneuert. Beispielsweise können die Geologische Karte, die Geologische Skizze und die Geologischen Schnitte abgerufen werden. Das Geothermische Potenzial für verschiedene Tiefen ist ebenso verfügbar wie auch über 160.000 Bohrungen mit den entsprechenden Zusatzinformationen.

Spätestens mit der Verabschiedung der Berliner Open Data-Strategie (BARNICKEL et al. 2012) und der Einführung des Berliner E-Government-Gesetzes im Jahre 2016 (EGOVG BLN 2016) haben die Senatsverwaltungen Berlins die Digitalisierung im Fokus. Neben der Einführung der elektronischen Aktenführung als ein Kernanliegen des E-Government-Gesetzes, sollen ebenso benutzerfreundliche und erweiterte Datenveröffentlichungen die Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechniken (IKT) fördern. Dafür entwickelte die Landesgeologie über die letzten Jahre zunehmend auch eigene Anwendungen, die zusätzlich zu den Angeboten im Geoportal oder im Umweltatlas veröffentlicht werden können.

### Das Grundwassermonitoring

Die Arbeitsgruppe der Landesgeologie ist auch für das Grundwassermanagement zuständig. Dazu werden laufend diverse Daten aus Grundwassermessstellen erhoben, analysiert, verwaltet und zu verschiedenen Fachauskünften weiterverarbeitet und veröffentlicht. Das sind vor allem digitale Kartendarstellungen, die ebenfalls über das Geoportal Berlin und den Umweltatlas als standardkonforme Webdienste bereitgestellt werden. Verschiedene Parameter des Grundwassermonitorings können mittels der Webdienste abgefragt werden wie zum Beispiel die Grundwassergleichenkarte für das jeweilige Bezugsjahr, die Grundwassertemperaturen für verschiedene Tiefen oder der zu erwartende höchste Grundwasserstand (zeHGW). Der tagesaktuelle Grundwasserstand (TAGESAKTUELLER GRUNDWASSERSTAND 2019) inklusive der Ganglinie wird für 38 ausgewählte Messstellen veröffentlicht (Abbildung 1).

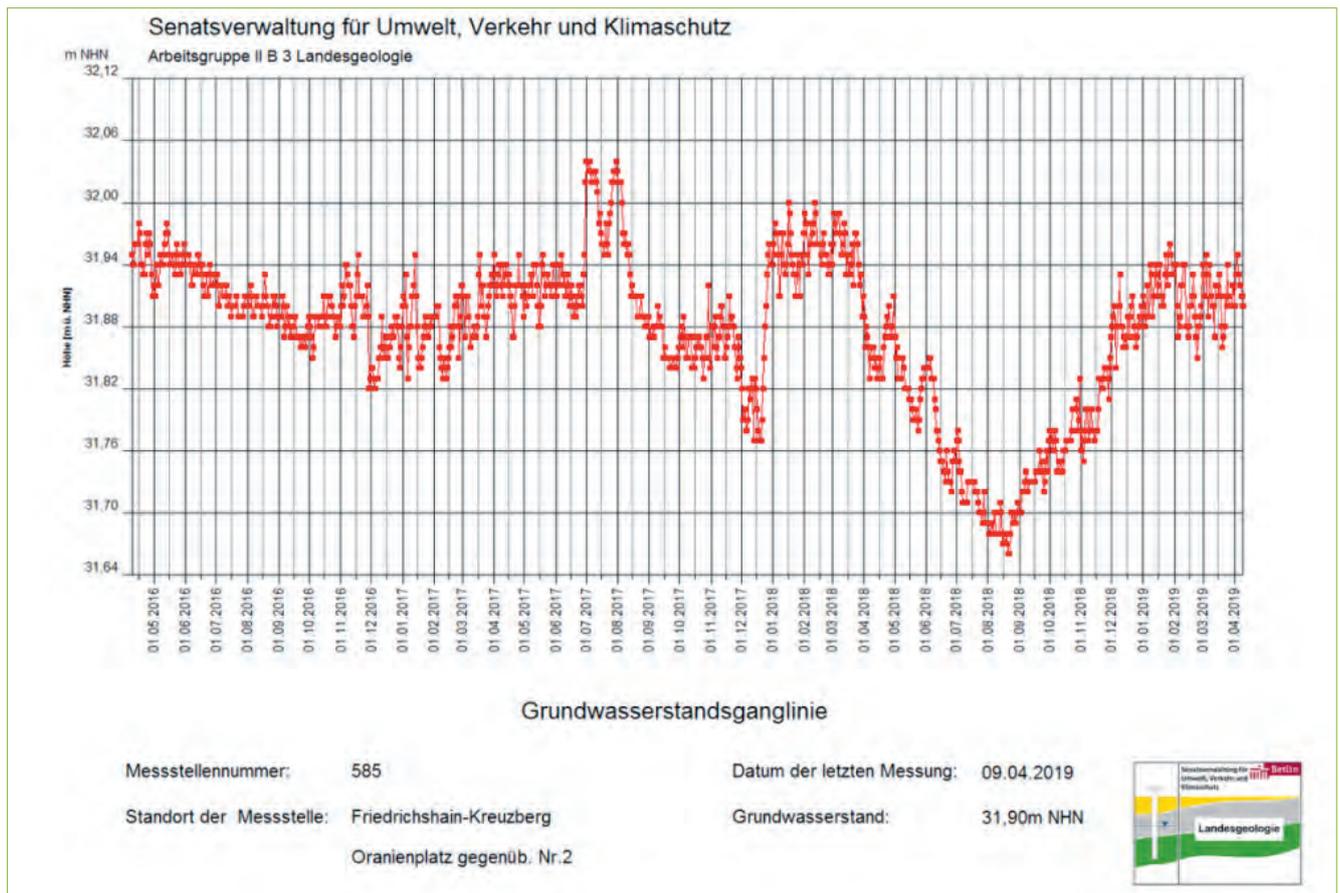


Abbildung 1 Grundwasserstandsganglinie für eine Messstelle; abgerufen im Geoportal Berlin am 9. April 2019

Die tagesaktuellen Grundwasserstände sind für ausgewählte Stationen einzeln und nacheinander abrufbar. Nichtsdestotrotz bergen die Zeitreihen der einzelnen Grundwassermessstellen weitaus mehr an Darstellungs- und Auswertemöglichkeiten. Die Messreihen eignen sich in hervorragender Weise für eine animierte Darstellung der Schwankungen der Grundwasserstände über den Faktor Zeit. Allerdings sind die Möglichkeiten der dynamischen Darstellung von punktuellen Daten sehr begrenzt. Einen Gesamtüberblick der Datenlage, der dem Nutzer idealerweise neue Zusammenhänge erschließt, kann so nur schwerlich gelingen. Daher wurde explizit hier eine zusätzliche Webanwendung entwickelt, welche die punktuellen Messwerte zwischen den einzelnen Stationen flächenhaft interpoliert und auf einem Kartenhintergrund darstellt. Ziel der Webanwendung ist eine dynamisch animierte Darstellung der langjährigen Messreihen bereitzustellen (SCHROEDER et al. 2017 a). Dieses ist verbunden mit dem weiterführenden Ziel, mittels der Webanwendung die interessierte Öffentlichkeit zu informieren und somit für ein besseres Verständnis für das Thema Grundwasser zu werben.

### Historische Grundwasserstände als Webanwendung

Um die punktuellen Messungen der Grundwasserstände ansprechend über die Zeit animieren zu können, werden die Messwerte jahresweise zu geostatistischen Oberflächen interpoliert. Die hierfür verwendete Software nutzt einen Interpolations-Algorithmus nach *Barnes (Boundless Suite)*. **Dabei werden jeweils die Werte eines Jahres zur Laufzeit des Aufrufs** der Anwendung ausgelesen, geostatistisch zu einer Oberfläche (Surface) interpoliert und mittels zuvor festgelegter Farbklassifizierung im Browser angezeigt. Mit dem Verzicht auf die Vorberechnung der Oberflächen erhalten wir die Möglichkeit jederzeit die Anwendung zu erweitern, beispielsweise um ein weiteres Jahr mit Messwerten.

Die Webanwendung stellt eine sehr anschauliche Darstellung (Abbildung 2) der Entwicklung der historischen Berliner Grundwasserstände bereit. Erstmals kann ein Gesamtbild der Grundwasserentwicklung für einen kleinen Teil Berlins, mittels einer geostatistischen Oberfläche in Verbindung mit interaktiven Ganglinien, für einen langen Zeitraum vorgestellt werden. Die Webanwendung ist daher im besonderen Maße für eine Veröffentlichung auf den Webseiten der Arbeitsgruppe Landesgeologie geeignet.

