

# Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik

Hannover

## Verbundvorhaben „Geofaces“

Charakterisierung geothermischer Ressourcen unter  
Berücksichtigung von Grenz- und Trennflächen in NW-  
Deutschland

Teilprojekt A

– Endbericht –

Projektleiter:	Dr. Thorsten Agemar
Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
Projekträger	Jülich (PtJ-EEN)
Förderkennzeichen:	0324025A
Laufzeit des Vorhabens:	01.06.2016 – 30.11.2019
Berichtsdatum:	29.05.2020
Archivnummer:	0136395

*Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0324025A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Autoren:**

**Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG):**

AGEMAR, T. (Kapitel 3, 4, 6, 7, 8, 9 – Herausgeber, Redakteur)

ALTEN, J.-A. (Kapitel 6, 8)

KUNKEL, C. (Kapitel 4,8)

KUDER, J. (Kapitel 5)

SKIBA, P. (Kapitel 7)

SUCHI, E. (Kapitel 3)

WEBER, J. (Kapitel 8, 9)

WOLF, M. (Kapitel 6, 8)

**Partner im Verbundprojekt:**

**Karlsruher Institut für Technologie (KIT):**

KOHL, T.

STOBER, I.

**Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG):**

OBST, K.

# 1 Inhalt

Zusammenfassung.....	6
2 Projektbeschreibung.....	9
2.1 Literatur .....	11
3 Entwicklung von 3D-Strukturmodellen.....	13
3.1 Erarbeitung von 3D-Strukturdaten (Horizontflächen).....	13
3.2 3D-Modelle NW-Deutschland .....	13
3.2.1 Dogger .....	16
3.2.2 Unterkreide (Wealden).....	17
3.2.3 Unterkreide (Valangin) .....	18
3.2.4 Unterkreide (Berrias bis Alb) .....	19
3.2.5 Untere Oberkreide (Cenoman bis Tournon).....	19
3.3 Erarbeitung von 3D-Diskordanzflächen .....	20
3.3.1 Erarbeitung von 3D-Strukturdaten .....	20
3.4 3D-Modell Fränkisches Becken .....	21
3.5 Literatur .....	23
4 Erfassung von hydraulischen Daten .....	26
4.1 Untersuchung der hydraulischen Eigenschaften von geothermischen Nutzhorizonten in Nordwestdeutschland.....	26
4.1.1 Geothermisch nutzbare Aquifere im Nordwesten Deutschlands.....	26
4.1.2 Datengrundlage .....	29
4.1.3 Geophysikalische Logauswertung .....	29
4.1.4 Porosität.....	29
4.1.5 Permeabilität.....	32
4.1.6 Kriging.....	33
4.1.7 Ergebnisse Dogger .....	34
4.1.8 Interpretation und Diskussion.....	36
4.1.9 Ergebnisse Unterkreide .....	37
4.1.10 Interpretation .....	39
4.1.11 Literatur .....	40

4.2	Zusammenstellung und Evaluation hydraulischer Testdaten geringer Tiefen (Nordbayern).....	41
4.2.1	Geothermische Nutzungsmöglichkeiten in Nordost Bayern .....	41
4.2.2	Untersuchungsmethoden.....	44
4.2.3	Ergebnisse.....	46
4.2.4	Fazit.....	52
4.2.5	Literatur.....	53
5	Numerische Modellierung des Porenraums.....	55
5.1	Einführung .....	55
5.2	Methodenauswahl .....	56
5.3	Lattice Boltzmann Methode .....	57
5.4	BGK-Modell mit Chemie .....	61
5.5	Chemische Gleichgewichts- und Diffusionszeit.....	62
5.6	Lösung und Fällung.....	63
5.7	Numerische Probenkörper.....	63
5.8	Fazit.....	64
5.9	Literatur .....	64
6	Weiterentwicklung und Anpassung von GeotIS.....	67
6.1	Weiterentwicklung der Visualisierungs-Algorithmen.....	67
6.2	Datenbasis .....	67
6.2.1	Bohrungsdaten.....	67
6.2.2	Temperaturdaten .....	68
6.3	Projektinfrastruktur .....	70
6.4	Erweiterung der GeotIS-Web-Anwendung .....	71
6.4.1	Website.....	71
6.4.2	Anwendung.....	71
6.4.3	Nutzungsanalyse .....	72
6.4.4	Infrastruktur und Systemsicherheit.....	75
6.5	Literatur .....	75
7	Algorithmen zur Generalisierung von Störungen.....	76
7.1	Einführung.....	76

7.2	Automatisierte kartographische Generalisierung.....	76
7.3	Generalisierung geologischer Strukturen .....	77
7.4	Ausgangsdaten .....	78
7.5	Dateneigenschaften und Datenqualität.....	79
7.6	Methoden und deren Implementierung.....	80
7.7	Ergebnisse .....	83
7.8	Fazit.....	84
7.9	Literatur .....	84
8	Interaktives E-Learning-Portal .....	86
8.1	Konzept und Umsetzung des E-Learning-Portals.....	86
8.2	Literatur .....	88
9	IEA-GIA: Energiestatistiken und Datensammlungen .....	89
9.1	Nationale und internationale Zusammenarbeit .....	89
9.2	Printmedien .....	90
10	Publikationen und Vorträge.....	91
10.1	Publikationen.....	91
10.1.1	Zeitschriften .....	91
10.1.2	Broschüren .....	92
10.1.3	Vortragsveröffentlichungen (Proceedings).....	92
10.1.4	Poster .....	93
10.1.5	Vorträge.....	95
10.1.6	Berichte .....	96
10.2	Meetings / Bericht an IEA Geothermal Executive Committee .....	98
10.3	Öffentlichkeitsarbeit.....	99
10.3.1	Veranstaltungen .....	99
10.3.2	Messestände .....	100
10.3.3	Pressemitteilungen und Internet .....	100
10.4	Gutachten / Editorentätigkeit .....	100

## Zusammenfassung

In Deutschland wird ein großer Teil der Primärenergie für die Wärmebereitstellung verwendet. Von diesem Wärmebedarf, der regional unterschiedlich verteilt ist, könnte in Zukunft ein erheblicher Anteil mit geothermischer Energie auf mittlerem oder niedrigem Temperaturniveau gedeckt werden und damit in vielen Bereichen wie zum Beispiel der Agrarwirtschaft, der Lebensmittelproduktion und der Gebäudeheizung einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung leisten. Durch die reduzierte Leistungsanforderung an die Reservoirs können geologische Formationen interessant werden, die bisher in der geothermischen Erkundung eine eher untergeordnete Rolle spielten. Daher war einer der Schwerpunkte des Projekts die Untersuchung von mitteltiefen geothermischen Reservoirs.

Entscheidend für die Nutzbarkeit eines geothermischen Reservoirs ist neben der Temperatur vor allem die Permeabilität der Gesteine. Sie ist an intergranulare Poren und andere Hohlräume gebunden, deren Größe und Gestalt sowohl durch primäre Prozesse in den Ablagerungsräumen als auch durch sekundäre Prozesse (Diagenese, Verwitterung, Tektonik) kontrolliert werden. Die hydraulischen Eigenschaften eines geothermischen Reservoirs sind daher ebenso wie die Tiefenlage oder die Ausdehnung das Resultat einer langen erdgeschichtlichen Entwicklung. Als geothermische Reservoirs kommen in Deutschland vor allem Formationen mit einer Durchlässigkeit von mind. 500 mD, einer Porosität von mind. 20 % und einer Mächtigkeit von mind. 20 m in Frage (ROCKEL & SCHNEIDER 1992).

Grundsätzlich bieten sich vier verschiedene Verfahren an, um die hydraulischen Reservoirseigenschaften einschätzen zu können:

- Hydraulischer Test in einem Bohrlochabschnitt
- Messung der Porosität und Permeabilität an Kernproben oder Bohrklein
- Ableitung der Sedimentzusammensetzung und des Porenvolumens aus Bohrlochlogs
- Untersuchung von Aufschlussanaloga

Die Durchführung hydraulischer Tests ist aufwändig, im Ergebnis kann aber schon durch einen einzigen Pumpversuch sehr viel über die Beschaffenheit der Fluidwegsamkeiten in Erfahrung gebracht werden. Ein großer Vorteil ist, dass bei diesem Verfahren alle vorhandenen Fluidwegsamkeiten, auch die von Kluft- und Karsthohlräumen erfasst werden. Daher wurden im Projekt Pumpversuche in Thermalwasserbrunnen recherchiert und ausgewertet. Der assoziierte Partner KIT (Karlsruher Institut für Technologie) verwendete hydraulische Testdaten aus tektonisch beanspruchten Formationen in SW-Deutschland, um in verschiedenen hydraulisch-geomechanisch gekoppelten Modellen das Strömungsverhalten zu simulieren. Geochemische Untersuchungen und Laborexperimente gaben darüber hinaus Aufschluss über Fluid-Gesteins-Wechselwirkungen, die zu einem besseren Verständnis der geologisch-geochemischen Entwicklung des Reservoirs führten. Durch Fluidzirkulation und geochemische Reaktionen kann der Porenraum und damit die Permeabilität verändert worden sein. Um diesem Phänomen nachzugehen, sind daher auch Untersuchungen im kleinskaligen Bereich an Gesteinsproben wichtig. Das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik

(LIAG) untersuchte Methoden, um den Zusammenhang zwischen strukturellen Grenzflächen und diagenetischen Veränderungen im Porenraum zu untersuchen. Von einer Landoberfläche kann unter feuchtwarmen Bedingungen durch Verwitterung der Porenraum im Liegenden geweitet werden. Sedimente, die sich später auf erodierten Landoberflächen ablagern, sind in der Regel anhand ihrer diskordanten Lagerung erkennbar, da die Schichtfolge vom Liegenden zum Hangenden unterbrochen ist. Diskordanzen können daher ähnlich wie Störungen interessante Explorationsziele darstellen und sollten daher ebenfalls räumlich erfasst werden. Auch in der Seismik sind Diskordanzen als Reflexionshorizont meist gut sichtbar.

Diskordanzen der Unterkreide im Norddeutschen Becken weisen wahrscheinlich ein höheres Potential als ältere Diskordanzen im Mesozoikum auf, da sie im Zusammenhang mit längeren Verwitterungs- und Erosionsphasen im feuchtwarmem Klima stehen.

Für eine möglichst flächendeckende Kartierung der Reservoireigenschaften werteten das LIAG und das Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG) geophysikalische Logs aus Industriebohrungen im Norddeutschen Becken aus. Dies geschah im engen fachlichen Austausch, um die Vergleichbarkeit der gewonnenen und im Geothermischen Informationssystem (GeotIS) dargestellten Daten zu gewährleisten.

Die vom KIT durchgeführten hydraulisch-geomechanisch gekoppelten Modellierungen von Störungszonen und die daraus resultierenden grundlegenden Erkenntnisse über die Permeabilitäten von Störungszonen und Trennflächen sind in GeotIS in die dort hinterlegten Modellgebiete eingeflossen.

Die Ergebnisse der bis hier beschriebenen Teilvorhaben dienen insgesamt dazu, die hydraulischen Reservoireigenschaften im Vorfeld einer Geothermie-Bohrung abschätzen zu können und günstige von weniger günstigen Bereichen eines geothermischen Reservoirs zu unterscheiden und in ihrer räumlichen Verteilung darzustellen.

