



# Geothermisches Nutzungspotenzial der Buntsandstein- und Keuperaquifere im Nordosten Bayerns mit Fokus auf tiefe Aquiferspeicher

Cindy Kunkel<sup>1</sup> · Thorsten Agemar<sup>1</sup> · Ingrid Stober<sup>2</sup>

Eingegangen: 9. November 2018 / Überarbeitet: 7. Juni 2019 / Online publiziert: 26. September 2019  
© Der/die Autor(en) 2019

## Zusammenfassung

Die mitteltiefen und tiefen geothermischen Ressourcen in Deutschland sind begrenzt auf Mittel- und Niedrigenthalpiesysteme. Diese werden vorwiegend für balneologische Anwendungen, Fern- und Raumwärme, sowie an zurzeit neun Standorten auch zur Stromgewinnung genutzt. Diese Studie befasst sich mit den gespannten Aquifere im Nordosten Bayerns, die sowohl für die Balneologie als auch zur Energiespeicherung genutzt werden können.

Auf Grundlage neu ausgewerteter Daten aus Pumptests und Förderdaten wurden die Durchlässigkeitsbeiwerte und Transmissivitäten der beiden Hauptaquifere Keuper und Buntsandstein mit einer großflächigen Verbreitung für mitteltiefe und tiefe geothermische Anwendungen ab 100 m auskartiert. Zudem fließen Temperaturabschätzungen sowie Angaben über die Tiefenlage der beiden Festgesteinsaquifere (Keuper 100 bis 650 m, Buntsandstein 100 bis 1400 m) mit ein. Die Ergebnisse werden in Form von Karten zur Verteilung von Durchlässigkeitsbeiwerten, Transmissivitäten und den Temperaturabschätzungen dargestellt und in das geothermische Informationssystem GeotIS (<https://www.geotis.de>) integriert.

An ca. 80 % aller 243 untersuchten Lokalitäten lassen die vorhandenen Daten darauf schließen, dass die Aquifere für eine geothermische Nutzung geeignet sind. Beim Keuper liegen sogar über 90 % der 155 Transmissivitätswerte im Bereich für eine entsprechende Nutzung des Untergrundes. Die neu erstellten Karten ersetzen aber keine Machbarkeitsstudie für Geothermieprojekte, da eine detaillierte geologische Vorerkundung unabdingbar für die Planung einer geothermischen Untergrundnutzung ist.

## Geothermal potential of the Buntsandstein and Keuper aquifers in NE Bavaria with a focus on deep thermal aquifer storage

### Abstract

Intermediate and deep geothermal resources of Germany are limited to medium and low enthalpy resources. These resources are predominantly used for balneological applications, space and district heating and for power production at nine separate sites. This study focuses on confined aquifers in northeast Bavaria, which can be used for balneology as well as energy storage.

Data from pumping tests and production data were interpreted to map the hydraulic conductivity of the main Keuper and Buntsandstein aquifers with a large spatial distribution for geothermal applications deeper than 100 m. Furthermore, temperature estimates as well as the depth of the two aquifers (Keuper 100 to 650 m, Buntsandstein 100 to 1400 m) are incorporated. The results will be visualized in the form of spatial distribution maps of the hydraulic conductivity and temperature, and will be integrated into the geothermal information system GeotIS (<https://www.geotis.de>).

**Zusatzmaterial online** Zusätzliche Informationen sind in der Online-Version dieses Artikels (<https://doi.org/10.1007/s00767-019-00430-1>) enthalten.

✉ Cindy Kunkel  
cindy.kunkel@leibniz-liag.de

Thorsten Agemar  
thorsten.agemar@leibniz-liag.de

Ingrid Stober  
ingrid.stober@minpet.uni-freiburg.de

<sup>1</sup> Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik,  
Stilleweg 2, 30655 Hannover, Deutschland

<sup>2</sup> Universität Freiburg, Albertstr. 23b, 79104 Freiburg,  
Deutschland

Altogether, about 80% of all 243 sampling sites show hydraulic conductivity values sufficient for geothermal energy utilization. For the Keuper aquifer, even 90% of all 155 sampling sites show transmissivities sufficient for geothermal energy utilization. However, these maps do not replace a feasibility study for specific geothermal projects because detailed geological site assessment is essential when planning a subsurface geothermal system.

**Keywords** Northern Bavaria · Buntsandstein · Keuper · Geothermal utilization · Aquifer · Hydraulic properties

## Einleitung

Mit Blick auf den Klimawandel werden erneuerbare Energien immer bedeutender. Die deutsche Regierung hat daher beschlossen, die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren, indem sie den Anteil erneuerbarer Energien im gesamten Energiemix erhöht (EEG 2000). Geothermische Energie nimmt dabei eine besonders wichtige Rolle ein, da sie das gesamte Jahr und zu jeder Tageszeit verfügbar ist und somit als Grundlastenergie, sowohl für Wärme als auch für Stromproduktion geeignet ist (z. B. Hurter und Schellschmidt 2003; Agemar et al. 2014). Da die nationalen geothermischen Ressourcen begrenzt sind auf hydrothermale Systeme niedriger bis mittlerer Enthalpie (unter 200 °C), ist eine Stromgewinnung nur möglich bei Temperaturen größer 100 °C und mittels zusätzlicher Technologien, wie z. B. einer ORC-Anlage (Organic Rankine Cycle) oder einer Kalina-Anlage (Stober et al. 2016). Die hydrothermalen Ressourcen in Deutschland werden bislang vorwiegend für balneologische Anwendungen, Fern- und Raumwärme sowie nur an einigen wenigen Standorten zur Stromgewinnung genutzt (Agemar et al. 2014).

Die Aquifere im Nordosten Bayerns bilden keine Ausnahme. Der typische geothermische Gradient in Nordbayern liegt aufgrund der Wärmeanomalie im Untergrund des Staffelsteiner Grabens zwischen 30 und 40 K/km (Bauer 2000; Agemar et al. 2012). Allerdings könnten, neben der Balneologie mit ihrer lokalen Wärmeversorgung von Thermalbädern, die gespannten Aquifere in 100 bis 650 m (Keuper) und 100 bis zu 1400 m (Buntsandstein) Tiefe (TVD) im Fränkischen Becken bei entsprechender Durchlässigkeit und Temperatur grundsätzlich auch zur Energiespeicherung in Form von Wärme genutzt werden (Fritzer et al. 2014). Bei so genannten Aquiferspeichern wird saisonal anfallende Überschusswärme (z. B. von Blockheizkraftwerken im Sommer) in Form von heißem Wasser in den Speicherhorizont eingebracht und zu Bedarfszeiten, i. d. R. in den Wintermonaten zur Wärmeversorgung wieder entnommen, d. h. in beiden Fällen ist Wasser der Wärmeträger (z. B. Sanner 2004; Schmidt und Müller-Steinhagen 2004; Sanner et al. 2005). Die ungestörte Aquifertemperatur muss dafür signifikant niedriger sein als die einzulagernde Überschusswärme. Außerdem sollte die Durchlässigkeit des Aquifers höher als  $1E-6$  m/s (Transmissivität  $> 5E-5$  m/s) sein (Stober et al. 2016).

Im Untersuchungsgebiet wurden vorhandene hydraulische Daten in Form von Pumptests und Förderdaten (z. B. Absenkung, spezifische Ergiebigkeit, Förderrate) mit dem Ziel zusammengetragen und interpretiert, die hydraulische Leitfähigkeit und Transmissivität der Aquifere zu erfassen und graphisch darzustellen. Zudem fließen Temperaturabschätzungen sowie Angaben über die Tiefenlage der beiden Festgesteinsaquifere (Keuper 100–650 m, Buntsandstein 100–1400 m) mit ein. Die Ergebnisse werden in geeigneter Form in das webbasierte geothermische Informationssystem GeotIS (GeotIS 2019) integriert und öffentlich zugänglich gemacht.

GeotIS ist ein interaktiver geothermischer Atlas, der einen Überblick über die benötigten Parameter für die Abschätzung geothermischer Nutzungsmöglichkeiten gibt und daher die erste Anlaufstelle für Planer geothermischer Projekte, für Wissenschaftler, kommunale Stadtwerke und für die öffentliche Verwaltung ist. Die Daten in GeotIS ersetzen aber keine Machbarkeitsstudie, da eine detaillierte, standortbezogene und geologische Vorerkundung unabdingbar für die Planung einer geothermischen Untergrundnutzung ist. Konkret bedeutet das, dass für einen spezifischen Standort u. U. weitere geowissenschaftliche Daten erhoben werden müssen, um ein hydrogeologisches Modell zu erstellen. Außerdem muss die Höhe der anfallenden Überschusswärme (Temperatur, Menge, Zeitintervall) bekannt sein. Darauf aufbauend sollte im Vorfeld eine numerische, thermisch-hydraulisch gekoppelte Modellierung für den spezifischen Standort erfolgen, um festzustellen, unter welchen Bedingungen der Aquiferspeicher optimal betrieben werden kann.

## Geothermische Nutzungsmöglichkeiten in NO-Bayern

Die unterschiedliche Tiefenlage der Wärmegewinnung und Nutzungsmöglichkeit der geothermischen Energie bedingt heute eine Unterteilung in oberflächennahe und tiefe geothermische Systeme. Die Grenzziehung erfolgt bei 400 m Tiefe und 20 °C. Die Übergänge zwischen den beiden Systemen sind allerdings fließend. Erdwärmesonden sind beispielsweise klassische Nutzungssysteme der oberflächennahen Geothermie. Bei der tiefen Geothermie wird zwischen hydrothermalen und petrothermalen Systemen unterschied-

den. Zu den hydrothermalen Systemen gehören geothermische Dubletten in tieferen Aquiferen, die überwiegend das im Untergrund vorhandene Wasser als Wärmeträger nutzen, während zu den petrothermalen Systemen Enhanced Geothermal Systems (EGS) gehören, die überwiegend die unmittelbar im Gestein gespeicherte Energie nutzen (Stober und Lorinser 2008; BMU 2009; Stober und Bucher 2014).

Die Tiefenlage der beiden wichtigsten Festgesteinsaquifere von NO-Bayern macht sie als potenzielle tiefe Aquiferwärmespeicher interessant, da sie sich über weite Bereiche zum einen deutlich unterhalb von für Trinkwasserzwecke genutzte Grundwasserleiter befinden, zum anderen jedoch auch nicht in allzu großen Tiefen liegen, d. h. die Temperaturen betragen deutlich weniger als 100 °C.

Tiefe Aquiferspeicher (ATES – Aquifer Thermal Energy Storage) sind interessant zur temporären Speicherung von Wärme aus Blockheizkraftwerken, Gasturbinen und Gas- und Dampfturbinen, Kraftwerken oder anderen Wärmequellen. Tiefe ATES stellen hohe Anforderungen an die geologischen Verhältnisse des jeweiligen Standortes, wie z. B. hydraulische Leitfähigkeit, Temperatur, natürliche Grundwasserfließgeschwindigkeit und hydrochemische Eigenschaft des Grundwassers, wobei die zentrale Größe die hydraulische Leitfähigkeit ist. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt daher auf den hydraulischen und thermischen Eigenschaften der beiden Festgesteinsgrundwasserleiter in NO-Bayern. Bei hohen Temperaturveränderungen kann es grundsätzlich auch zu geochemischen und/oder biologischen Veränderungen im Grundwasser kommen, mit der potenziellen Folge von Ablagerungen an Bauteilen (Benner et al. 1999; Schmidt und Müller-Steinhagen 2005).

Als tiefe ATES können gut durchlässige tiefe Grundwasserleiter (Aquifere) genutzt werden. Über Förder- und Entnahmebohrungen erfolgt die Einlagerung bzw. die Entnahme von Wärme mit Wasser als Wärmeträgermedium. Tiefe geothermische Energiespeicher lassen sich z. B. auch mit Solarthermie durch Einspeicherung von sommerlicher Überschusswärme kombinieren. Auch die Kombination mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK), bei denen im Sommer Überschusswärme anfällt, sind günstige Bedingungen für tiefe ATES. Grundsätzlich können Aquifere in geringer Tiefe auch für Kühlzwecke genutzt werden, wie beispielsweise im Deutschen Reichstagsgebäude (BINE Informationsdienst 2000).

