



# Erkundung und Monitoring auf Quartiersebene

# 3

Nele Hastreiter, Steve Henker, Marco Pohle, Ulrike Werban und Thomas Vienken

## 3.1 Anforderungen an Erkundung und Monitoring

Im Rahmen des Projektes Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze zum Heizen und Kühlen von Stadtquartieren unter Nutzung des oberflächennahen geologischen Raumes (EASyQuart) wurden die Anforderungen an die Erkundung und das Monitoring untersucht, die aus der geothermischen Erschließung auf Wohngebietskala hervorgehen. Diese besonderen Anforderungen entstehen aus der räumlichen Dimension der Untersuchungsgebiete sowie aus der hohen geothermischen Nutzungsdichte bei Quartieren.

---

N. Hastreiter (✉) · T. Vienken

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf am TU München Campus Straubing,  
Straubing, Deutschland

E-mail: [nele.hastreiter@ufz.de](mailto:nele.hastreiter@ufz.de)

T. Vienken

E-mail: [thomas.vienken@ufz.de](mailto:thomas.vienken@ufz.de)

S. Henker

geoENERGIE Konzept GmbH, Freiberg, Deutschland

E-mail: [thiel@geoenergie-konzept.de](mailto:thiel@geoenergie-konzept.de)

N. Hastreiter · M. Pohle · U. Werban · T. Vienken

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig, Deutschland

E-mail: [marco.pohle@ufz.de](mailto:marco.pohle@ufz.de)

U. Werban

E-mail: [ulrike.werban@ufz.de](mailto:ulrike.werban@ufz.de)

© Der/die Autor(en) 2024

A. Bucher et al. (Hrsg.), *EASyQuart – Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze von Stadtquartieren*,

[https://doi.org/10.1007/978-3-662-67140-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-67140-5_3)

In der Regel ist für Kleinanlagen mit einer Heizleistung von  $< 30 \text{ kW}$  gemäß Stand der Technik keine separate Vorerkundung vorgesehen. Dies sind typischerweise Anlagen, wie sie in der individuellen Versorgung von Einfamilienhäusern (EFH) oder kleineren Mehrfamilienhäusern genutzt werden. Hier beruht die Erkundung in der Regel auf der Auswertung von Literatur oder Geodaten hauptsächlich in Bezug auf die zu erwartenden durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeiten, mittleren Untergrundtemperaturen oder mittleren Entzugsleistungen. Diese Daten dienen als Grundlage zur Anlagendimensionierung, z. B. Ermittlung der benötigten Installationslänge von Erdwärmesonden (EWS). Beim Abteufen der Bohrungen zur Installation der EWS kann adaptiv auf Grundlage des geförderten Bohrgutes, das eine geologische Einordnung der erbohrten Schicht oder Schichten erlaubt, die Anlagendimensionierung bei Bedarf in gewissem Umfang angepasst werden.

Obgleich eine Anlagendimensionierung ohne Vorerkundung zu Unsicherheiten führen kann, ist eine Erkundung im Vorfeld der Installation von geothermischen Kleinanlagen in der Regel wirtschaftlich nicht vertretbar. Anders ist dies bei geothermischen Großanlagen mit einer Leistung  $> 30 \text{ kW}$ . Hier wird häufig zusätzlich zur Literatur- und Geodatenrecherche ein sogenannter Thermal-Response-Test (TRT) zur Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit integral über die installierte Erdwärmesondenslänge bzw. mittels Enhanced-TRT auch tiefenorientiert, durchgeführt. Der TRT wird dabei in der Regel an einer ersten Pilotinstallation einer EWS durchgeführt, die idealerweise über den Test hinaus als Teil der geothermischen Installation genutzt werden kann. Auf Grundlage der Literatur- und Geodatenrecherche in Kombination mit den TRT-Daten kann eine maßgeschneiderte ortsspezifische Anlagendimensionierung erfolgen und eine Über- oder Unterdimensionierung des Systems mit negativen Auswirkungen auf Betrieb und Kosten vermieden werden. Eine Skalierung dieses Ansatzes auf Quartiersskala ist allerdings nicht uneingeschränkt möglich, da bei zunehmender Größe des Untersuchungsgebietes die Wahrscheinlichkeit der Variabilität im geologischen Schichtaufbau steigt und entsprechend berücksichtigt werden muss. Zwar kann die Anzahl der durchgeführten TRT prinzipiell erhöht werden, um eine bessere räumliche Abdeckung zu erzielen; dies ist aber mit einem nicht zu unterschätzenden Kosten- und Zeitaufwand verbunden. Des Weiteren stellt der TRT eine Punktmessung dar, deren Messwert zunächst nur für den Ort der Messung gilt. Eine Übertragbarkeit von Punktmessungen auf ein Untersuchungsgebiet oder Teile davon ist daher von der Heterogenität des Untergrundes, der damit verbundenen Variabilität der Zielparameter und deren Einfluss auf die geothermische Anlage in Planung und Betrieb abhängig. Die Frage nach der Anzahl von Messungen zur zuverlässigen Charakterisierung einer Untersuchungsfläche kann nicht pauschal beantwortet werden, sondern ist, insofern diese Information benötigt wird, Teil der standortspezifischen Erkundung.

Heterogenitäten können durch eine Vielzahl geo(morpho)logischer Prozesse entstehen. Durch diese Heterogenitäten können die petrophysikalischen und/oder hydrogeologischen Eigenschaften im Untergrund über kurze vertikale oder auch horizontale Distanzen zum Teil erheblich variieren. Besonders stark und hinsichtlich der Anlagendimensionierung relevant können diese Heterogenitäten in Lockergesteinsablagerungen bzw. Lockergesteinsgrundwasserleitern ausgeprägt sein. Deren

Charakterisierung ist insofern herausfordernd, da für die geothermische Erkundung neben relevanten Parametern wie der ungestörten Untergrundtemperatur, der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des wassergesättigten Sediments auch die hydraulische Leitfähigkeit und die Grundwasserfließgeschwindigkeiten von großer Bedeutung sind. Zusätzlich zum konduktiven Wärmetransport erfolgt ein konvektiver Wärmetransport über das fließende Grundwasser. Damit ist die Kenntnis der hydraulischen Leitfähigkeit und deren räumlicher Verteilung wesentlich zur Beurteilung der thermischen Entzugsleistung, möglicher Umweltauswirkungen wie z. B. Kälte- oder Wärmefahnen, aber auch zur Abschätzung von Anlageninteraktionen, der sogenannten nachbarschaftlichen Beeinflussung. Die Berücksichtigung von Anlageninteraktionen ist insbesondere in Wohnquartieren mit hoher Anlagendichte sehr relevant und sollte daher im Rahmen von Machbarkeitsstudien oder in der frühen Phase der geothermischen Erkundung erfolgen.

Wichtig ist, dass die Erkundung in ihrem Informationsgrad, Aufwand und den Kosten stets dem Erkundungsziel angepasst ist. Daher müssen, insbesondere unter der Prämisse komplexer (hydro)geologischer Untergrundverhältnisse, neue Wege in der geothermischen Erkundung auf Quartiersskala gegangen werden, um die geothermische Erkundung selbst unter komplexen Bedingungen flexibel und kostengünstiger zu gestalten. Gerade bei der Beschreibung komplexer Lockergesteinsgrundwasserleiter hat sich gezeigt, dass eine Charakterisierung rein basierend auf Punktuntersuchungen wie klassischer Bohrungen mit einem für die Geothermie nicht zu vertretenden Aufwand verbunden wäre. Daher müssen bestehende Techniken wie der TRT an diese Herausforderungen angepasst werden. Zu den neuen Wegen in der Vorerkundung zählen u. a. der Einsatz effizienter Sondiertechnik wie die Direct-Push-Technologie oder auch ein bereits seit Jahren in vielen Bereichen der Hydrogeologie verfolgter erfolgreicher Ansatz durch Kopplung flächenhafter geophysikalischer Daten und Punktmessungen. Im Rahmen von EASyQuart wurden diese Ansätze beispielhaft an Demonstrationsstandorten bezüglich ihrer Eignung zur geothermischen Erkundung von Flächen auf Quartierskala bewertet.

Eine der großen Herausforderungen beim Übertragen dieser Erkundungskonzepte ist die Erkundungstiefe. Die in EASyQuart betrachteten Erkundungsmethoden, allen voran die Direct-Push-Sondiertechnik, wird bei Tiefen von einigen Zehner Metern, jedoch selten tiefer als 40 m eingesetzt. Diese vergleichsweise geringe Erkundungstiefe steht einer Installationslänge von häufig 99 m und mehr bei EWS in der Oberflächennahen Geothermie gegenüber. Die im Rahmen von EASyQuart betrachteten Erkundungskonzepte sind daher nicht ohne weitere Adaption bei großen Erkundungstiefen anwendbar. Aus den Fallbeispielen geht jedoch hervor, dass in den betrachteten Fällen eine größere Erkundungstiefe kaum erforderlich war. Zudem werden standortunabhängige Konzepte beschrieben, die durch Modifikation der speziellen Erkundungstechniken einer Vielzahl von Standortbedingungen gerecht werden. Die Forderung aus der Praxis nach verbesserten Erkundungsmethoden mit einer für die Geothermie ausreichenden Erkundungstiefe ist nachvollziehbar und Lösungen sind verfügbar. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass Aufwand und Kosten mit zunehmender Erkundungstiefe erheblich ansteigen. In Abhängigkeit der Komplexität der Standortbedingungen und der geothermischen Nutzung

wäre daher zu klären, ob eine geothermische Erschließung unter herausfordernden Standort- oder Nutzungsbedingungen nur bis in Tiefen erfolgen sollte, aus denen auch zuverlässige Daten vorliegen. Auf Grundlage einer Machbarkeitsstudie kann dann entschieden werden, ob ein ökologisch und ökonomisch nachhaltiger Betrieb von Geothermieanlagen auch in flacheren Tiefen möglich ist.

Die ökologisch nachhaltige Nutzung, d. h. die Quantifizierung und Überwachung von Umweltauswirkungen erfolgt bei größeren geothermischen Installationen häufig über ein Boden- bzw. Grundwassertemperaturmonitoring. Dafür werden Boden- und/oder Grundwassertemperaturmessstellen im An- und Abstrom von größeren Geothermiesystemen installiert und die Untergrundtemperaturen in diskreten Zeitintervallen mittels Stichtagsmessungen oder quasi-kontinuierlich mittels autonomer Messtechnik erfasst. Der Unterschied zwischen An- und Abstromtemperaturen wird der geothermischen Nutzung zugeschrieben und dient zur Kontrolle der Einhaltung behördlicher Auflagen für den Betrieb. Damit besitzt das Temperaturmonitoring wesentliche Relevanz hinsichtlich der Kontrolle und Bewertung der ökologisch und ökonomisch nachhaltigen geothermischen Nutzung. In Anbetracht der Relevanz gab es bislang aber nur eingeschränkte Untersuchungen zur Repräsentativität gemessener Untergrundtemperaturen im urbanen Raum. Wichtige Faktoren, die die Repräsentativität der Messung beeinträchtigen können, sind u. a. die Messstellenlokation, das eingesetzte Temperaturmessgerät bzw. die Vergleichbarkeit verschiedener Temperaturmessgeräte und die Definition der von der Geothermie unbeeinflussten Boden- und Grundwassertemperatur im urbanen Raum. Die Untersuchung dieser Unsicherheiten stellt einen weiteren Arbeitsbereich von EASyQuart dar.

Letztlich sind Erkundung und Monitoring eng miteinander verwoben, da die verlässliche Erkundung als Grundlage einer verlässlichen Vorhersage und dem Monitoring etwaiger Umweltauswirkungen dient.

---

## 3.2 Erkundung

Im Folgenden werden innovative Konzepte bei der geothermischen Erkundung anhand von ausgewählten Fallbeispielen vorgestellt. Die dabei verwendeten Erkundungstechnologien wurden standortbezogen ausgewählt. Durch eine angepasste Auswahl der Erkundungstechniken sind die Erkundungskonzepte jedoch auf andere Standorte übertragbar.