Neben den hydrogeologischen Verhältnissen sind aber auch Tiefenlage und Verbreitung von möglichen Zielformationen für die geothermische Exploration wichtig. Deshalb erstellten das LIAG und das LUNG in enger Abstimmung neue 3D-Strukturmodelle für Norddeutschland, um Lage und Nutzungspotential bislang kaum untersuchter geothermischer Reservoire darzustellen. Alle neuen Daten zur Struktur und zum Nutzungspotential des tiefen Untergrunds werden in geeigneter Weise im Geothermischen Informationssystem GeotIS dargestellt.

Des Weiteren wurde ein interaktives eLearning-Portal aufgebaut, das über wissenschaftlich-technische Zusammenhänge und Nutzungsmöglichkeiten der Geothermie in Deutschland informiert. Zu diesem eLearning-Portal haben zahlreiche Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler beigetragen. Es ist unter <https://www.geotis.de> zu finden und kann ohne Installation von zusätzlicher Software jederzeit kostenfrei genutzt werden. Es ist geplant, dieses eLearning-Portal auch außerhalb von Fachkreisen publik zu machen.

Ebenfalls wurden die Arbeiten im Rahmen des Geothermal Implementing Agreement der IEA am LIAG fortgeführt.

Die im Rahmen des Projekts erfolgten Verbesserungen und Aktualisierungen des geothermischen Informationssystems GeotIS können unter <https://www.geotis.de> von allen Nutzerinnen und Nutzern kostenfrei in Anspruch genommen werden.

Zusätzlich kann sich die Öffentlichkeit über die tiefe Geothermie mit Hilfe der LIAG-Broschüre „Tiefe Geothermie – Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland“ in Deutsch (4. überarbeitete Auflage), in Englisch (2. überarbeitete Auflage, 2017) und in Spanisch (1. Auflage, 2017) informieren. Die Broschüre „Wärmewende mit Geothermie – Möglichkeiten und Chancen in Deutschland“ stellt die Möglichkeiten und Chancen der Wärmewende komprimiert in einer deutschen und einer englischen Version vor. Das Positionspapier „Die Rolle der tiefen Geothermie bei der Wärmewende. Wie Deutschland 60 % erneuerbare Wärme bis 2050 schaffen könnte.“ von AGEMAR ET AL. 2018 richtet sich thematisch ebenfalls an eine breite Öffentlichkeit und hat bereits zu großer Resonanz geführt.

## 2 Projektbeschreibung

Erneuerbare Energiequellen werden in Deutschland im Wärmemarkt vor allem im Mittel- und Niedertemperaturbereich (bis ca. 150 °C) eingesetzt. Unter den regenerativen Energiequellen nimmt die Erdwärme eine Sonderstellung ein, da sie ganzjährig und zu jeder Tageszeit zur Verfügung steht und daher im Grundlastbereich sowohl in der Wärme- wie in der Stromerzeugung eingesetzt werden kann. Moderne Wandlungstechniken, wie ORC-Verfahren und Kalina-Zyklus, ermöglichen die wirtschaftliche Stromerzeugung bei Temperaturen ab 100 °C. Damit wird die geothermische Stromerzeugung auch für normale geothermische Regionen wie Mitteleuropa interessant.

Für den Aufbau einer geothermischen Stromnutzung in Deutschland schlug das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) im TAB-Bericht 2003 die Erstellung eines Atlases der geothermischen Ressourcen vor (PASCHEN ET AL. 2003). Das dafür vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) bis 2009 geförderte Projekt „Aufbau eines Geothermischen Informationssystems“ (GeotIS) konzentrierte sich auf die tiefen Grundwasserleiter (Heißwasseraquifere) im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens, im Oberrheingraben und in Süddeutschland (SCHULZ ET AL. 2009). In diesen Gebieten ist die wirtschaftliche Nutzung der tiefen Grundwasserleiter kurz- und mittelfristig am besten zu realisieren.

Das Folgeprojekt „Internet basiertes Informationszentrum für geothermische Energienutzung“, gefördert durch das BMU bis 2013, diente zur Qualitätsverbesserung bei der Projektierung geothermischer Anlagen und zur Abschätzung des Fündigkeitsrisikos geothermischer Projekte an wählbaren Lokalisationen. Dafür wurde das Geothermische Informationssystem weiter ausgebaut. Die Datenbestände für hydrothermale Ressourcen in Deutschland wurden teilweise neu erfasst, erweitert und mit neuen Datenbanken vernetzt. Die 3D-Strukturmodelle wurden u. a. in Norddeutschland, in dem Süddeutschen Molassebecken und dem südlichem Oberrheingraben erweitert und ergänzt. Für den nördlichen Oberrheingraben konnte ein 3D-Modell für die geothermischen Potenziale für Hessen übernommen werden (SCHULZ ET AL. 2013).

In dem TAB-Bericht 2003 wurden auch die Störungssysteme in Deutschland als Quellen für die Gewinnung von geothermischer Energie angesehen. Hierbei sind vor allem die größeren, mindestens 7 km tief reichenden Tiefenstörungen bedeutsam (JUNG ET AL. 2002, PASCHEN ET AL. 2003).

Die Zielsetzung des Verbundprojekts „Die Rolle von tiefreichenden Störungszonen bei der geothermischen Energienutzung“ von 01.04.2013 – 31.03.2016 war, die tiefreichenden Störungszonen genauer in ihrer Geometrie zu erfassen, ihre thermisch-hydraulischen Eigenschaften zu charakterisieren sowie ihr geothermisches Potenzial neu zu berechnen und zu bewerten. Die Ergebnisse sind über das Geothermische Informationssystem (GeotIS) allgemein zugänglich (GORLING ET AL. 2016, AGEMAR ET AL. 2014).

Im Verbundprojekt „Charakterisierung geothermischer Ressourcen unter Berücksichtigung von Grenz- und Trennflächen“ (GeoFaces) wird der Fokus auf die Vorausset-

zungen zur geothermischen Stromproduktion auf die der geothermischen Wärmebereitstellung gerichtet. In Zukunft könnte ein erheblicher Anteil des Wärmebedarfs auf mittlerem oder niedrigem Temperaturniveau in vielen Bereichen wie zum Beispiel der Agrarwirtschaft, der Lebensmittelproduktion und der Gebäudeheizung mit geothermischer Energie gedeckt werden und einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung leisten. Durch die reduzierte Leistungsanforderung an die Reservoirs werden geologische Formationen interessant, die bisher in der geothermischen Erkundung eine eher untergeordnete Rolle spielten.

Das Vorhaben wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Zeitraum vom 01. April 2016 bis zum 30. November 2019 unter dem Förderkennzeichen 0324025A gefördert und am Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und am Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG) durchgeführt.

Nr.	Datum	Ort	Teilnehmende Organisationen
1	04.05.2017	Hannover	KIT, HLNUG LBEG, LIAG, LUNG, PtJ, TUD
2	18.10.2017	Güstrow	KIT, LIAG, LLUR, LUNG, UG
3	11.04.2018	Karlsruhe	KIT, LIAG, LUNG
4	16.-17.10.2018	Hannover	KIT, LBEG, LIAG, LUNG, PtJ
5	24.-25.04.2019	Hannover	KIT, LBEG, LIAG, LUNG, PtJ

KIT: Karlsruher Institut für Technologie  
 LBEG: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (Niedersachsen)  
 HLNUG: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie  
 LIAG: Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik  
 LLUR: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (Schleswig-Holstein)  
 LUNG: Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (Mecklenburg-Vorpommern)  
 PtJ: Projektträger Jülich  
 TUD: TU Darmstadt  
 UG: Universität Göttingen

**Tab. 2.1:** Auflistung der Projekttreffen und der teilnehmenden Organisationen.

Zwischen dem LIAG und den staatlichen geologischen Diensten besteht ein enger Kontakt und Informationsaustausch, der durch regelmäßige Projekttreffen unterstützt wurde (Tab. 2.1). Die Projekttreffen wurden wechselseitig vom LUNG, vom KIT und dem LIAG organisiert.

Der vorliegende Endbericht fasst alle wichtigen Ergebnisse zusammen. Kapitel 3 beschreibt die neu erstellten 3D-Modelle im norddeutschen Raum, die stratigrafisch vom Dogger bis in die Untere Oberkreide reichen. Daneben wird in diesem Kapitel auf die Modellierung von Diskordanzflächen eingegangen.

Kapitel 4 befasst sich mit der Charakterisierung der Sandsteinformationen des Doggers im Norddeutschen Becken. Die wichtigsten Sandstein-Aquifere sind die Dogger-Beta-Sandsteine des Aalen, der Garantianen-Sandstein sowie die Cornbrash-Fazies des Bajoc und die Württembergica-Sandsteine des Bathon. Neben der Durchlässigkeit und hydraulischen Leitfähigkeit der Speichergesteine wurde auch die Temperatur der Formationen betrachtet, um Aussagen bezüglich der Nutzbarkeit für geothermische Zwecke zu treffen.

In Kapitel 5 geht es um einen neuen Ansatz, die Gesteins-Fluid-Wechselwirkungen auf Porenskala zu modellieren. Eine wichtige Frage für die geothermische Exploration ist die Veränderung des Porenvolumens durch untersättigte Lösungen. Im Rahmen dieses Projekts wurden die Anwendung der Lattice-Boltzmann-Methode betrachtet und die Grundlagen zur numerischen Modellierung des Porenraumes mit dieser Methode gelegt. Die Lattice-Boltzmann-Methode hat den großen Vorteil, dass sie auf der Boltzmann-Gleichung und nicht auf den Gleichungen der Strömungsmechanik basiert. Bei herkömmlichen Methoden liegt ein Großteil der Komplexität in der Bestimmung von Ableitungsnäherungen, die nicht lokal von benachbarten Knoten der numerischen Gesteinsmatrix abgeleitet werden.

In Kapitel 6 werden die technischen Entwicklungen während der Projektlaufzeit beschrieben. Diese betreffen in erster Linie die IT-Architektur, Funktionalität, Nutzungsverhalten und Sicherheit von GeotIS, aber auch die interne IT-Infrastruktur, wie zum Beispiel Code-Repository, Bug-Tracker, Kommunikations-Plattform und anderer Werkzeuge, die für so ein komplexes Software-Entwicklungsprojekt mit mehreren Entwicklern erforderlich sind.

Kapitel 7 beschreibt eine neuentwickelte Software, welche als Zusatzmodul von ESRI's ArcGIS® GIS-Software ermöglicht, Störungslineamente für unterschiedliche Kartenmaßstäbe automatisch zu generalisieren. Dabei werden die spezifischen Anforderungen geologischer Kartenerstellung voll berücksichtigt. Es können Störungskarten im kleinen Maßstab unabhängig vom Bearbeiter und reproduzierbar erzeugt werden. Die Generalisierung basiert auf verschiedenen Algorithmen, die nacheinander auf die Störungsshapes angewandt werden. Für Spezialfälle können die Standard-Generalisierungsparameter für die einzelnen Schritte individuell angepasst werden.

Kapitel 8 stellt das neue E-Learning-Portal vor, welches in Zusammenarbeit mit externen Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen erstellt wurde. Technische Grundlage ist das OpenSource Autorenwerkzeug XERTE. Dieses E-Learning Portal richtet sich an Nutzerinnen und Nutzer mit Interesse an geowissenschaftlichen und technischen Zusammenhängen.

Kapitel 9 beschreibt unsere internationalen Aktivitäten im Rahmen des Geothermal Implementing Agreements (IEA-GIA).

Ein umfangreiches Verzeichnis der im Rahmen des Projektes erstellten Schriften, der Vortragstätigkeit und Öffentlichkeitsarbeit schließt den Bericht. Das Geothermische Informationssystem steht jeder/m Benutzer/in zur Verfügung (<https://www.geotis.de>).