Die in den Sommermonaten eingelagerte Wärme kann zu Bedarfszeiten, i. d. R. im Winter, aus dem ATES wieder entnommen, d. h. gefördert werden (z. B. Dickinson et al. 2009). Da die natürlichen Fließgeschwindigkeiten in tiefen Grundwasserleitern i. d. R. sehr gering sind (z. B. Wei et al. 1990; Mazar und Nativ 1992), entstehen nur geringe Verluste der eingelagerten Wärme. Auch steigt die Effizienz eines Aquiferspeichers mit zunehmender Betriebsdauer, da sich durch die Wärmeeinlagerung auch die Temperatur des

Speichergesteins, d. h. des Gesamtspeichers, erhöht. Aquifer-Wärmespeichern wird ein hoher Wirkungsgrad zugesprochen. Die Wärmerückgewinnungskoeffizienten können bis zu 70 % und mehr betragen, bei der Kälteeinlagerung sogar bis über 80 % (Sommer et al. 2014).

Zudem lassen sich tiefe geothermische Energiespeicher gut mit Wärmepumpen kombinieren, sodass die in den Bedarfszeiten wieder entnommene Wärme nach Passage durch den Wärmetauscher über Wärmepumpen auf einem konstanten und im Bedarfsfall höheren Niveau (erforderliche Temperatur des Fernwärmenetzes) gehalten werden kann (z. B. Schmidt und Müller-Steinhagen 2005), und somit also optimale Voraussetzungen z. B. für den Betrieb einer Fernwärmeversorgung darstellen.

Im Vorfeld der Errichtung eines Aquiferspeichers ist eine intensive Datenerhebung und Modellierung des Gesamtsystems (Senken, Quellen, Reservoir), also nicht nur des Aquifers erforderlich (z. B. Kranz und Frick 2013).

### Vorhandene geothermische Untergrundspeicher

Weltweit existieren derzeit über 2800 Aquiferspeicher, die zusammen mehr als 2,5 TWh für Heiz- und Kühlzwecke zur Verfügung stellen. Allerdings handelt es sich bei 99 % dieser Untergrundspeicher um Niedrig-Temperatur-Systeme mit Aquifertemperaturen < 25 °C, somit um oberflächennahe Aquiferwärmespeicher. 85 % dieser Untergrundspeicher befinden sich in den Niederlanden und weitere 10 % in Schweden, Dänemark und Belgien (Fleuchaus et al. 2018). In Deutschland gibt es derzeit nur zwei tiefe und einen oberflächennahen Aquiferspeicher. Ein Niedrigtemperaturspeicher existiert für den Deutschen Bundestag.

Hochtemperatur-Aquiferspeicher (> 90 °C) sind im Gegensatz zu Niedertemperatur-Speicher weltweit noch wenig erprobt. Zwar wurden Einspeise-Fließraten von 30 l/s mit Temperaturen bis 100 °C bei der Zirkulation bereits erfolgreich realisiert, jedoch gibt es weltweit mit Beladungstemperaturen über 100 °C noch wenig Erfahrung (Fleuchaus et al. 2018). Bei den Hochtemperaturspeichern in Neubrandenburg (Kabus et al. 2005) und Utrecht (Niederlande) (Valstar 2015) wird 90 °C heißes Wasser in den Untergrundspeicher eingelagert. In Zwammerdam (NL) waren es 88 °C. Die Anlagen in den Niederlanden haben gezeigt, dass die thermische Effizienz der tiefen Aquiferspeicher wesentlich stärker von der Charakteristik des Wärmebedarfs geprägt wird als von derjenigen des Speichers.

Da die Temperaturen der im Folgenden untersuchten Aquifere in NO-Bayern bei 15–45 °C liegen, handelt es sich weitestgehend um Niedrigtemperaturspeicher, sodass insgesamt betrachtet auf die großen Erfahrungen mit vergleichbaren Speichern in den Niederlanden, Schweden, Dänemark und Belgien aber auch auf die Erfahrungen mit dem

Betrieb des deutschen Reichstagsgebäudes zurückgegriffen werden kann (Fleuchaus et al. 2018).

### Geothermische Energiespeicher in Deutschland

Das deutsche Reichstagsgebäude verfügt über zwei Aquiferspeicher, einen Kälte- und einen Wärmespeicher (z. B. BINE Informationsdienst 2000; Sanner 2004). Der Kältespeicher liegt in 30–60 m Tiefe und dient der Kühlung von Gebäuden. Der Wärmespeicher befindet sich in 300 m Tiefe; es handelt sich um einen soleführenden Sandstein-Aquifer. In den Wärmespeicher wird die überwiegend in den Sommermonaten aus dem Blockheizkraftwerk (BHKW) anfallende Überschusswärme mit einer Temperatur von bis zu 70 °C (im Mittel 55 °C) und Injektionsraten bis 28 l/s eingelagert. Die Beladung des Speichers erfolgt stundenweise und ist somit atypisch. Die in den Sommermonaten eingelagerte Wärme beträgt damit pro Jahr 2650 MWh. In den Wintermonaten erfolgt eine kontinuierliche Entladung des Wärmespeichers zur Deckung des Wärmedefizites aus dem BHKW. Die Fördertemperaturen liegen bei 65–30 °C bei Förderraten von 28 l/s. Im Laufe des Entnahmezklus nehmen die Fördertemperaturen ab. Die pro Jahr entnommene Wärme liegt damit bei 2050 MWh. Das Verhältnis von genutzter zu eingelagerter Wärme (Rückgewinnungskoeffizient) liegt somit bei 77 %. Im Kältespeicher beträgt das Verhältnis zwischen genutzter und eingelagerter Kälte sogar 93 % (Sanner et al. 2005).

Der Wärmespeicher Neubrandenburg ist ein Hochtemperatur-Aquiferspeicher (z. B. Kabus 2003; Kabus et al. 2009). Hier wird saisonal ein 85–90 °C heißes Fluid im Oberen Postera-Sandstein (Formationswasser mit einem Gesamtlösungsinhalt ca. 135 g/kg) aus einem Heizkraftwerk in 1250 m Tiefe mit 28 l/s injiziert (ca. 20 MW). Die ungestörte Reservoirtemperatur liegt bei 55 °C. Die Entnahmetemperatur beträgt derzeit ca. 75 °C. Bei der Anlage geht man nach mehrjährigem Betrieb von einem Rückgewinnungskoeffizienten von 72 % aus.

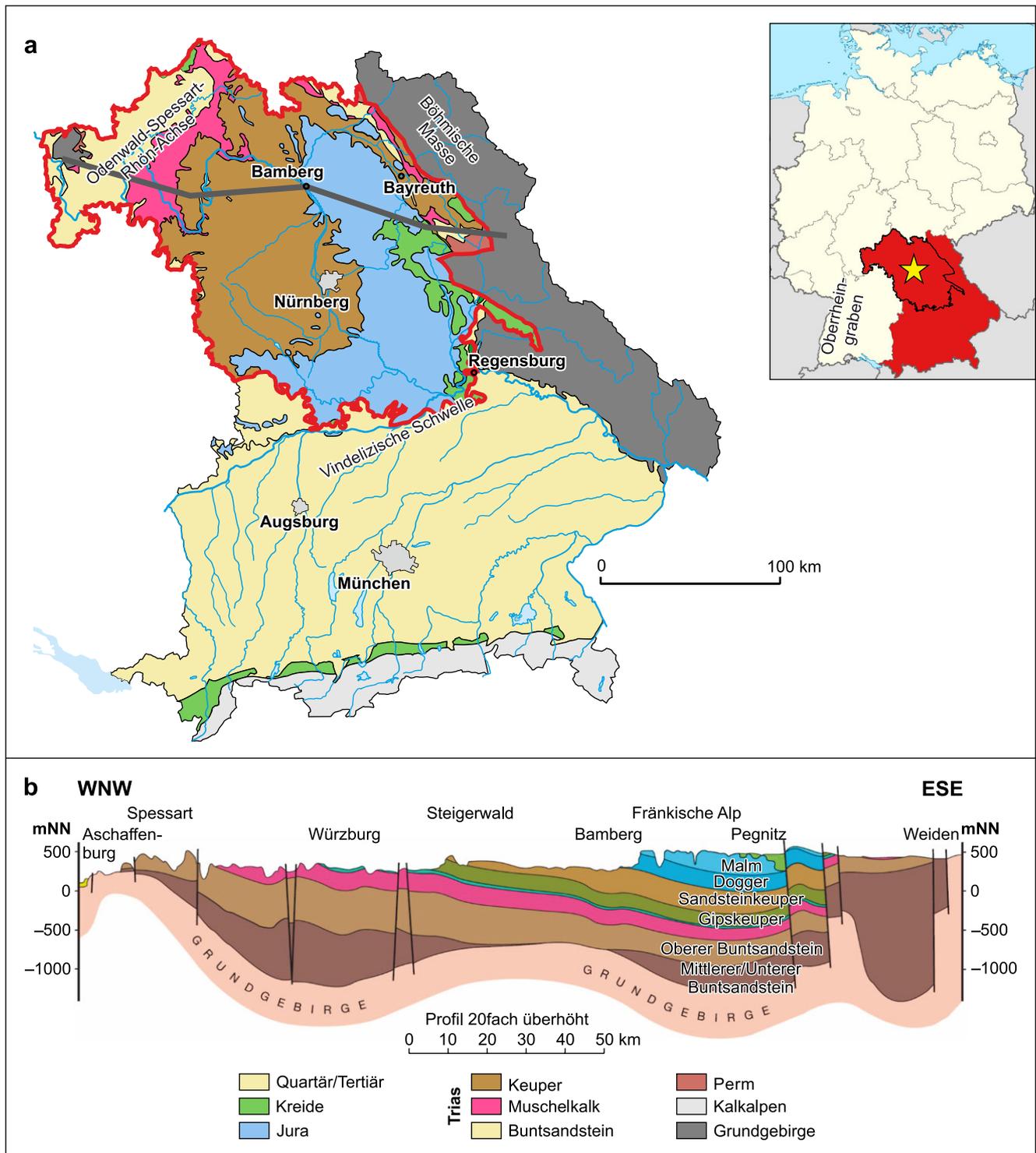
In Rostock ist ein Aquifer-Wärmespeicher in eine solar unterstützte Nahwärmeversorgung eingebunden (z. B. Schmidt und Müller-Steinhagen 2004). Der Aquifer befindet sich in einer Tiefe von 30 m unter dem Gebäude und wird über zwei Brunnenbohrungen erschlossen. Der Speicher wird saisonal auf einem mittleren Temperaturniveau bis maximal 50 °C betrieben. Im Sommer wird überschüssige Solarwärme von Kollektoren (Kollektorfläche: 1000 m<sup>2</sup>) eingespeichert. In der Heizperiode wird die Wärme wieder entnommen und mithilfe einer Wärmepumpe auf konstantem Temperaturniveau gehalten. Der Wärmespeicher unterstützt die lokale Gebäudebeheizung und die Warmwasserbereitung. Die gemessenen Speichernutzungsgrade liegen zwischen 55 und 70 % (Schmidt und Müller-Steinhagen 2005).

### Geologie Nordost-Bayerns

Das Bundesland Bayern wird durch vier hydrogeologische Großräume gegliedert. Im Süden durch die Alpen und das Alpenvorland, im Osten durch das Grundgebirge und im Nordwesten durch das Schichtstufen- und Bruchschollenland (Wagner et al. 2009). Im untersuchten nördlichen Teil ist die Geologie vor allem durch das Fränkische Becken geprägt, das sich seit dem Oberkarbon entwickelte (Bauer 2000; Fritzer et al. 2014). Es umfasst im weitesten Sinne den Randbereich des Germanischen Triasbeckens auf der Süddeutschen Großscholle südlich der Odenwald-Spessart-Rhön-Achse, zwischen Böhmischer Masse und Oberrheingraben und nördlich der Vindelizischen Schwelle (Schröder 1982). Die abgelagerte Schichtenfolge reicht, z. T. mit Schichtlücken und erheblichen Mächtigkeitsunterschieden, vom Oberkarbon bis zum Jungtertiär (Fritzer et al. 2014) (Abb. 1).