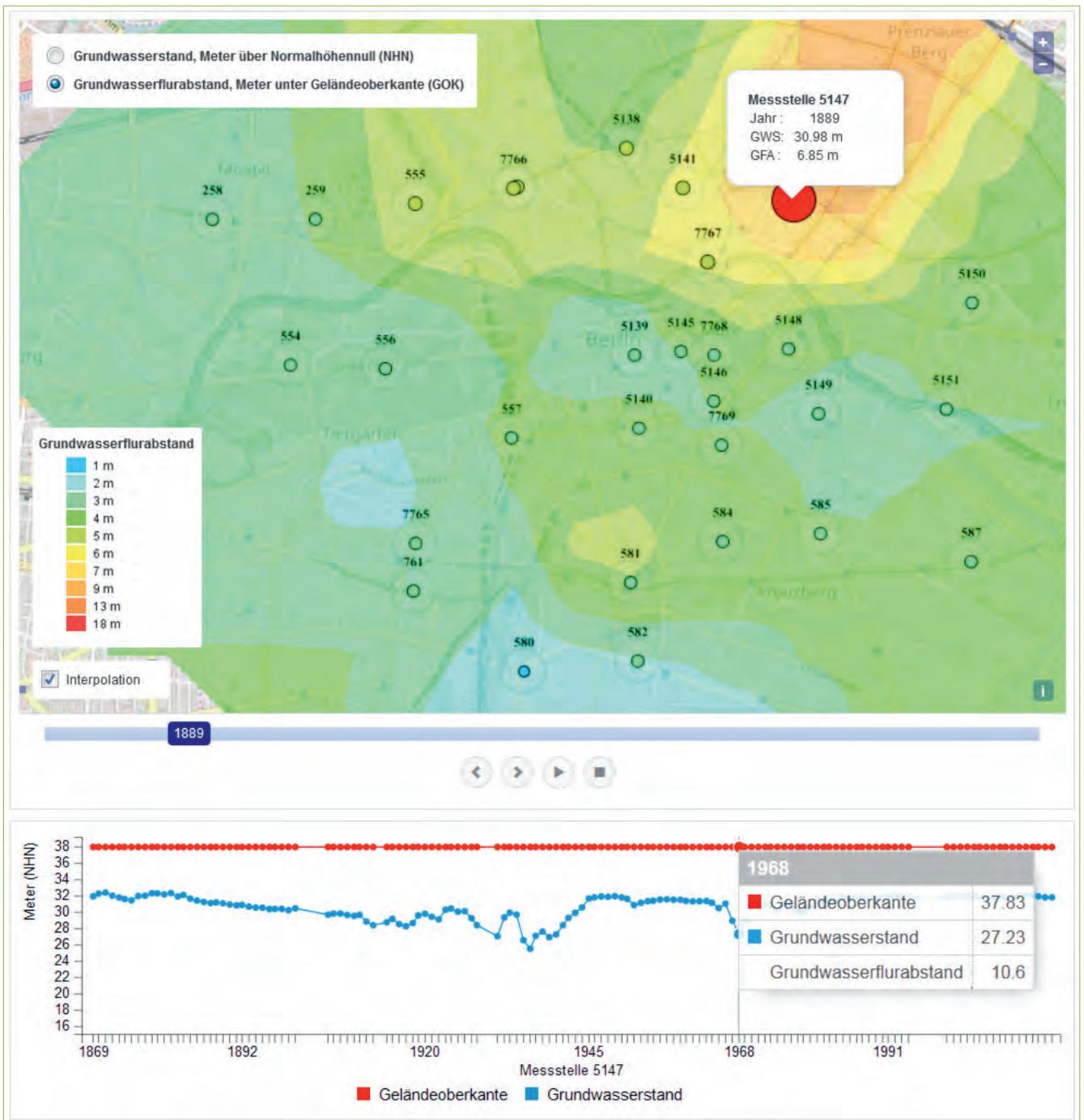


Abbildung 2 Ansicht der Webanwendung mit Karte, Zeitschieberegler und interaktiver Ganglinie

## Digitale geologische 3D-Modelle

Die Ergebnisse der dreidimensionalen Modellierung(en) des geologischen Landesmodells wurden ebenfalls für die Veröffentlichung als eigene Webanwendungen aufbereitet.

Auf Basis der geologischen Bohrungen der Landesdatenbank und der daraus abgeleiteten Profilschnitte wurden die räumlichen Verbreitungen der Schichten ausgewertet und für das geologische Landesmodell flächendeckend aufgearbeitet. Im 2D-Viewer und im 3D-Earthviewer werden die geologischen Einheiten räumlich differenziert dargestellt, wobei die einzelnen Schichten, das Geländemodell und vorhandene Bohrungen individuell dazu geladen werden können. Dieses Untergrundmodell kann beliebig gedreht oder geneigt werden und die Erstellung von virtuellen Bohrungen ist ebenfalls möglich (Abbildung 3).

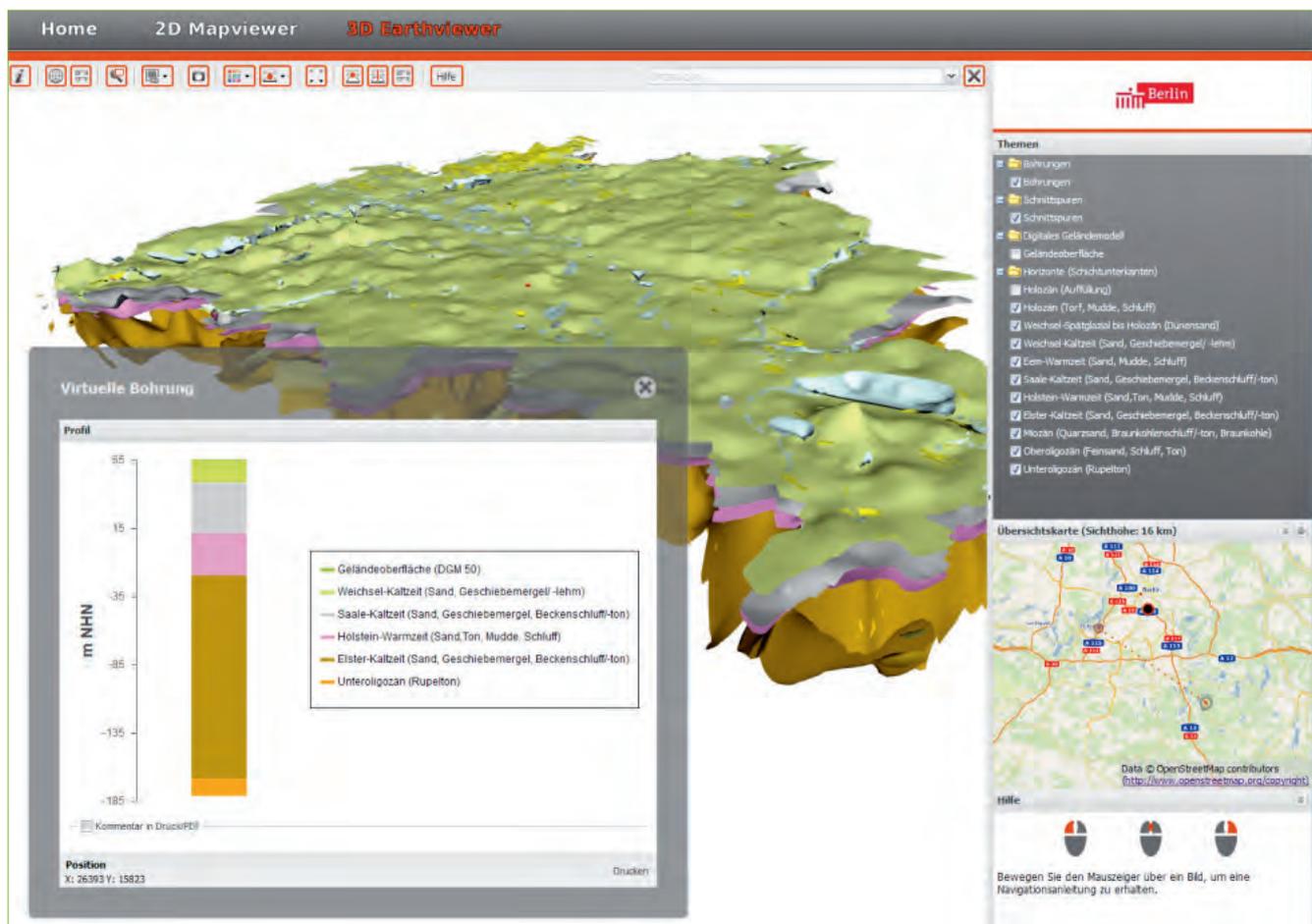


Abbildung 3 Das Geologische Landesmodell im 3D Earthviewer (<http://berlin.geo-3d.de/berlin3d/portal/>) mit Darstellung einer virtuellen Bohrung.