## **2.1 Literatur**

- AGEMAR, T., ALTEN, J., GANZ, B., KUDER, J., KÜHNE, K., SCHUMACHER, S. & SCHULZ, R. (2014): The Geothermal Information System for Germany - GeotIS – ZDGG Band 165 Heft 2, 129–144
- Gorling, L., AGEMAR, T., ALTEN, J., GRAMENZ, J., KUDER, J., SUCHI, E., MOECK, I., WEBER, J. & V. HARTMANN, H. (2016) Die Rolle von tiefreichenden Störungszonen bei der geothermischen Energienutzung - Teilprojekt A. Endbericht, Archiv-Nr. 0134085; Hannover.

- JUNG, R., RÖHLING, S., OCHMANN, N., ROGGE, S., SCHELLSCHMIDT, R., SCHULZ, R. & THIELEMANN, T. (2002): Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) in Deutschland. – Bericht für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag; BGR/GGA, Archiv-Nr. 122 458; Hannover.
- PASCHEN, H., OERTEL, D. & GRÜNWARD, R. (2003): Möglichkeiten der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland. – Sachstandsbericht, Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Arbeitsbericht **84**: 129 S.; Berlin (TAB).
- SCHULZ, R., AGEMAR, T., ALTEN, J., BRUNKEN, J., HEBER, M., KUDER, J., KÜHNE, K., MAUL, A.-A., PESTER, S. & SCHÖNHOFEN, K. (2009) Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland. Endbericht, Archiv-Nr. 0128452; Hannover.
- SCHULZ, R., AGEMAR, T., ALTEN, J., GANZ, B., KUDER, J., SCHUMACHER, S. & TRIBBENSEE, K. (2013) Aufbau eines Internet basierten Informationszentrums für geothermische Energienutzung. Endbericht, Archiv-Nr. 0131282, Hannover.

## **3 Entwicklung von 3D-Strukturmodellen**

### **3.1 Erarbeitung von 3D-Strukturdaten (Horizontflächen)**

In den vergangenen Jahren wurden große Fortschritte in der digitalen 3D-Modellierung geologischer Strukturen erzielt. Gegenüber einfachen Karten, die nur die Verbreitung und Tiefenlage einzelner Horizonte darstellen, können die verschiedenen Strukturmerkmale sowie das Volumen stratigraphischer Einheiten abgebildet werden. 3D-Strukturmodelle sind daher heute die Grundlage für hydrologische und geothermische Modelle.

Die bisherigen Modelle basieren zudem im Wesentlichen auf Basis- und Topflächen von Formationen bzw. stratigraphischen Einheiten. Der Grund hierfür ist, dass ältere Software zur Erstellung von 3D-Modellen weitergehende Information über Grenzflächen nicht verarbeiten konnte. Dies hat sich inzwischen geändert. Mit neueren Versionen der Software GOCAD/SKUA® können nicht nur stratigraphische Profile erfasst werden, es ist auch möglich, Diskordanzen und andere Strukturelemente entsprechend ihrer Bedeutung zu integrieren, um so stratigraphisch konsistente 3D-Modelle zu erzeugen.

### **3.2 3D-Modelle NW-Deutschland**

In Norddeutschland finden sich viele Formationen, die bei niedrigen bis mittleren Temperaturen ökonomisch sinnvoll zur Wärmegewinnung nutzbar sind, wie z. B. der Bentheimer Sandstein im Emsland oder die Kalkstein-Sandstein-Lagen des Cenoman bis Turon im Münsterländer Kreidebecken. Ab einer Temperatur von 40 °C kann Erdwärme auch ohne den Einsatz von Wärmepumpen vielfältig genutzt werden. Für eine Reihe von Formationen fehlen allerdings bislang detaillierte 3D-Modelle ihres strukturellen Aufbaus.

Die bisher in GeotIS verfügbaren 3D-Modelle geothermisch nutzbarer Horizonte in Niedersachsen wurden innerhalb dieses Projekts erweitert und vervollständigt (Abb. 3.1). Vor allem im Niedersächsischen Becken zeigen Sandsteine des Wealden und des Valangin sowohl von der Porosität als auch von der Permeabilität günstige Eigenschaften für eine geothermische Nutzung (KUDER ET AL., 2014). Nördlich des Niedersächsischen Beckens sind mächtige Unterkreidesandsteine im Bereich der Emsmündung, im Bereich der Lineamente Leer-Bremen und Uelzen durch Bohrungen belegt (KNOPF 2011). Auch die Sandsteine des Dogger weisen vor allem innerhalb des Niedersächsischen Beckens lokal Reservoirqualität auf (FRISCH & KOCKEL, 2004; KNOPF 2011) und könnten geothermisch genutzt werden. Das Münsterländer Kreidebecken war bisher ebenfalls noch nicht in GeotIS erfasst, obwohl es nennenswertes geothermisches Potential besitzt. Der Zielhorizont ist hier der Cenoman-Turon-Aquifer (Oberkreide), bei dem es sich um einen geklüfteten Kalkstein mit Sandsteineinschaltungen handelt.

Das Norddeutsche Becken gehört zum Mitteleuropäischen Beckensystem, welches sich seit dem Perm bis zum Ende der Kreide sukzessiv vertiefte. In diesem Zeitabschnitt entstanden die Sedimente, die als Zielhorizont für die geothermische Energienutzung zu erfassen waren. Berücksichtigt wurden verschiedene Kriterien, die für eine

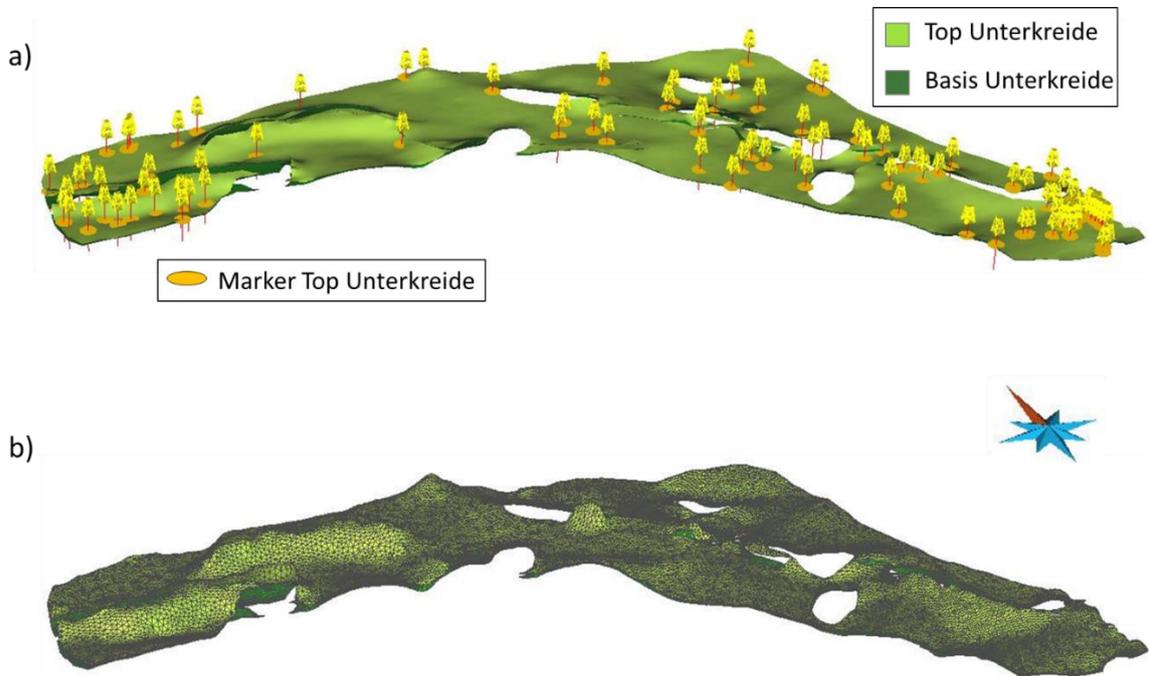
hydrothermale Nutzung geothermischer Reservoirs von Bedeutung sind. Hierzu zählen vor allem eine Mindestmächtigkeit permeabler Schichten von 20 m (ROCKEL & SCHNEIDER, 1992; ROCKEL ET AL., 1997), eine regionale Verbreitung sowie eine Tiefenlage, die eine Formationstemperatur von mindestens 40 °C erwarten lässt. Ziel der Strukturmodellierung ist die räumliche Darstellung geologischer Körper bzw. Sedimentformationen, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit einen oder mehrere Grundwasserleiter erwarten lassen. Erst wenn Basis- und Topflächen vorhanden sind, können Formationen als geologische Körper betrachtet werden. Dabei stellt die Höhendifferenz zwischen diesen beiden Flächen die stratigraphische Mächtigkeit dar. Diese darf nicht mit der kumulierten Mächtigkeit der Grundwasserleiter verwechselt werden, da diese nur die durchlässigen Sandsteine berücksichtigt.



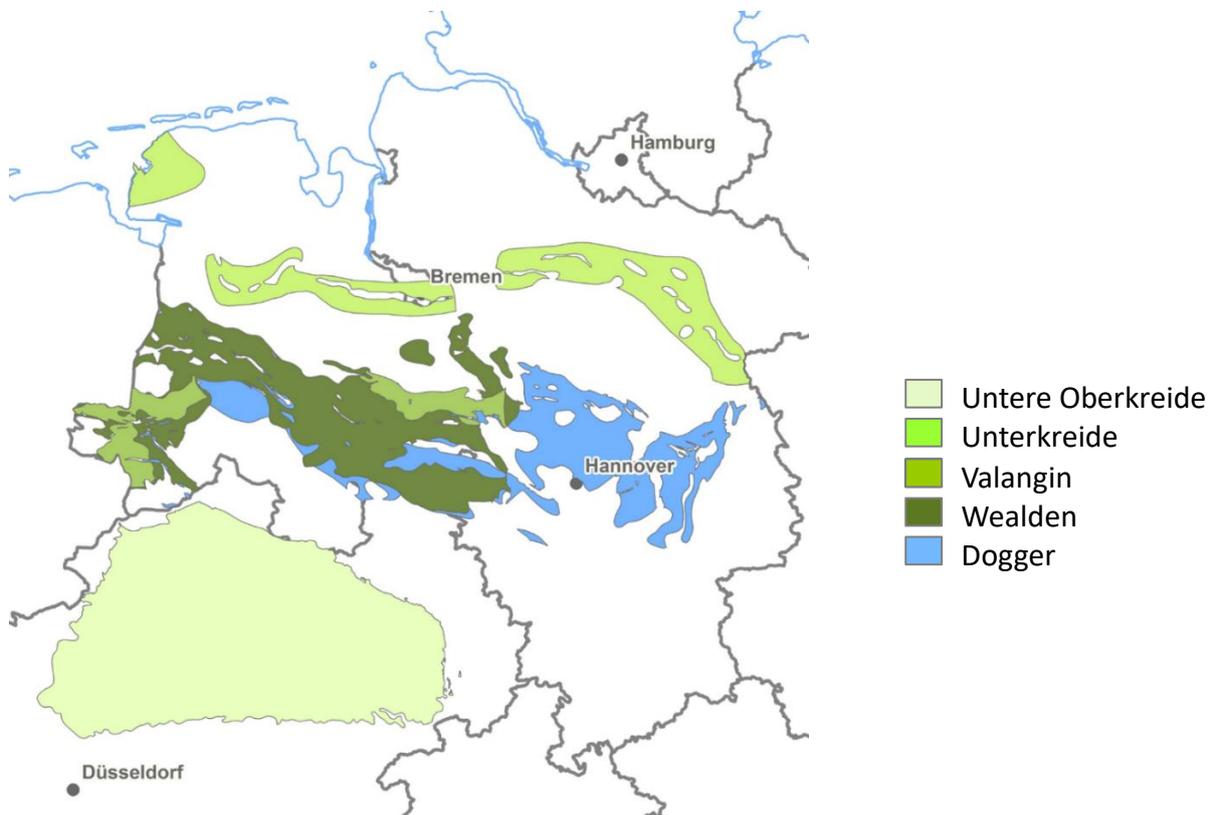
**Abb. 3.1:** Die über Internet aufrufbare Oberfläche von GeotIS; grün hinterlegte Flächen zeigen die Gebiete, in denen 3D-Modelle zur Verfügung stehen; die roten Markierungen zeigen Bereiche, in denen bisher keine 3D-Modelle vorlagen. Die Karte rechts zeigt den aktuellen Stand.