### 3.2.1 Erkundungskonzept Bestandssanierung, Fallbeispiel Köln-Junkersdorf

Im Zuge der Sanierung von Bestandsgebäuden sowie dem Neubau einzelner Wohngebäude vornehmlich im Zeitraum von 2010 bis 2015 wurde die Wärmeversorgung von 51 der rund 150 EFH in dem Quartier auf die Nutzung oberflächennaher Geothermie (insbesondere Nutzung von EWS zur Wärmeerzeugung) umgestellt. Der



**Abb. 3.1** Installierte Erdwärmeanlagen im Untersuchungsgebiet Köln-Junkersdorf aus [Vienken et al. \(2019\)](#)

Demonstrationsstandort ist in [Abb. 3.1](#) schematisch dargestellt. Hierbei ist anzumerken, dass es während der Sanierungs- bzw. Neubauphase zu keiner koordinierten geothermischen Erkundung oder geothermischen Entwicklung auf Quartierskala kam. Vielmehr erfolgte die Vorerkundung und Anlagenplanung grundstücksbezogen. Aufgrund der Größe der einzelnen Anlagen mit einer Leistung von < 30 kW wurde bei der Vorerkundung auf Literaturstudien bzw. Bohrprofile bereits abgeteufter Erdwärmesondenbohrungen zurückgegriffen. [Schelenz et al. \(2017\)](#) zeigen allerdings deutlich anhand eines Fallbeispiels aus der Region Leipzig, dass eine koordinierte, grundstücksübergreifende geothermische Erkundung erheblich zu einer ökologisch und ökonomisch nachhaltigen intensiven Nutzung Oberflächennaher Geothermie beitragen kann. Vorteile einer solchen Erkundung sind u. a. die Möglichkeit einer maßgeschneiderten Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen sowie der zuverlässigen Abschätzung induzierter Temperaturänderungen durch die Nutzung Oberflächennaher Geothermie (z. B. Kältefahnen) und Quantifizierung der Auswirkung auf die Wärmepumpeneffizienz bei hoher Anlagendichte. Vor diesem Hintergrund ist das folgende Erkundungskonzept als Ergänzung zur grundstücksbezogenen Erkundung im Bestand zu sehen. Das Ziel ist es, mit möglichst geringem finanziellem und technischem Aufwand eine geeignete Datengrundlage zu schaffen, wie sie für ein zielgerichtetes Monitoring und insbesondere für die modellbasierte Vorhersage bzw. Bewertung induzierter Umweltauswirkungen und deren Auswirkung auf die Anlageneffizienz benötigt wird. Für einen entsprechenden Bewertungsansatz siehe [Meng et al. \(2019\)](#). Eine Erhebung oberflächennaher geophysikalischer Daten war aufgrund der bereits bestehenden Bebauung nicht möglich und wurde wegen der ge-

ringen lateralen Variabilität im geologischen Schichtenaufbau in diesem Falle nicht benötigt. Relevante Faktoren bei der Auswahl des Standortes waren:

- Große Dichte von Anlagen zur Nutzung Oberflächennaher Geothermie,
- thermische Nutzung ausschließlich des quartären Grundwasserleiters bis in eine Tiefe von ca. 35 m unter Geländeoberkante (GOK),
- gute Erschließbarkeit dadurch, dass städtische Grünflächen als Lokationen für die Erkundungs Sondierungen und Installation der Grundwassermessstellen (GWM) genutzt werden konnten,
- vorwiegende Nutzung der Geothermie zu Heizzwecken (Abkühlung des Grundwassers während der Heizperiode), daher keine zusätzliche Effektüberlagerung durch Nutzung des Grundwassers zur Gebäudeklimatisierung im Sommer.

Hinweis: Das im Folgenden erläuterte Erkundungskonzept beruht auf Daten, die bereits 2013 erhoben wurden. Die verwendeten Methoden, insbesondere der Einsatz geringinvasiver Direct-Push-Sondiertechnik, waren zu diesem Zeitpunkt noch kein etablierter Standard in der geothermischen Erkundung – auch hinsichtlich der Verbreitung von Anbietern in Deutschland. Dies hat sich über die letzten Jahre jedoch stark verändert. Die Direct-Push-Technologie ist mittlerweile ein Standard in der hydrogeologischen Erkundung nicht- bzw. geringkonsolidierter Lockergesteine mit einer Erkundungstiefe bis ca. 40 m geworden und hat dadurch eine entsprechende Marktdurchdringung und Verfügbarkeit erreicht.

### **Vorerkundung auf Grundlage verfügbarer Fachinformationen**

Zunächst wurde anhand der hydrogeologischen Karte (siehe u. a. Geodatenportal Nordrhein-Westfalen (NRW), Geologischer Dienst NRW) sowie weiteren verfügbaren Fachinformationen (z. B. Fachinformationssystem ELWAS) die zu erwartende vorwiegende Grundwasserfließrichtung ermittelt und nach dem Vorhandensein von GWM im Bestand zur Durchführung von Voruntersuchungen recherchiert. Die Auswertung der Fachinformationen ergab eine Grundwasserfließrichtung in Richtung Osten. Ebenfalls wurde festgestellt, dass sich weder in dem Untersuchungsgebiet noch im näheren Umfeld aktive GWM im Bestand befinden und daher eigene Aufschlussarbeiten für die Erkundung und das Monitoring durchgeführt werden mussten.

Informationen zur Wärmeleitfähigkeit des oberflächennahen Untergrundes als ein wesentlicher Parameter zur Dimensionierung und Nutzung von Erdwärmesondenanlagen wurden über den „Geothermie in NRW – Standortcheck“ des Geologischen Dienstes NRW (<https://www.geothermie.nrw.de>) ermittelt. Für das Untersuchungsgebiet ergeben sich laut Standortcheck für eine Installationstiefe bis 40 m unter GOK geringe, d. h.  $0,5 - 0,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , bis mittlere ( $1,0 - 1,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) Wärmeleitfähigkeiten. Weitere Informationen über den geologischen Aufbau ergaben die Bohrprofile, die bei dem Abteufen der Erdwärmesondenbohrungen erstellt wurden. Aufgrund der insgesamt zu erwartenden geringen Wärmeleitfähigkeiten boten sich hier zusätzliche Untersuchungen zum besseren Verständnis und zur differenzierteren Betrachtung des geologischen Untergrundes und des hydrogeologischen Regimes an.

Bei allen Arbeiten mit invasiver Sondiertechnik, wie sie in diesem Projekt zur Installation von Temperaturmessstellen und Charakterisierung des oberflächennahen Untergrundes genutzt wurde, ist das Einholen zahlreicher Freigaben und Genehmigungen zwingend erforderlich, zumal die Untersuchungen zwischen dem Gebäudebestand durchgeführt wurden. Daher beinhalteten die Vorarbeiten u. a.:

- Festlegung geeigneter Untersuchungspunkte,
- Einholen von Leitungsfreigaben für alle Untersuchungspunkte (z. B. Strom, Wasser, Abwasser, Gas, Ferngas, Fernwärme und Medienträger wie Telefon, Kabel-TV, Internet),
- Überprüfung auf Kampfmittelverdacht bzw. Kampfmittelfreigabe durch die für die Kampfmittelbeseitigung verantwortliche Stelle (in diesem Fall der Kampfmittelbeseitigungsdienst),
- Einholen der notwendigen behördlichen Genehmigungen.

### **Detailerkundung**

Nach Festlegung und Freigabe der Untersuchungspunkte erfolgte die Detailerkundung mit folgenden Zielen:

- Erkundung des Aufbaus und der Mächtigkeit der quartären Schichtenfolge bis in eine Tiefe von ca. 35 m unter GOK (max. Installationstiefe der EWS am Standort),
- Ermittlung hydrogeologischer Parameter, darunter:
  - hydraulische Leitfähigkeit,
  - Ermittlung der Mächtigkeit der ungesättigten bzw. der grundwassergesättigten Zone des quartären Grundwasserleiters,
  - Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit, Ermittlung der von der Geothermienutzung unbeeinflussten Grundwassertemperatur,
- Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des geologischen Untergrundes.

Die Detailerkundung wurde an den geplanten Lokationen der Grundwassertemperaturmessstellen mittels Direct-Push-Technologie durchgeführt. Detaillierte Informationen zur Direct-Push-Technologie finden sich u. a. in [Dietrich und Leven \(2006\)](#), [McCall et al. \(2005\)](#) und [Leven et al. \(2011\)](#). Wesentliche Informationen daraus sind im Folgenden zusammengefasst. Direct Push beschreibt ein geringinvasives Sondierverfahren, bei dem ein Stahlhohlgestänge mittels Druck oder Einsatz eines Percussionshammers in den Untergrund eingebracht wird. Direct Push kann dabei zur Boden-, Grundwasser- oder Bodenluftprobenahme oder zur Installation von Grundwasser- oder Bodenluftmessstellen eingesetzt werden. Alternativ können Sensoren am Ende des Sondiergestänges angebracht werden. Hierdurch können quasi-kontinuierliche Vertikalprofile der hydrogeologischen, geotechnischen, geophysikalischen oder geochemischen Eigenschaft des Untergrundes erhoben werden. Bei Direct Push handelt es sich um ein materialverdrängendes Verfahren, d. h. im Gegensatz zur klassischen Bohrung wird beim Sondierfortschritt kein Bohrgut

gefördert. Im Folgenden werden die Erkundungsschritte und die dabei eingesetzten Direct-Push-Verfahren kurz erläutert.

### **Erkundung des Schichtaufbaus**

Für die geologische Erkundung wurden zunächst Bodenproben an ausgewählten Punkten entnommen und geologisch angesprochen. Für die Bodenprobenahme wurde das Geoprobe-Dual-Tube-Verfahren eingesetzt. Dabei können über eine Schutzverrohrung kontinuierlich Bodenproben in PVC-Linern entnommen werden. Aufgrund der kiesigen Untergrundverhältnisse, die die Eindringtiefe bei Direct-Push-Sondierungen erheblich beeinflussen können, wurde mit dem Geoprobe Dual-Tube 21 ein Verfahren mit möglichst geringem Durchmesser des Sondiergestänges (hier 54 mm Außendurchmesser) ausgewählt, um eine möglichst hohe Eindringtiefe zu erzielen. Aufgrund des reduzierten Außendurchmessers konnten somit nur Liner mit einem Durchmesser von 30 mm verwendet werden. Durch die Grobkiesanteile im Untergrund kann eine Beeinträchtigung der Bodenprobenahme (z. B. durch Zusetzen des Probenehmers) nicht ausgeschlossen werden. Dies kann wiederum zu Kernverlust und ungenauer Zuordnung von Schichtgrenzen innerhalb eines Liners führen. Darüber hinaus kann es aufgrund des dynamischen Sondiervorgangs zu Setzungen innerhalb der Liner kommen. Folgende Erkundungstiefen wurden erreicht: Ansatzpunkt 2 = 24,20 m unter GOK, Ansatzpunkt 5 = 21,50 m unter GOK, Ansatzpunkt 6 = 24,12 m unter GOK; alle Sondierungen wurden abgebrochen, nachdem kein weiterer Sondierfortschritt festgestellt wurde.

Die ermittelte Schichtenfolge besteht im Wesentlichen aus einer 6 bis 10 m mächtigen, feinsandigen, gelegentlich tonigen und schwachkiesigen Schluffschicht gefolgt von den sand- und kiesdominierten Ablagerungen der Mittelterrasse. Diese bestehen aus schluffigem bis feinsandigem Grobsand und Mittelkies mit vereinzelt Schlufflinsen. Mit zunehmender Tiefe steigt der Grobkornanteil, mit sandigem Mittelkies als Hauptbestandteil ab einer Tiefe von 19 bis 21 m. Als Besonderheit wurde festgestellt, dass die gewonnenen Proben aus der ungesättigten Zone sehr trocken und zuweilen sehr verfestigt wirken. Es kann nicht abschließend geklärt werden, ob die Proben eine tatsächlich sehr geringe Bodenfeuchte in der ungesättigten Zone widerspiegeln oder ob es aufgrund der entstehenden Reibungswärme bei dem insgesamt sehr geringen Sondierfortschritt zu einem Austrocknen der Proben während der Probenahme kam.

### **Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des geologischen Untergrundes**

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an gewonnenen Proben eignen sich Nadelsonden. Aufgrund der gestörten Probenahme sowie der Verfestigung des Materials, die gegebenenfalls auf die Hitzeentwicklung bei der Probenahme selbst zurückzuführen ist, wurde von Messungen an dem Material abgesehen. Zumal sich eine relevante Abhängigkeit zwischen Wassergehalt und Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Proben bei Testmessungen ergab und der Wassergehalt nicht eindeutig bestimmt werden konnte. Hier müssten zur Reduzierung von Unsicherheiten weitere Literaturwerte recherchiert oder, idealerweise, *In-situ*-Messungen an ausgewählten Stellen z. B. über den TRT oder den Enhanced-TRT durchgeführt werden. Aufgrund der zu erwarten-



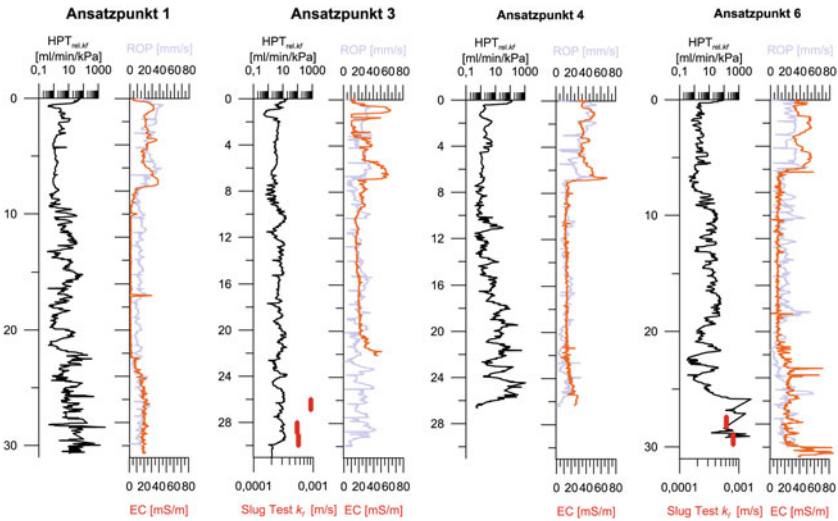
den geringen Wärmeleitfähigkeiten wurde der Fokus der weiteren Erkundung auf das hydrogeologische Regime zur Berücksichtigung eines möglichen konvektiven Wärmetransportes über fließendes Grundwasser ausgerichtet.