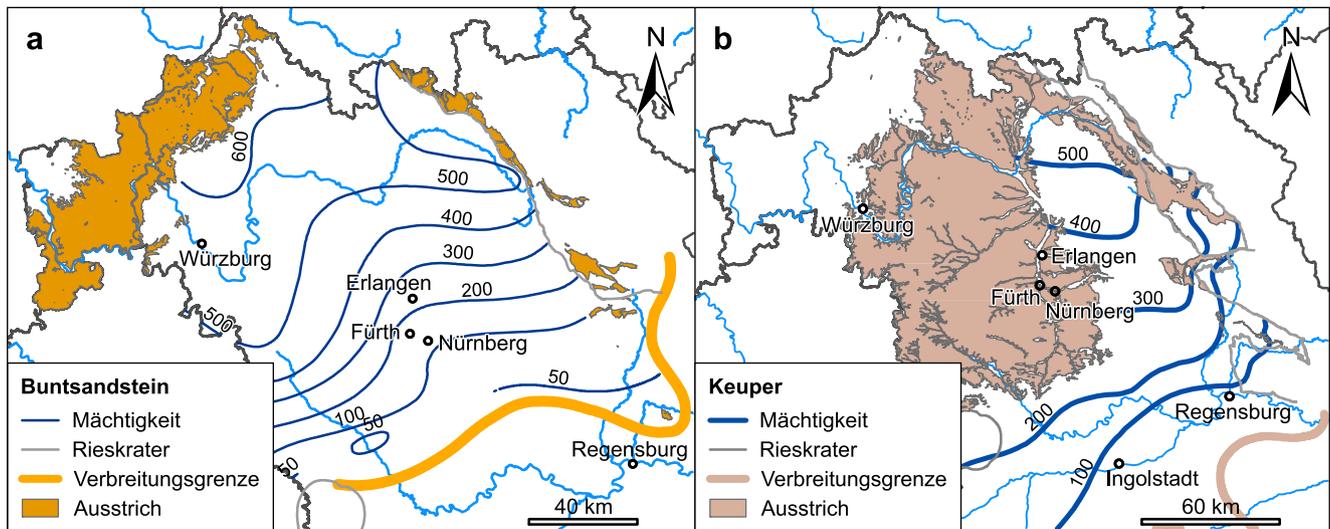
Die geologische Entwicklung begann mit dem Ende der variszischen Gebirgsbildung und führte im Oberkarbon aufgrund von Krustenbewegungen zur Bildung intramontaner Becken mit erhöhten Sedimentmächtigkeiten. Eines dieser Becken ist das Fränkische Becken (Müller 1994). Es dehnte sich ab dem Zechstein aufgrund mehrerer Transgressionen nach Süden und Westen aus und glich das vorhandene Relief weitestgehend aus (Trusheim 1964; Freudenberger und Schwerd 1996; Fritzer et al. 2014).

Mit Beginn der Trias dehnte sich der Sedimentationsraum weiter nach Süden aus. Die Sedimentation war während des Unteren und Mittleren Buntsandsteins teilweise unterbrochen, im Oberen Buntsandstein erfolgte jedoch eine erneute Transgression von Norden und Osten her, die im Unteren Muschelkalk zu flachmarinen Ablagerungen führte. Mit Beginn der Epoche des Mittleren Muschelkalks wurde das Fränkische Becken immer wieder vom offenen Meer abgeschnürt, wodurch sich evaporitische Ablagerungen bildeten, bevor im Oberen Muschelkalk wieder vollmarine Verhältnisse herrschten (Freudenberger und Schwerd 1996). Eine Regression im höheren Oberen Muschelkalk sorgte für eine weitere Süd-Ausdehnung des Sedimentationsraumes bis auf das Vindelizische Land und bestimmte die Sedimentationsbedingungen im Keuper, der in Süd-Deutschland vor allem von terrestrischen Einflüssen geprägt ist (Berger 1981; Geyer und Gwinner 1991). Dabei ist die Beckenfazies meist pelitisch-sulfatisch und die Randfazies klastisch-sandig ausgebildet. Am Ende des Oberen Keuper erfolgte ein Meeresvorstoß aus dem Norddeutschen Becken über die Hessische Senke (Fritzer et al. 2014). Dieser bestimmte die Ablagerungsbedingungen des Unteren Juras (Lias) bis in den tieferen Mittleren Jura (Dogger), die durch pelitisch-karbonatische Sedimentation mit hohem organischem Anteil im Beckeninneren und durch teilweise sandige Flussdeltaschüttungen aus dem Vindelizischen Land



**Abb. 1** a Vereinfachte geologische Übersicht von Bayern. Rot eingrahmt befindet sich der bayerische Anteil des Fränkischen Beckens. (Modifiziert nach Bayerisches Landesamt für Umwelt 1997 mit kleiner Deutschlandkarte, die die Lage Bayerns und des Untersuchungsgebietes (Stern) zeigt). b Schematisches geologisches Profil durch den Untergrund Nordbayerns aus Lage des Profilschnittes siehe (a)

**Fig. 1** a Simplified geological overview of Bavaria. Red outline shows the Bavarian part of the Franconian Basin. (Modified after Bayerisches Landesamt für Umwelt 1997 with a small map of Germany showing Bavaria and the study area (star)). b Schematic cross-section of the subsurface of northern Bavaria from Doppler et al. (2004). Location of the profile see (a)



**Abb. 2** Verbreitungs- und Mächtigkeitkarten des Buntsandsteins (a) und Keupers (b) in Nordbayern. Ausstrich in orange und braun. Südliche Verbreitungsgrenze als dicke orange und braune Linien. (Karten modifiziert nach Fritzer et al. 2014 und Mächtigkeiten des Keupers aus Haunschild 2000)

**Fig. 2** Distribution and thickness maps of the Buntsandstein (a) and Keuper (b) aquifers in northern Bavaria. Outcropping rocks are shown in orange and brown. Southern distribution limits are shown by thick orange and brown lines. (Maps modified after Fritzer et al. 2014 and Keuper thickness from Haunschild 2000)

gekennzeichnet sind. Anschließend wurde die Verbindung über die Hessische Senke durch die Hebung der Mitteldeutschen Schwelle unterbrochen, sodass der Einfluss des Tethys-Meeress zunahm und sandige Einheiten sedimentierten, die wiederum von pelitischen Lagen überlagert werden. Durch eine weltweite Transgression, die im oberen Dogger einsetzte, wurde das Fränkische Becken im Oberen Jura schließlich zu einem flachen Schelfmeer der Tethys und es kam zur Ablagerung mächtiger Karbonate des Malm (Freudenberger und Schwerd 1996; Fritzer et al. 2014).

Gegen Ende des Juras wurde die Juratafel gehoben (Trusheim 1964). In Folge unterlagen die Malmablagerungen (Oberer Jura) während der Unterkreide einer tiefgründigen Verkarstung, die nach der Transgression aus Südosten in der Oberkreide verfüllt wurde. Innerhalb der Kreide kam es im Zuge der alpidischen Orogenese zu einer Beckeninversion und zur Kippung der Sedimenttafel um ca. 3–5°. Nach Rückzug des Kreide-Meeress erfolgte eine Hebung der Böhmisches Masse und Teile der mesozoischen Sedimente wurden abgetragen (Bauer 2000).

### Aquifere im Fränkischen Becken

Potenzielle Aquifere im Fränkischen Becken bilden das Oberkarbon/Rotliegend, Zechstein, Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper und Dogger. Die beiden wichtigsten siliziklastischen Aquifere mit einem Potenzial für geothermische Nutzungen bilden aufgrund ihrer weiten räumlichen Verbreitung (Abb. 1), ihrer Tiefenlage (Abb. 2), ihrer grundsätzlich erhöhten Durchlässigkeit und ihrer ausreichenden

Temperaturen (10–45 °C) der Buntsandstein und Keuper (Bauer 2000; Fritzer et al. 2014). Diese Aquifere sind daher Gegenstand dieser Untersuchung.

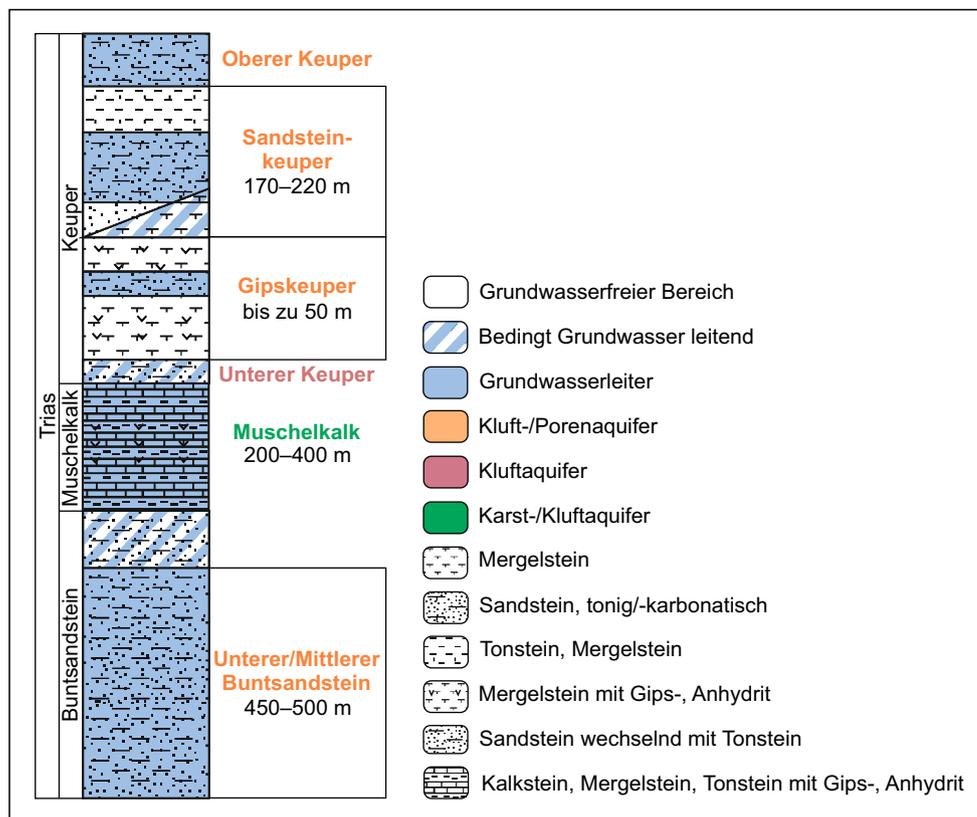
Die größten Mächtigkeiten des Buntsandsteins in Bayern werden im Nordosten nahe der Grenze zu Thüringen mit ca. 700 m Gesamtmächtigkeit erreicht. Nach Süden bzw. Südosten nehmen die Mächtigkeiten ab. Der Südrand der Buntsandsteinsedimentation verläuft nördlich der Linie Rieskrater-Regensburg (Abb. 2). Der östlich der Fränkischen Linie abgelagerte Buntsandstein ist durch die Heraushebung des Grundgebirges weitestgehend erodiert. Die tiefste strukturelle Position erreicht der Buntsandstein im Nordosten, nach Süden steigt die Buntsandsteinbasis wieder an (Bauer 2000).

Die stratigraphische Einteilung des Buntsandsteins erfolgt anhand lithologischer Kriterien nach den zyklisch wiederkehrenden Sedimentationsfolgen von grobklastischem Material über klastisch-pelitische Wechsellagerungen hin zu pelitischen Ablagerungen (Lepper und Röhlings 1998). Der Untere Buntsandstein wird so in zwei (Calvörde, Bernburg), der Mittlere Buntsandstein in vier (Volpriehausen, Detfurth, Hardegsen, Solling) Formationen und der Obere Buntsandstein in eine Formation (Röt) untergliedert (Freudenberger und Schwerd 1996; Lepper et al. 2013). Zu den Beckenrändern wird eine lithologische Abgrenzung oft schwierig, da die Formationen faziell identisch sind (Fritzer et al. 2014).

Im Unteren Buntsandstein weisen besonders die Geröllfelder am Beckenrand und tektonisch beanspruchte Bereiche gute Speichereigenschaften auf, während die feinkör-

**Abb. 3** Schematische Profilabfolge der hydrogeologischen Einheiten der Trias in Oberfranken mit mittleren Mächtigkeiten im Untersuchungsgebiet. (Modifiziert nach Kus et al. 2007)

**Fig. 3** Schematic stratigraphic sequence of the Triassic hydrogeological units in Upper Franconian with average thickness in the study area. (Modified after Kus et al. 2007)



nigen Ablagerungen eher ungünstige Speichereigenschaften aufweisen (Bauer 2000). Der wichtigste Grundwasserleiter innerhalb der Buntsandstein-Formation stellt jedoch der Mittlere Buntsandstein mit seinen teils grobkörnigen und kiesigen Sandsteinen dar (Udluft 1969; März 1977). Im Oberen Buntsandstein kann der zwischen den Röttonen auftretende Röt Quarzit als lokaler Grundwasserleiter ausgebildet sein (Klare 1989). Zum Beckenrand hin verbessern sich die hydraulischen Eigenschaften des Oberen Buntsandsteins aufgrund des zunehmenden Sandanteils in der Übergangsfazies (März 1977; Fritzer et al. 2014). In der sandig ausgebildeten Randfazies bilden Mittlerer und Oberer Buntsandstein ein zusammenhängendes Grundwasserstockwerk (Abb. 3) (Bauer 2000).