Die 3D-Modelle wurden mit der Software GOCAD<sup>®</sup> von Paradigm erstellt. In der Regel handelt es sich dabei um triangulierte Basis- und Topflächen, die auf der Grundlage von geologischen Strukturkarten und weiterer Daten, wie z. B. Bohrungen, modelliert wurden. In der aktuellen Arbeit wurden jeweils Top- und Basisflächen des Dogger (Niedersächsisches Becken), des Wealden (Niedersächsisches Becken), des Valangin (Niedersächsisches Becken), der Unterkreide (Berrias bis Alb) nördlich des Niedersächsischen Beckens und der Oberkreide (Cenoman bis Turon) im Münsterländer Kreidebecken berücksichtigt. Bezüglich der Geometrie der Störungsflächen wurden mangels genauerer Informationen sämtliche Störungen vertikal für alle jeweiligen Top- und Basisflächen modelliert. Lediglich für die Topfläche des Gebiets des Münsterländer Kreidebeckens standen gar keine Informationen über die Störungsverläufe zur Verfügung. Nach der Erzeugung der jeweiligen Flächen auf Basis der Isobathen in den jeweils ermittelten Verbreitungsgebieten erfolgte noch eine kleinräumige Anpassung

der modellierten Flächen an alle für die jeweilige Stratigrafie zur Verfügung stehenden Bohrprofile (Abb. 3.2). Es wurden auch die Abstände zu den jeweils darüber liegenden Flächen berücksichtigt und Flächendurchdringungen gegebenenfalls korrigiert.



**Abb. 3.2:** a) Top und Basis des 3D-Modells des Uelzen Lineaments (Ausschnitt) mit Lage der Bohrungen und der Horizontmarker. b) Gleiches Modell mit eingblendeter Vermaschung (2-fach überhöht).



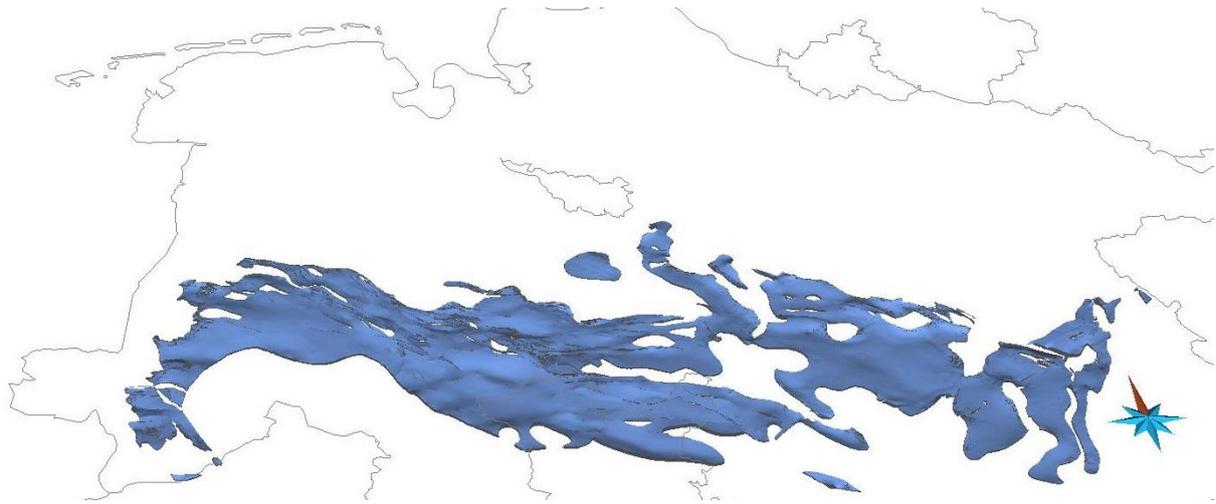
**Abb. 3.3:** Lage der neu erstellen 3D-Modelle innerhalb des Norddeutschen Beckens und des Münsterländer Kreidebeckens.

Zur Erweiterung der bisher im Geothermischen Informationssystem implementierten 3D-Modelle wurden im Bereich des Norddeutschen Beckens und im Münsterländer Kreidebecken fünf neue Modelle erstellt (Abb. 3.3). Diese geothermisch nutzbaren Horizonte weisen niedrigen bis mittlere Temperaturen ab 40 °C auf und stehen damit potenziell für eine Wärmegewinnung zur Verfügung. Es handelt sich um Sandsteine des Dogger, Wealden und Valangin im Niedersächsischen Becken, um Unterkreide-sandsteine nördlich des Niedersächsischen Beckens im Bereich der Emsmündung und der Lineamente Leer-Bremen und Uelzen sowie um den Cenoman-Turon-Aquifer im Münsterländer Kreidebecken. Nach Verschnitt mit dem 3D-Temperaturmodell des LIAG werden die Modelle in den Datenbestand von GeotIS eingefügt und stehen einer weitergehenden Nutzung zur Verfügung.

### 3.2.1 Dogger

Die Auswahl und Abgrenzung des Gebietes mit Sandsteinen des Doggers (Aalen bis Callov) im Niedersächsisches Becken erfolgte nach MÜLLER & REINHOLD (2011) und KNOPF (2011) wobei eine Speichergesteinsmächtigkeit von > 10 m und eine Tiefenlage am Top der Einheit > 800 m als Kriterien angelegt wurden. Die Modellierung erfolgte nach Kartenwerken des Geotektonischen Atlases (BALDSCHUHN ET AL., 2001) bzw. des Southern Permian Basin Atlases (DOORNENBAL & STEVENSON, 2010). Für die Anpassung der modellierten Fläche standen für die Top-Fläche Callov 1252 Bohrungen und für die Basis-Fläche Aalen 417 Bohrungen zur Verfügung. Die Modellierung der Störungsverläufe auf den jeweiligen Flächen erfolgte nach DOORNENBAL & STEVENSON (2010) (Abb. 3.4).

Im Mittleren Jura werden die z. T. mächtigen Tonsteifolgen viel häufiger als im Unteren Jura von Sandsteifolgen unterbrochen (HOTH ET AL., 2007). Wichtige Sandsteinhorizonte sind Dogger Beta-Sandsteine aus dem Aalen, die im Nordosten des Arbeitsgebietes nachgewiesen sind. Diese Sandsteine sind aus dem Osten geschüttet worden. Laut ZIEGLER (1990) sind in dem Zeitabschnitt danach vom Bajoc bis Bathon vor allem deltaische und küstennahe bzw. flachmarine Klastika sowie weiterhin flachmarine Tonsteine abgelagert worden. Aus dem Bajoc ist der Garantianen-Sandstein von Bedeutung, der in zentralen Gebieten Niedersachsens verbreitet ist und aus einem Deltafächer aus dem Norden geschüttet wurde (BOIGK, 1981). Ebenso aus dem Norden geschüttet wurden Sandsteine aus dem Bathon, die unter der Bezeichnung Cornbrash-Fazies zusammengefasst werden (FRISCH & KOCKEL, 2004). Sie sind im (Süd)Osten und Westen des Niedersächsischen Beckens weit verbreitet. Im Westen sind Sandsteine dieser Fazies aus dem Unteren Bathon in den Schichtenverzeichnissen auch unter der Bezeichnung Württemberg-Sandsteine aufgeführt (KNOPF, 2011).



**Abb. 3.4:** Geothermisch relevante Gebiete innerhalb des Niedersächsischen Beckens (Top Dogger).

### 3.2.2 Unterkreide (Wealden)

Die Auswahl und Abgrenzung des Gebietes mit Ablagerungen der Unterkreide (Wealden) im Westteil des Niedersächsischen Beckens erfolgte nach KUDER ET AL. (2014). Für die Modellierung wurden die Bereiche gewählt, die sich innerhalb des Niedersächsischen Beckens befinden und sich an den bereits fertiggestellten Teil dieser Einheit im Ostteil des Beckens anschließen. Die Modellierung erfolgte nach Kartenwerken des Geotektonischen Atlases (BALDSCHUHN ET AL., 2001) bzw. des Southern Permian Basin Atlases (DOORNENBAL & STEVENSON, 2010). Für die Anpassung der modellierten Fläche standen für die Top-Fläche Wealden 1676 Bohrungen und für die Basis-Fläche Wealden 1254 Bohrungen zur Verfügung. Die Modellierung der Störungsverläufe auf den jeweiligen Flächen erfolgte nach DOORNENBAL & STEVENSON (2010) (Abb. 3.5).



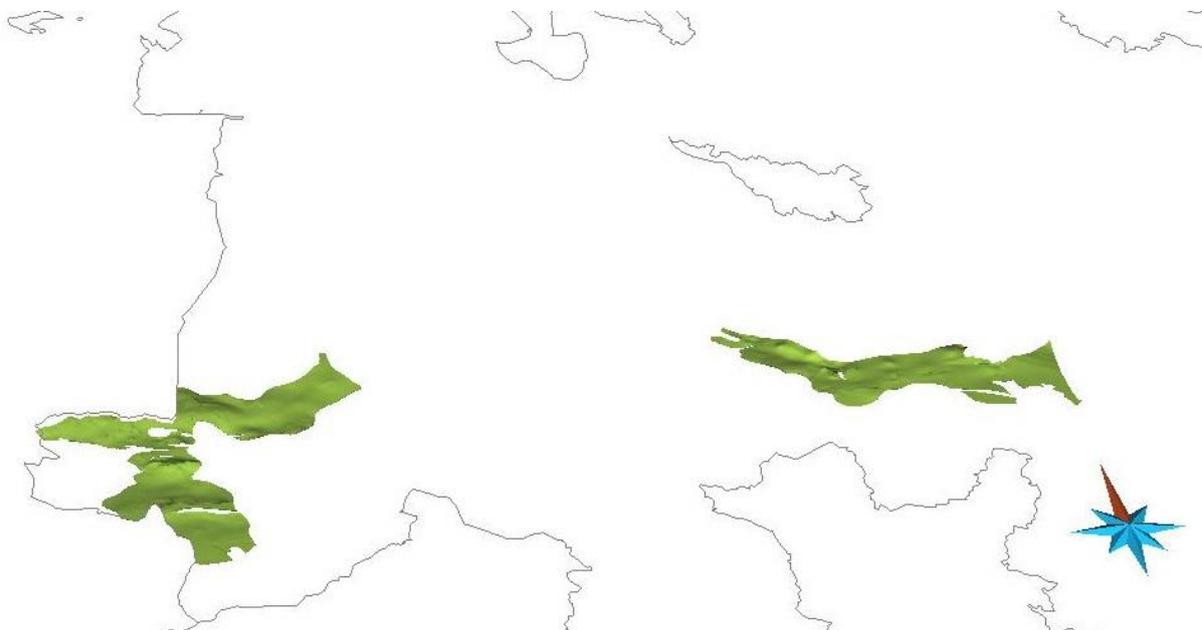
**Abb. 3.5:** Geothermisch relevante Gebiete innerhalb des Niedersächsischen Beckens (Top Wealden).