### **Ermittlung hydrogeologischer Parameter**

Die Erkundung der hydrogeologischen Eigenschaften des geologischen Untergrundes erfolgte in verschiedenen Schritten, die im Folgenden erläutert werden.

#### **Hydraulic Profiling**

In einem ersten Schritt wurde das Hydraulic Profiling Tool (HPT) zur hydrostratigraphischen Charakterisierung des Untergrundes und zur Ermittlung der Mächtigkeit der Schluffüberdeckung eingesetzt. Dafür wird eine Sensorsonde mit einer bevorzugten Sondiergeschwindigkeit von 2 cm/s in den Untergrund getrieben. Über einen Filter an der Seite der Messsonde wird kontinuierlich Wasser (ca. 200 ml/min) in den Untergrund injiziert. Zeitgleich wird in der Höhe des Injektionsfilters der Wasserdruck gemessen. Bereiche höherer hydraulischer Leitfähigkeit zeichnen sich daher durch hohe Injektionsraten und einen geringen Injektionsdruck aus. Bereiche mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit hingegen werden durch geringe Durchflussraten und hohe Injektionsdrücke charakterisiert. Aus dem Verhältnis von Durchfluss zu Injektionsdruck ( $HPT_{rel.k_f}$ ) können daher im gemessenen Vertikalprofil Bereiche ähnlicher oder unterschiedlicher hydraulischer Leitfähigkeiten unterschieden werden. Dieses Tool ist für den Einsatz im grundwassergesättigten Bereich vorgesehen. Allerdings kann die Verteilung der Messwerte auch dazu genutzt werden, um qualitative Aussagen über die Heterogenität der Schichtenfolge im ungesättigten Bereich zu treffen. Eine weitere Anwendung ist bei Kenntnis des Luftdrucks die Approximation des Grundwasserstandes schon kurz nach der Sondierung. Diese Abschätzung zum Zeitpunkt der Sondierung (vergleichbar mit einer Stichtagsmessung) ist möglich, ohne eine GWM zu errichten. Zusätzlich kann über seitlich angebrachte Elektroden an der Messsonde die elektrische Leitfähigkeit des Bodens während des Vortriebs gemessen werden – dies dient in diesem Falle primär der Ermittlung der Mächtigkeit der Schluffüberdeckung. Die elektrische Leitfähigkeit ist dabei u. a. von der Bodenart, dem Tongehalt, der Porosität und der elektrischen Leitfähigkeit des Porenwassers abhängig. Unter nicht salzhaltigen Bedingungen korrespondiert eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit sehr häufig mit der Zunahme des Tonmineralgehalts im Untergrund. Im Untersuchungsgebiet wurden HPT-Sondierungen (inkl. Messung der elektrischen Leitfähigkeit) an den Ansatzpunkten 1, 3, 4 und 6 durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 3.2 dargestellt. Insgesamt bestätigt sich das Bild der Bodenprobenahme, indem zunächst eine Deckschicht von variabler Mächtigkeit (bis ca. 8 m) mit erhöhter elektrischer Leitfähigkeit identifiziert werden kann, die im Liegenden von heterogenen klastischen Sedimenten abgelöst werden. Einzelne Peaks der elektrischen Leitfähigkeit deuten auf isolierte Tonlinsen. Die Kiesschicht zeichnet sich durch eine geringe elektrische Leitfähigkeit aus. Sehr geringe elektrische Leitfähigkeiten können zudem durch eine schlechte elektrische Ankopplung der Elektroden an das Bodenmaterial im ungesättigten Bereich verursacht werden. An Punkt 6 scheint die Quartärbasis entgegen der vorliegenden



**Abb. 3.2** Übersicht der Direct-Push-Ergebnisse am Demonstrationsstandort

Schichtverzeichnisse bereits bei 30 m unter GOK erreicht und die Sondierung wurde gestoppt. Der besondere Vorteil der Direct-Push-Sondiertechnik gegenüber klassischen Bohrungen ist die größere Effizienz, d. h. Untersuchung von mehr Punkten in vergleichbarer Zeit sowie die direkte Anzeige der *In-situ*-Messwerte. So kann ein Durchdrören auch geringmächtiger Trennschichten effektiv verhindert werden. Weitere Informationen zu dem eingesetzten HPT-Verfahren finden sich u. a. in [McCall et al. \(2009\)](#) sowie [McCall und Christy \(2020\)](#).

### Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit mittels Slug-Test

Zur Messung absoluter Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) wurden pneumatische Slug-Tests auf Grundlage der HPT-Ergebnisse in ausgewählten Tiefen durchgeführt. Für die Durchführung dieser Tests wurden temporäre GWM mit einer Filterlänge von 1,06 m mittels Direct Push installiert. Bei dieser Variante des klassischen Slug-and-Bail-Tests wird die erzwungene Grundwasserspiegeländerung in der betrachteten Messstelle mittels Druckluftbeaufschlagung herbeigeführt. Nachdem sich der Wasserstand in der Messstelle entsprechend der Druckbeaufschlagung angepasst hat, wird die Druckluft schlagartig abgelassen und der Wiederanstieg des Wassers in der Messstelle über einen Druckaufnehmer aufgezeichnet. Über eine Kurvenanpassung (siehe [Butler \(1998\)](#); [Zlotnik und McGuire \(1998\)](#)) können somit absolute  $k_f$ -Werte, die jeweils einen integralen Messwert des Durchlässigkeitsbeiwertes über die Filterlänge von 1,06 m darstellen, erhoben werden. Aus Qualitätssicherungsgründen wurden pro Tiefe Redundanzmessungen mit verschiedener Druckbeaufschlagung ausgeführt. Slug-Tests wurden in insgesamt fünf Tiefen an den Sondieransatzpunkten 3 und 6 durchgeführt. Die erhobenen Messwerte variieren dabei nur im geringen Umfang zwischen  $9,13 \cdot 10^{-4}$  m/s und  $5,37 \cdot 10^{-4}$  m/s.

### Messstelleninstallation

Im Anschluss an die Vorerkundung wurden sieben GWM installiert. Die nach der Installation durchgeführten Stichtagsmessungen belegen eine von West nach Ost gerichtete Grundwasserfließrichtung. Basierend auf den durchgeführten Slug-Tests wurde ein durchschnittlicher Durchlässigkeitsbeiwert von  $6,9 \cdot 10^{-4}$  m/s ermittelt. Bei einem durchschnittlichen hydraulischen Gradienten von  $6 \cdot 10^{-4}$  (basierend auf mehreren Stichtagsmessungen) liegt die Grundwasserfließgeschwindigkeit bei ca. 13 m/a in Richtung Osten. Die Ermittlung der unbeeinflussten Grundwassertemperatur erfolgte dann im Rahmen des Grundwassertemperaturmonitorings. Zusätzliche Stichtagsmessungen wären auch über die temporären GWM zur Durchführung der pneumatischen Slug-Tests möglich gewesen. Aufgrund des geringen Innendurchmessers der temporären GWM war der Einbau der vorgesehenen Messtechnik nicht möglich, jedoch Messungen mit einem Kabellichtlot mit Temperaturfühler mit reduziertem Durchmesser. Die temporären Messstellen hatten eine Standzeit von ca. einem Tag und wurden mit geringem Aufwand (Zeitaufwand ca. 1,5 h) rückstandslos wieder entfernt. In diesem Falle erfolgte die Installation der Grundwassertemperaturmessstellen zeitnah nach Durchführung der Slug-Tests, sodass auf eine Stichtagsmessung in den temporären GWM verzichtet wurde.

Insgesamt zeigt sich, dass das angewandte Erkundungskonzept gut geeignet ist, um im Nachgang der grundstücksbezogenen geothermischen Erkundung weitere Daten beispielsweise für eine grundstücksübergreifende Modellierung möglicher Umweltauswirkungen zu liefern. Dabei liegen die Vorteile der Direct Push basierten *In-situ*-Messtechnik in ihrer vertikalen Auflösung, der schnellen Verfügbarkeit von Daten (z. B. bei HPT-Sondierungen liegen die Ergebnisse in beinahe Echtzeit vor) und deren Effizienz. Deutlich werden aber auch die herausfordernden Bedingungen für die Direct-Push-Sondiertechnik am Standort, die in einigen Fällen zu einem vorzeitigen Sondierabbruch führten. Werden Vor- und Nachteile abgewogen, dominieren aber doch die hier erzielte Datenqualität des Erkundungskonzeptes z. B. gegenüber der Durchführung klassischer Bohrungen.

### 3.2.2 Erkundungskonzept Neuerschließung

Bei dem in diesem Abschnitt betrachteten Demonstrationsstandort handelt es sich um eine landwirtschaftlich genutzte Fläche mit einer Größe von ca. 430 m x 760 m zwischen Bingen und Mainz in ca. 1000 m Entfernung zum Rhein. Aufgrund der geologischen und hydrogeologischen Standortbedingungen erscheinen offene Systeme oder Erdwärmekollektoren als besonders geeignet zur Nutzung Oberflächennaher Geothermie am Standort, da zunächst von einem geringen Installationsaufwand bei idealerweise hohem thermischen Entzugspotenzial auszugehen ist. Im Rahmen der Bewertung der Machbarkeit beim Einsatz offener Systeme müssen zunächst u. a. die Eigenschaften des Grundwasserleiters, d. h. die grundwassergesättigte Mächtigkeit sowie die hydraulische Leitfähigkeit und deren räumliche Variabilität charakterisiert werden. Die räumliche Charakterisierung ist in diesem Falle besonders relevant, da der Grundwasserleiter in flachen Tiefen von einer grundwasserstauenden Schicht im

Liegenden begrenzt wird, die nicht durchörtert werden darf. In Bezug auf die Nutzung von Erdwärmekollektoren ist die Kenntnis über eine etwaige räumliche Variabilität der Wärmeleitfähigkeit in den oberflächennahen Schichten sowie Informationen über den Grundwasserflurabstand wichtig. Ziele der durchgeführten Erkundung, wie sie im Rahmen einer Machbarkeitsstudie geeignet wäre, sind daher:

- Flächenhafte Ermittlung der Mächtigkeit des Grundwasserleiters, inkl. der Ermittlung der Mächtigkeit der ungesättigten Zone,
- flächenhafte Ermittlung der Tiefenlage der Oberkante des Grundwasserstauers,
- hydraulische Charakterisierung und *In-situ*-Messung der hydraulischen Leitfähigkeit im Bereich des Grundwasserleiters.

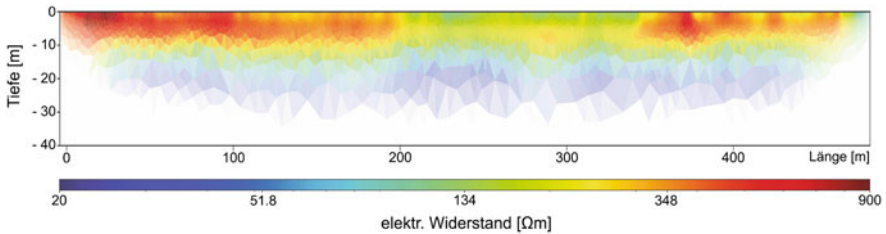
Die Herausforderung bei der Charakterisierung der Fläche liegt vor allem in deren Dimension mit einer Größe von rund 33 ha. Daher wurde an diesem Demonstrationsstandort der bereits zuvor kurz erläuterte Ansatz aus der kombinierten Anwendung von oberflächengeophysikalischen Messungen und vertikal hochauflösenden Direct-Push-Sondierungen angewendet.

Als Methode der geophysikalischen Vorerkundung wurde die elektrische Widerstandstomografie genutzt. Bei diesem Verfahren wird dem Untergrund mittels Elektroden, die entlang von Transekten positioniert werden, ein elektrisches Feld aufgeprägt (siehe u. a. Knödel et al. (2005)). Über die Stärke des eingespeisten Stroms und über die an den Elektroden gemessenen Spannung kann die Verteilung des elektrischen Widerstandes entlang des Messtransektes berechnet werden. Unter nicht salzhaltigen Bedingungen korrespondiert eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit sehr häufig mit der Zunahme des Tonmineralgehalts im Untergrund. Messungen entlang der folgenden Transekte wurden durchgeführt:

- Zwei kombinierte Transekte im Norden der Untersuchungsfläche mit Ost-West-Ausrichtung mit einer Gesamtlänge von 656 m,
- ein Transekt mit West-Ost-Ausrichtung mit einer Länge von 516 m im Süden der Fläche,
- ein Nord-Süd verlaufendes 446 m langes Transekt über das Zentrum der Fläche.