Die meisten Thermalwasserbohrungen im Fränkischen Becken haben Wasser aus dem Unteren und Mittleren Buntsandstein erschlossen, da dieser eine großräumige Ausdehnung bei ausreichenden Tiefen sowie vergleichsweise günstige Speichereigenschaften besitzt. Während der Buntsandstein in Unter- und Mittelfranken als ein ausgesprochener Kluftaquifer anzusprechen ist, scheint in Oberfranken zusätzlich der Gesteinsporenraum einen geringen Anteil an der Wasserführung zu besitzen (Klare 1989; Bauer 2000).

Der Ausstrich des Keupers verläuft bogenförmig aus dem Raum Stuttgart-Heilbronn über Mittelfranken nach Südhüringen (Abb. 2). Die Schichten tauchen von ih-

rem Ausstrichbereich nach SE unter die Frankenalb ab. Die größten Mächtigkeiten mit über 500 m wurden in dem NW-SE-gerichteten Ablagerungszentrum erbohrt. Die Südgrenze der Keuperverbreitung dürfte etwa der Linie Straubing-Kempten folgen (Bauer 2000; Freudenberger 2005).

Der Untere Keuper wird von tonig-sandigen Bildungen mit Dolomit- und Kalkeinschaltungen dominiert; im tieferen Mittleren Keuper tritt auch Gips auf (Gipskeuper) (Freudenberger und Schwerd 1996; Bauer 2000). Südöstlich einer Linie Bayreuth-Erlangen-Ansbach-Feuchtwangen kommt im tiefsten Gipskeuper der sogenannte „Benkersandstein“ als randfazielles Äquivalent zu den tonig-mergeligen Myophorienschichten des Beckenzentrums vor (Emmert 1964; Haunschild 1985). Ab dem höheren Mittleren Keuper werden überwiegend Sandsteine mit Tonsteineinschaltungen abgelagert („Sandsteinkeuper“) (Freudenberger und Schwerd 1996). Im Oberen Keuper (Rhät) findet sich im Fränkischen Becken eine Wechselfolge von Sand- und Tonsteinen, die sich lithologisch nicht immer eindeutig dem Rhät oder dem darüber folgenden Lias zuordnen lässt. Sie werden daher als „Rhätolias“ zusammengefasst (Freudenberger und Schwerd 1996; Fritzer et al. 2014).

Gute Ergiebigkeiten sind im Keuper vor allem im Benkersandstein zu erwarten. Auch die Abfolgen des Sandsteinkeupers können als gute Grundwasserleiter entwickelt

sein. Die einzelnen Sandsteinkeuper-Folgen werden im Beckenzentrum durch Lettenhorizonte teilweise hydraulisch voneinander getrennt. Eine hydraulische Abgrenzung des Sandsteinkeupers vom Benkersandstein ist durch die tonigen Lehrberg- und Estheriensichten gegeben (Abb. 3). Diese Trennung tritt zum Beckenrand mit zunehmender Versandung zurück.

Allgemein weisen die Gesteine des Mittleren Keupers erhöhte hydraulisch wirksame Porenraumanteile auf. Es handelt sich somit um kombinierte Kluft-Poren-Aquifere, wobei Wasserbewegungen entlang von Klüften dominieren (Bauer 2000). Auch beim Rhätolias handelt es sich um einen kombinierten Kluft-Poren-Aquifer (Fritzer et al. 2014).

## Methoden

Die hydraulischen Parameter Transmissivität und Durchlässigkeitsbeiwert können – bei Kenntnis der Aquifermächtigkeit bzw. Zuflusszone – direkt aus Pump- und Injektionstests berechnet werden. Für eine geothermische Nutzung sollten die Transmissivitätswerte höher als  $5E-5 \text{ m}^2/\text{s}$  sein und die Durchlässigkeitsbeiwerte höher als  $1E-6 \text{ m/s}$  (Stober et al. 2016).

Als Datengrundlage dienten vor allem Leistungsdaten wie Ruhewasserspiegel, Absenkung, Förderleistung und spezifische Ergiebigkeit von Brunnen und Bohrungen, bzw. Protokolle von Leistungspumpversuchen aus den geologischen Kartenerläuterungen der GK25 für Bayern und Transmissivitäts- und Durchlässigkeitsbeiwerte aus dem deutschen Bäderbuch (Käß und Käß 2008). Hinzu kommen Transmissivitäts- und Durchlässigkeitsbeiwerte aus der hydrogeologischen Karte (HK 100) Planungsregion 4 Oberfranken-West (Kus et al. 2007) und der hydrogeologischen Karte von Bayern im Maßstab 1:500.000 (Wagner et al. 2009). Die Werte zur Transmissivität und Durchlässigkeit des Geothermieatlas Bayern (Fritzer et al. 2014) ergänzen die Recherche. Weiterhin wurden Akten von Pumpstests im Landesamt für Umwelt in Augsburg eingesehen, um das Datenset mit bereits ausgewerteten Transmissivitäten und Durchlässigkeitsbeiwerten zu erweitern. Eine Literaturrecherche zu veröffentlichten Transmissivitätswerten und Durchlässigkeitsbeiwerten wurde ausgehend von der Arbeit von Bauer (2000) und der darin zitierten Literatur durchgeführt und vervollständigt das Datenset (Nosrat-Nezami 1975; März 1977; Andres und Georgotas 1978; Rietzler 1979, 1984; Andres und Wirth 1981; Udluft und Bauer 1997) (s. Tabellen im Zusatzmaterial der Online-Ausgabe dieses Beitrags).

Häufig standen zur Beurteilung der Durchlässigkeit jedoch nur Leistungsdaten von Brunnen und Bohrungen, bzw. Protokolle von Leistungspumpversuchen zur Verfü-

gung. Daher konnten in diesen Fällen lediglich Abschätzungen der Transmissivitäten und Durchlässigkeitsbeiwerte mithilfe der Brunnencharakteristika vorgenommen werden.

## Transmissivität (T)

Ausgehend von den Methoden von Thiem (1906) hat Logan (1964) die spezifischen Ergiebigkeiten aus Brunnenstests als Grundlage genommen, um für den stationären Fall die Transmissivität im gespannten Aquifer und im Aquifer mit freier Oberfläche zu berechnen.

Die spezifische Ergiebigkeit  $C$  ergibt sich dabei zu:

$$C = \frac{Q}{s} [\text{m}^2/\text{s}] \quad (1)$$

mit:

$Q$  = Förderrate [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$s$  = Absenkung [ $\text{m}$ ]

Nach Logan (1964) berechnet sich für gespannte Aquifere daraus die Transmissivität zu:

$$T = 1,22 \cdot C [\text{m}^2/\text{s}] \quad (2)$$

und für Aquifere mit freier Oberfläche zu:

$$T = 2,43 \cdot C \cdot \frac{m}{2m-s} [\text{m}^2/\text{s}] \quad (3)$$

mit:

$C$  = spezifische Ergiebigkeit [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$m$  = wassererfüllte Mächtigkeit [ $\text{m}$ ]

## Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert)

Der Durchlässigkeitsbeiwert lässt sich bei homogenen, isotropen Verhältnissen aus der Transmissivität berechnen:

$$k_f = \frac{T}{m} [\text{m/s}] \quad (4)$$

Leider ist die wassererfüllte Mächtigkeit nicht immer bekannt. Nach Grimm und Hofbauer (1967) gibt es auf Grundlage der allgemeinen Formel von Thiem (1870) die Gleichung:

$$Q = \frac{\pi \cdot k_f (H^2 - h^2)}{\ln R - \ln r} [\text{m}^3/\text{s}] \quad (5)$$

mit:

$H$  = Höhe ungesenkter Wasserstand

$h$  = Höhe abgesenkter Wasserstand

$R$  = Radius des Absenktrichters  
 $r$  = Radius des Brunnens

Wobei  $(H-h)$  der Absenkung  $s$  entspricht. Sichardt (1927) ermittelte  $k_f$ -Werte mittels eines statistischen Probiervfahrens für verschiedene Radien und schloss, dass sie nur einen sehr geringen Einfluss auf die hydraulische Durchlässigkeit haben und daher zu  $c = \frac{\ln R - \ln r}{\pi}$  substituiert werden können. Es ergibt sich:

$$k_f = \frac{c \cdot Q}{(2H-s) \cdot s} [m/s] \quad (6)$$

Mithilfe des Verfahrens nach Sichardt (1927) und seiner Annahme eines Filterradius von 30 cm lässt sich Gl. 6 umformen zu:

$$k_f = \frac{2 \cdot Q}{(2H-s) \cdot s} [m/s] \quad (7)$$

Da Gl. 7 die Annahme eines Radius von 30 cm beinhaltet, lassen sich damit nur grobe Abschätzungen des Durchlässigkeitsbeiwertes vornehmen.

Insgesamt wurden Transmissivitätswerte und  $k_f$ -Werte mithilfe vier verschiedener Methoden abgeleitet:

- Methode 1: Transmissivitäts- oder  $k_f$ -Wert aus Literatur übernommen.
- Methode 2: Bei bekannter Mächtigkeit kann nach Gl. 4 eine Transmissivität aus dem  $k_f$ -Wert berechnet werden, bzw. aus einem bekannten Transmissivitätswert der  $k_f$ -Wert abgeleitet werden. Hierbei sind als Grundlage Transmissivität und  $k_f$ -Wert aus Methode 1 verwendet worden.
- Methode 3: Bei bekannter spezifischer Ergiebigkeit (berechnet aus Förderrate und Absenkung, die der Literatur entnommen wurden) wird nach Gl. 2 die Transmissivität berechnet. Der  $k_f$ -Wert wird aus Gl. 7 anhand Förderrate, Absenkung und der Höhe des ungesenkten Wasserstandes (Ruhewasserspiegel) berechnet.
- Methode 4: Die 4. Methode berechnet Transmissivität, bzw.  $k_f$ -Wert wiederum nach Gl. 4. Hier sind die eingehenden Transmissivitäten bzw.  $k_f$ -Werte allerdings nach Methode 3 (Gl. 2, bzw. Gl. 7) berechnet.

## Temperatur

Die Untergrundtemperatur nimmt in Deutschland im Mittel um 32 K pro Kilometer mit der Tiefe zu. Für eine genaue Prognose der Untergrundtemperatur zur Abschätzung geothermischer Ressourcen reicht dieser statistische Mittelwert jedoch nicht, da lokal und auch abhängig von der Tiefe große Abweichungen vom mittleren geothermischen Gra-

dienten auftreten können (Agemar et al. 2012, 2013). Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit aneinandergrenzender Gesteinskörper, aufsteigende Tiefenwässer, aber auch eine mögliche räumliche Variabilität des basalen Wärmestroms können zu einem räumlich heterogenen Temperaturfeld im Untergrund beitragen (z. B. Kutasov 1999). Der Zusammenhang zwischen Wärmestromdichte (HFD), Temperaturgradient und Wärmeleitfähigkeit  $\kappa$  [ $J / (s \cdot m \cdot K)$ ] wird dabei durch die Fourier-Gleichung ausgedrückt:

$$HFD = -\kappa \frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1} \quad (8)$$

mit:

$z_1$  und  $z_2$  = Teufen in m (TVD)  
 $T_1$  und  $T_2$  = Temperaturen bei  $z_1$  und  $z_2$

Das Vorzeichen ist nötig, da die positive  $z$ -Achse nach oben zeigt.

Grundlage für die Beschreibung des Temperaturfelds im Untergrund sind Temperaturmessungen, die am LIAG im Fachinformationssystem Geophysik (FIS-GP) archiviert werden (Kühne et al. 2003). Am häufigsten liegen BHT-Messungen (BHT = Bottom Hole Temperature) vor, da diese in fast allen Industriebohrungen unmittelbar nach Einstellen der Bohrarbeiten im Bohrlochtiefsten im Rahmen der geophysikalischen Bohrlochmessungen durchgeführt werden. Allerdings muss diese korrigiert werden, da die eingebrachte Bohrspülung das tiefere Ende des Bohrlochs während des Bohrvorgangs kühlt. Am besten gelingt die Korrektur, wenn über mehrere Tage nach dem Spülungsstopp der Wiederanstieg der Temperatur gemessen wird. Die aktuell im FIS-GP angewandten Korrekturverfahren sind in Fachzeitschriften und verschiedenen, online verfügbaren Berichten ausführlich beschrieben (Schulz und Werner 1987; Schulz und Schellschmidt 1991; Agemar et al. 2012; Bolotovskiy et al. 2015; Agemar 2017).