Stratigraphisch muss der „deutsche Wealden“ vom Wealden an seiner Typuslokalität in England unterschieden werden, daher ist die traditionsbedingt mit „Wealden“ bezeichnete Einheit dem stratigraphischen Begriff „Bückeberg-Formation“ zuzuordnen.

Bei den Sandsteinen handelt es sich nach SCHULZ & RÖHLING (2000) um fluviatile Ablagerungen eines verflochtenen Fluss-Systems mit einem sehr heterogenen Faziesgefüge. Sie bestehen vorwiegend aus einem Wechsel von Feinsanden und Schluffen mit tonigen Lagen. Partienweise können sie konglomeratisch ausgebildet sein. Es dominieren bei den Sandsteinen die fein- bis mittelkörnigen Varietäten mit typischer Flaserschichtung. Die Tonsteine des Wealden sind überwiegend mittel- bis dunkelgrau. Nach Westen stellen sich häufiger grünlichgraue Tonsteine und einzelne Karbonathorizonte ein. Die Korngröße innerhalb der einzelnen Sequenzen nimmt vom Liegenden zum Hangenden ab (BEUTLER ET AL., 1994).

### 3.2.3 Unterkreide (Valangin)

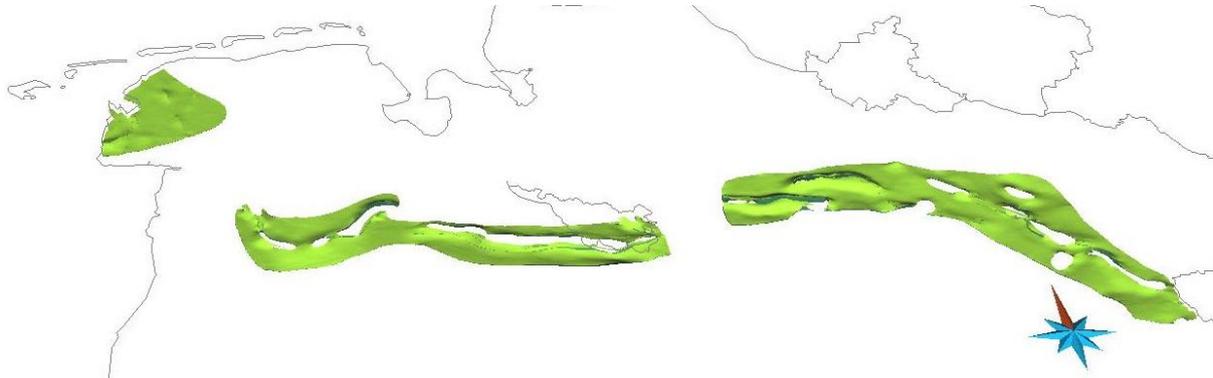
Die Auswahl und Abgrenzung des Gebietes mit Ablagerungen der Unterkreide (Valangin mit Valendis Sandstein und Bentheimer Sandstein) innerhalb des Niedersächsischen Beckens erfolgte nach KUDER ET AL. (2014) und HAENEL & STAROSTE (1988). Die Modellierung erfolgte nach Kartenwerken des Geotektonischen Atlases (BALDSCHUHN ET AL., 2001) bzw. des Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland (HAENEL & STAROSTE, 1988). Für die Anpassung der modellierten Fläche standen für die Top-Fläche Bentheimer Sandstein 1493 Bohrungen und für die Basis-Fläche Bentheimer Sandstein 521 Bohrungen zur Verfügung. Für den Valendis Sandstein waren es 536 Bohrungen für die Top-Fläche und 318 Bohrungen für die Basis-Fläche. Die Modellierung der Störungsverläufe auf den jeweiligen Flächen erfolgte für die Störungen des Top Valangin nach HAENEL & STAROSTE (1988) und für die Basis des Valangin nach DOORNENBAL & STEVENSON (2010) (Abb. 3.6).



**Abb. 3.6:** Geothermisch relevante Gebiete innerhalb des Niedersächsischen Beckens (Top Valangin). Im Westen: Bentheimer Sandstein. Zentral: Valendis Sandstein.

Die Ausbildung der Wealden- und Valangin-Sandsteine im zentralen Niedersachsen ist in den meisten Fällen identisch. Der Bentheimer Sandstein ist ein brauner bis roter fein- bis mittelkörniger Quarzsandstein, dessen Kornbindung weitgehend durch Kornverwachsung bewirkt wird. Gelegentlich tritt auch überwiegend dolomitisierter Kalk als

Bindemittel auf (KEMPER, 1976). Bei diesen Einheiten ist die Mächtigkeit als Nettomächtigkeit zu verstehen, die 70 bis 100 % der Gesamtmächtigkeit ausmacht (HAENEL & STAROSTE, 1988).



**Abb. 3.7:** Geothermisch relevante Gebiete nördlich des Niedersächsischen Beckens (Top Unterkreide). Links: Emsmündung. Mitte: Leer-Bremen Lineament. Rechts: Uelzen Lineament.

### 3.2.4 Unterkreide (Berrias bis Alb)

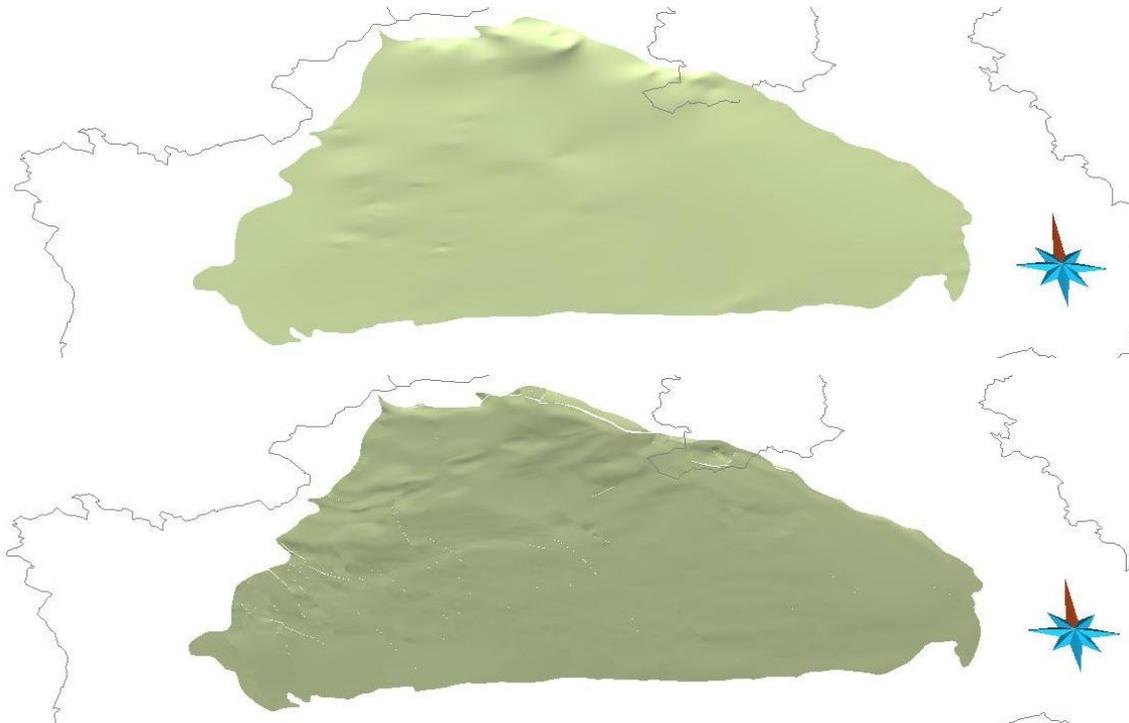
Die Auswahl und Abgrenzung des Gebietes mit Ablagerungen der Unterkreide (Berrias bis Alb) nördlich des Niedersächsischen Beckens erfolgte nach MÜLLER & REINHOLD (2011) und KNOPF (2011) wobei eine Speichergesteinsmächtigkeit von  $> 10$  m und eine Tiefenlage am Top der Einheit  $> 800$  m als Kriterien angelegt wurden. Die Modellierung erfolgte nach Kartenwerken des Geotektonischen Atlases (BALDSCHUHN ET AL., 2001) bzw. des Southern Permian Basin Atlases (DOORNENBAL & STEVENSON, 2010). Es handelt sich um Gebiete im Bereich der Emsmündung, des Leer-Bremen Lineaments und des Uelzen Lineaments. Für die Anpassung der modellierten Fläche standen für die Top-Fläche Alb 165 Bohrungen und für die Basis-Fläche Berrias 163 Bohrungen zur Verfügung. Die Modellierung der Störungsverläufe auf den jeweiligen Flächen erfolgte nach DOORNENBAL & STEVENSON (2010) (Abb. 3.7).

Die wichtigen Sandsteinhorizonte im Bereich der Unterkreide nördlich des Niedersächsischen Beckens sind in den Stufen Berrias (Obernkirchen-Sandstein), Valangin (Bentheim-Sandstein, Dichotomiten-Sandstein) und Hauterive (Gildehaus-Sandstein) zuzuordnen. Aus dem höheren Teil der Unterkreide ist nur der Hils-Sandstein aus dem Alb im äußersten Südosten des Verbreitungsgebietes durch Bohrungen belegt. Die aus der Bohrungsdatenbank abgeleiteten Sandsteinmächtigkeiten weisen Werte von einigen Zehnermetern auf; dabei sind mit Ausnahme der Emsmündung auch Werte von mehr als 50 m Mächtigkeit nachgewiesen (KNOPF, 2011).

### 3.2.5 Untere Oberkreide (Cenoman bis Turon)

Die Auswahl des Gebietes mit Ablagerungen der Unteren Oberkreide (Cenoman bis Turon) innerhalb des Münsterländer Kreidebeckens erfolgte nach und BALDSCHUHN ET AL. (2001) sowie nach DÖLLING & JUCH (2009). Die Modellierung der Basis Cenoman erfolgte nach Kartenwerken des Geotektonischen Atlases (BALDSCHUHN ET AL., 2001). Die Modellierung des Top Turon sowie der Störungen Top Turon erfolgte anhand von Bohrungen und Profilschnitten. Für die Anpassung der modellierten Fläche standen

für die Top-Fläche Turon 19 Bohrungen und für die Basis-Fläche Cenoman 22 Bohrungen zur Verfügung. Die Modellierung der Störungsverläufe erfolgte für die Störungen an der Basis Cenoman nach DOORNENBAL & STEVENSON (2010) sowie Daten des Geologischen Dienstes von NRW (Abb. 3.8).



**Abb. 3.8:** Geothermisch relevante Gebiete innerhalb des Münsterländer Kreidebeckens (Cenoman bis Turon). Oben: Top Turon. Unten: Basis Cenoman.

Die Lagerungsverhältnisse im Kreide-Deckgebirge des zentralen Münsterlandes gelten als relativ ungestört (DÖLLING & JUCH, 2009). Nach MICHEL & STRUCKMEIER (1985) handelt es sich bei dem kretazischen Aquifer um einen rissigen, geklüfteten Kalkstein mit Sandsteineinschaltungen, wobei sich der Randbereich und das Zentrum im Salzgehalt des Formationswassers unterscheiden; zum Beckeninneren und mit zunehmender Tiefe steigt dieser an.