Der Elektrodenabstand (Messung in Wenner-Konfiguration) betrug bei den Messungen 2 m. Abb. reffig:ERTspsIng zeigt die Verteilung der erfassten elektrischen Widerstände entlang des West-Ost orientierten Profils im Süden der Untersuchungsfläche.

Aus Abb. 3.3 wird deutlich, dass eine ca. 8–10 m mächtige Schicht erfasst wird, die sich durch hohe gemessene Widerstände auszeichnet. Dies deutet auf den Sand- und Kiesgrundwasserleiter hin, der von Material mit geringen Widerständen, d. h. hohen elektrischen Leitfähigkeiten, im Liegenden begrenzt wird. Aus den Messungen ist zudem eine laterale Veränderung der Verteilung der elektrischen Widerstände im Bereich von 200 m und 350 m entlang des Transektes erkennbar. In diesem Bereich nehmen die gemessenen Widerstände ab. Auf Grundlage der Geoelektrikmessungen wurden zehn Sondieransatzpunkte entlang der gemessenen Transekte festgelegt.



**Abb. 3.3** Geoelektrikprofil mit West-Ost-Ausrichtung im Süden der Untersuchungsfläche

An diesen Punkten wurden Untersuchungen mit dem HPT und Bodenprobenahmen zur direkten Erfassung weiterer petrophysikalischer und hydrogeologischer Parameter durchgeführt. Informationen zur Funktionsweise und Quellen zu weiterführenden Informationen zum HPT sind im Erkundungskonzept Köln-Junkersdorf im Abschn. 3.2.1 aufgeführt.

Mittels des HPT konnte sehr effizient die Basis des Grundwasserleiters dezimetergenau erfasst werden – ohne den Stauer zu durchhörern. Dabei dauerte eine Sondierung am Standort etwa 35 min. Die Ergebnisse der verschiedenen Sondierungen sind in Abb. 3.4 dargestellt. Dabei wurden die Profile farblich entsprechend der hydrostratigrafischen Eigenschaften gekennzeichnet.

Aus der Abbildung wird deutlich, dass insbesondere die grundwassergesättigte Mächtigkeit durch Variationen in der Höhenlage des Grundwasserstauers zwischen 4,3 m und 7,3 m variiert. Ebenfalls variiert die Mächtigkeit der ungesättigten Zone aufgrund der Geländemorphologie zwischen 1,5 m und 3,6 m. Abb. 3.5 gibt eine beispielhafte Darstellung der auf den Raum interpolierten Messwerte.

Die am Standort gemessenen hydraulischen Leitfähigkeiten weisen mit Werten von  $1,2 \cdot 10^{-3}$  m/s bis  $3,12 \cdot 10^{-4}$  m/s zunächst auf hydraulisch gut leitfähige Sedimente hin. Auf Grundlage der gewonnenen Ergebnisse erscheint die grundwassergesättigte Mächtigkeit im obersten Grundwasserleiter insbesondere im Nordwesten der Untersuchungsfläche mit rund 4 m jedoch als nicht vorteilhaft für eine geothermische Quartiersversorgung – insbesondere vor dem Hintergrund zusätzlicher etwaiger saisonaler Schwankungen des Grundwasserspiegels. Wärmeleitfähigkeiten wurden an insgesamt 130 Proben gemessen, die an fünf Ansatzpunkten bis in eine maximale Tiefe von 10,5 m unter GOK entnommen wurden. 23 dieser Proben entstammen dabei aus Tiefen von 0 bis 3,0 m unter GOK, einem für Erdwärmekollektoren relevanten Tiefenbereich. Die Wärmeleitfähigkeit lag dabei im Mittel bei  $1,84 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  wobei die Werte zwischen  $2,47$  und  $1,22 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  als erfasste Maximal- bzw. Minimalwerte variieren. Variationen in der Wärmeleitfähigkeit ergeben sich hierbei sowohl durch Materialunterschiede als auch durch Unterschiede im Wassergehalt. Insgesamt liegen die Werte in einem typischen Bereich für feuchte Lockergesteine (siehe u. a. Prinz und Strauß (2018)). Auf Grundlage dieser Werte kann zusätzlich die Machbarkeit für den Einsatz von Erdwärmekollektoren in Abhängigkeit eines bestimmten Nutzungsszenarios geprüft werden.

Insgesamt erwies sich das Erkundungskonzept im Rahmen einer Machbarkeitsstudie als sehr zielführend. Innerhalb von vier Tagen konnten die relevanten Daten

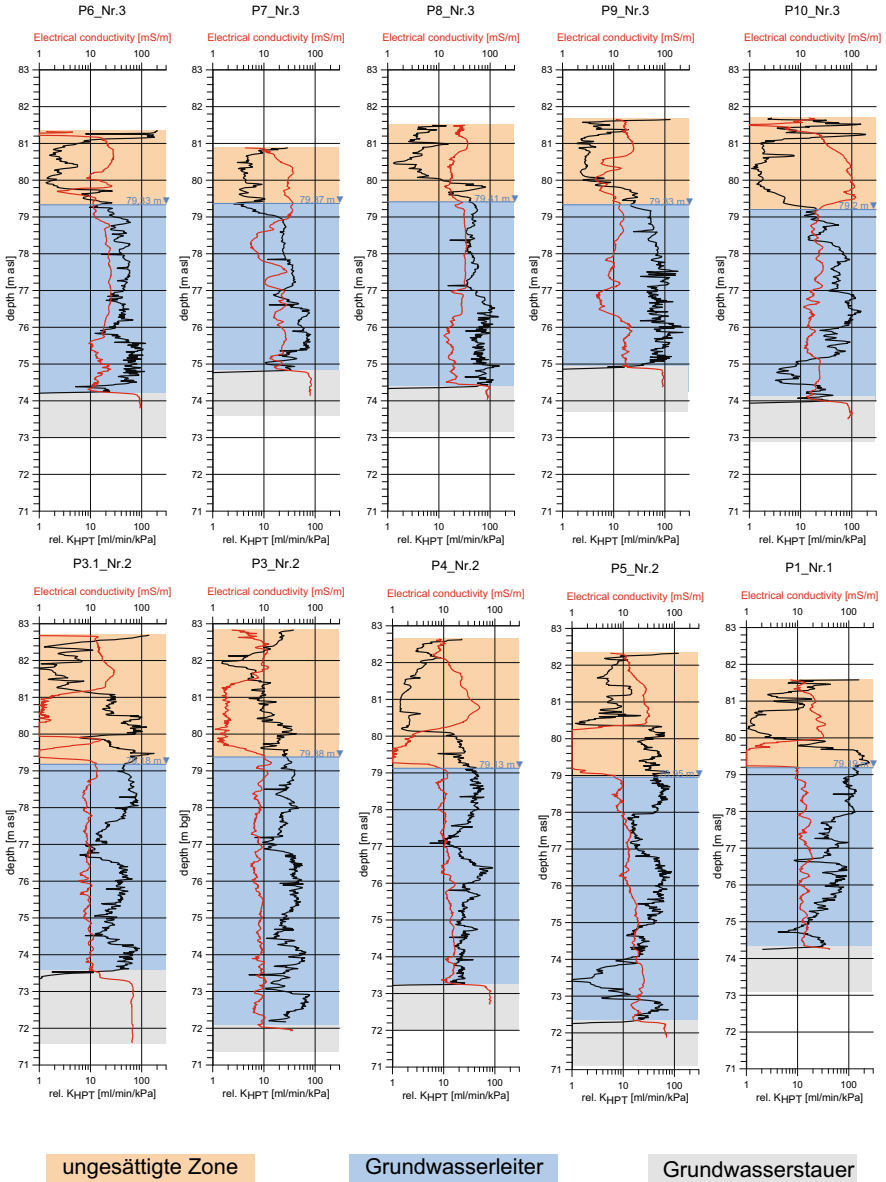
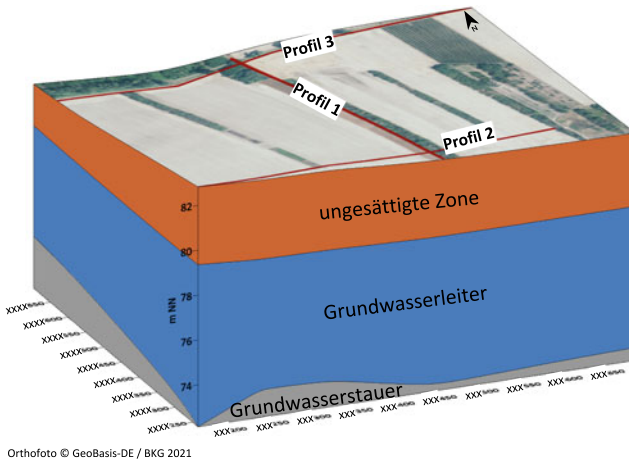


Abb. 3.4 Ergebnisse und Interpretation der Direct Push-Untersuchungen mittels HPT



Orthofoto © GeoBasis-DE / BKG 2021

**Abb. 3.5** Abgeleitetes konzeptionelles Modell

erhoben und teilweise noch vor Ort ausgewertet werden. Während die Geoelektromessungen zunächst für die Festlegung der Sondieransatzpunkte genutzt wurden, konnten diese jedoch keine Detailinformationen zur weiteren Verbesserung des konzeptionellen Modells in diesem Fall liefern. Hier erwiesen sich die vertikal hochauflösenden Direct-Push-Sondierungen unter Einsatz des HPT als sehr vorteilhaft. Als sehr zeitintensiv erwies sich die Messung der Wärmeleitfähigkeit an dem Probenmaterial. Aus Gründen der Qualitätssicherung wurden sechs Einzelmessungen pro Probe durchgeführt. Der benötigte Zeitaufwand belegt daher, wie wichtig es ist, über die Kombination von oberflächengeophysikalischen Messungen und vertikal hochaufgelösten Profilen gezielte Probenahmebereiche zu identifizieren, anstatt Probenmaterial rein auf Grundlage von Probenahme-strategien ohne weiteres Detailwissen am Standort zu generieren.

### 3.3 Weiterentwicklung von Erkundungsmethoden

Für die Dimensionierung einer geothermischen Anlage werden standortspezifische Angaben über die Untergrundeigenschaften benötigt, um eine Anlage optimal zu kalkulieren. Es besteht zum einen die Möglichkeit, anhand geologischer Karten und bestehenden Bohrungen die relevanten Untergrundeigenschaften abzuschätzen oder es können über eine *In-situ*-Messung am Standort die Untergrundparameter gemessen werden.

Hierbei gibt es mehrere Möglichkeiten, um die Untergrundeigenschaften zu ermitteln, wobei sich der TRT als ein international anerkanntes Standardverfahren zur Bestimmung der geothermischen Untergrundeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Bohrlochwiderstand und Untergrundtemperatur) etabliert hat. Dabei wird eine fertig ausgebaute (und im späteren Sondenfeld nutzbare) EWS mit einem definierten

Wärmeeintrag über einen Zeitraum von 48 bis 72 h thermisch belastet und der Untergrund zu einer Temperaturantwort („response“) angeregt. Diese Reaktion ist charakteristisch für die dort anstehenden Gesteine und lässt die Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit im Umfeld der Sonde zu. Die theoretischen Grundlagen des TRT wurden in den 1980er-Jahren aus der Thermodynamik abgeleitet und für die Bestimmung von Wärmeleitfähigkeiten in Erdwärmebohrungen angepasst. Seit Mitte der 1990er-Jahre stehen mobile Messeinrichtungen für den Baustelleneinsatz zur Verfügung. Ein TRT-Messgerät besteht im Wesentlichen aus einer Heizeinrichtung, einer Umwälzpumpe sowie einer Datenerfassung und Steuerung. Da der Querschnitt einer EWS gegenüber der Länge zu vernachlässigen ist, kann die Auswertung anhand der Kelvin’schen Linienquelle (siehe [Carslaw und Jaeger \(1959\)](#)) erfolgen. Demnach zeigt der Untergrund bei Eintrag einer konstanten Wärmemenge zu Beginn ein typisches Aufheizerhalten und zu späten Zeiten einen konstanten Temperaturanstieg. Die Auswertung der zeitlichen Temperaturentwicklung ermöglicht die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Umfeld des Bohrloches.

Die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes ist bestimmt durch die Geschwindigkeit, mit der sich die Erwärmung ausbreitet. Die Wärmeleitfähigkeit ist das Vermögen eines Stoffes, Energie in Form von Wärme zu transportieren. Die effektive Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_s$  liefert einen integralen Wert der Wärmeleitfähigkeit über die gesamte Bohrung. Die Berechnung erfolgt nach der Theorie der Kelvin’schen Linienquelle. Der thermische Bohrlochwiderstand  $R_b$  beschreibt den Wärmeübergang zwischen dem Fluid in der Sonde und der Bohrlochwand. Die Ermittlung ist ebenfalls aus der Kelvin’schen Linienquellentheorie abzuleiten. Der thermische Bohrlochwiderstand ermöglicht eine qualitative Aussage zur Güte der Anbindung der EWS an das Gebirge. Daraus ergeben sich einerseits Eingangsparameter für Simulationsprogramme zum thermischen Verhalten von EWS und andererseits Hinweise auf die Qualität der Hinterfüllung.