Darüber hinaus enthält das FIS-GP auch kontinuierliche Temperaturmessungen (Temperatur-Logs) aus Tiefbohrungen, die jedoch zum Teil ebenfalls zu einem Zeitpunkt gemessen wurden, als das Bohrloch noch nicht die ursprüngliche, ungestörte Temperatur wieder erreicht hatte. Stark gestörte Temperaturlogs sind daher im FIS-GP deaktiviert.

Zuverlässigere Temperaturwerte stammen entweder von ungestörten Messungen, die erst mehrere Wochen oder Monate nach dem Spülungsstopp gemessen wurden, oder von längeren Pumptests.

Für die Prognose der Formationstemperaturen wurde das 3D-Temperaturmodell des geothermischen Informationssystems GeotIS verwendet, das 2018 aktualisiert wurde. Dieses Temperaturmodell wurde mit 3D-Kriging auf der Grundlage verschiedener Temperaturdaten weitgehend nach dem in Agemar et al. (2012) beschriebenen Ver-

fahren erstellt. Allerdings wurden die Abstandsregeln für den Qualitätsfilter bei der Datenauswahl verschärft, worauf noch näher eingegangen wird. Außerdem wurde eine weitere Qualitätskategorie für Temperaturmessungen bei Pumptests eingeführt. Recherchen in Bohrakten haben gezeigt, dass Temperaturmessungen aus Pumptests häufig nicht so zuverlässig die ungestörte Formationstemperatur wiedergeben, wie sehr zuverlässig bestimmte Lagerstättentemperaturen oder ungestörte Temperatur-Logs, aber in aller Regel besser als korrigierte Messwerte im Bohrloch-tiefsten (Bottom Hole Temperatures, BHT). Es erfolgt eine Einteilung der Untergrundtemperaturmessungen in vier Qualitätskategorien:

1. Ungestörte Logs und Lagerstättentemperaturen
2. Temperaturmessungen bei Pumptests
3. Gestörte Logs und korrigierte BHTs mit Standzeit(en) ab Spülstopp
4. Korrigierte BHTs mit geschätzter Standzeit ab Spülstopp

Insgesamt liegen in dem Untersuchungsgebiet für ca. 400 Lokalitäten Temperaturmessdaten vor. Die niedrigste Datenqualität (4) wurde für die Prognose des Temperaturfeldes im Untersuchungsgebiet nur bei einer Lokalität verwendet (Bohrung Windsheim 1), da in allen übrigen Gebieten höherwertigere Messungen vorlagen. Die höchsten Datenqualitäten (1 und 2) gingen an etwa der Hälfte aller Lokalitäten in die Berechnung des Temperaturfeldes ein.

Die Abstandsregel besagt, dass weniger zuverlässige Messwerte bis zu einer bestimmten Entfernung von einer höherwertigen Messung nicht verwendet werden, wenn sie nicht mehr als 500 m tiefer als die höherwertige Messung lokalisiert ist. Messungen der zweiten Qualitätskategorie werden in einem Umkreis mit 5-km-Radius einer Messung der höchsten Kategorie 1 nicht verwendet. Bei Messungen der Kategorie 3 beträgt der Radius 10 km und bei der Kategorie 4 beträgt der Radius 20 km. Hintergrund dieser entfernungs-basierten Filterung ist, dass entsprechend der räumlichen Varianz die Bedeutung einer Temperaturmessung für die Prognose mit zunehmendem Abstand abnimmt. Die Verschärfung der Abstandsregeln gegenüber Agemar et al. (2012) erfolgte aufgrund einer neuen Einschätzung der Datenqualität und einer stärkeren Gewichtung der räumlichen Varianz speziell in Süddeutschland.

Sämtliche Untergrundtemperaturen wurden aus dem FIS-Geophysik entnommen, das über Temperaturdaten von ca. 11.000 Bohrungen verfügt. Der überwiegende Teil dieser Daten bezieht sich auf Deutschland. Bodentemperaturen wurden, wie in Agemar et al. (2012) dargelegt, aus Lufttemperaturmessungen des Deutschen Wetterdienstes und anderer Meteorologischer Dienste des Zeitraums 1961–1990 abgeleitet.

## Ergebnisse

### Hydraulische Eigenschaften

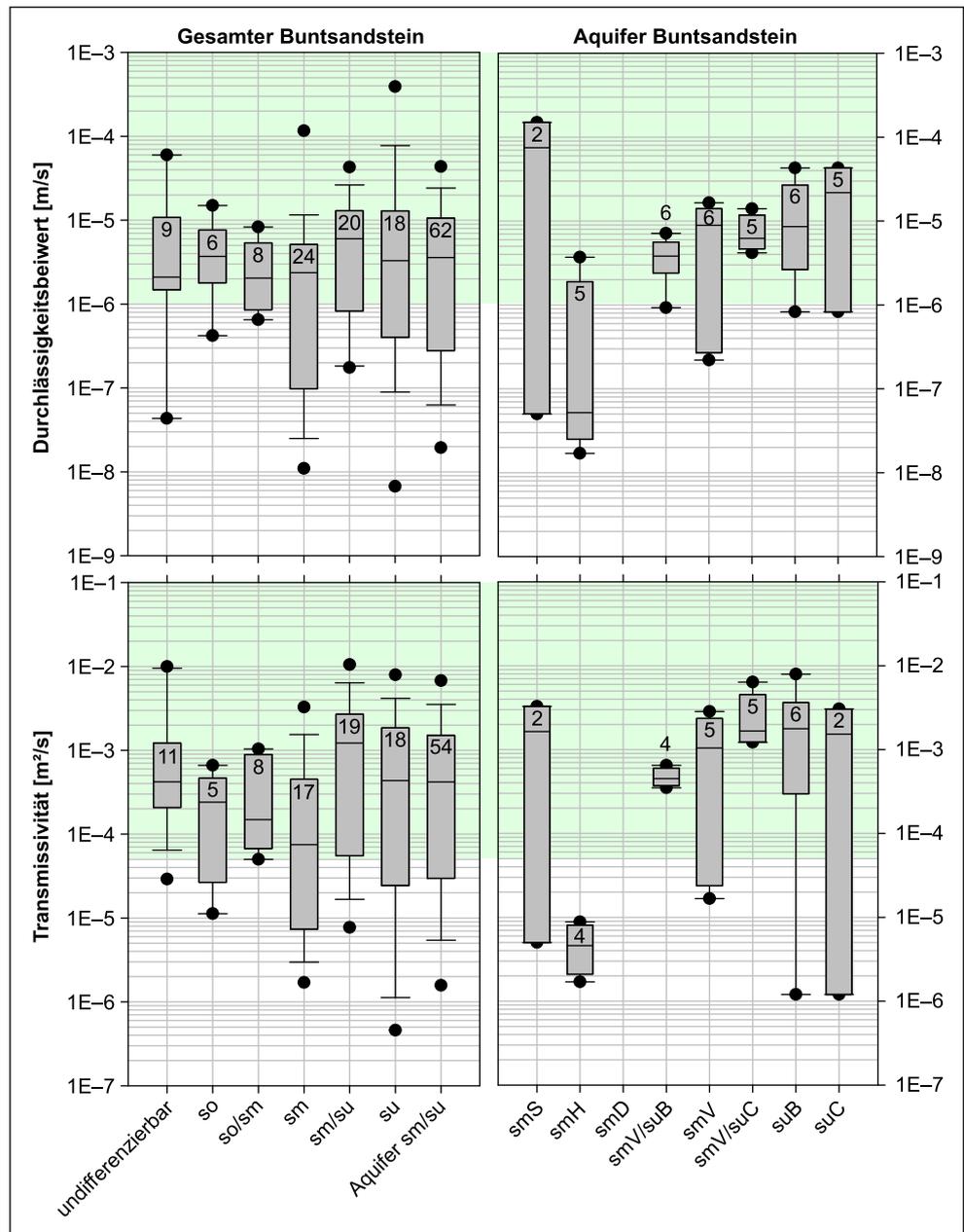
Rund 70 % aller Werte des gesamten Buntsandstein-Daten-sets sind nach der Definition von Stober et al. (2016) für eine geothermische Nutzung geeignet (Abb. 4). Die Medianwerte der Durchlässigkeitsbeiwerte und der Transmissivitätswerte liegen, bis auf die Hardeggen-Formation (smH), im für eine geothermische Nutzung geeigneten Bereich. Aufgrund der geringen Anzahl von Werten sind die Daten zu den Formationen wenig aussagekräftig. Die höchsten Durchlässigkeitsbeiwerte und Transmissivitätswerte finden sich im Unteren Buntsandstein (su), bzw. in den stratigraphisch nicht differenzierbaren Werten im Mittleren und Unteren Buntsandstein (sm/su), meist bis zu 200 m Tiefe. Die Werte des Mittleren Buntsandsteins (sm) weisen die größte Datenspanne auf, bei der fast 50 % der  $k_f$ -Daten und 40 % der Transmissivitäts-Daten für eine geothermische Nutzung zu gering sind. Sie liegen in einer Teufe bis zu 200 m. Den Buntsandstein-Aquifer bilden allerdings der Mittlere und Untere Buntsandstein (Aquifer sm/su) zusammen. Der Median der Aquifer-Werte liegt beim Durchlässigkeitsbeiwert bei  $3,6E-6$  m/s und bei der Transmissivität bei  $4,2E-4$  m<sup>2</sup>/s (Abb. 4). Hier sind insgesamt 65 % der Durchlässigkeitsbeiwerte und 70 % der Transmissivitätswerte für eine Nutzung geeignet. Räumlich betrachtet fallen die hohen Werte in den Nordosten Bayerns an die Grenze zu Thüringen und in den Raum um Fürth (Abb. 5). Für den deutlich tiefer versenkten Buntsandstein im Oberrheingraben wurden geringere Durchlässigkeiten ermittelt (Stober und Bucher 2014). Allerdings steigt die Mächtigkeit des Buntsandsteins im Oberrheingraben bereichsweise auf über 500 m an.

Insgesamt sind im Aquifer Buntsandstein aufgrund der Verteilung der Durchlässigkeits- und Transmissivitätswerte größer  $1E-6$  m/s bzw.  $5E-5$  m<sup>2</sup>/s die Regionen im Nordosten Bayerns und um Fürth gut für eine geothermische Nutzung geeignet (Abb. 5).

Im Keuper sind insgesamt sogar über 80 % aller Werte in diesem Datenset für eine geothermische Nutzung geeignet. Die Medianwerte der verschiedenen Stratigraphien schwanken stärker als im Buntsandstein. Auch die Probenanzahl für die verschiedenen Stratigraphien schwankt stark (134 Werte für den Mittleren Keuper und nur 3 Werte für den Unteren Keuper, Abb. 6).

Für die Aquifere im Unteren und Oberen Keuper (ko) sind nur wenige Daten vorhanden (Abb. 6). Eine detaillierte Betrachtung ist daher wenig sinnvoll. Im Mittleren Keuper (km) sind 75 % der Durchlässigkeitsbeiwerte und 97 % der Transmissivitäten für eine geothermische Nutzung geeignet. Aufgrund der Datenlage können die Aquifere im Gipskeuper und im Sandsteinkeuper näher betrachtet werden. Dabei ist der Median der Werte im Gipskeuper ( $3,2E-6$  m/s beim

**Abb. 4** Übersicht der hydraulischen Eigenschaften in Form von Box-Whisker-Plots mit 5 und 95 Perzentile des Buntsandsteins. Die *Linie* im Boxplot zeigt den Median. *Zahl* im Boxplot = Anzahl der Werte. Für eine hydrothermale Nutzung geeignet sind alle Werte im *grün hinterlegten Bereich* (so Oberer Buntsandstein, *sm* Mittlerer Buntsandstein, *su* Unterer Buntsandstein, *smS* Solling Formation, *smH* Hardegsen Formation, *smD* Detfurth Formation, *smV* Volpriehausen Formation, *suC* Calvörde Formation, *suB* Bernburg Formation)  
**Fig. 4** Overview of the hydraulic properties as box-whisker plots with 5 and 95 percentiles of the Buntsandstein. The *line* in the box plot shows the median. *Figures* in the box plot = number of values. All values in the *green coloured area* are suitable for hydrothermal use (so Upper Buntsandstein, *sm* Middle Buntsandstein, *su* Lower Buntsandstein, *smS* Solling Formation, *smH* Hardegsen Formation, *smD* Detfurth Formation, *smV* Volpriehausen Formation, *suC* Calvoerde Formation, *suB* Bernburg Formation)