### 3.3 Erarbeitung von 3D-Diskordanzflächen

#### 3.3.1 Erarbeitung von 3D-Strukturdaten

Um mesozoische Diskordanzflächen mit GOCAD<sup>®</sup> zu modellieren, wurden aus dem Kohlenwasserstoff-Fachinformationssystem (KW-FIS) des Landesamts für Bergbau Energie und Geologie (LBEG) KW-Bohrungen recherchiert, deren Schichtenverzeichnisse die Merkmale Lücke, Schichtlücke, Diskontinuität, Emersion oder Diskordanz aufweisen. Die ausgewählten Merkmale wurden mit ihren Koordinaten in GOCAD<sup>®</sup> importiert, um daraus Flächenmodelle zu entwickeln. Dabei hat sich gezeigt, dass aufgrund der Datendichte nur kleinräumige Flächen zu erstellen sind (Abb. 3.9).

Für folgende chronostratigraphische Stufen wurden Diskordanzflächen modelliert:

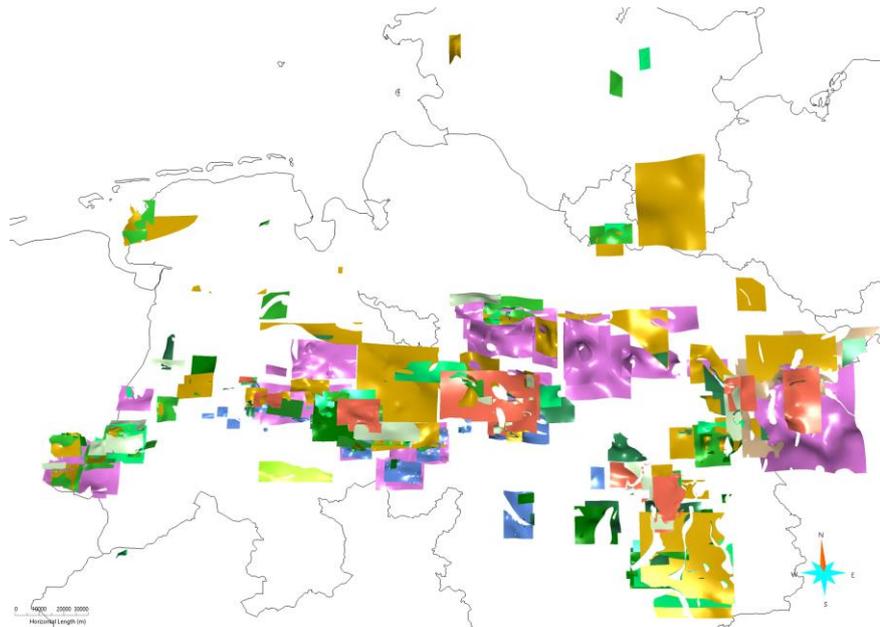
- Maastricht
- Campan
- Albium

- Aptium
- Barreme
- Hauterive
- Valanginium
- Berriasium
- Kimmeridgium
- Callovium
- Bathonium
- Bajocium

Außerdem wurden Diskordanzflächen in folgenden lithostratigraphischen Gruppen modelliert:

- Keuper
- Mittlerer Buntsandstein

Eine Zunahme der Porosität für Sandsteine innerhalb der Stufen im Mittel- und Oberjura sowie der Kreide könnte aufgrund feuchtwarmer Klimaverhältnisse und der damit möglichen Infiltration meteorischer Wässer durch Lösungsprozesse entstanden sein. Aufgrund der lückenhaften Datenlage konnte ein solcher Zusammenhang jedoch nicht nachgewiesen werden (siehe auch Kapitel 4).



**Abb. 3.9:** 3D-Diskordanzflächen aus dem Mesozoikum für NW-Deutschland (kleinräumig im Bereich von Bohrungen modelliert).

### 3.4 3D-Modell Fränkisches Becken

Das Fränkische Becken wird östlich von der Böhmisches Masse und westlich durch das Rheinische Massiv begrenzt. Im Süden grenzt es an die Vindelizische Schwelle (Dinkelsbühl-Berching-Hoch) und im Norden verläuft die Spessart-Rhön-Achse (Bauer 1999). Bedeutende Teilbecken stellen das Unterfränkische Becken, das Coburger Becken und das Weidener Becken dar, deren Schichten vom Oberkarbon bis zum Jungtertiär reichen (FRITZER ET AL., 2014). Die größte Sedimentmächtigkeit von bis zu 3.000

m befindet sich in Unterfranken, während Richtung Süden die Mächtigkeit auf weniger als 400 m abnimmt.

Für die Auswahl der Modellgebiete und Horizonte wurden aus Mangel an Alternativen geringere Kriterien für eine hydrothermale Nutzung als bisher angesetzt. Der wichtigste geothermische Nutzhorizont im Fränkischen Becken ist der Buntsandstein mit seinen geklüfteten Sandsteinen, der bereits vielerorts balneologisch genutzt wird. Die Tiefenlage von maximal 1000 m begrenzt die zu erwartende Temperaturspanne auf 10 bis 50 °C. Im Bereich von Störungszonen können durch aufsteigende Wässer auch höhere Temperaturen auftreten. Neben dem Buntsandstein stellt vor allem im Süden auch der Keuper ein möglicher Nutzhorizont dar, der jedoch aufgrund seiner geringeren Tiefe und damit auch geringeren Temperatur vor allem als saisonaler Wärmespeicher in Frage kommen dürfte. Möglicherweise ließen sich auch Granite und Gneise des kristallinen Grundgebirges in Zukunft geothermisch nutzen. Erkenntnisse aus Untersuchungen im Schwarzwald und der kontinentalen Tiefbohrung in der Oberpfalz lassen vermuten, dass insbesondere die Granite über ein gleichmäßiges, hydraulisch durchlässiges Netzwerk von Kluft- und Störungsflächen verfügen (FRITZER ET AL., 2014). Oberflächliche Verwitterung könnte die Durchlässigkeit zusätzlich erhöht haben. Für das Grundgebirge unterhalb des Fränkischen Beckens liegen jedoch noch keine detaillierten Untersuchungen vor, so dass hier auf eine Modellierung der Grundgebirgsoberfläche für GeotIS vorerst verzichtet wurde.

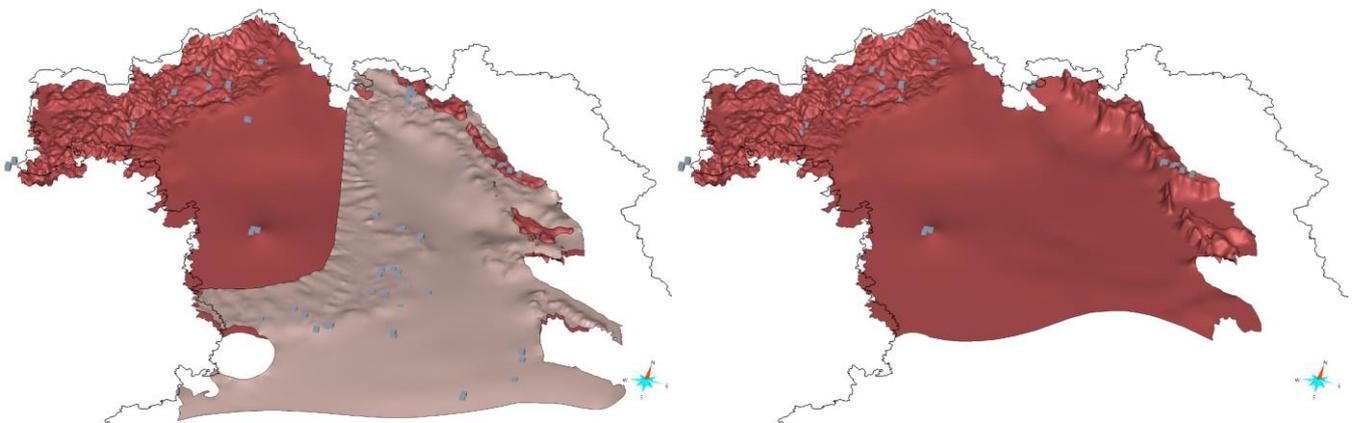
Die 3D-Modelle wurden wie in den norddeutschen Modellgebieten ebenfalls mit der Software GOCAD<sup>®</sup> von Paradigm erstellt. Auch hier wurden triangulierte Basis- und Topflächen erzeugt, welche die obere und untere Begrenzung der geologischen Einheit darstellen. Als Grundlage dienten die Isobathen-Karten der Oberkante von Buntsandstein und Oberkante Sandsteinkeuper des Bayerischen Geothermie-Atlas (FRITZER ET AL., 2014). Um die Basisflächen zu erstellen, wurden Karten der Mächtigkeit hinzugezogen (FRITZER ET AL., 2014; HAUNSCHILD, 2000). Der Beckenrand wurde nach den Befunden von HAUNSCHILD (1993) gezogen. Die Abgrenzung zum Nördlinger Ries erfolgte nach HAUNSCHILD (2000). Außerdem konnte die Tiefenlage anhand von 74 Bohrungen im Keuper und 29 Bohrungen im Buntsandstein verifiziert werden.

Mehrere große Störungszonen durchziehen in Nordwest-Südost-Richtung das Fränkische Becken, die nach der variszischen Gebirgsbildung durch eine Krustendehnung in Nordost-Südwest-Richtung entstanden. Dabei handelt es sich meist um Horst-Graben-Strukturen mit Versatzbeträgen von bis zu 200 m (BAUER, 1999). In der späteren tektonischen Entwicklung führten mehrere Kompressions- und Extensionsphasen zur Bildung bzw. Reaktivierung von Auf- und Überschiebungen sowie zu Seitenverschiebungen (FRITZER ET AL., 2014). Leider standen für dieses Projekt keine Karten der Störungsverläufe zur Verfügung, so dass die Modelle in vielen Bereichen nur die weiträumig interpolierte, ungefähre Tiefenlage widerspiegeln. Die Versatzbeträge wurden nicht berücksichtigt. Im Randbereich des Fränkischen Beckens wurden die Top-Flächen mit der Fläche der Geländeoberfläche verschnitten.

Die Top-Fläche des Keuper-Modells stellt die Oberfläche dieses Sandsteinkeupers dar. Die Top-Fläche des Buntsandstein-Modells gibt die Oberfläche des Oberen Buntsandsteins wieder. Da sowohl Buntsandstein als auch der Keuper in Nordbayern an der Geländeoberfläche ausstreichen, wurden die Top-Flächen in diesem Bereich aus dem Geländere relief abgeleitet (Abb. 3.10).

Im unteren Mittleren Keuper treten innerhalb des Gipskeuper südöstlich einer Linie Bayreuth – Erlangen – Ansbach – Feuchtwangen die Benkersandsteine als gut durchlässige Grundwasserleiter auf. Ab dem höheren Mittleren Keuper werden überwiegend Sandsteine mit Tonsteineinschaltungen abgelagert, die als sogenannte Sandsteinkeuper bezeichnet wird.

Es gilt auch zu beachten, dass nicht der gesamte Raum zwischen Top- und Basisfläche als mögliches Reservoir zu betrachten ist. In mehreren Zyklen folgten immer wieder auf grobkörnige Sande auch tonig-schluffige Ablagerungen. Für eine geothermische Nutzung kommen vor allem die grobkörnigen und kiesigen Sandsteine des Mittleren Buntsandstein und die Geröllfächer am Beckenrand des Unteren Buntsandstein in Frage (BAUER, 1999). Im Oberen Buntsandstein bietet sich der Rötquarzit als lokaler Grundwasserleiter für eine geothermische Nutzung an. Zum Beckenrand hin verbessern sich seine hydraulischen Eigenschaften aufgrund des zunehmenden Sandanteils. In dieser Randfazies bilden Oberer und Mittlerer Buntsandstein einen zusammenhängenden Speicherkomplex (BAUER, 1999).