Eine komplette Darstellung des Berliner Untergrundes als 3D-Körper konnte mit einer Multitouchtable-Anwendung geschaffen werden. Auch hier ist es möglich einzelne Schichten individuell und separat darzustellen, die Körper zu drehen und virtuelle Bohrungen anzulegen. Das 3D-Modell in dieser Anwendung ist stark vereinfacht, wurde aber durch zusätzliche Informationen wie eiszeitliche Hinterlassenschaften von Findlingen und Pfuhlen im Berliner Stadtgebiet erweitert. Die Anwendung dient der Öffentlichkeitsarbeit bei Messen und Ausstellungen und ist seit Neuestem auch als Desktopvariante verfügbar (Abbildung 4).

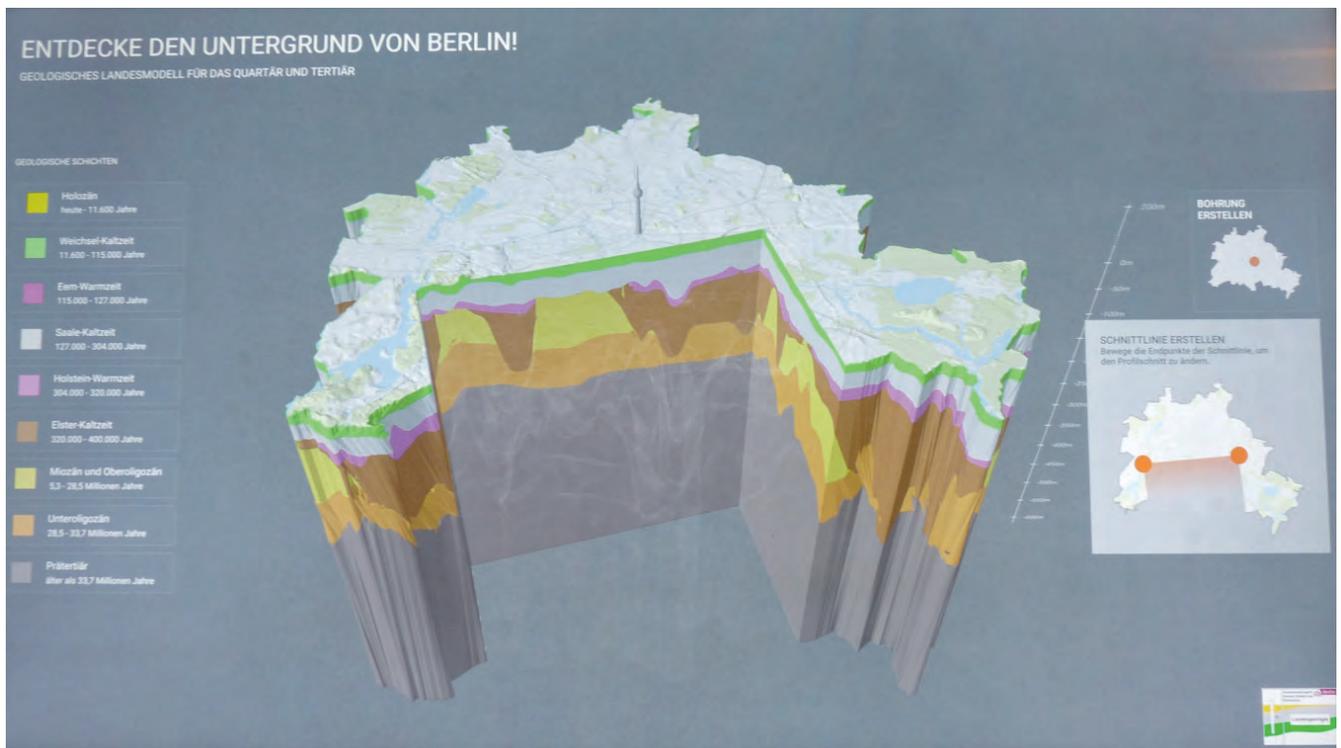


Abbildung 4 Das Geologische Landesmodell in 3D mit individueller Schnittlinie.

### Die Landesgeologie goes digital

Der Untergrund ist eine begrenzte und komplexe Ressource. Insbesondere unter Großstädten wie Berlin ergibt sich eine Vielzahl von konkurrierenden Nutzungsinteressen. Für diverse öffentliche Belange und privatwirtschaftliche Interessen ist der Untergrund damit von hohem wirtschaftlichem Wert. Die Grundwasservorkommen zur Versorgung mit Trink- und Brauchwasser sind beispielsweise eine wichtige Ressource. Gründungen für Gebäude und Tiefbauten für den Personentransport durch U- und S-Bahnen sind von öffentlichem Interesse. Versorgungsleitungen für Wasser, Strom und Gas im oberflächennahen Untergrund ergeben ein dichtes Netz und erhöhen die Komplexität der Situation. Geothermische Quellen für die Klimatisierung von Gebäuden werden zunehmend genutzt. Und ebenso dient der Untergrund als Speicher wie es in Berlin in circa 300 Meter Tiefe für die Wärmerversorgung des Reichstages praktiziert wird. Gleichzeitig werden derzeit neue Ideen entwickelt, die in naher Zukunft Realität werden könnten, wie beispielsweise der unterirdische Warentransport.

Allen Szenarien ist eine wechselseitige Abhängigkeit an Informationen über die jeweilige Beanspruchung des Untergrundes gleich. Diese Informationen sind bisher meist in sehr unterschiedlichen Datensilos abgelegt und bleiben somit einer weiteren Verarbeitung verborgen. Es mangelt bis heute an einer medienbruchlosen Verarbeitung der Informationen und Daten des Untergrundes und an dessen Bereitstellung durch benutzer-

freundliche Portale. Die fortschreitende Entwicklung der digitalen Informations- und Kommunikationstechnologie muss genutzt werden, um neue und smarte Konzepte für ein alle Daten integrierendes Untergrundmanagementsystem zu erschaffen (SCHROEDER et al. 2017 b). Aufbauend auf digitalen Referenzarchitekturen und der Nutzung verschiedener Standards werden heterogene Infrastrukturen weiter verknüpft werden. Dies wird die Interoperabilität und Nutzbarkeit der einzelnen Daten weiter erhöhen. Für die Landesgeologie bedeutet dies in Zukunft: den Ausbau des Grundwassermessnetzes mit weiteren Echtzeitsensoren auszustatten, die Integration der Messwerte in Datenbanken zu automatisieren, und semiautomatische Werkzeuge von der Analyse bis zur Veröffentlichung zu etablieren. Insbesondere sollen zukünftig die Möglichkeiten der dynamischen Darstellung von Zeitreihen und die Bereitstellung von maschinenlesbaren Daten über das Berliner Open Data Portal berücksichtigt werden.