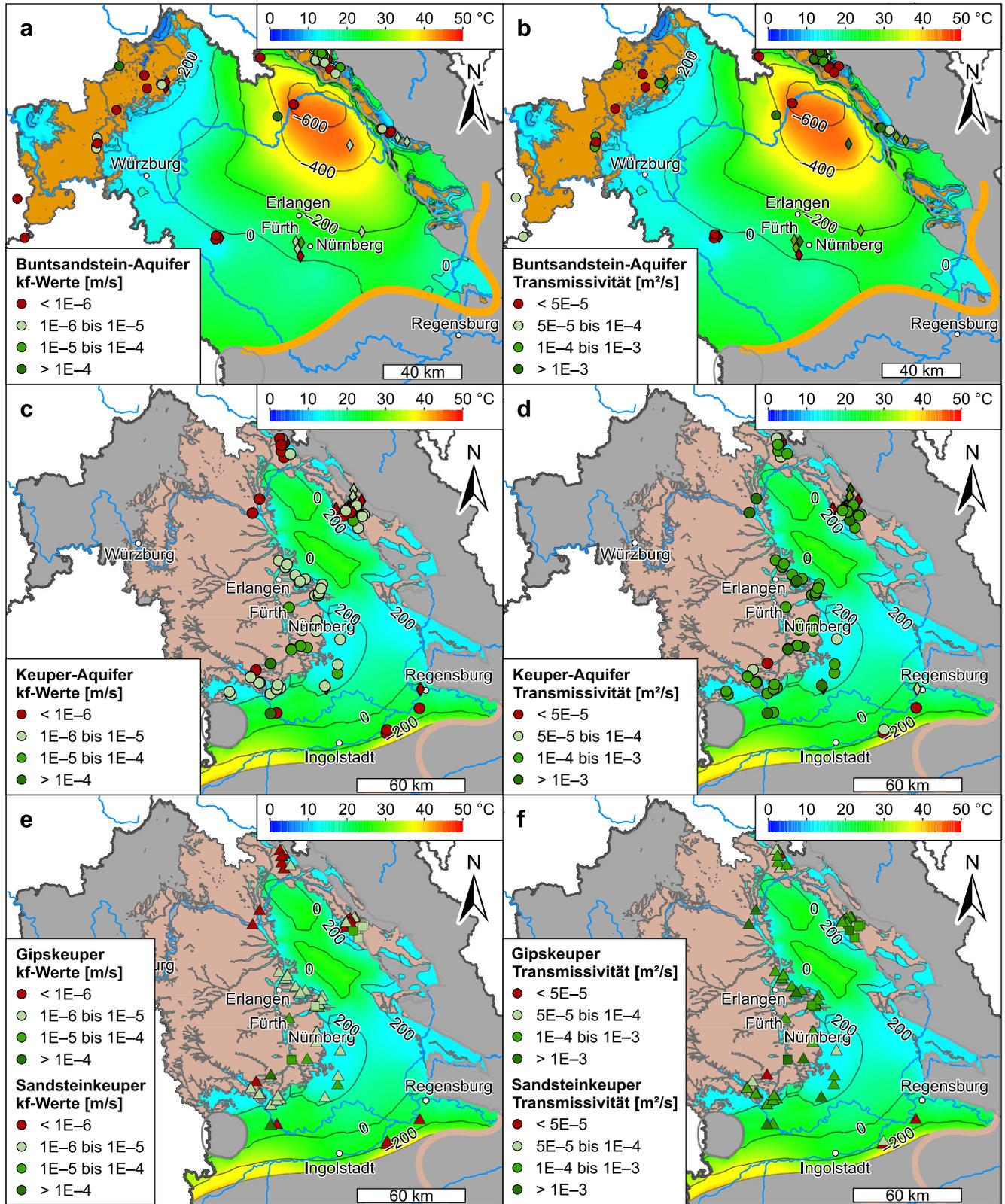
$k_f$ -Wert bzw.  $4,7E-4\text{ m}^2/\text{s}$  bei der Transmissivität) höher als der Median im Sandsteinkeuper ( $2,5E-6\text{ m/s}$  beim  $k_f$ -Wert bzw.  $2,8E-4\text{ m}^2/\text{s}$  bei der Transmissivität). Es liegen fast alle Werte im Bereich für eine geothermische Nutzung nach Stober et al. (2016).

Leider können von den 10 vorliegenden Werten des Gipskeupers nur acht Werte weiter stratigraphisch differenziert werden (Abb. 6). Die beiden Aquifere Benkersandstein, ausschließlich am nordöstlichen Beckenrand, und Schilfsandstein liegen in Teufen bis zu 400m und sind in diesem Datenset vollständig für eine Nutzung geeignet. Die Werte befinden sich dem Ausbiss folgend nördlich und

südlich von Nürnberg sowie in der Region am Ausstrich im Osten.

Über 65 % aller Durchlässigkeitsbeiwerte und 95 % aller Transmissivitätswerte im Sandsteinkeuper kommen für eine geothermische Nutzung infrage. Von den 82 Werten des Sandsteinkeupers können 38 Werte weiter stratigraphisch in die Aquifere Buntsandstein und Blasensandstein differenziert werden. Die vorliegenden Werte und die dazugehörigen Mediane unterscheiden sich kaum (Abb. 6).

Bei einer räumlichen Betrachtung befinden sich die höchsten Durchlässigkeits- und Transmissivitätswerte des Keuperaquifers dem Ausbiss in einem Bogen folgend nördlich und südlich von Nürnberg in geringen Teufen (Abb. 5).

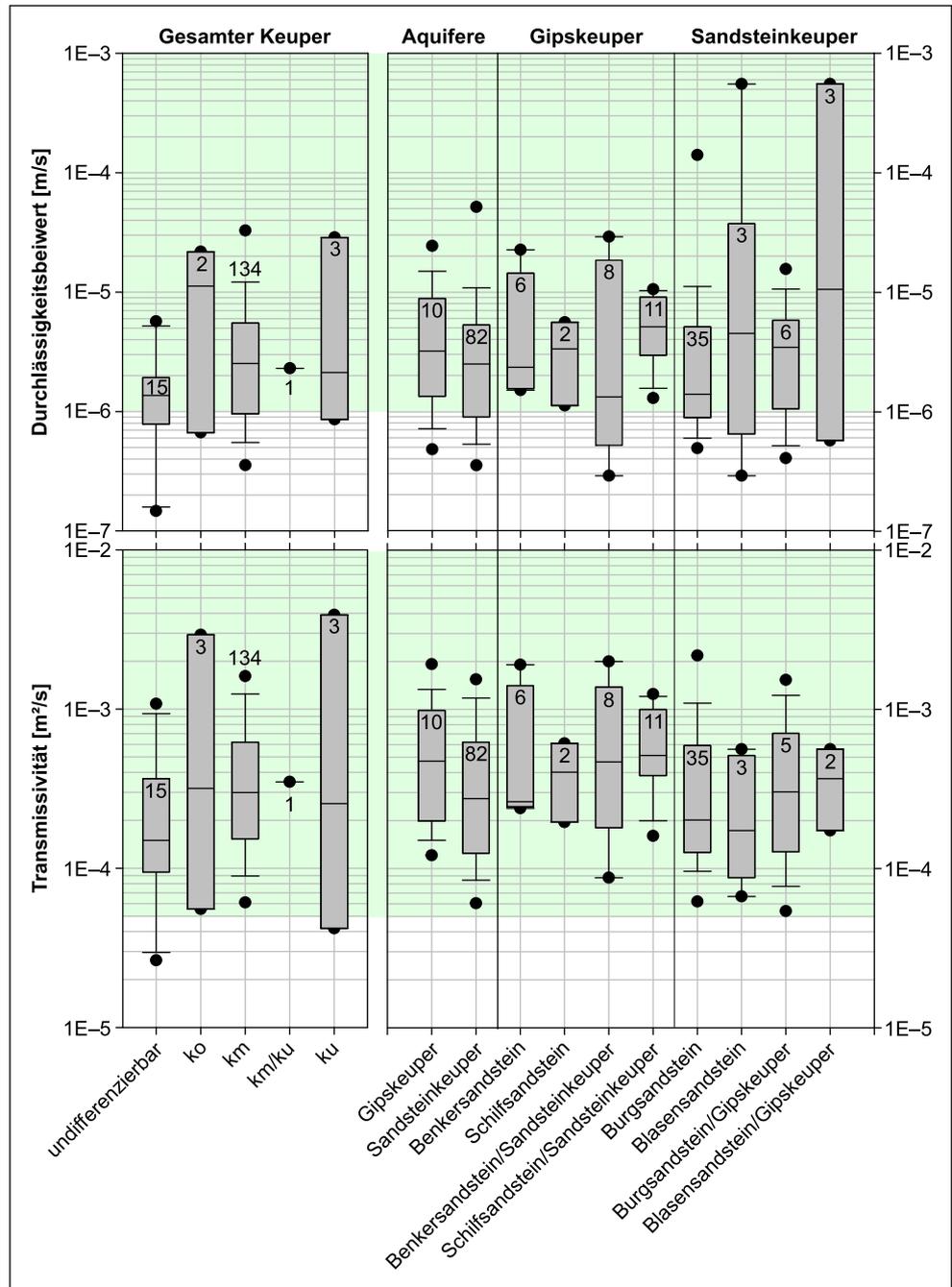


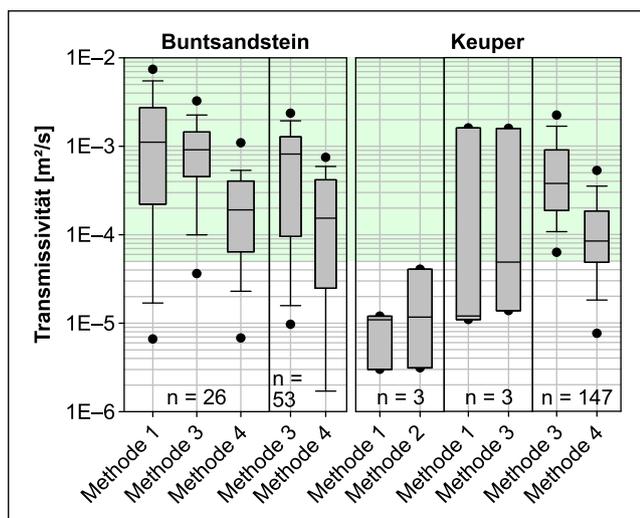
**Abb. 5** Karten der Temperaturverteilung in Nordbayern. Eingetragen sind die Durchlässigkeitsbeiwerte und Transmissivitäten: **a–b** Buntsandstein, **c–f** Keuper. Alle grün gehaltenen Werte sind für eine hydrothermale Nutzung geeignet. Symbole in Rautenform geben Werte an, die keiner genauen Stratigraphie zugeordnet werden konnten. Die Karten zeigen die Tiefe in Meter über NN der Oberkante des Buntsandsteins (**a–b**) und der Oberkante des Sandsteinkeupers (**c–f**). Die ausstreichenden Gesteine sowie ihre Verbreitungsgrenze sind in orangenen (Buntsandstein) bzw. braunen (Keuper) Farben wiedergegeben. (Karten modifiziert nach Fritzer et al. 2014)

**Fig. 5** Maps of the temperature distribution in northern Bavaria. Hydraulic conductivity and transmissivity values are marked as symbols: **a–b** Buntsandstein, **c–f** Keuper. All green coloured values are suitable for hydrothermal use. Diamond shaped symbols show values with an unknown stratigraphic position. Furthermore, maps show the depth relative to mean sea level of the top of the Buntsandstein (**a–b**) and top of the Sandsteinkeuper (**c–f**). Outcropping rocks and their southern distribution limits are orange and brown coloured. (Maps modified after Fritzer et al. 2014)

**Abb. 6** Übersicht der hydraulischen Eigenschaften in Form von Box-Whisker-Plots mit 5- und 95-Perzentile des Keupers. Die Linie ist der Median. Zahl im Boxplot = Anzahl der Werte. Für eine hydrothermale Nutzung geeignet sind alle Werte im grün hinterlegten Bereich (ko Oberer Keuper, km Mittlerer Keuper, ku Unterer Keuper)

**Fig. 6** Overview of the hydraulic properties in box-whisker plots with 5 and 95 percentiles of the Keuper. Line in the box plot shows the median. Figures in the box plot = number of values. All values in the green coloured area use suitable for hydrothermal use (ko Upper Keuper, km Middle Keuper, ku Lower Keuper)





**Abb. 7** Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Berechnung der Transmissivität in Form von Box-Whisker-Plots mit 5- und 95-Perzentilen ( $n$  Anzahl der Werte. Methode 1 = Werte aus Literatur übernommen, Methode 2 = Transmissivität berechnet mit Gl. 4 aus Literatur- $k_f$ -Werten, Methode 3 = berechnet nach Gl. 2, Methode 4 = Transmissivität berechnet nach Gl. 4 aus selbst berechneten  $k_f$ -Werten nach Gl. 7) **Fig. 7** Comparison of different methods for the calculation of the transmissivity in box-whisker plots with 5 and 95 percentiles ( $n$  number of values. Method 1 = Values from literature, Method 2 = Transmissivity calculated with eq. 4 from literature hydraulic conductivity values, Method 3 = calculated with eq. 2, Method 4 = Transmissivity calculated with eq. 4 using hydraulic conductivity values calculated from eq. 7)

Die 35 % der ungeeigneten Durchlässigkeitsbeiwerte befinden sich im Norden des Untersuchungsgebietes und in größeren Teufen im Süden bei Ingolstadt und Regensburg (300–650 m).