**Abb. 3.10:** Top-Flächen der 3D-Modelle von Buntsandstein (dunkelrot) und Sandsteinkeuper (beige, linke Abbildung) im Fränkischen Becken zehnfach überhöht dargestellt. Die grauen Markierungen zeigen die Lage der verwendeten Bohrprofile.

### 3.5 Literatur

BALDSCHUHN, R., BINOT, F., FLEIG, S. & KOCKEL, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. – Geologisches Jahrbuch, A 153: 95 S.; Stuttgart (Schweizerbart).

BAUER, W. (1999) Thermalwasserhöflichkeit und geothermische Verhältnisse des Fränkischen Beckens (Nordbayern/Südthüringen) Lehr- und Forschungsbereich Hydrogeologie und Umwelt, Universität Würzburg, Dissertation, 214 S., 49 Abb., 6 Anl., Würzburg.

- FRITZER, T., SETTLES, E. & DORSCH, K. (2014): Bayerischer Geothermieatlas, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, München. 96 S.
- HAUNSCHILD, H. (1993): Die Trias auf Blatt Wackersdorf. – In: Meyer, R.K.F. & Mielke, H.: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000, Blatt Nr. 6639 Wackersdorf: 36–47, München (Bayer. Geol. Landesamt).
- HAUNSCHILD, H. (2000): Die Trias, in: GROISS, J. et al. (Eds.), Das Ries und sein Vorland, Borntraeger, Berlin. 18-54.
- BEUTLER, G., RÖHLING, H.-G., SCHULZ, R. & WERNER, K.-H. (1994): Regionale Untersuchungen von geothermischen Reserven und Ressourcen in Nordwestdeutschland. Bericht, NLFb-Archiv 111758; 161 S., 37 Abb., 13 Tab., 33 Anl.; Hannover.
- BOIGK, H. (1981): Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland. Erdölprovinzen, Felder, Förderung, Vorräte, Lagerstättentechnik. – 330 S.; Stuttgart (Enke).
- DÖLLING, M. & JUCH, D. (2009): Strukturgeologische Modellvorstellungen zum Kreide-Deckgebirge im zentralen Münsterland. – In: Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Zwei Beiträge zur Geologie des zentralen und des südlichen Münsterlandes: 5-27; Krefeld (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen).
- DOORNENBAL, J.C. & STEVENSON, A.G. (Eds.) (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. – 342 S.; Houten (EAGE).
- FRISCH, U. & KOCKEL, F. (2004): Der Bremen-Knoten im Strukturnetz Nordwest-Deutschlands. – Bericht, Uni Bremen, FB Geowissenschaften Nr. 223: 379 S.; Bremen.
- HAENEL, R. & STAROSTE, E. (Eds.) (1988): Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland. – Publ. No. EUR 17811 of the European Commission, Office of Official Publications of the European Communities, 74 pp.; Hannover.
- HOTH, P., WIRTH, H., REINHOLD, K., BRÄUNER, V., KRULL, P. & FELDRAPPE, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. – 118 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin.
- KEMPER, E. (1976): Geologischer Führer durch die Grafschaft Bentheim und die angrenzenden Gebiete. – Das Bentheimer Land Nr. 64: 206 S.; Nordhorn-Bentheim (Heimatverein der Grafschaft Bentheim e.V.).
- KNOPF, S. (2011): Speicher-Kataster Deutschland: Endbericht für Niedersachsen und Bremen –104 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin.
- KUDER, J., BINOT, F., HÜBNER, W., ORILSKI, J., WONIK, T. & SCHULZ, R. (2014): Für die Geothermie wichtige hydraulische Parameter von Gesteinen des Valangin und der Bückeberg-Formation (Wealden) in Nordwestdeutschland. – Z. dt. Ges. Geowiss., 165(3): 455-467.
- MICHEL, G. & STRUCKMEIER, W. (1985): The Cretaceous Basin of Muenster – A General System in Response to Multiple Impacts (Water Supply, Spas, Deep mining). – In: Hydrology in the Service of Man, Memoires of the 18th Congress of the IAH: 150-159; Cambridge.

- MÜLLER, C. & REINHOLD, K. (HRSG.) (2011): Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland – Speicher-Kataster Deutschland. – Schriftenr. dt. Ges. Geowiss., Heft 74; Hannover.
- ROCKEL, W. & SCHNEIDER, H. (1992): Die Möglichkeiten der Nutzung geothermischer Energie in Nordostdeutschland und der Bearbeitungsstand geplanter Vorhaben. – In: Schulz, R., Werner, R., Ruhland, J. & Bußmann, W. (Hrsg.): Geothermische Energie – Forschung und Anwendung in Deutschland: 87-98; Karlsruhe (C.F. Müller).
- ROCKEL, W., HOTH, P. & SEIBT, P. (1997): Charakteristik und Aufschluss hydrogeothermaler Speicher. – Geowissenschaften, 15 (8): 244-252.
- SCHULZ, R. & RÖHLING, H.-G. (2000): Geothermische Ressourcen in Nordwestdeutschland. – Z. Angew. Geol., 46 (3): 122-129; Hannover.
- WMS GEOLOGISCHER DIENST NRW (Februar 2017).
- ZIEGLER, P. A. (1990): Geological atlas of Western and Central Europe. – 239 S.; Den Haag (Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V.).

## **4 Erfassung von hydraulischen Daten**

### **4.1 Untersuchung der hydraulischen Eigenschaften von geothermischen Nutzhorizonten in Nordwestdeutschland**

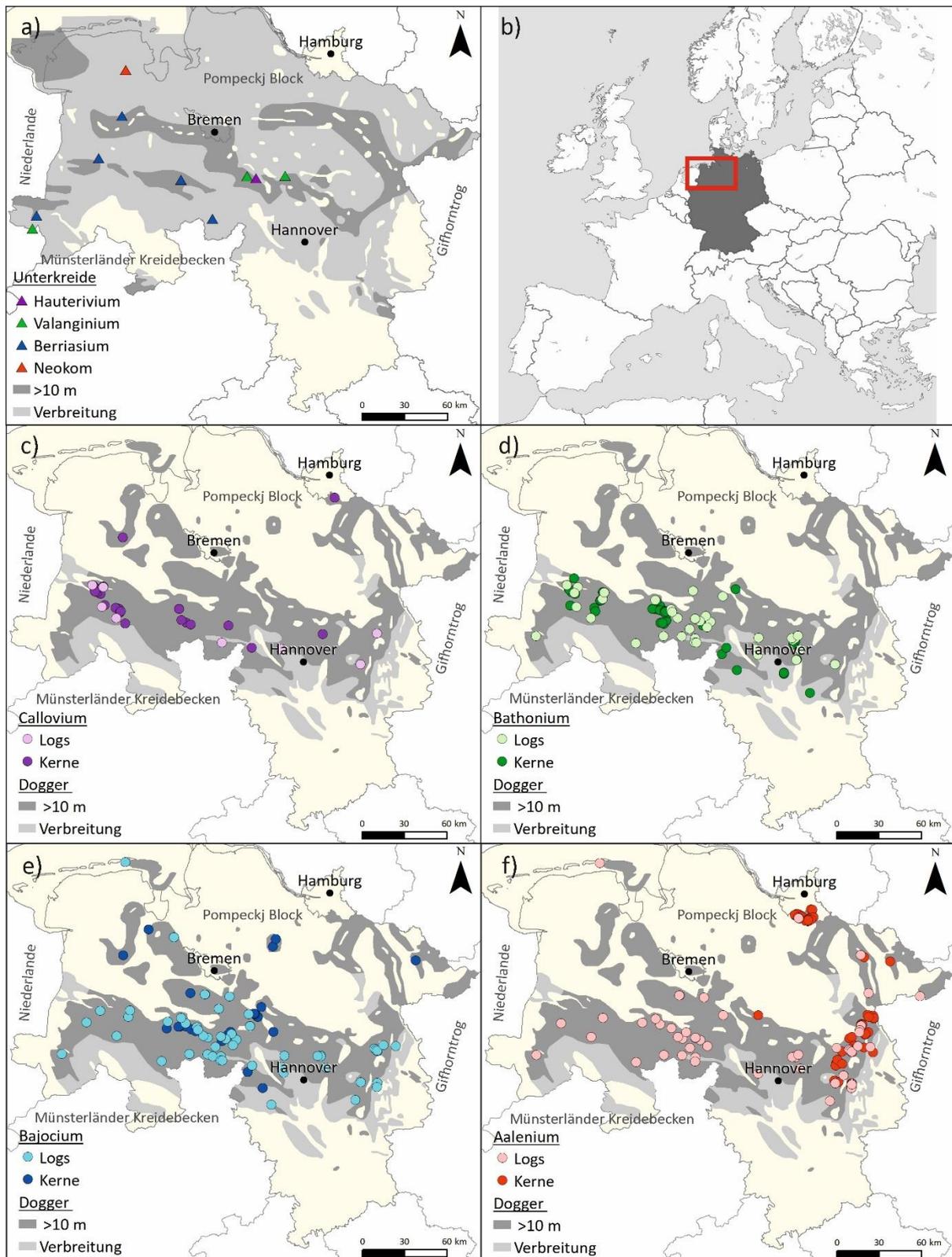
Untersucht wurde die Verteilung hydraulischer Eigenschaften von Sandsteinformationen im westlichen Teil des Norddeutschen Beckens mit dem Ziel, das geothermische Potenzial bewerten zu können. Bisher gibt es lediglich zwei Standorte im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens, in Neustadt-Glewe und Waren, an denen die Geothermie zur Fernwärmeerzeugung genutzt wird. Ein dritter Standort, Schwerin, befindet sich zurzeit in der Erschließungsphase.

Im Mittelpunkt stehen die Sandsteinformationen des Doggers und der Unterkreide im westlichen Teil des Norddeutschen Beckens, die mit einer mittleren Mächtigkeit von mehr als 10 m und in einer Teufe von mehr als 800 m weit verbreitet sind. Beim Dogger liegt der Schwerpunkt auf der Charakterisierung und Kartierung des hydraulischen Untergrundes und dessen Temperaturverteilung. Bei der Unterkreide wurde speziell der Einfluss geologischer Grenzflächen auf die hydraulischen Eigenschaften untersucht. Die Charakterisierung und Kartierung dieser Einheit wurde bereits von KUDER ET AL. (2014) im Vorgängerprojekt „StörTief“ durchgeführt.