Da mithilfe von geothermischen Testarbeiten die standortspezifischen Untergrundeigenschaften bestimmt werden können, welche einen signifikanten Einfluss auf die Berechnung und Dimensionierung einer geothermischen Anlage besitzen, bedarf es eines Testgeräts, das die hohen Anforderungen an die Messung der vorangegangenen Parameter erfüllt. Im Zuge des Vorhabens wurde deshalb ein Testgerät entwickelt und gebaut, das den Anforderungen der VDI 4640 Blatt 5 entspricht. Mit dem Testgerät können sowohl an Einfach-U- als auch an Doppel-U-Sonden geothermische Testarbeiten durchgeführt werden, da innerhalb des Geräts jeweils zwei separate Vor- bzw. Rücklaufstränge vorhanden sind. Über zwei Wärmemengenzähler im Vorlauf können des Weiteren die Durchflussrate, die eingetragene Wärmemenge sowie die Temperatur der jeweiligen Stränge erfasst werden. Im Rücklauf wird über Temperatursensoren die Rücklauftemperatur gemessen. Durch Strangreguliventile können die einzelnen Stränge hydraulisch abgeglichen werden, sodass beide Sonden gleichmäßig durchströmt und thermisch belastet werden (bei Doppel-U-Sonden). Das Gerät besitzt insgesamt drei Heizstufen (3 kW, 6 kW und 9 kW) sowie einen Durchsatzregler, um in Abhängigkeit der standortspezifischen Sonden- und Standortcharakteristik (Sondentyp, Sondentiefe, Schichtenabfolge, Grundwasser) eine optimale Einstellung für die Testarbeiten zu generieren.



Zur Kontrolle der laufenden Messungen sowie zum Auslesen der aufgezeichneten Daten kann über einen Remote Acces auf das Gerät zugegriffen werden. Dies ermöglicht es zeitnah, bei Störungen erste Informationen über das aufgetretene Problem zu erhalten, sowie, wenn möglich, das Problem zu beheben, sodass die Messung fortgeführt werden kann. Des Weiteren kann geprüft werden, ob, nach der Mindestdauer von 48 h für die Durchführung des TRT, eine vorzeitige Auswertung der Messung möglich ist.

Die Funktionalität sowie die Messergebnisse des neu gebauten Testgeräts wurde an einer Testsonde der geoENERGIE Konzept GmbH ausgiebig geprüft und untersucht. Die Testsonde befindet sich am Firmenstandort in Freiberg und ist eine Doppel-U-Sonde mit einer Tiefe von 100 m. Die Messungen wurden mit alten Messungen (mit Testgeräten der geoENERGIE Konzept GmbH) verglichen und hierbei konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse der bisherigen Messungen mit dem neuen Testgerät reproduzierbar bzw. vergleichbar sind. Im Laufe des Projektes wurde das neue Testgerät durch den Projektpartner geoENERGIE Konzept GmbH intensiv geprüft, um zum einen die Einsatzfähigkeit nachzuweisen und zum anderen um bauliche Fehler zu finden, die einen Einfluss auf die Messergebnisse haben. So wurden Komponenten teilweise ausgetauscht bzw. angepasst, um das Gerät für einen zuverlässigen Baustelleneinsatz zu optimieren. In den ersten Messungen konnte verifiziert werden, dass die Temperaturentwicklung innerhalb des Geräts, aufgrund der guten Isolierung der Leitung, einen sehr geringfügigen Einfluss auf die Temperaturentwicklung im System und somit auf die Messwerte besitzt. Die vorhandene Luftkühlung sowie die Möglichkeit einer Kühlung mit einem Klimagerät können somit als praxistauglich bezeichnet werden. Im Winter ist der Einfluss etwas stärker ausgeprägt als im Sommer. In den bisherigen Messungen hat sich zudem gezeigt, dass eine konstante Stromzufuhr/Spannung wichtig ist, da es sonst zu einem Leistungsabfall bei der Heizpatrone kommt, welche ein kurzfristiges Absinken der Vorlauftemperatur bewirkt. In der Auswertung bewirken diese minimalen Schwankungen kein größeres Problem, jedoch ist ein konstanter Wärmeeintrag in den Untergrund wünschenswert. Aus diesem Grund soll das Gerät dahingehend optimiert werden, dass kurzfristige Spannungsschwankungen abgefedert werden können und eine konstante Leistung gewährleistet werden kann. Diese Spannungsschwankungen sind abhängig vom (Bau-)Stromnetz und weisen auch eine deutliche Variation innerhalb eines Tages auf.

Nach Optimierung des bisherigen Geräts ist dieses im Einklang mit den bisherigen Richtlinien und stellt ein wichtiges Planungsinstrument bei der Dimensionierung von geothermischen Systemen in Quartieren und im Allgemeinen dar. Das Gerät ist des Weiteren eine deutliche Weiterentwicklung der bisherigen Testgeräte des Projektpartners geoENERGIE Konzept GmbH und kann somit als wertvolle Ergänzung im Rahmen eines Erkundungskonzeptes angesehen werden. Die neuen Erkenntnisse werden in den Bau weiterer TRT-Geräte fließen, um eine Verwertung der Projektergebnisse gewährleisten zu können.

### 3.4 Monitoring

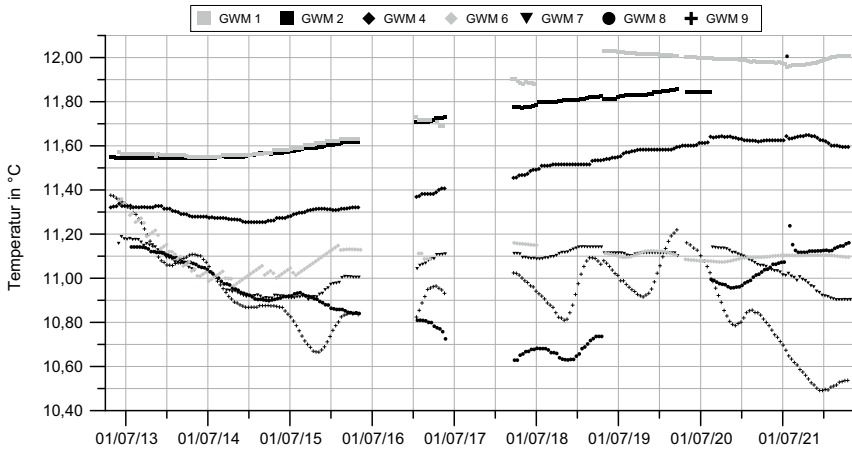
Die Beobachtung der Entwicklung von Boden- und Grundwassertemperaturen im Zusammenhang mit der Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen erlaubt die Bewertung potenzieller Umweltauswirkungen sowie der ökonomischen Effizienz geothermischer Anlagen. Grundwassertemperaturdaten sind daher ein wichtiger Indikator für eine dauerhaft nachhaltige Nutzung Oberflächennaher Geothermie.

Im Rahmen von EASyQuart wurden technische Aspekte von Monitoringstrategien untersucht und die Repräsentativität gemessener Temperaturdaten bewertet sowie die dabei relevanten Einflussfaktoren identifiziert. Dabei standen die besonderen Herausforderungen im Fokus, welche mit dem Grundwassertemperaturmonitoring auf Quartiersebene einhergehen.

#### 3.4.1 Langzeitmonitoring am Fallbeispiel Köln-Junkersdorf

Für das in Abschn. 3.2.1 vorgestellte Wohnquartier besteht seit 2013 ein intensives Langzeitmonitoring (siehe [Meng et al. \(2019\)](#); [Vienken et al. \(2019\)](#)), das im Rahmen von EASyQuart fortgeführt wurde. [Abb. 3.1](#) zeigt eine Übersicht des Untersuchungsgebiets und die Lokationen der sieben GWM, welche zum Zweck des Grundwassertemperaturmonitorings installiert wurden. Zwei der Messstellen liegen im Anstrombereich (GWM 1 und GWM 2), zwei innerhalb des Wohngebietes (GWM 4 und GWM 6) und drei im Abstrombereich (GWM 7, GWM 8 und GWM 9). Die Tiefe der Messstellen beträgt ca. 30 m mit Ausnahme der GWM 4 mit einer technisch bedingten Installationstiefe von 25,8 m. Die GWM sind über den erschlossenen grundwassergesättigten Bereich vollständig verfiltert. Der Grundwasserspiegel im Untersuchungsgebiet lag zu Beginn des Monitorings zwischen 21 und 23 m unter GOK und variierte über den gesamten Untersuchungszeitraum um ca. 0,7 m. Innerhalb der Messstellen wurden je fünf Temperaturlogger zwischen 22,5 und 29,5 m unter GOK zur quasi-kontinuierlichen Erfassung der Grundwassertemperaturen installiert, Ausnahme bildet wiederum die GWM 4 mit nur vier Loggern in den Tiefen zwischen 22,5 und 25,2 m unter GOK. [Abb. 3.6](#) zeigt die im Laufe des Untersuchungszeitraums gewonnenen und über die Grundwassermächtigkeit gemittelten Temperaturdaten (weitere Informationen zur Datenbearbeitung finden sich unter [Vienken et al. \(2019\)](#)).

Zu Beginn der Untersuchung 2013 lagen die Grundwassertemperaturen in allen Messstellen relativ nah beieinander. Der maximale Temperaturunterschied betrug zu diesem Zeitpunkt 0,4 K. Mit voranschreitender geothermischer Nutzung kam es zu einem zunehmenden Unterschied zwischen den An- und Abstromtemperaturen. Dies wird zunächst durch eine deutliche Verringerung der Abstromtemperaturen in den ersten beiden Jahren des Monitorings, gefolgt von einer Erhöhung der Anstromtemperaturen bei sich stabilisierenden Abstromtemperaturen bedingt. Eine Ausnahme hiervon stellt die Temperaturentwicklung in GWM 9 dar, welche einen Verlauf mit starken saisonalen Schwankungen aufweist. Die Ursache ist nicht eindeutig zu klären, die Messstelle liegt jedoch im direkten Einflussbereich eines der wenigen



**Abb. 3.6** Grundwassertemperaturen am Standort Köln-Junkersdorf von 2013 bis 2022, modifiziert nach [Vienken et al. \(2019\)](#)

offenen geothermischen Systeme im Untersuchungsgebiet. Die (relative) Abnahme der gemessenen Grundwassertemperaturen im Abstrom sind ein deutliches Indiz für die Auswirkungen der intensiven geothermischen Nutzung auf Quartiersebene.

Insbesondere die im Zeitraum von EASyQuart gewonnenen Daten weisen darauf hin, dass die Grundwassertemperaturen im Untersuchungsgebiet neben der thermischen Nutzung auch von anderen Faktoren beeinflusst werden. Zum einen zeigt sich dies durch den bereits erwähnten Anstieg der Grundwassertemperaturen im Anstrombereich; zum anderen zeigen die Temperaturverläufe in den Abstrommessstellen GWM 7, GWM 8 und GWM 9 ab 2017 ein ausgeprägtes nicht vergleichbares individuelles Verhalten.

Die gewonnenen Daten stellen einen wertvollen Referenzdatensatz für die Quantifizierung von Langzeitauswirkungen der intensiven Nutzung Oberflächennaher Geothermie auf Quartiersebene dar. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, wie wichtig die kritische Betrachtung von Monitoringdaten und deren Repräsentativität für die Bewertung tatsächlicher Temperaturveränderungen durch die intensive Nutzung Oberflächennaher Geothermie ist.