## Literatur

ASSMANN, P. (1957): Hrsg.: Senator für Bau- und Wohnungswesen. Beiträge: O. F. Gandert, G. Siebert, G. Sukopp. – Der geologische Aufbau der Gegend von Berlin. Zugleich als Erläuterung zur geologischen Karte und Baugrundkarte von Berlin (West) im Maßstab 1:10.000. Graphische Gesellschaft; Berlin

LOSSEN, K.A. (1879): der Boden der Stadt Berlin nach seiner Zugehörigkeit zum norddeutschen Tieflande, seiner geologischen Beschaffenheit und seinen Beziehungen zum bürgerlichen Leben. (unter Benutzung der Vorarbeiten von A. KUNTH.) Reinigung und Entwässerung Berlins, Heft XIII und Atlas mit einer geologischen Karte 1:10 000; Berlin

SCHROEDER M., BAUTZ E., HÖRMANN U., KOLBERG A. & A. LIMBERG (2017 a): Die historische Entwicklung der Grundwasserstände im Berliner Zentrum. Tagungsband des 24. Workshops „Umweltinformationssysteme 2017 – Vernetzte Umweltdaten (UIS 2017)“ des Arbeitskreises „Umweltinformationssysteme“ der Fachgruppe „Informatik im Umweltschutz“ der Gesellschaft für Informatik (GI), Herausgeber Ulrike Freitag, Frank Fuchs-Kittowski u.a., 18. bis 19. Mai 2017; Brandenburg an der Havel

SCHROEDER, M.; WÄCHTER, J.; LIMBERG, A.; & B. FRITZ-TAUTE (2017 b): An Integrative Management Approach of Subsurface Data for Major Cities like Berlin, INSPIRE Conference 2017, INSPIRE a digital Europe: Thinking out of the box, 4. bis 8. September 2017, Kehl, Germany & Strasbourg, France

BARNICKEL, N. et al. (2012): Berliner Open Data Strategie 2012. Verfügbar: [https://www.researchgate.net/publication/262330562\\_Berliner\\_Open\\_Data\\_Strategie\\_Organisatorische\\_rechtliche\\_und\\_technische\\_Aspekte\\_offener\\_Daten\\_in\\_Berlin](https://www.researchgate.net/publication/262330562_Berliner_Open_Data_Strategie_Organisatorische_rechtliche_und_technische_Aspekte_offener_Daten_in_Berlin) (aufgerufen am 12. März 2019)

BOUNDLESS SUITE 4.10: <http://suite.opengeo.org/docs/latest/cartography/rt/barnes.html>, (aufgerufen am 09. April 2019)

GESETZ- UND VERORDNUNGSBLATT FÜR BERLIN, 72. Jahrgang, Nr. 14, 9. Juni 2016, 282, Berliner E-Government-Gesetz, 30. Mai 2016: <http://gesetze.berlin.de/jportal/?quelle=jlink@query=EGovG+BE@psml=bsbeprod.psml@max=true> (aufgerufen am 12. März 2019)

TAGESAKTUELLER GRUNDWASSERSTAND, FIS Broker: <http://fbinter.stadt-berlin.de/fb/wms/senstadt/kganglinien>, (aufgerufen am 09. April 2019)

## Von der Wärmeinsel in Berlin zur Hitzefalle?

Auswertung von Grundwassertemperaturmessungen über 150 Jahre

Alexander Limberg\*, Andreas Henning\*\*

\*Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Berlin,

\*\*Diplom Geophysiker Andreas Henning Energie- und Umweltberatung, Berlin  
alexander.limberg@senumvk.berlin.de , andreas.henning@henning-

### Beginn der Messungen 1869

Aufgrund der Sorge, dass das Grundwasser gegebenenfalls Überträger oder Auslöser der damals auch in Berlin grassierenden Choleraepidemien sein könnte, wurden neben der genauen Aufzeichnung der Grundwasserstände an 30 neu errichteten Messstellen auch Temperaturmessungen durchgeführt. „Es ist endlich zu bemerken, dass das Grundwasser seine niedrigste Temperatur erlangt, wenn es seinen höchsten Stand erreicht, und umgekehrt seine höchste Temperatur nahezu mit seinem stärksten Sinken zusammenfällt, – eine überaus wichtige Tatsache, welche für die Erörterung des Einflusses, welches das Grundwasser auf Gesundheit und Sterben äußert, von größter Bedeutung ist.“ (VIRCHOW 1873: S. 49)

Die Aufzeichnungen der Grundwassertemperatur wurden beginnend im September 1869 monatlich bis Ende 1873 durchgeführt (Abbildung 1).

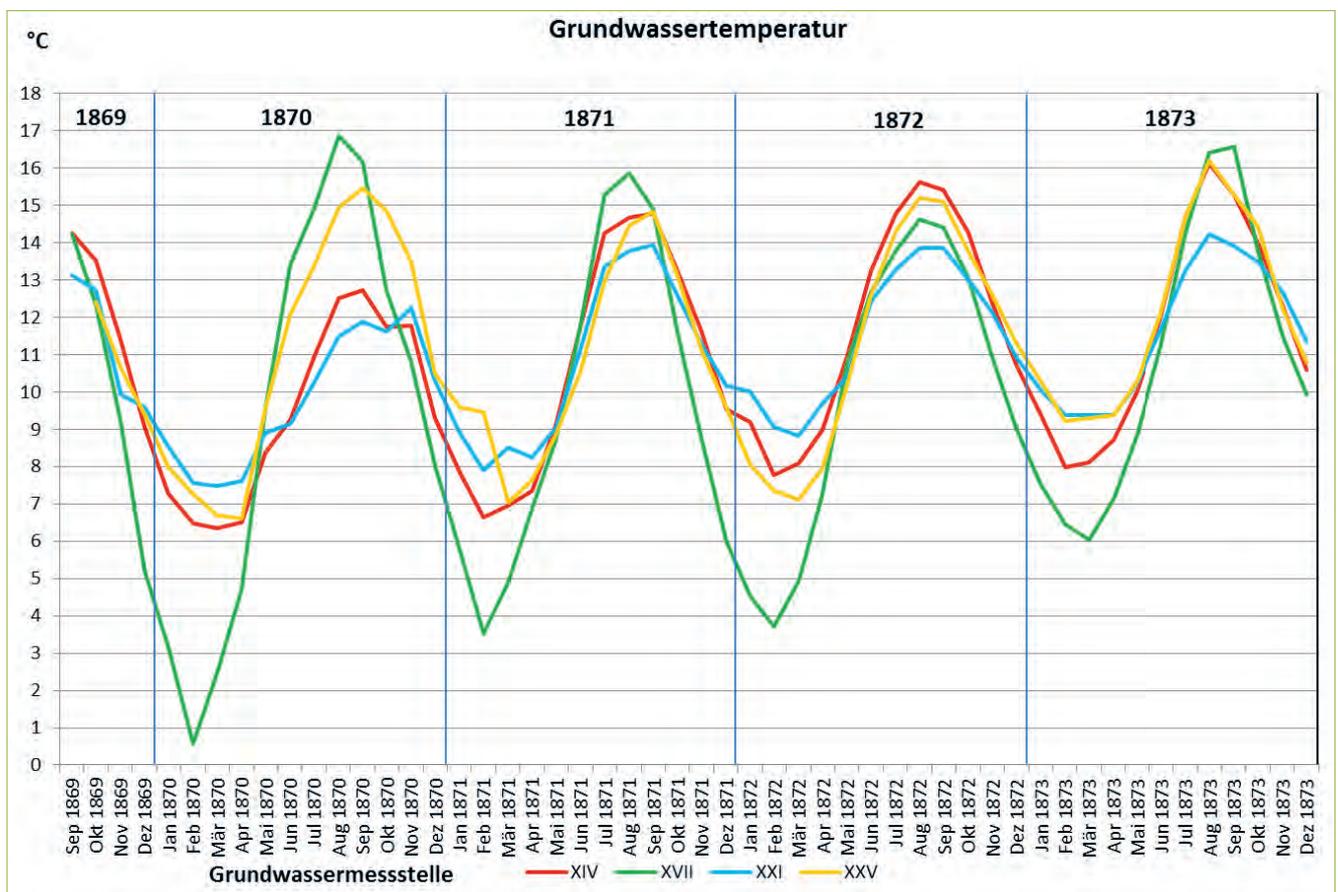
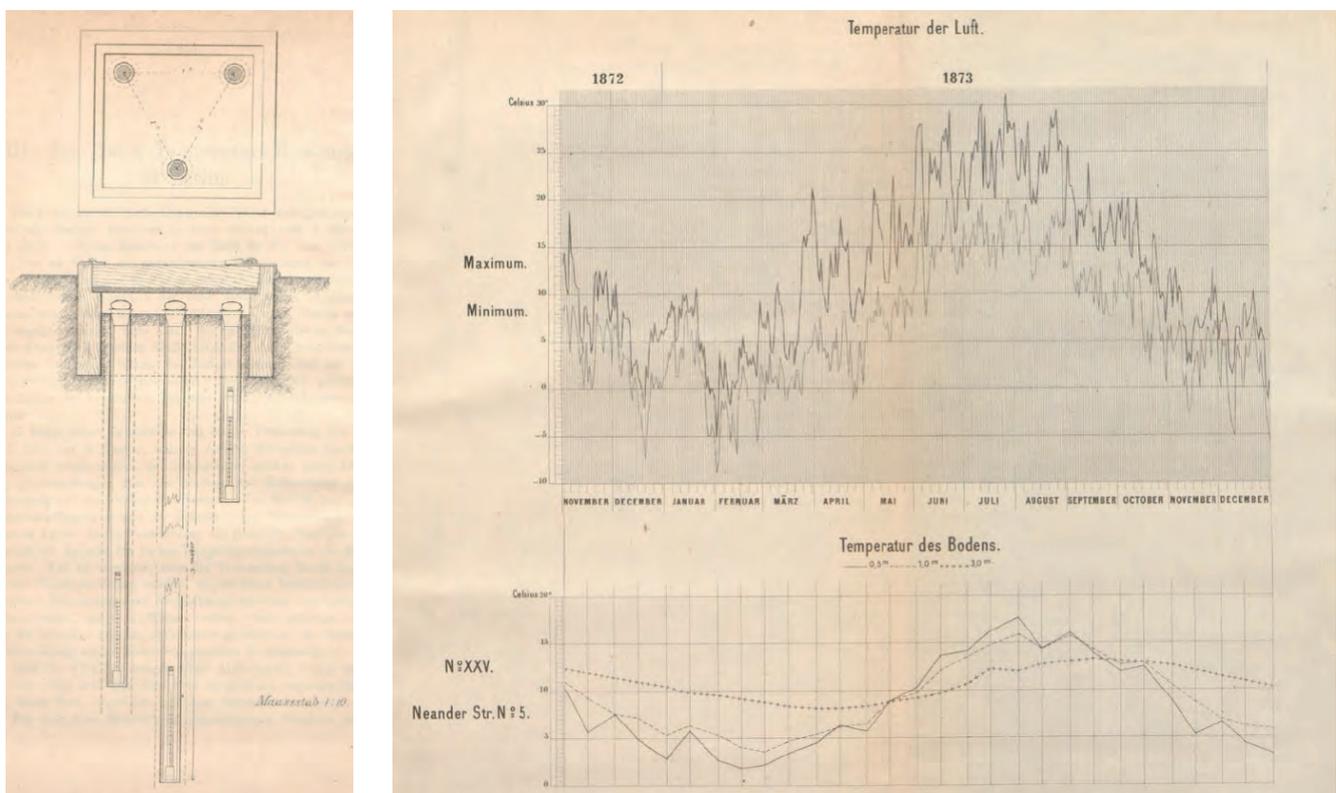