Insgesamt eignet sich, nach der Definition von Stober et al. (2016), die Region nördlich und südlich von Nürnberg in geringen Teufen der Ausbisskante folgend am besten für eine geothermische Nutzung. Als eher nicht geeignet zeichnet sich der Keuper in größeren Teufen zwischen Regensburg und Ingolstadt und im Norden ab (Abb. 5).

### Temperaturverhältnisse im Buntsandstein und Keuper

Das Fränkische Becken weist nach dem aktuellen Temperaturmodell des LIAG einen durchschnittlichen geothermischen Gradienten von ca. 31 K/km auf, im Beckenzentrum können aber auch bis zu 48 K/km erreicht werden. Für den Buntsandstein sind deshalb die höchsten Temperaturen im Beckenzentrum zu erwarten. Der Buntsandstein liegt hier in einer Tiefe von ca. 1000 m (TVD) und lässt eine Formationstemperatur von ca. 45 °C erwarten (Abb. 5). Der Keuper liegt hier deutlich höher bei ca. 400 m Tiefe (TVD) und weist eine Temperatur von wahrscheinlich 25 °C auf. Die höchsten Keuper-Temperaturen sind mit ca. 40 °C am

Südrand des Modellgebiets in ca. 800 m Tiefe (TVD) zu erwarten (Abb. 5). Die Temperaturverteilung im Fränkischen Becken kann über das geothermische Informationssystem GeotIS einschließlich der Kriging-Standardabweichung abgerufen werden (<https://www.geotis.de>).

### Methodenvergleich

Da die verwendeten Daten zur Bestimmung der Transmissivitäts- und Durchlässigkeitsbeiwerte mit den vier vorgestellten Methoden aufbereitet wurden, müssen die Ergebnisse der Methoden miteinander verglichen und diskutiert werden. Verglichen werden hier Transmissivitätswerte, die gleichzeitig nach unterschiedlichen Methoden berechnet werden konnten.

Für den Buntsandstein können 27 Werte verglichen werden, die sowohl aus der Literatur (Methode 1) als auch nach Methode 3 und nach Methode 4 bestimmt werden konnten (Abb. 7). Die Mediane der verschiedenen Methoden schwanken fast um eine Größenordnung und liegen zwischen  $1,1E-3 \text{ m}^2/\text{s}$  und  $1,9E-4 \text{ m}^2/\text{s}$ . Der Großteil der Werte (87 %) liegt aber im Bereich, der eine geothermische Nutzung erlaubt ( $> 5E-5 \text{ m}^2/\text{s}$ ). Da die Werte trotz der Berechnung nach unterschiedlichen Methoden nur innerhalb des Intervalls schwanken, das für eine geothermische Nutzung nach Stober et al. (2016) geeignet ist, fällt die Wahl der Methode für die Übersichtsdarstellung nicht ins Gewicht.

Beim Keuper lassen sich jeweils nur Werte von zwei Methoden miteinander vergleichen (Abb. 7). Beim Vergleich der Literaturdaten (Methode 1) mit denen nach Methode 2 stimmen die Mediane fast überein ( $1,1E-5 \text{ m}^2/\text{s}$  und  $1,2E-5 \text{ m}^2/\text{s}$ ). Allerdings werden hier auch nur drei Wertepaare miteinander verglichen, die allesamt nicht im Bereich für eine geothermische Nutzung liegen. Die Ergebnisse sind hier unabhängig von der betrachteten Methode. Das Gleiche gilt für den Vergleich der Methoden 1 und 3.

Beim Vergleich der 147 Wertepaare, die nach Methode 3 und Methode 4 bestimmt wurden, zeigt sich wie beim Buntsandstein ein deutlicherer Unterschied. Der Median aus den Werten nach Methode 3 ( $3,8E-4 \text{ m}^2/\text{s}$ ) liegt deutlich höher als bei den Werten nach Methode 4 ( $8,4E-5 \text{ m}^2/\text{s}$ ). Da der Großteil der Werte nach Gl. 4 aus berechneten  $k_f$ -Werten (Methode 4) das Keuper-Datenset ausmacht, muss berücksichtigt werden, dass die so ermittelten Transmissivitätswerte beim Keuper tendenziell etwas zu niedrig sind (Abb. 7).

Beim direkten Vergleich sind die Werte nach Methode 3 meistens deutlich höher als für die nach Methode 4 berechneten (Abb. 7). Allerdings stimmen die Werte nach Methode 3 beim Buntsandstein besser mit den Literaturwerten (Methode 1) überein. Die Qualität der Literaturdaten ist nur im Vergleich mit berechneten Werten abschätzbar. Da die nach Methode 3 berechneten Werte mit denen aus der Li-

teratur fast komplett übereinstimmen, stimmt die Qualität der Literaturdaten mit denen nach Methode 3 überein. Die nach Methode 4 berechneten Werte sind im Vergleich etwas niedriger als die nach den anderen Methoden abgeleiteten. Insgesamt liegt die Wertestreuung beim Vergleich verschiedener Methoden meist innerhalb der Nachkommastelle und ist für die hier gewählte räumliche Übersichtsdarstellung der hydraulischen Eigenschaften vernachlässigbar.

## Fazit

Der Großteil der vorliegenden Werte liegt in Teufen bis zu 300 m, vereinzelt auch bis 650 m. Mit zunehmender Teufe nimmt das Potenzial für eine geothermale Nutzung meist ab. Insgesamt sind 76 % aller Transmissivitäts- und Durchlässigkeitsbeiwerte bei Temperaturen zwischen 10 und 45 °C für eine geothermische Nutzung geeignet. Die geothermischen Nutzungsmöglichkeiten im Norden Bayerns liegen vor allem in Aquiferspeichern.

Als Aquiferspeicher im Buntsandstein sind die Regionen im Nordwesten und Nordosten Bayerns und um Nürnberg aufgrund erhöhter Durchlässigkeiten besonders gut geeignet. Südlich daran schließen sich eher weniger geeignete Regionen an. In den eher geeigneten Bereichen, z. B. um Nürnberg dürfte der Buntsandstein Temperaturen um 20 °C aufweisen, etwas weiter nördlich bei Erlangen etwa 27 °C. In den nordöstlichen und nordwestlichen Beckenrandgebieten sind es dagegen nur ca. 10 °C.

Keuper-Aquifere eignen sich für eine Wärmespeicherung in den Regionen nördlich und südlich von Nürnberg in geringer Tiefe der Ausbisskante folgend. Eher wenig geeignet zeichnet sich der Keuper in größeren Teufen zwischen Regensburg und Ingolstadt und im Norden ab. Im eher geeigneten Gebiet um Nürnberg und Erlangen erreicht der Keuper Temperaturen von ca. 15 °C. Diese fallen jedoch nach Südwesten hin auf ca. 10 °C ab.

Da lokale Variationen im Untergrund, wie Störungen und Klüfte, nicht berücksichtigt wurden bzw. keine Informationen dazu vorlagen, ist die Information hier nur punktuell einzuordnen. Auf eine Flächendarstellung in den Karten wurde daher verzichtet.

Die ermittelten geologischen und hydraulischen Daten sowie die aktualisierten Temperaturdaten werden in das geothermische Informationssystem (GeotIS) überführt. Diese Daten ersetzen keine Machbarkeitsstudie, da detaillierte, standortbezogene und geologische Vorerkundung unabdingbar für die Planung einer geothermischen Untergrundnutzung ist. Für eine konkrete standortspezifische Planung für einen Aquiferspeicher sind daher ggf. zusätzliche Untergrundinformationen erforderlich und müssen im Bedarfsfall erhoben werden. Desweiteren wird empfohlen, im Vorfeld eine thermisch-hydraulisch gekoppelte Model-

lierung durchzuführen und den Einfluss der Hydrochemie wegen der wechselnden Temperaturen (Einspeicherung, Entladung) zu berücksichtigen.

**Danksagung** Wir danken Herrn Dr. Fritzer vom Bayerischen Landesamt für Umwelt für die Bereitstellung von Daten und für seine kritische Durchsicht einer frühen Version dieses Manuskripts.

**Förderung** Außerdem danken wir dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Unterstützung im Rahmen des Projektes Geofaces, Fördernr.: 0324025A.

**Open Access** Dieser Artikel 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.

## Literatur

- Agemar, T.: Fachinformationssystem Geophysik: Änderung der BHT-Korrekturverfahren für einfach belegte Messungen. LIAG-Bericht. (2017)
- Agemar, T., Brunken, J., Jodocy, M., Schellschmidt, R., Schulz, R., Stober, I.: Untergrundtemperaturen in Baden-Württemberg. *Z. Dtsch. Ges. Geowiss.* **164**, 49–62 (2013)
- Agemar, T., Schellschmidt, R., Schulz, R.: Subsurface temperature distribution in Germany. *Geothermics* **44**, 65–77 (2012)
- Agemar, T., Weber, J., Schulz, R.: Deep geothermal energy production in Germany. *Energies* **7**, 4397–4416 (2014)
- Andres, G., Georgotas, N.: Das Mainprojekt. Schriftenr. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft H. 7., S. 240–250 (1978)
- Andres, G., Wirth, H.: Die Thermal- und Schwefelwasservorkommen von Bad Gögging. Schriftenr. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 15. (1981)
- Antoniadis, P., Fytrolakis, N., Hegenberger, W., Strassner-Munk, C., Apel, R., Bader, K., Berger, K., Meyer, R., Pescheck, C., Schmeer, D., Wittmann, O.: Geologische Karte von Bayern 1:25000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6032 Scheßlitz. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1972)
- Bauer, W.: Geothermische Verhältnisse des Fränkischen Beckens (Nordbayern/Südhüringen). Lehr- und Forschungsbereich Hydrogeologie und Umwelt, Universität Würzburg, Würzburg (2000)
- Bayerisches Landesamt für Umwelt: Geologische Karte von Bayern 1:500.000. Bayerisches Landesamt für Umwelt, München (1997)
- Bendel, R., Fitzenreiter, H.: Ergebnisbericht mit Grundwasservorratsnachweis Vorerkundung Sonnenberg. VEB GFE/VEB Hydrogeolog. Erkundung, S (1981)
- Benner, M., Mahler, B., Mangold, D., Schmidt, T., Schulz, H., Seiwald, H., Hahne, E.: Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher. Forschungsbericht zum BMFT-Vorhaben 0329606C. ITW, Stuttgart (1999)
- Berger, K.: Keuper. In: Bayerisches Geologisches Landesamt (Hrsg.) Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000, S. 49–54. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1981)
- Berger, K.: Geologische Karte von Bayern 1:25.000 – Erläuterungen zum Blatt Nr. 6931 Weißenburg i. Bay. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1982)
- Berger, K., Andres, G., Diez, T.: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25000. Blatt Nr. 6732 Roth b. Nürnberg. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1967)