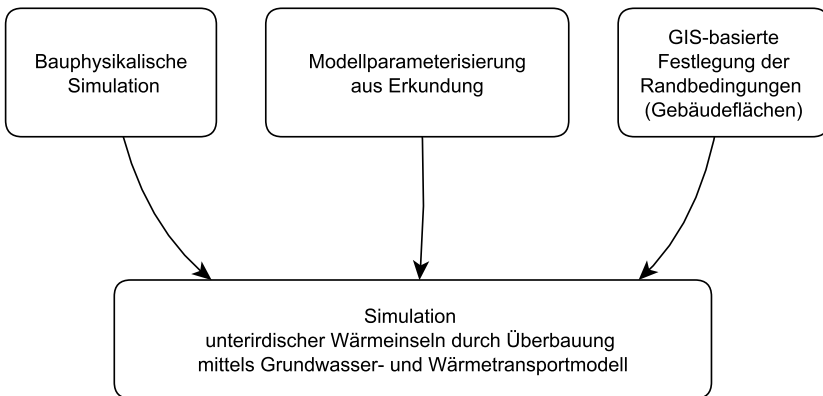
### 3.4.2 Beeinflussungen von Boden- und Grundwassertemperaturen auf Quartiersebene

Wie bereits in Abschn. 1.4 dargestellt, unterliegt das unterirdische Temperaturregime dicht besiedelter Räume einer Vielzahl von Einflüssen, welche in der Regel die Erhöhung der Untergrundtemperaturen im Vergleich zur ländlichen Umgebung hervorrufen ([Menberg et al. 2013](#); [Balke 1974](#)). Für eine zuverlässige Bewertung der Auswirkungen der geothermischen Untergrundnutzung muss diese von anderen

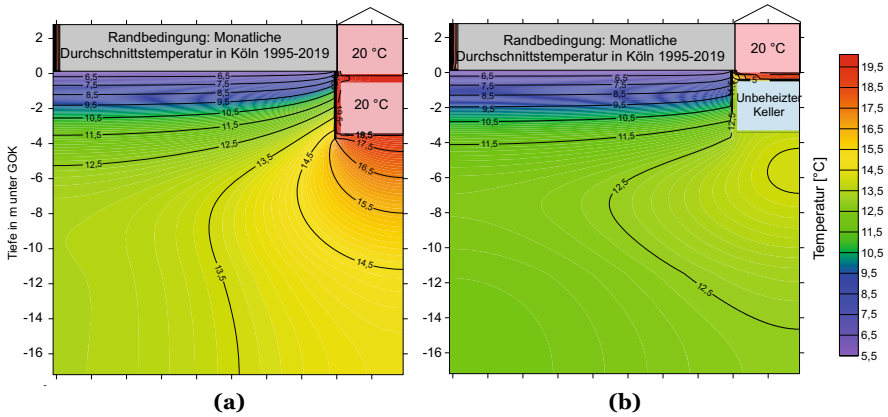
thermischen Einflüssen abgegrenzt werden. Die Herausforderung liegt darin, die verschiedenen Faktoren zu definieren und zu quantifizieren. Im Gegensatz zu urbanen Ballungszentren lassen sich die möglichen thermischen Beeinflussungen von Quartieren wie Einfamilienhausiedlungen auf wenige wesentliche Faktoren eingrenzen (z. B. Überbauung, Oberflächenversiegelung und Versorgungsleitungen). Im Projekt EASyQuart wurden mit der Überbauung und verschiedenen Oberflächenarten zwei dieser Aspekte näher betrachtet.

### **Einfluss der Überbauung**

Zur Ermittlung und Quantifizierung des durch die Siedlungstätigkeit erzeugten Wärmeeintrags in den Untergrund wurde im Rahmen von EASyQuart ein modellbasierter Ansatz entwickelt. Abb. 3.7 zeigt vereinfacht den angewandten Workflow. Im ersten Schritt wurden verschiedene bauphysikalische Softwarelösungen auf ihre Anwendbarkeit hin getestet. Der Wärmeeintrag in den Untergrund wurde dann für verschiedene Gebäudetypen mithilfe des ausgewählten Programms HTFlux simuliert. Es wurden dabei Gebäude ohne Unterkellerung sowie Gebäude mit beheiztem und unbeheiztem Keller mit Dämmstandards verschiedener Baualtersklassen untersucht. Die Parametrisierung der Referenzgebäude sowie der verschiedenen Bauteile und die daraus resultierenden Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) erfolgte in Anlehnung an die Deutsche Wohngebäudetypologie des Instituts Wohnen und Umwelt (Loga et al., 2015). Als Temperaturrandbedingung an der Oberfläche wurden die Monatsmittel der Lufttemperaturen in Köln von 1995 bis 2019 des Deutschen Wetterdienstes angesetzt (Deutscher Wetterdienst, 2021). Für die Simulation wurde der Untergrund als homogener Raum mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $2,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  definiert. Abb. 3.8 zeigt die simulierten Temperaturverteilungen nach 20 Jahren unter einem Gebäude mit mittlerem Dämmstandard mit beheiztem (Abb. 3.8 (a)) und unbeheiztem Keller (Abb. 3.8 (b)). Unterhalb des Gebäudes entsteht eine Wärmeanomalie, welche im Falle des beheizten Kellers wesentlich größer ist als bei dem unbeheizten Keller. Die Ergebnisse der bauphysikalischen Simulation wurden im Anschluss



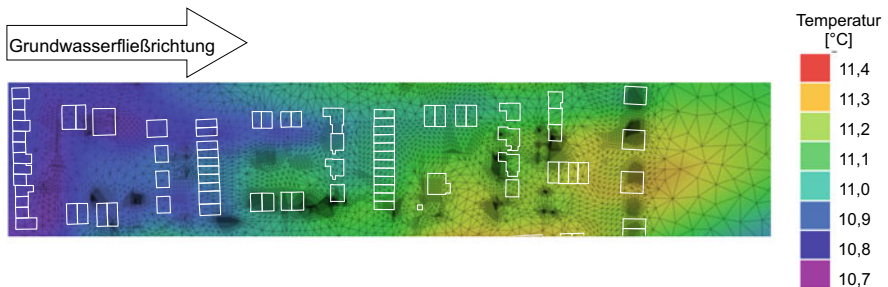
**Abb. 3.7** Workflow zur Ermittlung von Wärmeeinträgen aus Gebäuden in den Untergrund



**Abb. 3.8** Simulierte Temperaturverteilungen unterhalb von Gebäuden mit mittlerer Dämmung mit beheiztem (links) und unbeheiztem (rechts) Keller nach 20 Jahren Simulationszeit; Simulation mittels HTFlux

in Form von Temperaturverläufen als Randbedingungen unterhalb bebauter Areale in ein Grundwasser- und Wärmeströmungsmodell in Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System (FEFLOW) implementiert, um den Effekt der Überbauung auf die Grundwassertemperaturen zu ermitteln. Grundlage für die Parametrisierung dieses Modells war der Demonstrationsstandort Köln-Junkersdorf, der bereits eingehend in Abschn. 3.2.1 beschrieben wurde. Als repräsentativer Gebäudetyp wurde ein mittlerer Dämmstandard mit beheiztem Keller gewählt. Die geothermische Nutzung des Modellgebiets wurde für diese Betrachtung zunächst nicht mit einbezogen.

Abb. 3.9 zeigt einen Ausschnitt der ermittelten Grundwassertemperaturverteilung in einer Tiefe von 24 m unter GOK für das gewählte Beispielszenario 30 Jahre nach Überbauung. Die Überbauung führt zu einer Grundwassertemperaturerhöhung von



**Abb. 3.9** Ausschnitt der simulierten Grundwassertemperaturverteilung unterhalb des Wohngebiets in 24 m Tiefe nach 30 Jahren, weiße Umrandungen markieren überbaute Bereiche; Simulation mittels FEFLOW

über 0,5 K gegenüber dem unbebauten Zustand und erzeugt eine Wärmefahne, welche sich in Grundwasserfließrichtung ausbreitet. Ein solcher zusätzlicher Wärmeeintrag sollte bei der Bewertung von Monitoringdaten hinsichtlich der tatsächlichen Auswirkungen einer geothermischen Untergrundnutzung unbedingt berücksichtigt werden.

Der vorgestellte Workflow ist für eine Vielzahl von Szenarien anwendbar und ermöglicht beispielsweise für Neubaugebiete die Abschätzung von Wärmeeinträgen, die aus der Überbauung resultieren. Für neu errichtete, geothermisch versorgte Quartiere kann somit der thermische Einfluss der Siedlungstätigkeit von Beginn an mit in Betracht gezogen werden.

### **Effekte verschiedener Oberflächen auf Untergrundtemperaturen**

Als weiterer Faktor wurde der thermische Einfluss verschiedener Arten von Oberflächen auf den Untergrund quantitativ untersucht. Abb. 3.10 zeigt eine Luftaufnahme der auf dem Gelände des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) in Leipzig eingerichteten Testfläche mit verschiedenen typischen Oberflächenbedeckungen. Die Teilflächen wurden mit Rasen (Referenz-/Testfläche R), dunklem (Testfläche A) und hellem (Testfläche B) Kies sowie Asphalt (Testfläche C) bedeckt.



**Abb. 3.10** Testflächen mit unterschiedlicher Oberflächenbedeckung auf dem UFZ-Gelände. Foto: M. Kreck

Auf jeder Teilfläche wurden in einer Tiefe von 5 cm mittig drei Temperatursensoren eingebaut, um die Entwicklung der oberflächennahen Bodentemperaturen zu erfassen. Für die tiefenorientierte Messung der Bodentemperaturen wurden zudem Bodentemperaturmessstellen mit entsprechender Sensorik in den Tiefen 0,25 m; 0,5 m; 1 m; 1,5 m; 2 m; 2,5 m und 2,9 m auf jeder Teilfläche installiert. Zusätzlich dient der Versuch zur Definition von Oberflächenrandbedingungen für Grundwassertemperatursimulationen von besiedelten Räumen.

Erwartungsgemäß wurden in einer Tiefe von 5 cm die größten Temperaturunterschiede zwischen den Flächen erfasst. Einen Überblick dazu bietet Tab. 3.1. Zu Beginn des Versuchs wurde der Bewuchs auf allen Flächen entfernt und die Bodentemperaturen vor Aufbringung der Oberflächenbeläge über einen Zeitraum von 14 Tagen aufgezeichnet (Nullmessung). Dabei ergaben sich Temperaturen zwischen 21,5 °C und 22,3 °C, die maximale Temperaturabweichung zwischen den einzelnen Flächen lag somit bei 0,8 K. Mit Installation der verschiedenen Oberflächenbeläge zeigte sich unmittelbar eine Änderung der gemessenen Bodentemperaturen in einer Tiefe von 5 cm. Über die Versuchsdauer von einem Jahr liegt die mittlere Temperatur unterhalb der Asphaltfläche bei 14,0 °C, unterhalb der dunklen Kiesfläche bei 14,4 °C, unterhalb der hellen Kiesfläche bei 11,5 °C und unterhalb der Referenzrasenfläche bei 13,0 °C. Damit ergibt sich eine maximale Temperaturdifferenz von 2,9 K zwischen der dunklen und der hellen Kiesfläche. Verstärkt tritt dieser Effekt im Sommer auf. Dies zeigt der Vergleich der gemessenen Temperaturen im Juli 2022 mit einer maximalen Abweichung von 4,3 K zwischen den Kiesflächen. Interessant dabei ist, dass die Temperaturen unterhalb der hellen Kiesfläche geringer als unter der Rasenfläche sind. Innerhalb des relativ kurzen Untersuchungszeitraums von einem Jahr sind diese Temperaturveränderungen hauptsächlich im oberflächennahen Bereich zu beobachten. Ab einer Tiefe von 2 m unter GOK ist der gemessene Temperaturunterschied nicht mehr eindeutig nachweisbar. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Temperaturveränderungen mit fortschreitender Zeit auch in tieferen Bodenbereichen auftreten. Zur langfristigen empirischen Erfassung des Einflusses

**Tab. 3.1** Temperaturentwicklung in 5 cm Tiefe unterhalb verschiedener Oberflächen, Werte sind arithmetische Mittel der drei Sensoren pro Fläche gemittelt über die Zeit

Testfläche	Bodentemperaturen vor Installation der Oberflächenbedeckungen (01.07.-14.07.2021; Nullmessung)	Mittlere Bodentemperatur 07/21-07/22	Bodentemperaturen 1 Jahr nach Installation der Oberflächenbedeckungen (01.07.-14.07.2022)
R- Referenz/Rasen	21,7 °C	13,0 °C	21,7 °C
A- Dunkler Kies	22,3 °C	14,4 °C	24,9 °C
B- Heller Kies	22,1 °C	11,5 °C	20,6 °C
C- Asphalt	21,5 °C	14,0 °C	23,4 °C
Maximale Temperaturdifferenz	0,8 K (zwischen A und C)	2,9 K (zwischen A und B)	4,3 K (zwischen A und B)



von unterschiedlichen Oberflächenarten auf die Untergrundtemperaturen wird die Weiterführung des Versuchs daher angestrebt.

### 3.4.3 Repräsentativität gemessener Grundwasser- und Bodentemperaturen

Für die zuverlässige Erfassung der induzierten Temperaturänderungen im Untergrund durch die Geothermienutzung ist die Repräsentativität gemessener Temperaturdaten von essenzieller Bedeutung. Obgleich dieser Relevanz gibt es wenige Richtlinien und Leitfäden für das repräsentative Boden- und Grundwassertemperaturmonitoring. Eine der wenigen Richtlinien sind die Empfehlungen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser zur Beobachtung und Auswertung von Grundwassertemperaturen (LAWA, 1988). Diese gibt Empfehlungen bezüglich der Anforderungen an Grundwassertemperaturmessstellen und Temperaturmessgeräte. Für speziell errichtete Grundwassertemperaturmessstellen gelten u. a. folgende Empfehlungen: einfach verfiltert mit einer Filterstrecke von maximal 1 m und ein Ausbaudurchmesser von maximal DN50 bzw. 2“. Bei Bestandsmessstellen können Messstellen mit größerem Durchmesser genutzt werden, solange diese nicht durchgehend oder mehrfach verfiltert sind (LAWA, 1988). Hintergrund der Einschränkungen in Bezug auf Ausbaudurchmesser und Länge bzw. Anzahl der Filterstrecken sind mögliche Vertikalströmungen innerhalb der Messstelle, welche die Repräsentativität gemessener Temperaturdaten beeinträchtigen können. Die Relevanz dieser Strömungen wurde u. a. von Diment (1967) und Berthold und Börner (2008) untersucht. Darüber hinaus untersuchten Alexander und MacQuarrie (2005) den Einfluss von Ausbaumaterial und oberirdischer Isolierung von GWM auf die gemessene Grundwassertemperatur. Umfassendere Untersuchungen, inwiefern die Messstellenlokation oder der Ausbau (Durchmesser und Filterlänge) die Messdaten beeinflussen, fehlen bislang.