Abbildung 1 Grundwassertemperaturganglinien an vier ausgewählten Messstellen von September 1869 bis Dezember 1873

Aus den Temperaturlaufzeichnungen erkannte man erstmals, dass die Temperaturmaxima im Verlauf des Jahres immer im Herbst und die Minima im Februar/März auftreten.

Bei geringem Grundwasserflurabstand von nur rund 1,5 bis 2 Meter (Messstelle XVII in Abbildung 1) ist die Amplitude der Temperaturen sehr viel größer als bei höherem Flurabstand von 3 bis 3,5 Meter (Messstelle XXI), da der jahreszeitlich bedingte Temperatureinfluss zur Tiefe hin abnimmt.

Da PFEIFFER (in VIRCHOW 1873: S. 49) glaubte, aus Untersuchungen zur Bodenwärme die Verbreitung und den Verlauf der Cholera ableiten zu können, wurden auch „...in dieser Richtung neue Ermittlungen für Berlin angeordnet. Es sind an 14 verschiedenen Punkten die erforderlichen Thermometer eingesenkt und die Beobachtungen haben am 1. December d. J. in je 3 Tiefen (0,5, 1 und 3 Met.) begonnen.“ (VIRCHOW 1873: S. 50) (Abbildung 2).



**Abbildung 2** Aufbau der Boden-Temperatursonden (links) und die Ganglinien der 14tägigen Temperaturmessungen in 0,5; 1,0 und 3,0 Meter Tiefe an einer ausgewählten Messstelle (XXV) von November 1872 bis Dezember 1873 (rechts unten) sowie Messungen der Oberflächentemperatur (rechts oben) (aus HOBRECHT 1874)

Die starken Temperaturdifferenzen in ein und derselben Tiefe von bis zu 5 Kelvin an vier ausgewählten Messstellen sind auf unterschiedliche Wärmeflüsse zwischen der Atmosphäre und dem Untergrund vermutlich auf die unterschiedliche Siedlungsstruktur und den unterschiedlichen Bodenaufbau zurückzuführen (Abbildung 3).

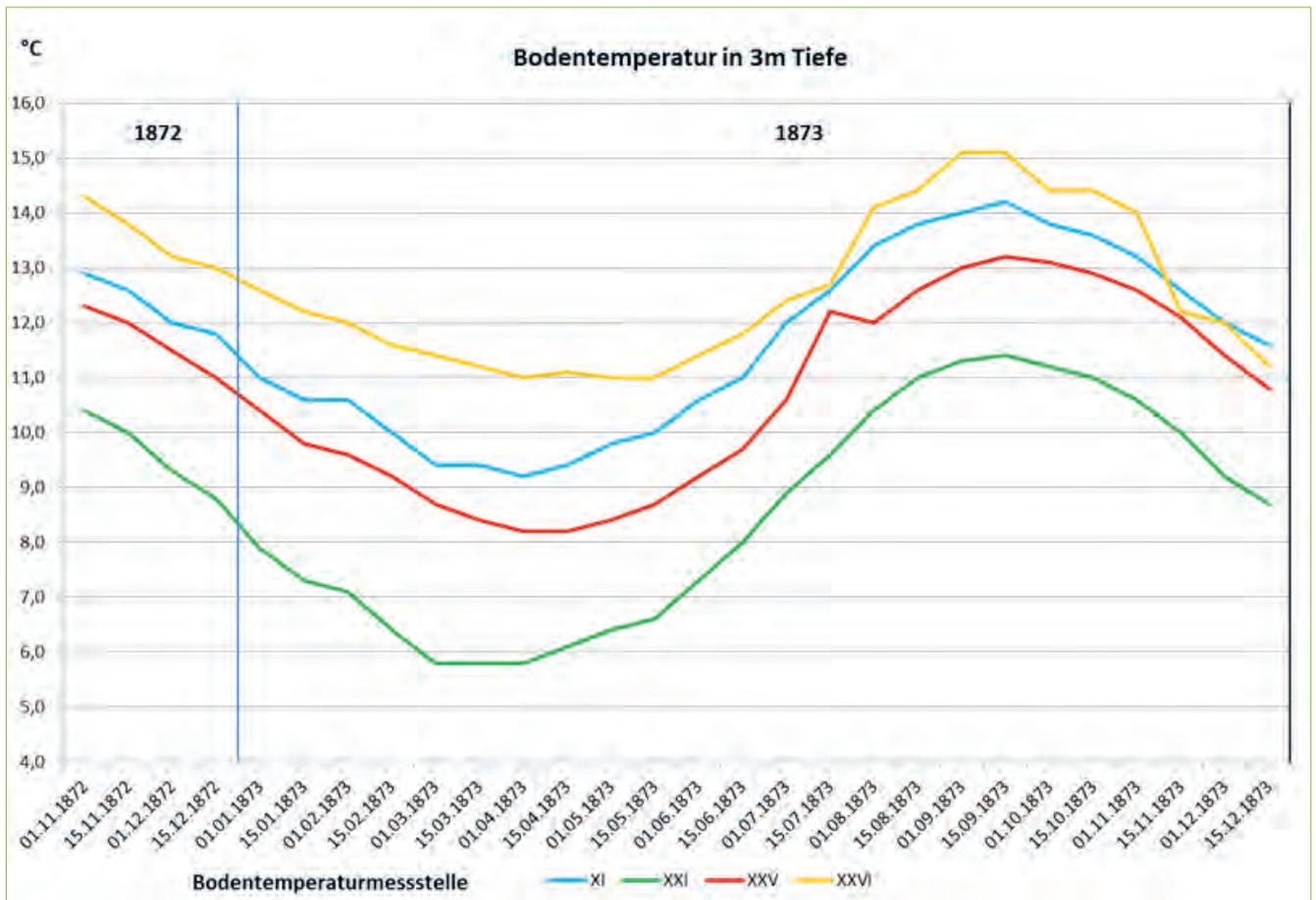
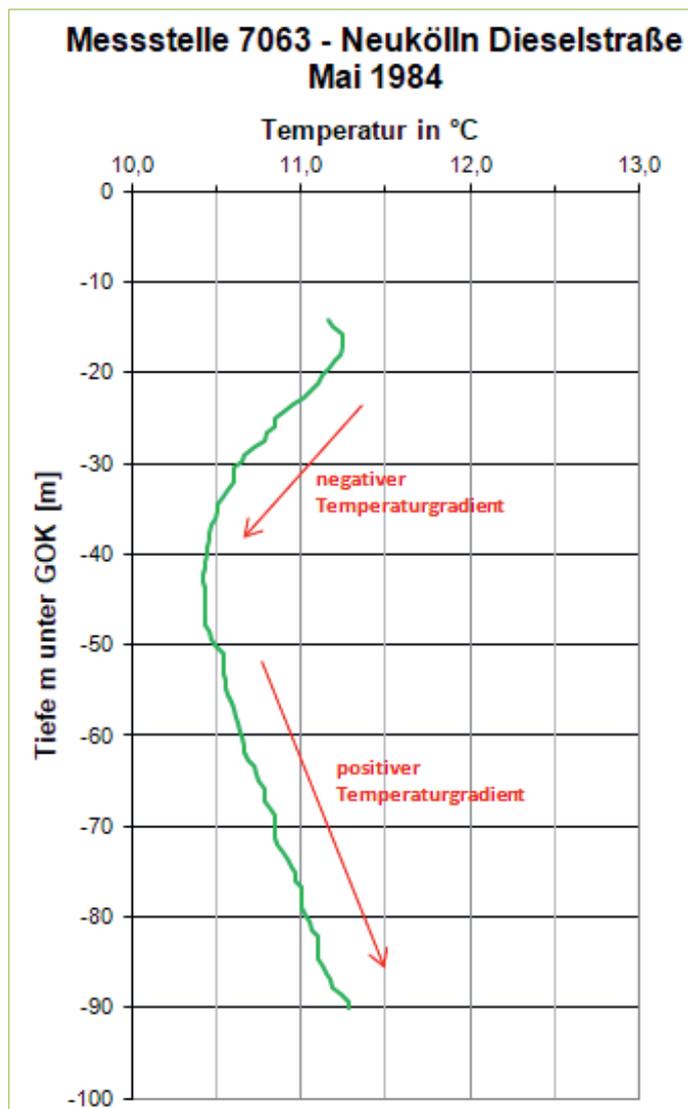