- Berger, K., Bader, K., Diez, T., Hörauf, H., Kern, H., Mitterer, A.: Geologische Karte von Bayern 1:25000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6830 Gunzenhausen. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1970)
- Berger, K., Bader, K., Frank, H., Schneider, G., Wegener, H.-R.: Geologische Karte von Bayern 1:25000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6633 Feucht. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1979)
- BMU: Energie in Deutschland, Trends und Hintergründe zur Energieversorgung in Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn (2009)
- Bolotovskiy, I., Schell Schmidt, R., Schulz, R.: Fachinformationssystem Geophysik: Temperaturkorrekturverfahren. LIAG-Bericht. (2015)
- Dickinson, J.S., Biuk, N., Matthews, M.C., Sniijders, A.: Aquifer thermal energy storage: theoretical and operational analysis. *Géotechnique* **59**, 249–260 (2009). <https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.00.1>
- Doppler, G., Fiebig, M., Freudenberger, W., Glaser, S., Meyer, R., Pürner, T., Rohrmüller, J., Schwerd, K., Berástegui, X., Centino, M.C., Dorn, W., Duguay, M., Geiß, E., Haas, U., Lagally, U., Rieger, A., Teipel, U., Wittmeier, H.: 600 Millionen Jahre Bayern – Internationale Edition. GeoBavaria, Bayerisches Geologisches Landesamt, München (2004)
- EEG: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes, Teil I, Nr. 13. Bundesgesetzblatt, Bonn (2000)
- Emmert, U.: Keuper. Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000. Bayerisches Geologisches Landesamt, München, S. 91–120 (1964)
- Emmert, U., Bader, K., Diez, T., Frank, H., Schneider, G., Streit, R.: Geologische Karte von Bayern 1:25000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6035. Bayerisches Geologisches Landesamt, Bayreuth (1977)
- Emmert, U., Stettner, G., Bader, K., Büttner, G., Drexler, O., Kröger, J., Reissmann, M.: Geologische Karte von Bayern 1:25000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6036 Weidenberg. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1995)
- Fleuchaus, P., Godschalk, B., Stober, I., Blum, P.: Worldwide application of aquifer thermal energy storage—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **94**, 861–871 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.057>
- Freudenberger, W.: Der Keuper in Franken und der Oberpfalz (Bayern). In: Beutler, G. (Hrsg.) *Stratigraphie von Deutschland IV – Keuper*, S. 203–213. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, Frankfurt (2005)
- Freudenberger, W., Schwerd, K.: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1996)
- Fritzer, T., Settles, E., Dorsch, K.: Bayerischer Geothermieatlas. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, München (2014)
- GeotIS: Geothermisches Informationssystem GeotIS. Leibniz-Insitut für Angewandte Geophysik (LIAG), Hannover (2019) <https://doi.org/10.17616/R3M89J>. <https://www.geotis.de>
- Geyer, O.F., Gwinner, M.P.: Geologie von Baden-Württemberg. Schweizerbart, Stuttgart (1991)
- Grimm, W.-D., Hofbauer, J.: Die Grundwasserkarte von Bayern 1:25000. I. Teil Idee, Gestaltung und Organisation. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen Special edition., S. 113–115 (1967)
- Hahn, L., Apel, R., Bader, K., Berger, K., Riech, V., Rückert, G.: Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 5732 Sonnefeld. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1974)
- Hänel, R., Apel, R., Bader, K., Berger, K., Rückert, G.: Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6433 Lauf a. d. Pegnitz. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1974)
- Haunschild, H.: Geologische Karte von Bayern 1:25.000 – Erläuterungen zum Blatt Nr. 6928 Weitingen. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1979)
- Haunschild, H.: Der Keuper in der Forschungsbohrung Obersees. *Geol. Bavarica* **88**, 103–130 (1985)
- Haunschild, H.: Die Trias. In: Groiss, J., Haunschild, H., Zeiss, A. (Hrsg.) *Das Ries und sein Vorland, Sammlung geologischer Führer*, S. 18–54. Borntraeger, Berlin (2000)
- Haunschild, H., Weiser, T., Bader, K., Berger, K., Frank, H., Gall, H., Wittmann, O.: Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6929 Wassertrüdingen. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1977)
- Hurter, S., Schell Schmidt, R.: Atlas of geothermal resources in Europe. *Geothermics* **32**, 779–787 (2003)
- Informationsdienst, B.I.N.E.: Aquiferspeicher für das Reichstagsgebäude. BINE Projektinfo 13/03. Fachinformationszentrum Karlsruhe, Karlsruhe (2000)
- Kabus, F.: Ein GTN-Projekt: Geothermie in Neustadt-Glewe – von der Machbarkeitsstudie zur Stromerzeugung. *Geotherm. Energ.* **43**, 27–29 (2003)
- Kabus, F., Möllmann, G., Hoffmann, F.: Speicherung von Überschüßwärme aus dem Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerk Neubrandenburg im Aquifer. Fachtagung Geothermische Vereinigung e.V, Landau in der Pfalz (2005)
- Kabus, F., Wolfgramm, M., Seibt, A., Richlak, U., Beuster, H.: Aquifer thermal energy storage in Neubrandenburg—monitoring throughout three years of regular operation. In: *Thermal Energy Storage for Efficiency and Sustainability: 11th International Conference on Thermal Energy Storage*, Stockholm, 14.06.–17.06. Stockholm, S. 1–8. (2009)
- Käß, W., Käß, H.: *Deutsches Bäderbuch*, 2. Aufl. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart (2008)
- Klare, B.: Gliederung und Paläogeographie des Buntsandsteins im Ostteil der Süddeutschen Scholle. Ruhr-Universität, Bochum (1989)
- Kranz, S., Frick, S.: Efficient cooling energy supply with aquifer thermal energy storages. *Appl. Energy* **109**, 321–327 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.002>
- Krause, T.: Hydrogeologischer Bericht – Gutachten Sonneberg. VEB Hydrogeologie, Jena (1977)
- Kühne, K., Maul, A.-A., Gorling, L.: Aufbau eines Fachinformationssystem Geophysik. *Z. Angew. Geol.* **2**, 48–53 (2003)
- Kus, G., Sieblitz, S., Wilferth, T., Pukowitz, C., Lischeid, G., Pamer, R.: Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planungsregion 4 Oberfranken West – Erläuterungen zur Hydrogeologischen Karte 1 : 100 000. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg (2007)
- Kutasov, I.M.: *Applied geothermics for petroleum engineers*. Elsevier Science B. V, Amsterdam; New York (1999)
- Lahner, L., Stahl, G., Bader, K., Rückert, G., Wrobel, J.-P.: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000, Blatt Nr. 6734, Neumarkt i. d. Opf. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1969)
- Lepper, J., Röhling, H.G.: Buntsandstein. *Hallesches Jb. Geowiss.* **B6**, 27–34 (1998)
- Lepper, J., Rambow, D., Röhling, H.G.: Lithostratigraphie des Buntsandstein in Deutschland. In: Lepper, J., Röhling, H.G., der Subkommission Perm-Trias, D.S.K. (Hrsg.) *Stratigraphie von Deutschland XI – Buntsandstein* Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. S. 69–149. Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften, Stuttgart (2013)
- Logan, J.: Estimating transmissibility from routine production tests of water wells. *Groundwater* **2**, 35–37 (1964). <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1964.tb01744.x>
- März, K.: Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Buntsandstein und Muschelkalk Nordbayerns. *Hydrochem. und hydrogeol. Mitt.* (1977)
- Mazor, E., Nativ, R.: Hydraulic calculation of groundwater flow velocity and age examination of the basic premises. *J. Hydrol.*

- Reg. Stud. **138**, 211–222 (1992). [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90165-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90165-R)
- Müller, M.: Neue Vorstellungen zur Entwicklung des Nordostbayerischen Permokarbon-Trogs aufgrund reflexionsseismischer Messungen in der Mittleren Oberpfalz. *Geol. Bl. No Bay.* **44**, 195–224 (1994)
- Nosrat-Nezami, M.: Hydrogeologische und Hydrochemische Untersuchungen im Großraum Bayreuth. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg (1975)
- Rietzler, J.: Zur Hydrogeologie des Raumes südöstlich von Nürnberg. LMU München, München (1979)
- Rietzler, J.: Unterirdische Erdgasspeicherung in der Aquifer-Struktur „Alte Bürg“. *Erdöl Kohle* **37**, 357–363 (1984)
- Sanner, B.: Thermische Untergrundspeicherung auf höherem Temperaturniveau: Begleitforschung mit Meßprogramm Aquiferspeicher Reichstag. Schlußbericht zum FuE-Vorhaben 0329809 B. Justus-Liebig-Universität Gießen, Gießen (2004)
- Sanner, B., Kabus, F., Seibt, P., Bartels, J.: Underground thermal energy storage for the German parliament in Berlin, system concept and operational experiences. In: *Proceedings world geothermal congress Anatolya*, 24–29 April. (2005)
- Schmidt, T., Müller-Steinhagen, H.: The central solar heating plant with aquifer thermal energy store in Rostock. Results after four years of operation. *EuroSun*, Freiburg (2004)
- Schmidt, T., Müller-Steinhagen, H.: Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher in Deutschland. OTTI Profiforum Oberflächennahe Geothermie, Regentstuf (2005)
- Schmidt-Kaler, H., Apel, R., Bader, K., Berger, K., Diez, T., Gauckler, P.: Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6634 Altdorf. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1974)
- Schmidt-Kaler, H., Apel, R., Bader, K., Gauckler, P., Scholz, G.: Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6534 Happurg. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1977)
- Schmidt-Kaler, H., Apel, R., Bader, K., Ulrich, R., Wegener, H.-R.: Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6834 Berching. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1981)
- Schmidt-Kaler, H., Apel, R., Bader, K., Schmidt, F., Ulrich, R.: Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6934 Beilngries. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1983)
- Schmidt-Kaler, H., Bader, K., Munk, C., Schmidt, F., Viernstein, M.: Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6933 Thalmässing. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1987)
- Schröder, B.: Entwicklung des Sedimentbeckens und Stratigraphie der klassischen Germanischen Trias. *Geol. Rundsch.* **71**, 783–794 (1982). <https://doi.org/10.1007/BF01821103>
- Schröder, B., Berger, K., Brunnacker, K., v. Edlinger, G., Hörauf, H., Haarländer, W., Hütteroth, W.-D.: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000. Blatt Nr. 6332 Erlangen Nord. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1968)
- Schulz, R., Schellschmidt, R.: Das Temperaturfeld im südlichen Oberrheingraben. *Geol. Jb.* **E48**, 153–165 (1991)
- Schulz, R., Werner, K.H.: Einfache Korrekturverfahren für Temperaturmessungen. *GGA-Bericht*, NLFb. (1987)
- Schwarzmeier, J.: Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 5927 Schweinfurt. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1982)
- Schwarzmeier, J., Bader, K., Berger, K., Wegener, H.-R., Schneider, G.: Geologische Karte von Bayern 1:25000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 6023 Lohr a. Main. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1980)
- Sichardt, W.: Über Tiefsenkung des Grundwasserspiegels. *Bautechnik* **1927**, 683, 718, 730 (1927)
- Sommer, W.T., Doornmenbal, P.J., Drijver, B.C., van Gaans, P.F.M., Leusbrock, I., Grotenhuis, J.T.C., Rijnaarts, H.H.M.: Thermal performance and heat transport in aquifer thermal energy storage. *Hydrogeol. J.* **22**, 263–279 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1066-0>
- Stober, I., Bucher, K.: Hydraulic and hydrochemical properties of deep sedimentary reservoirs of the Upper Rhine Graben, Europe. *Geofluids* **15**, 164–482 (2014). <https://doi.org/10.1111/gfl.12122>
- Stober, I., Lorinser, B.: Wärme ist unter uns, Geothermie in Baden-Württemberg. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart (2008)
- Stober, I., Fritzer, T., Obst, K., Agemar, T., Schulz, R.: Tiefe Geothermie – Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland, 4. Aufl. LIAG, Hannover (2016)
- Thiem, A.: Die Ergiebigkeit artesischer Bohrlöcher, Schachtbrunnen und Filtergalerien. *J. Gasbeleucht. Wasserversorg.* **14**, 450–467 (1870)
- Thiem, G.: Hydrogeologische Methoden. Gebhardt, Leipzig (1906)
- Trusheim, F.: Über den Untergrund Frankens – Ergebnisse von Tiefbohrungen in Franken und Nachbargebieten 1953–1960. *Geol. Bavarica* **54**, 1–106 (1964)
- Udluft, P.: Hydrogeologie und Hydrochemie der Südrhön unter besonderer Berücksichtigung der Mineralquellen im Brückenauer Raum, Allgemeine Wissenschaften. TU München, München (1969)
- Udluft, P., Bauer, W.: Erkundungsbohrungen zur Erschließung von zusätzlichen Heil- und Mineralwasser in Bad Kissingen. Abschlussbericht Untersuchungsphase 1. Institut für Geologie, Universität Würzburg, Würzburg (1997)
- Valstar, J.: Adaptive circular cities: water, food and energy—matching thermal energy demand in Utrecht centre west. *TO federatie*, Bd. 29. (2015)
- Wagner, B., Kus, G., Kainzmaier, B., Spörlein, T., Wilferth, T., Veit, W., Fritsch, P., Wrobel, M., Lindenthal, W., Neumann, J., Sprenger, W.: Erläuterungen zur Hydrogeologischen Karte von Bayern 1:500.000 (2009)
- Wei, H.F., Ledoux, E., Marsily, D.G.: Regional modelling of groundwater flow and salt and environmental tracer transport in deep aquifers in the Paris Basin. *J. Hydrol.* **120**, 341–358 (1990)

**Hinweis des Verlags** Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.