#### Auswirkungen des Messstellenausbau – Fallbeispiel Leipzig

Auf dem Testfeld des UFZ in Leipzig wurden 2015 sechs GWM für Vergleichsmessungen in einem Abstand von ca. 1,5 m zueinander errichtet. Die Tiefe der Messstellen liegt bei 15 m unter GOK, der Grundwasserspiegel liegt bei ca. 10 m unter GOK. Wie in Tab. 3.2 zu sehen, unterscheiden sich die Messstellen hinsichtlich des Ausbaudurchmessers und der Länge der Filterstrecken. GWM 2, 4 und 6 entsprechen dabei der LAWA-Richtlinie für Grundwassertemperaturmessstellen hinsichtlich Ausbaudurchmesser und Länge der Filterstrecke, während die Messstellen GWM 1, 3 und 5 eine Filterstrecke von 5 m haben.

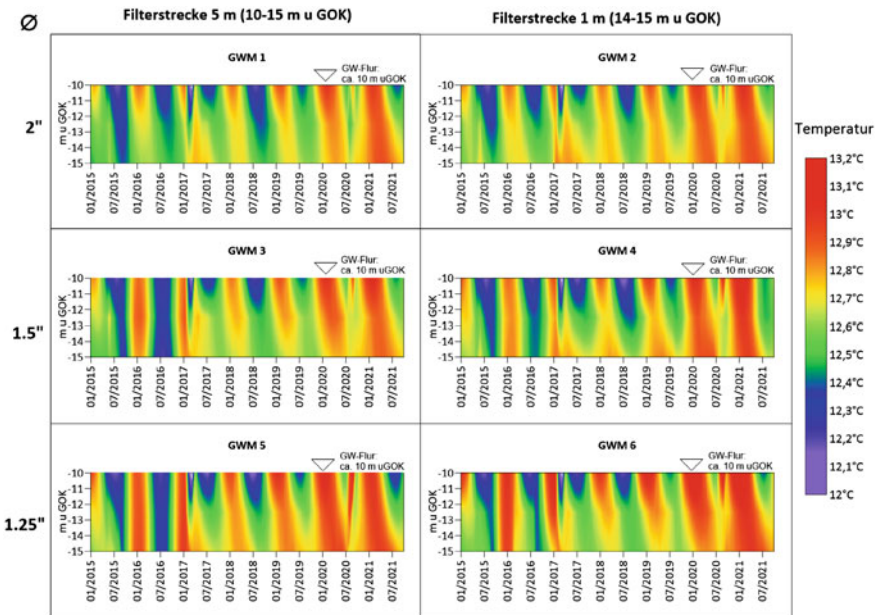
In allen Messstellen wurden Temperaturmessketten mit TidBit-Loggern der Marke OnSet (Genauigkeit  $\pm 0,21$  K) verbaut, welche seit 2015 Temperaturen in einem vierstündigen Turnus aufzeichnen. Die Logger befinden sich jeweils in den Tiefen 4,7 m; 10 m; 11 m; 12 m; 13 m und 14 m. Im Rahmen von EASyQuart erfolgte eine Fortführung der Messreihe sowie die vergleichende Auswertung der gewonnenen Daten.



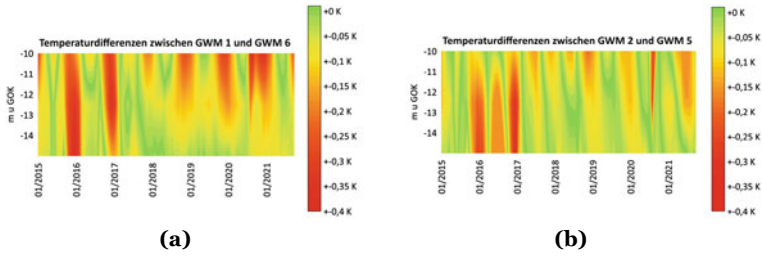
**Tab. 3.2** Ausbaudetails der GWM 1- GWM 6

Messstelle	Ausbauerdurchmesser	Filterstrecke
GWM 1	2"	5 m (10–15 m unter GOK)
GWM 2	2"	1 m (14–15 m unter GOK)
GWM 3	1,5"	5 m (10–15 m unter GOK)
GWM 4	1,5"	1 m (14–15 m unter GOK)
GWM 5	1,25"	5 m (10–15 m unter GOK)
GWM 6	1,25"	1 m (14–15 m unter GOK)

Abb. 3.11 zeigt die über die Tiefe interpolierten zeitlichen Verläufe der gemessenen Temperaturen im grundwassergesättigten Bereich. Zur Verdeutlichung der Ergebnisse zeigt Abb. 3.12 die Differenzen zwischen den gemessenen Temperaturen innerhalb GWM 1 und GWM 6 (Abb. 3.12 (a)) sowie GWM 2 und GWM 5 (Abb. 3.12 (b)), den Messstellen mit den größten Ausbaunterschieden. Obgleich sich kleinere Unterschiede in den gemessenen Grundwassertemperaturen aus Abb. 3.11 ergeben, liegen die im Grundwasser gemessenen Temperaturunterschiede innerhalb der kumulierten Fehlerbereiche der verwendeten Logger. Dieser Langzeitversuch zeigt, dass die getesteten Ausbauvarianten keinen relevanten Einfluss auf die gemessenen



**Abb. 3.11** Entwicklung der Temperaturen innerhalb der Messstellen GWM 1 - GWM 6 im grundwassergesättigten Bereich



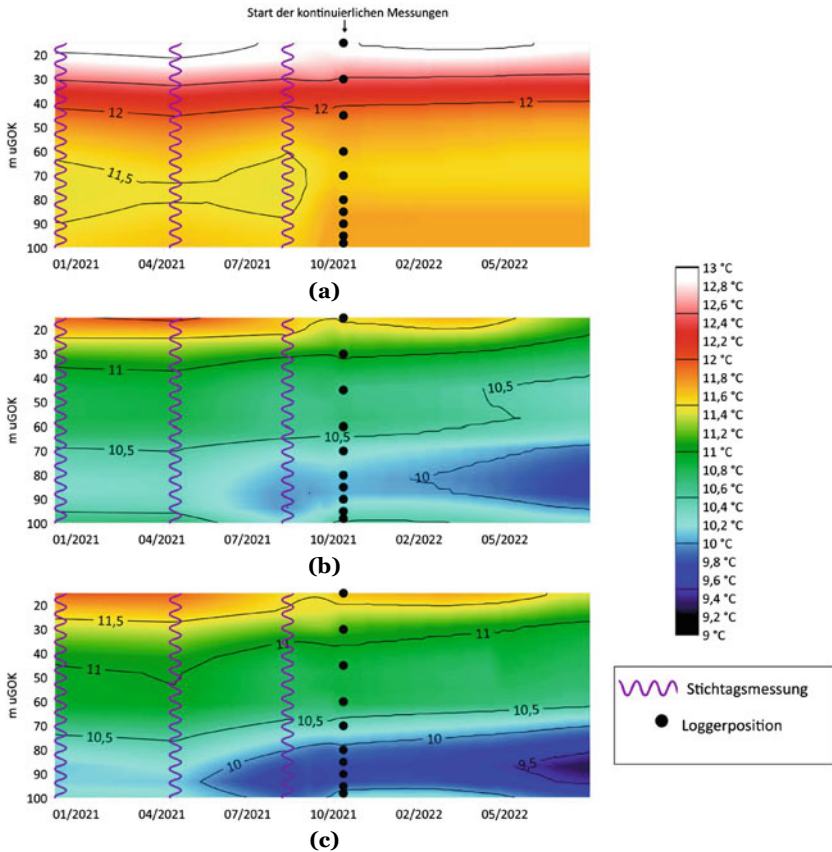
**Abb. 3.12** Temperaturdifferenzen zwischen den Messstellen GWM 1 und GWM 6 (a) und GWM 2 und GWM 5 (b)

Temperaturen haben und somit gleichermaßen für die Ermittlung repräsentativer Grundwassertemperaturdaten geeignet sind.

### Vergleich von Methoden zur Grundwassertemperaturerfassung am Fallbeispiel Berlin-Gesundbrunnen

Im Rahmen von EASyQuart wurden Auswirkungen der geothermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrunds auf die Boden- und Grundwassertemperaturen am Standort Berlin-Gesundbrunnen untersucht. Dabei handelt es sich um ein Gebäude mit Wohnungen und gewerblicher Nutzung, welches durch 18 EWS mit einer Tiefe von jeweils 99,9 m geothermisch beheizt und gekühlt wird. Vertikalprofile der Verteilung der Boden- und Grundwassertemperaturen werden seit 2020 in Form von Stichtagsmessungen in einem viermonatigen Turnus in drei Temperaturmessstellen erfasst. Dabei handelt es sich um eine Anstrommessstelle im Norden sowie zwei Abstrommessstellen im Süden und Südwesten der Anlage. Dieses Monitoring wurde seit November 2021 um eine quasi-kontinuierliche Langzeitaufzeichnung der Untergrundtemperaturen in diskreten Tiefen ergänzt. Dazu wurden in den drei Temperaturmessstellen insgesamt 29 Temperaturlogger installiert. Die UTBI-001 Logger der Marke OnSet wurden in Form von Messketten in den Tiefen 15 m; 30 m; 45 m; 60 m; 70 m; 80 m; 85 m; 90 m und ca. 95 m eingebaut und zeichnen dort stündlich die Untergrundtemperaturen auf. Der Fokus der Temperaturmessungen im Bereich von 70–95 m unter GOK ergibt sich aus der Vorerkundung, die auf einen ausgeprägten Grundwasserleiter in dieser Tiefe schließen lässt.

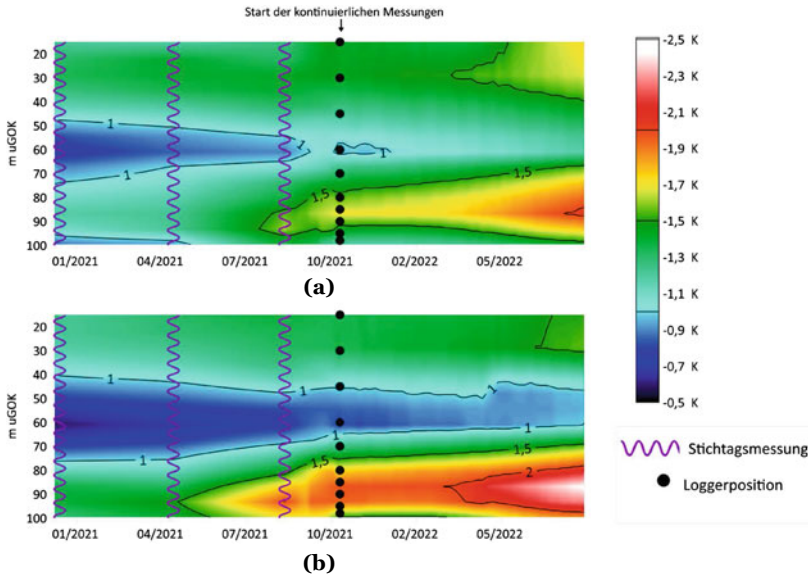
Abb. 3.13 (a-c) zeigt die Entwicklung der Temperaturen in den drei Temperaturmessstellen. Die dargestellten Daten wurden bis November 2021 durch Stichtagsmessungen gewonnen und über die Zeit interpoliert. Ab November 2021 zeigt die Abbildung die über die Tiefe interpolierten Daten der quasi-kontinuierlichen Messungen. Die Ergebnisse des Monitorings weisen die stärksten Temperaturänderungen im Tiefenbereich des Grundwasserleiters zwischen 70 m und 90 m unter GOK auf. Über den Untersuchungszeitraum verringerte sich die Temperatur in diesem Tiefenbereich in der Abstrommessstelle Süd-West um 1 K (Abb. 3.13 (c)). Im Vergleich mit der Anstrommessstelle ergeben sich Temperaturunterschiede von 2 K bzw. 2,5 K im selben Bereich, wie aus Abb. 3.14 (a und b) hervorgeht. Die Ergebnisse belegen die hohe Relevanz der Kenntnis des geologischen Schichtenaufbaus bzw. der



**Abb. 3.13** Entwicklung der gemessenen Untergrundtemperaturen am Standort Berlin-Gesundbrunnen in der Anstrommessstelle (a), Abstrommessstelle Süd (b) und Abstrommessstelle Süd-West (c)

Hydrostratigrafie zur Erstellung und Umsetzung effizienter und maßgeschneiderter Monitoringkonzepte, u. a. durch die Identifizierung von Zielhorizonten für das Monitoring. Zudem zeigen insbesondere die Ergebnisse der Abstrommessstellen, dass mit Beginn der quasi-kontinuierlichen Messungen die Auswirkungen der geothermischen Nutzung sowohl zeitlich als auch quantitativ deutlich genauer bestimmt werden.