Abbildung 3 14tägige Boden-Temperaturmessungen in 3 Meter Tiefe an vier ausgewählten Messstellen von September 1869 bis Dezember 1873

### Erkundung des Temperaturfeldes seit 1978

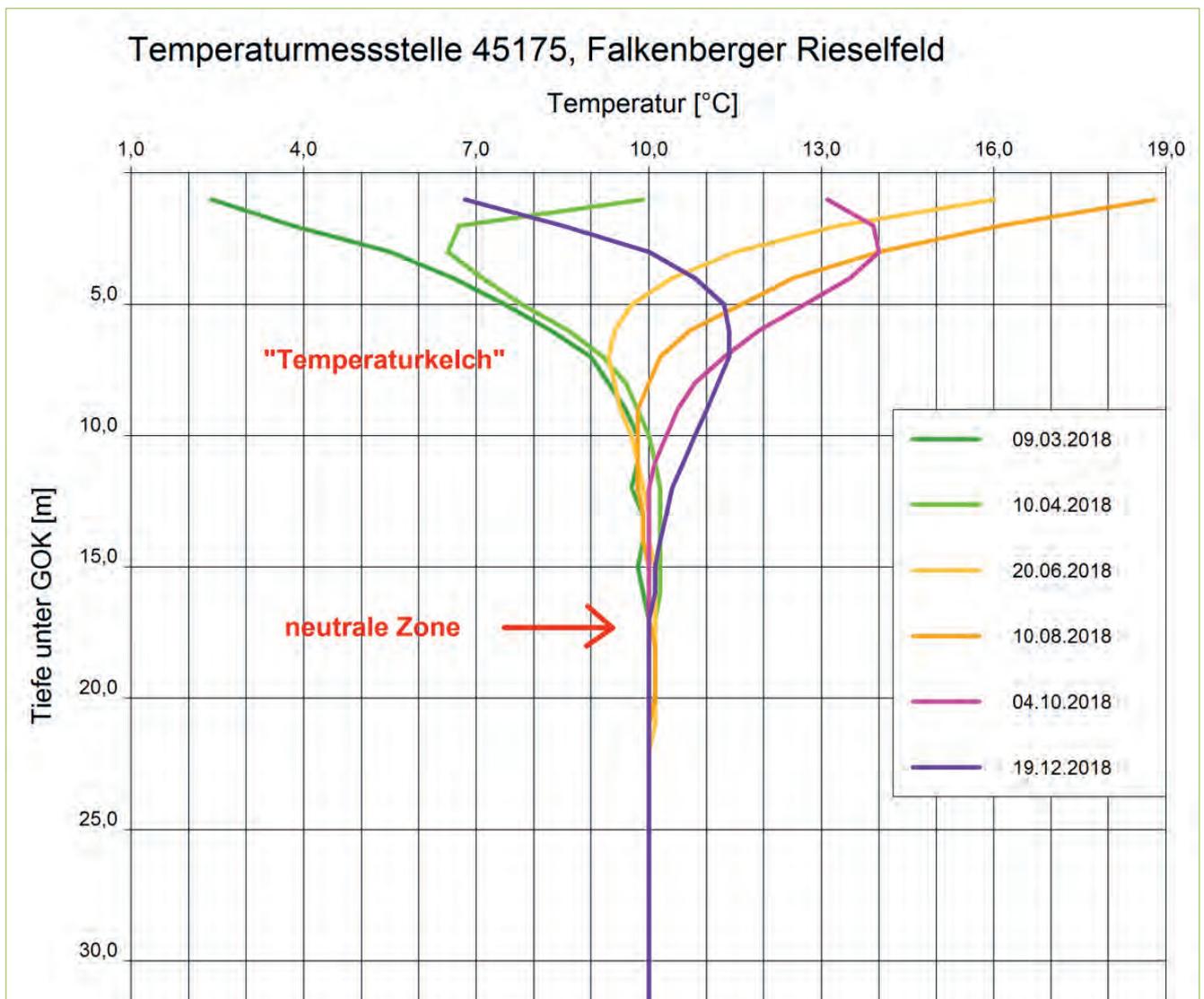
Seit den 1970er-Jahren wird das Berliner Temperaturfeld systematisch erkundet. In allen tieferen Grundwassermessstellen der damals durchgeführten Erkundungsbohrprogramme wurden Temperaturprofile oft bis in Tiefen von mehr als 100 Meter aufgenommen (TRAPP 1983; OTTO 1987). Die Messbefunde zeigten schon zum damaligen Zeitpunkt, dass im innerstädtischen Bereich bis in größere Tiefen ein negativer Temperaturgradient zu beobachten ist.

Bis in circa 40 Meter Tiefe nimmt die Temperatur ab (negativer Temperaturgradient) und erst dann folgt die Temperatur der „normalen“ Entwicklung mit steigenden Werten zur Tiefe (positiver Gradient) hin (Abbildung 4). Aus den Beobachtungen kann der Schluss gezogen werden, dass das Temperaturfeld vermutlich durch den starken anthropogenen Temperatureintrag bis in Tiefen von 40 Meter teilweise auch bis in rund 80 Meter beeinflusst ist.



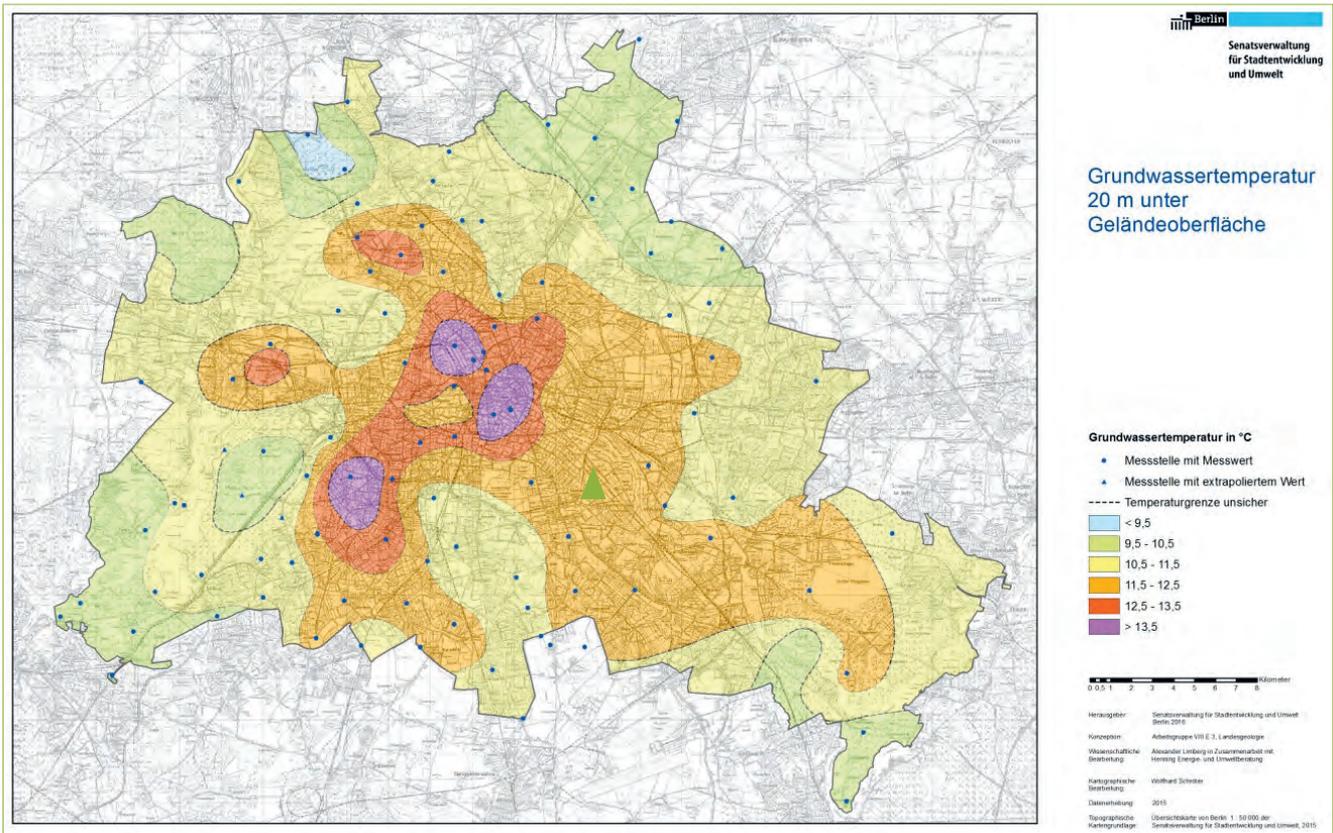
**Abbildung 4** Das Temperaturlog der Grundwassermessstelle 7063 vom Mai 1984 in der Innenstadt zeigt abnehmende Temperaturen bis etwa 40 Meter unter Gelände (negativer Temperaturgradient). Erst darunter steigen sie wieder (positiver Gradient).

Nach 1989 wurde ein regelmäßiges Temperaturmonitoring im Untergrund von ganz Berlin in den vorhandenen Grundwassermessstellen begonnen. Zusätzlich wurden vereinzelt Spezialmessstellen errichtet. Es handelt sich dabei um filterlose mit Wasser gefüllte Rohre, in denen auch die Untergrundtemperatur in der nicht wassergesättigten Bodenzone bis an die Geländeoberkante gemessen werden kann. Hiermit lassen sich sowohl die Amplitude als auch die Eindringtiefe der jahreszeitlichen Beeinflussung ermitteln (Abbildung 5). Oberhalb der neutralen Zone, die in Berlin zwischen circa 15 bis 20 Meter unter der Geländeoberfläche liegt, variieren die Temperaturen in Abhängigkeit von der Jahreszeit zwischen 1 Grad Celsius bis 20 Grad Celsius mit einer abnehmenden Amplitude zur Tiefe hin. Unterhalb der neutralen Zone findet kein jahreszeitlicher Einfluss der natürlichen jahreszeitlichen Temperaturschwankungen mehr statt. Ab dieser Tiefe wirken sich nur noch unter anderem die langfristigen anthropogen bedingten klimatischen Veränderungen auf den Temperaturverlauf aus.



**Abbildung 5** Mehrere Temperaturprofile, zu unterschiedlichen Jahreszeiten gemessen, zeigen die Ausbildung eines „Temperaturkelches“ bis zur neutralen Zone an einer Spezial-Temperaturmessstelle (45175) in Falkenberg, im Nordosten Berlins.

Aus den vorliegenden Temperaturdaten wurden Karten generiert, die die Temperaturverteilung in 20, 40, 60, 80 und 100 Meter Tiefe unter der Geländeoberfläche zeigen (Abbildung 6). Diese Karten sind im Internet abrufbar (GRUNDWASSERTEMPERATUR, UMWELTATLAS BERLIN 2016).



**Abbildung 6 Grundwassertemperaturverteilung 20 Meter unter der Geländeoberfläche**

### Erwärmung des Untergrundes

Auf der Grundwassertemperaturkarte 20 Meter unter der Geländeoberfläche ist ein jahreszeitlicher Temperatureinfluss weitestgehend auszuschließen. Trotzdem sind stark erwärmte Gebiete mit Temperaturen von mehr als 12,5 Grad Celsius im Innenstadtbereich zu erkennen. Diese „Wärmeinseln“ können auf die verdichtete Stadtstruktur mit einem hohen anthropogen bedingten Wärmeeintrag zurückgeführt werden (Abbildung 6). Dagegen zeigen die bewaldeten Gebiete, größere Parkanlagen und die weniger dicht besiedelten Bereiche an den Stadträndern eine deutlich geringere anthropogene Beeinflussung.

Zunehmend stärker wirken sich auch die zunehmenden Oberflächentemperaturveränderungen durch den Klimawandel aus. Beispielhaft lässt sich dies an den Temperaturprofilen zeigen, die an der Messstelle 7063 im südöstlichen Bezirk Neukölln über einen Zeitraum von 33 Jahren zwischen Mai 1984 bis Juli 2017 gemessen worden sind. Im bisherigen Beobachtungszeitraum kann in einer Tiefe von 20 Meter, in der kein jahreszeitlicher Einfluss mehr stattfindet, eine Erwärmung um circa 1 Kelvin festgestellt werden (Abbildung 7).