Die beschriebene quasi-kontinuierliche Erfassung der Temperaturdaten erfolgt parallel zu den Stichtagsmessungen und erlaubt so einen Methodenvergleich. Im April 2022 erfolgten vergleichende Messungen mit verschiedener Messtechnik, um sowohl deren Eignung als auch mögliche Beeinflussungen der Messergebnisse zu untersuchen. Dazu wurden Temperaturprofile in Form von Stichtagsmessungen mit folgenden Geräten aufgenommen:



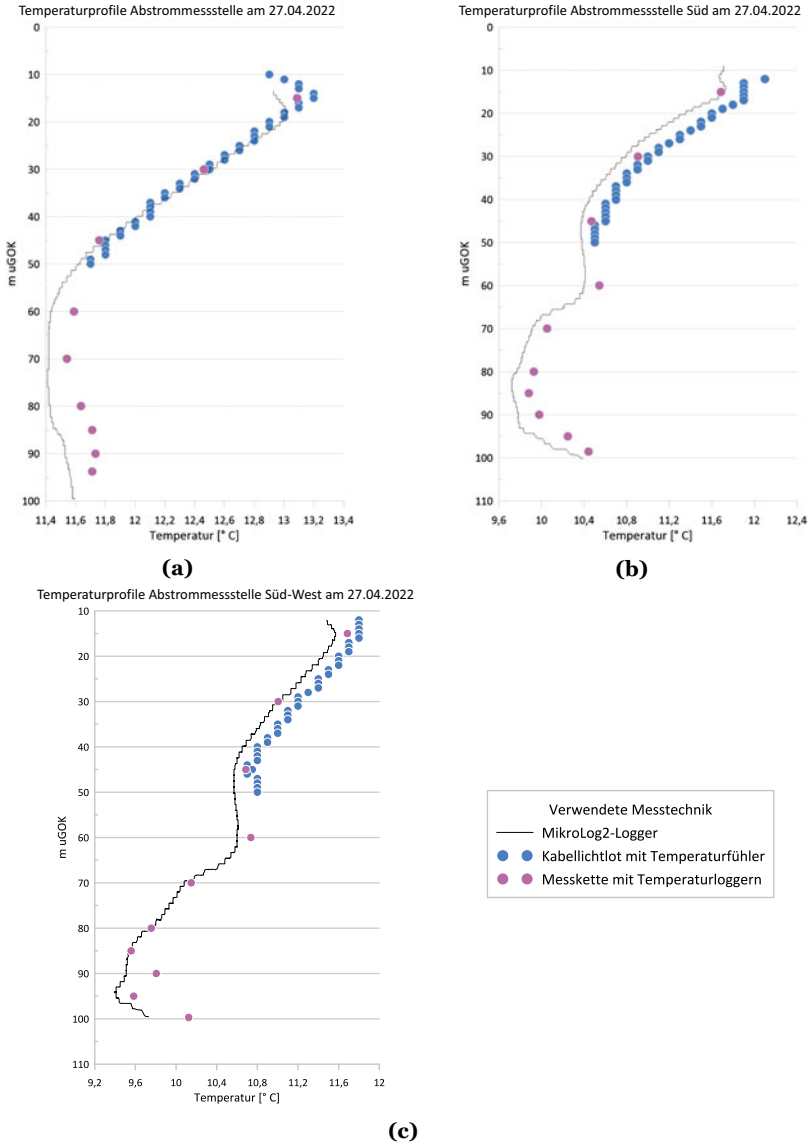
**Abb. 3.14** Entwicklung der Temperaturdifferenzen zwischen An- und Abstrom am Standort Berlin-Gesundbrunnen: Anstrom-Abstrom Süd (a), Anstrom-Abstrom Süd-West (b)

- Kabellichtlot mit Temperaturfühler (nur einsetzbar in den oberen 50 m); Genauigkeit 0,1 K; Auflösung von 0,1 K,
- Messketten mit Temperaturdatenloggern des Typs HOBO TidbiT v2 UTBI-001 der Fa. Onset; Genauigkeit  $\pm 0,21$  K, Auflösung 0,001 °C,
- MikroLog2-Logger; Genauigkeit  $\pm 0,2$  K; Auflösung 0,001 K,
- Diver-Grundwasserdaten-Logger; Genauigkeit  $\pm 0,1$  K; Auflösung 0,01 K.

Folgende Einflüsse wurden untersucht:

- Einfluss der Messtechnik auf gemessene Temperaturdaten,
- Störung der Temperaturschichtung innerhalb der Messstellen durch wiederholte Messungen,
- Auswirkungen von Umwelteinflüssen (z. B. Lufttemperatur).

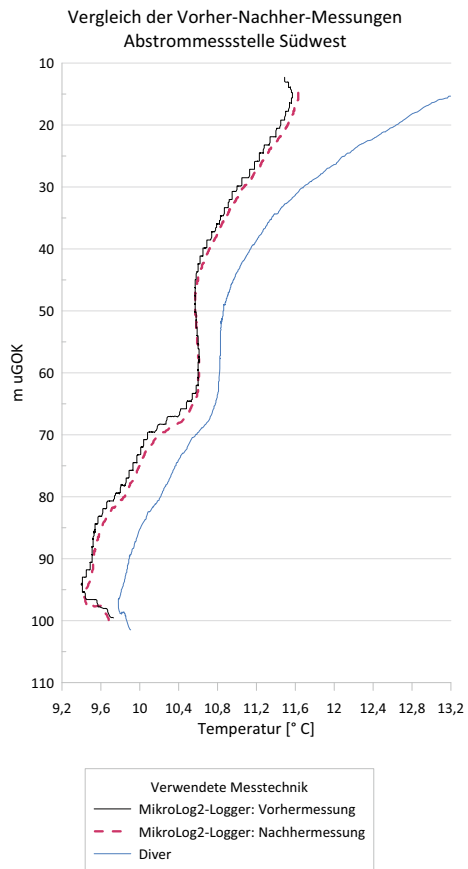
Wie die Ergebnisse zeigen, ergaben sich bei den Stichtagsmessungen (Abb. 3.15 (a-c)) mit den unterschiedlichen Messgeräten keine relevanten Abweichungen voneinander. Somit sind alle getesteten Geräte prinzipiell für die Erfassung von Grundwassertemperaturprofilen geeignet, es bestehen jedoch individuelle Vor- und Nachteile der einzelnen Messgeräte.



**Abb. 3.15** Mit verschiedener Messtechnik aufgenommene Temperaturprofile in der Anstrommessstelle (a), Abstrommessstelle Süd (b) und der Abstrommessstelle Süd-West (c) am Stichtag 27.04.2022

An der südwestlichen Messstelle wurde eine weitere Vergleichsmessung durchgeführt. Dazu wurde zunächst die installierte Messkette ausgebaut und nach ca. einer Stunde ein weiteres Temperaturprofil mit zwei Loggern gleichzeitig aufgenommen (MikroLog2-Logger und Diver-Grundwasserdatenlogger). Der Vergleich dieser Messdaten (siehe Abb. 3.16) zeigt, dass die Temperaturschichtung innerhalb der Messstellen durch den Ausbau der Messketten und die wiederholten Messungen nicht gestört wurde, da die Temperaturprofile der Vorher- und Nachher-Messung mit dem MikroLog2-Logger keine signifikante Abweichung voneinander aufweisen. Der Vergleich mit dem durch den Diver-Grundwasserdatenlogger aufgenommenen Profil zeigt hingegen, dass die gemessenen Temperaturen hier höher liegen; besonders stark ist die Abweichung in den oberen 20 m des Profils. Aber auch in den weiteren Teilen des Temperaturprofils liegen die Abweichungen über dem angegebenen Genauigkeitsbereich der Messgeräte.

**Abb. 3.16** Vergleich der Wiederholungsmessung mit der vorherigen Messung in Abstrommessstelle Süd-West



Ein wesentlicher Grund für die Abweichung, insbesondere im oberen Bereich des Profils, ist die bei der Verwendung des Diver-Loggers nicht erfolgte Anpassung des Loggers an die Untergrundtemperatur vor Beginn der Messung. Insgesamt zeigt sich die Relevanz der sachgemäßen Durchführung von Temperaturmessungen und der zuverlässigen Kalibrierung von Temperaturmessgeräten bei Einzelmessungen und insbesondere bei Wiederholungsmessungen.

---

## Literatur

- Alexander MD, MacQuarrie KT (2005) The measurement of groundwater temperature in shallow piezometers and standpipes. *Can Geotech J* 42(5):1377–1390. <https://doi.org/10.1139/t05-061>
- Balke KD (1974) Der thermische Einfluss besiedelter Gebiete auf das Grundwasser, dargestellt am Beispiel der Stadt Köln. Heft, GFW-Wasser/Abwasser, p 3
- Berthold S, Börner F (2008) Detection of free vertical convection and double-diffusion in groundwater monitoring wells with geophysical borehole measurements. *Environ Geol* 54(7):1547–1566. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0936-y>
- Butler JJ (1998) The design, performance, and analysis of slug tests. Lewis, Boca Raton, Fla
- Carlsaw HS, Jaeger JC (1959) Conduction of heat in solids, 2nd edn. Clarendon Press, Oxford
- Deutscher Wetterdienst (2021) Historische monatliche Stationsbeobachtungen (Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer, Wind und Bewölkung) für Deutschland. DWD Climate Data Center (CDC) Version v22.3. [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/) [https://www.overleaf.com/project/5edad8424808ed000134bc2dt/CDC/observations\\_germany/climate/monthly/kl/historical/](https://www.overleaf.com/project/5edad8424808ed000134bc2dt/CDC/observations_germany/climate/monthly/kl/historical/). Zugegriffen: 19. Apr. 2022
- Dietrich P, Leven C (2006) Direct Push–Technologies. In: Kirsch R (Hrsg) *Groundwater Geophysics*, Springer-Verlag, Berlin, S 321–340. [https://doi.org/10.1007/3-540-29387-6\\_11](https://doi.org/10.1007/3-540-29387-6_11)
- Diment WH (1967) Thermal regime of a large diameter borehole: instability of the water column and comparison of air-and water-filled conditions. *Geophysics* 32(4):720–726. <https://doi.org/10.1190/1.1439885>
- Knödel K, Krummel H, Lange G, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg) (2005) *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*, 2. Aufl. Bd. 3 in *Geophysik*, Springer, Berlin
- LAWA (1988) *Grundwasser, Richtlinien für Beobachtung und Auswertung. 2: Grundwassertemperatur*. Woeste-Druck & Verl, Essen
- Leven C, Weiß H, Vienken T et al (2011) Direct-Push-Technologien – Effiziente Untersuchungsmethoden für die Untergrunderkundung. *Grundwasser* 16(4):221–234. <https://doi.org/10.1007/s00767-011-0175-8>
- Loga T, Stein B, Diefenbach N, Born R, Institut Wohnen, Umwelt (Hrsg) (2015) *Deutsche Wohng Gebäudetypologie: beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA – “Typology approach for building stock energy assessment”, EPISCOPE – “Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks”, 2. Aufl.* IWU, Darmstadt
- McCall W, Christy TM (2020) The Hydraulic Profiling Tool for Hydrogeologic Investigation of Unconsolidated Formations. *Groundwater Monitoring & Remediation* 40(3):89–103. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12399>

- McCall W, Nielsen DM, Farrington SP et al (2005) Use of Direct-Push Technologies in Environmental Site Characterization and Ground-Water Monitoring. In: Practical Handbook of Environmental Site Characterization and Ground-Water Monitoring, 2. Aufl. CRC Press
- McCall W, Christy TM, Christopherson T et al (2009) Application of Direct Push Methods to Investigate Uranium Distribution in an Alluvial Aquifer. *Ground Water Monitoring & Remediation* 29(4):65–76. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2009.01258.x>
- Menberg K, Blum P, Schaffitel A et al (2013) Long-Term Evolution of Anthropogenic Heat Fluxes into a Subsurface Urban Heat Island. *Environ Sci Technol* 47(17):9747–9755. <https://doi.org/10.1021/es401546u>
- Meng B, Vienken T, Kolditz O et al (2019) Evaluating the thermal impacts and sustainability of intensive shallow geothermal utilization on a neighborhood scale: Lessons learned from a case study. *Energy Convers Manag* 199(111):913. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111913>
- Prinz H, Strauß R (2018) *Ingenieurgeologie*, 6. Aufl. Springer Spektrum, Berlin
- Schelenz S, Vienken T, Shao H et al (2017) On the importance of a coordinated site characterization for the sustainable intensive thermal use of the shallow subsurface in urban areas: a case study. *Environ Earth Sci* 76(2):73. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6331-9>
- Vienken T, Kreck M, Dietrich P (2019) Monitoring the impact of intensive shallow geothermal energy use on groundwater temperatures in a residential neighborhood. *Geotherm Energy* 7(1):8. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0123-x>
- Zlotnik VA, McGuire VL (1998) Multi-level slug tests in highly permeable formations: 1. Modification of the Springer-Gelhar (SG) model. *J Hydrol* 204(1-4):271–282. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00128-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00128-5)

**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