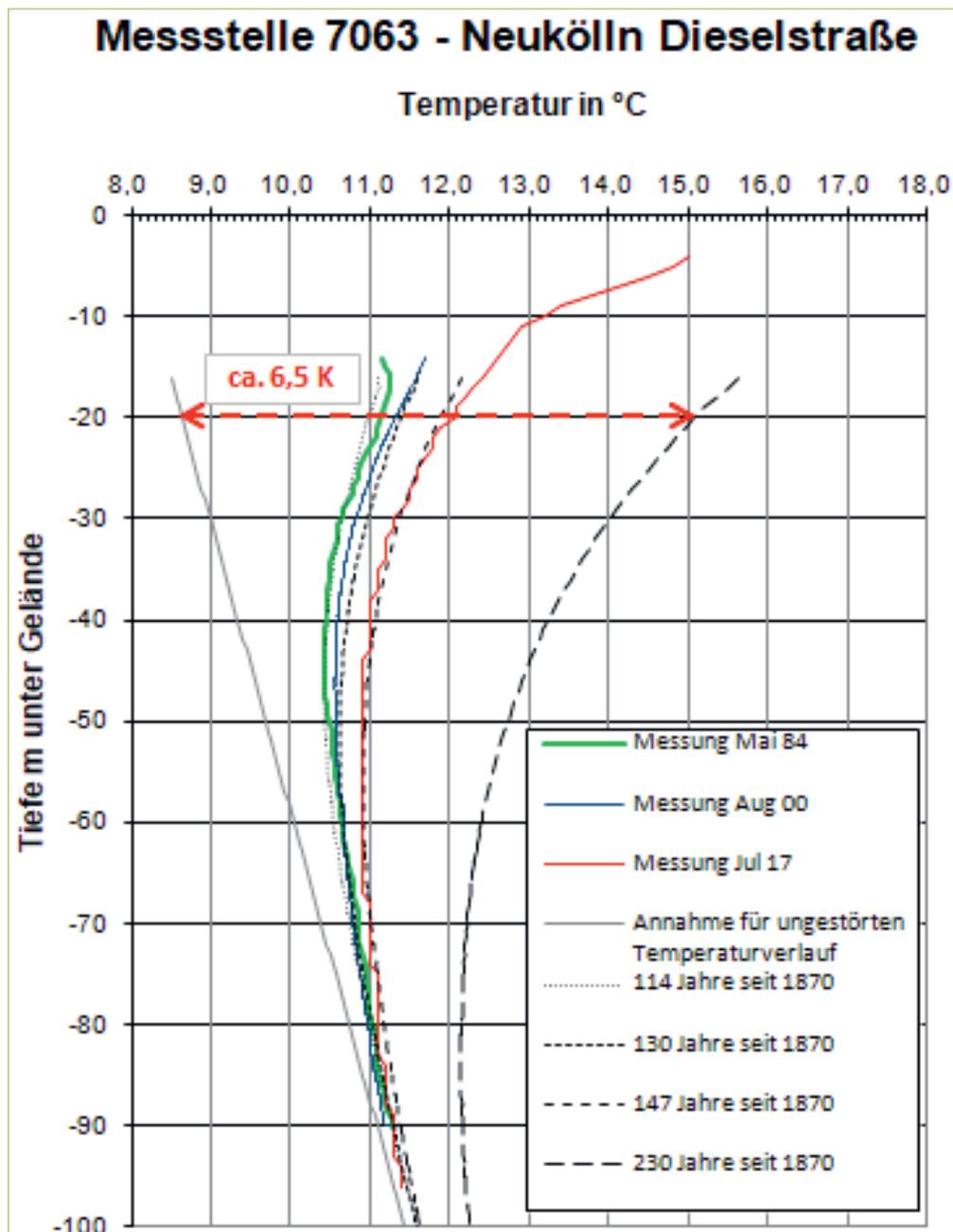


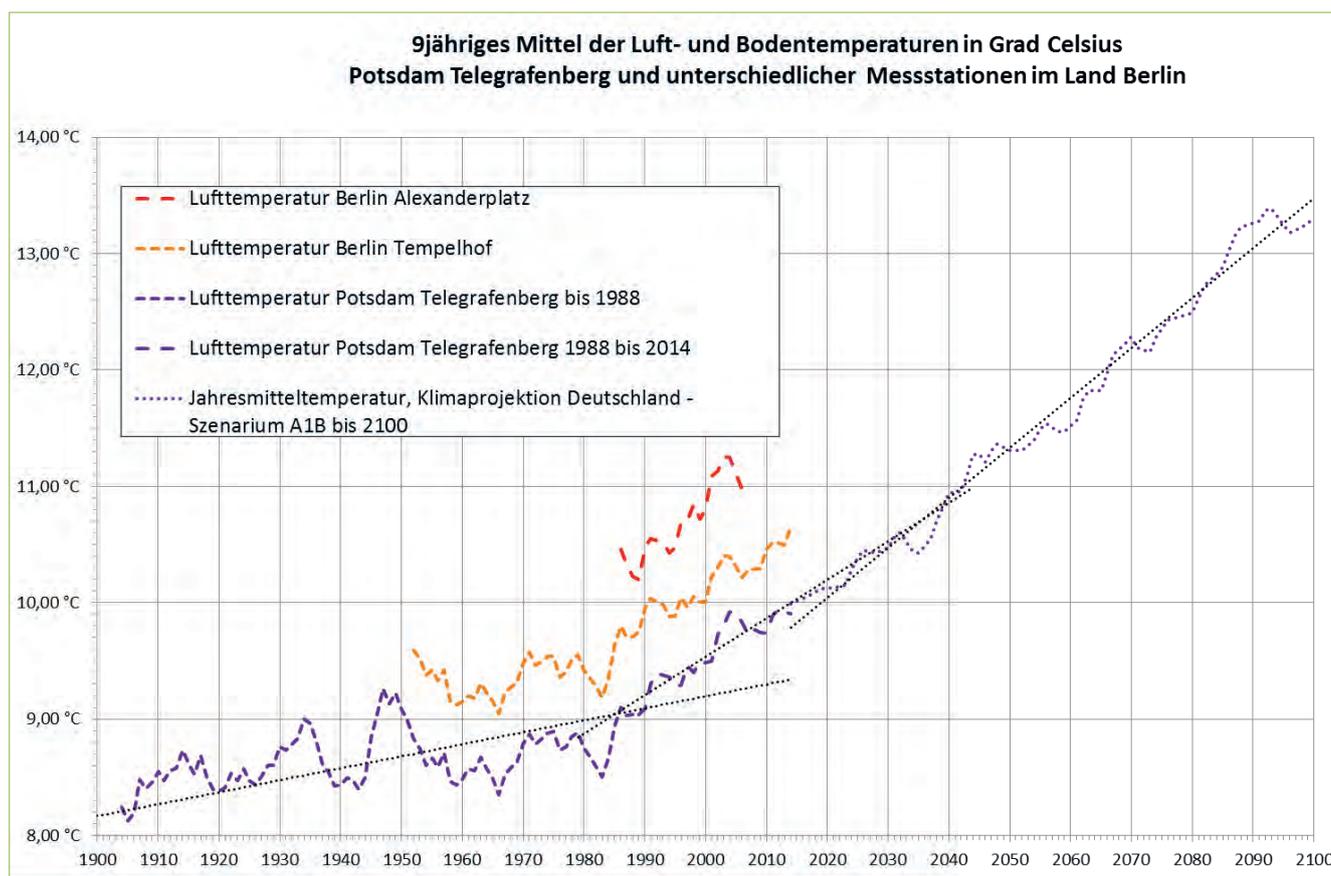
Abbildung 7 Erwärmung des Untergrundes unterhalb der neutralen Zone seit rund 150 Jahren um fast 6,5 Kelvin an der Messstelle 7063 (Lage: siehe grünes Dreieck in Abbildung 6)

Durch einfache analytische Modellrechnungen für eine konduktive Wärmeausbreitung lässt sich der beobachtete Temperaturanstieg auch theoretisch nachvollziehen. Dabei sind ein linearer Anstieg der Oberflächentemperatur (zum Beispiel durch Klimawandel) oder ein permanenter sprunghafter Anstieg der Oberflächentemperatur (zum Beispiel durch Bebauung) zugrunde gelegt worden.

Ausgehend von einer angenommenen ungestörten mittleren Oberflächentemperatur von circa 8,4 Grad Celsius im Berlin der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts können die gemessenen Temperaturprofile mit dem vorliegenden historischen Verlauf der mittleren Lufttemperatur nachmodelliert werden (siehe Abbildung 8 und HENNING & LIMBERG 2012).

So eröffnet sich auch die Möglichkeit unter der Berücksichtigung der Klimaprojektion für Deutschland des Deutschen Wetterdiensts (Veränderung der Jahresmitteltemperatur für Deutschland von 2000 bis 2100, hier Szenarium A1B, siehe Abbildung 8) eine Prognose für die zukünftige Temperaturentwicklung der Untergrundtemperaturen vor dem Hintergrund der zu erwartenden klimatischen Veränderungen abzugeben und die mögliche Entwicklung von der Wärmeinsel gegebenenfalls zur „Hitzeinsel“ im Vorfeld abschätzen zu können.

Unter den getroffenen Annahmen wäre zum Beispiel für die Messstelle 7063 im Jahr 2100 eine Temperatur in der neutralen Zone zwischen 15 und 16 Grad Celsius zu erwarten, was einen Temperaturanstieg um circa 6,5 Kelvin im Vergleich zum angenommenen ungestörten Zustand in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts darstellt.



**Abbildung 8** 9jähriges Mittel der Lufttemperaturen in Grad Celsius in Potsdam Telegrafenberg und unterschiedlicher Messstationen im Land Berlin sowie die prognostizierte Entwicklung der Jahresmitteltemperatur für Deutschland von Jahr 2000 bis 2100 nach den Szenarium A1B der Klimaprojektion für Deutschland

## Literatur

- HENNING, A. & LIMBERG, A. (2012): Veränderung des oberflächennahen Temperaturfeldes von Berlin durch Klimawandel und Urbanisierung. – Brandenburgische Geowiss. Beitr., 19, 1, S. 81-92; Cottbus
- 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)
- GRUNDWASSERTEMPERATUR, UMWELTATLAS BERLIN (2016): <https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ic214.htm> (aufgerufen am 23. April 2019)
- 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
- Trapp, C. (1983): Beschaffenheit und hydrogeologische Zusammenhänge des tieferen Grundwassers im nördlichen Stadtgebiet von Berlin (West). – Berliner geowiss. Abh.. 88: 115 S.; Berlin
- 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)