#### **4.1.1 Geothermisch nutzbare Aquifere im Nordwesten Deutschlands**

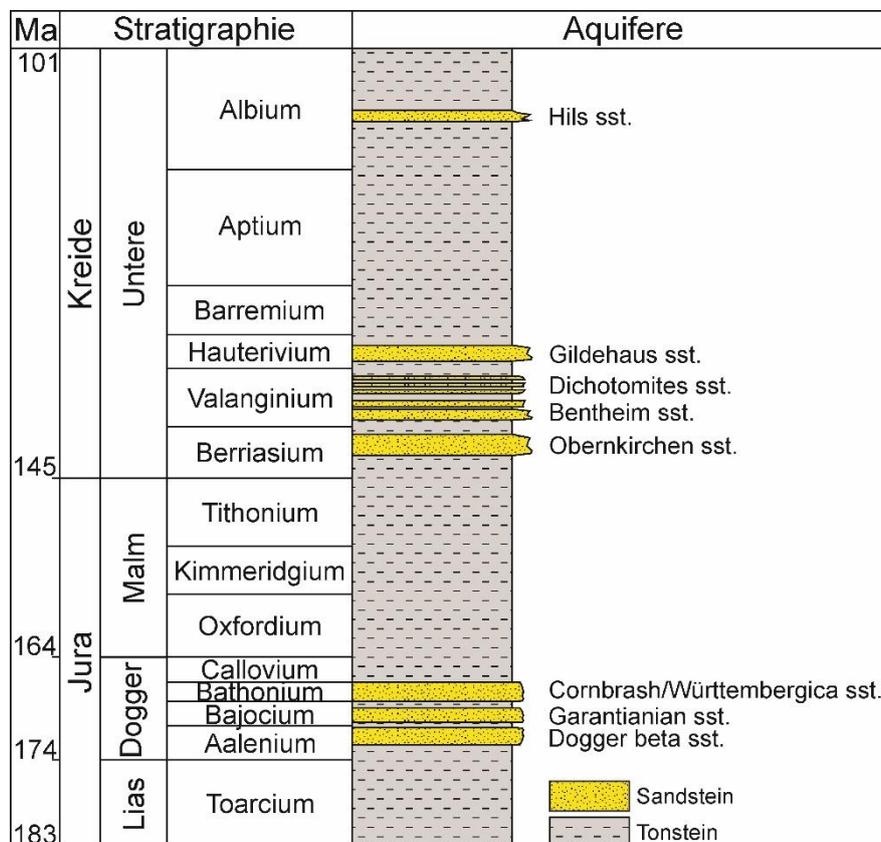
Die miozäne Geologie in Nordwestdeutschland wird vor allem durch die Entwicklung des Norddeutschen Beckens kontrolliert. Durch die anhaltende Subsidenz seit dem mittleren Paläozän und den damit einhergehenden tektonischen Bewegungen entstanden verschiedene Teilbecken (VOIGT ET AL., 2008).

Das niedersächsische Becken ist eines dieser Teilbecken. Es existierte vom Perm bis zur späten Kreide und wurde im Zuge der alpidischen Orogenese invertiert. Das Becken bedeckt weite Teile Niedersachsens und wird im Norden durch den Pompeckj-Block, im Westen ungefähr entlang der deutsch-niederländischen Grenze, im Süden durch das Münsterländer Kreidebecken und im Osten durch den Gifhorntrog begrenzt (BETZ ET AL. 1987; VOIGT ET AL. 2008) (Abb. 4.1). Tektonisch bedingt entwickelten sich außerdem verschiedene Salzstrukturen, wie zum Beispiel Salzdome, die den geologischen Untergrund zusätzlich beeinflussen (TRUSHEIM 1957). In 2011 hat die Geologische Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe (BGR) Karten potentieller Reservoirs im westlichen Teil des Norddeutschen Beckens erstellt (KNOPF 2011). In dieser Studie weisen die Sedimente des jurassischen Doggers und der Unterkreide mit durchschnittlichen Tiefen zwischen 1200 m und 400 m die vielversprechendsten Reservoirpotentiale auf (KNOPF 2011).



**Abb. 4.1:** Datensatz dieser Studie aufgeteilt nach verschiedenen stratigraphischen Formationen der Unterkreide und des Doggers, sowie nach Kern- und Logdaten. Die Verteilung der Dogger und Unterkreide Sedimente in Nordwestdeutschland nach KNOPF (2011). Dunkelgraue Flächen zeigen Sandsteinmächtigkeiten größer als 10 m und eine Topteufe von mehr als 800 m. Das Rechteck oben rechts in der Europakarte zeigt die Lage des Arbeitsgebietes.

Dogger Sedimente kommen vor allem in einem west-ost verlaufenden Band im niedersächsischen Becken vor. Die abgelagerten Sandsteine sind weitestgehend mächtiger als 10 m bei einer Tiefe von mehr als 800 m (Abb. 4.1). Der Ablagerungsraum ist gekennzeichnet durch ein fluviatil dominiertes Deltasystem, das in ein flaches Küstenmeer mündete. Mächtige Sandsteinpakete entstanden dabei in den Verteilerrinnen und auf den Sandbänken der Deltaebene (BETZ ET AL. 1987; DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION 2012; ZIMMERMANN ET AL. 2018). Die abgelagerten Sedimente bestehen hauptsächlich aus feinkörnigen Sandsteinen und Tonsteinen. Die wichtigsten Aquifere bilden die Dogger-Beta Sandsteine im Aalenium, der Garantianen Sandstein im Bajocium sowie die Cornbrash-Fazies und die Württembergica-Sandsteine im Bathonium (BRAND & MÖNNING 2009; KNOPF 2011) (Abb. 4.2).



**Abb. 4.2:** Stratigraphie im westlichen Teil des Norddeutschen Beckens modifiziert nach BRAND & MÖNNING (2009); FELDRAPPE ET AL. (2008); MUTTERLOSE (2000). Die Alter sind angepasst nach DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (2012). sst. = Sandstein.

Unterkreide Sedimente weisen eine große Verbreitung in Niedersachsen auf. Nur im Süden und westlich vom Harz sind nicht vorhanden. Kummulative Sandsteinmächtigkeiten größer als 10 m und einer Topteufe von mehr als 800 m kommen nur im zentralen Niedersachsen und in einigen kleinräumigen Flecken vor (Abb. 4.1). Die siliziklastischen Sedimente wurden in einem fluviatilen Zopfstromsystem abgelagert, was zu einer heterogenen Faziesverteilung führte (SCHULZ & RÖHLING 2000). Die abgelagerten Sedimente bestehen hauptsächlich aus Wechsellagerungen von feinkörnigen Sandsteinen und Siltsteinen mit tonigen Lagen. Teilweise sind auch Konglomerate vorhan-

den. Die wichtigsten Aquifersandsteine bilden der berriasische Obernkirchen Sandstein, die valanginischen Bethem und Dichotomiten Sandsteine, der hauderivische Gildehaus Sandstein (MUTTERLOSE 2000) sowie der Hils Sandstein des Albium (KNOPF 2011), der nur im südöstlichen Niedersachsen vorkommt (Abb. 4.2).

Da die vorhandenen Daten zum Teil nur unter veralteter Nomenklatur zu finden sind und nicht einheitlich auf die moderne Stratigraphie übertragen werden können, werden diese Daten unter dem Begriff Neokom zusammengefasst. Sie enthalten Sedimente vom Valanginium bis zum Barremium.

#### 4.1.2 Datengrundlage

Zur Beurteilung der räumlichen Permeabilitätsverteilung wurde eine kombinierte Untersuchung von hydraulischen Porositäts- und Permeabilitätsmessungen aus Plugs zusammen mit berechneten Porositäts- und Permeabilitätswerten aus geophysikalischen Bohrlochmessungen durchgeführt.

Die Datengrundlage bilden zum einen digitale Daten aus Bohrungen der Kohlenwasserstoffindustrie und zum anderen analoge Bohrungsdaten aus dem Archiv des Geozentrums Hannover. Insgesamt besteht das Dogger-Datenset aus 466 Plugmessungen an 200 verschiedenen Lokationen und aus zusätzlichen 186 Datenpunkten aus der geophysikalischen Bohrloginterpretation an 72 Lokationen. Das Datenset der Unterkreide besteht nur aus 15 Plugmessungen an 10 Lokationen (Abb. 4.1).

#### 4.1.3 Geophysikalische Logauswertung

Es wurde eine Analyse des Selbstpotential- oder Gamma-Ray-Logs zusammen mit einem Neutronen-, Dichte- oder Soniclog durchgeführt um Porosität und Permeabilität zu berechnen. Dabei wurde die Software Geolog<sup>®</sup> von Paradigm benutzt. Die beschriebenen Auswerteverfahren folgen den in Geolog<sup>®</sup> hinterlegten Verfahren und/oder werden ergänzt durch Crain's Petrophysical Handbook (<https://www.spec2000.net>)

#### 4.1.4 Porosität

Um die Porosität berechnen zu können wird zuerst der Tongehalt (Volume of shale,  $V_{SH}$ ) berechnet und als Log dargestellt (Abb. 4.3). Dies geschieht beim GR-Log nach Formel (1). Analog dazu berechnet sich der Tongehalt beim SP-Log.

$$V_{SH} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (1)$$

$GR_{log}$  = GR-Wert im Log

$GR_{min}$  = Minimum Gamma Ray-Wert

$GR_{max}$  = Maximum Gamma Ray-Wert

Da diese einfache lineare Abhängigkeit häufig den Tongehalt überschätzt wird die Formel (1) für mesozoische Gesteine nach LARINOV (1969) angepasst:

$$V_{SH_{Larinov}} = 0.33 \cdot (2^{2 \cdot V_{SH}} - 1) \quad (2)$$

Daraus kann nun mit Hilfe des **Sonic-Logs** nach der Wyllie-Time-Average Gleichung die effektive Porosität ( $PH_e$ ) und die totale Porosität ( $PH_t$ ) berechnet werden und als Log dargestellt werden (Abb. 4.3):

$$PHIe = \frac{DT_{Log} - DT_{MA}}{DT_{FL} - DT_{MA}} - \frac{V_{SH_{Larinov}} \cdot (DT_{SH} - DT_{MA})}{DT_{FL} - DT_{MA}} \quad (3)$$

$DT_{Log}$  = Sonic-Wert im Log

$DT_{MA}$  = Sonic-Wert bei 100 % Matrix

$DT_{FL}$  = Sonic-Wert der Bohrspülung

$DT_{SH}$  = Sonic-Wert bei 100 % Ton

Der Wert für  $DT_{FL}$  kann meist aus dem Messprotokoll entnommen werden. Ansonsten kann er mit 620  $\mu$ S/m bei einer Salzwasser Bohrspülung und mit 656  $\mu$ S/m bei einer Frischwasser Bohrspülung approximiert werden.

Die totale Porosität wird berechnet nach:

$$PHIt = PHIe + (V_{SH_{Larinov}} \cdot PHIt_{shale}) \quad (4)$$

$PHIt_{shale}$  repräsentiert das Volumen des tongebundenen Wassers. Die Bestimmung erfolgt nach:

$$PHIt_{shale} = \frac{DT_{SH} - DT_{MA}}{DT_{FL} - DT_{MA}} / KCP \quad (5)$$

KCP = Korrekturfaktor für kompaktierte Gesteine. Wenn  $DT_{SH}$  größer 328, dann muss der Kompaktions-Korrekturfaktor berechnet werden. Ansonsten entfällt KCP.

$$KCP = \frac{DT_{SH}}{328} \quad (6)$$

Eine andere Möglichkeit die Porosität zu berechnen ist mit Hilfe des **Dichte-Logs**. Dieses Log ist in tonigen Sanden dem Sonic-Log vorzuziehen, da die Tonkorrektur klein ist. Die effektive Porosität ( $PHIe$ ) wird berechnet durch:

$$PHIe = \frac{RHO_{MA} - RHO_{Log}}{RHO_{MA} - RHO_{FL}} - \frac{V_{SH_{Larinov}} \cdot (RHO_{MA} - RHO_{SH})}{RHO_{MA} - RHO_{FL}} \quad (7)$$

$RHO_{MA}$  = Dichte-Wert bei 100 % Matrix

$RHO_{Log}$  = Dichte-Wert im Log

$RHO_{FL}$  = Dichte-Wert Bohrspülung

$RHO_{SH}$  = Dichte-Wert bei 100 % Ton

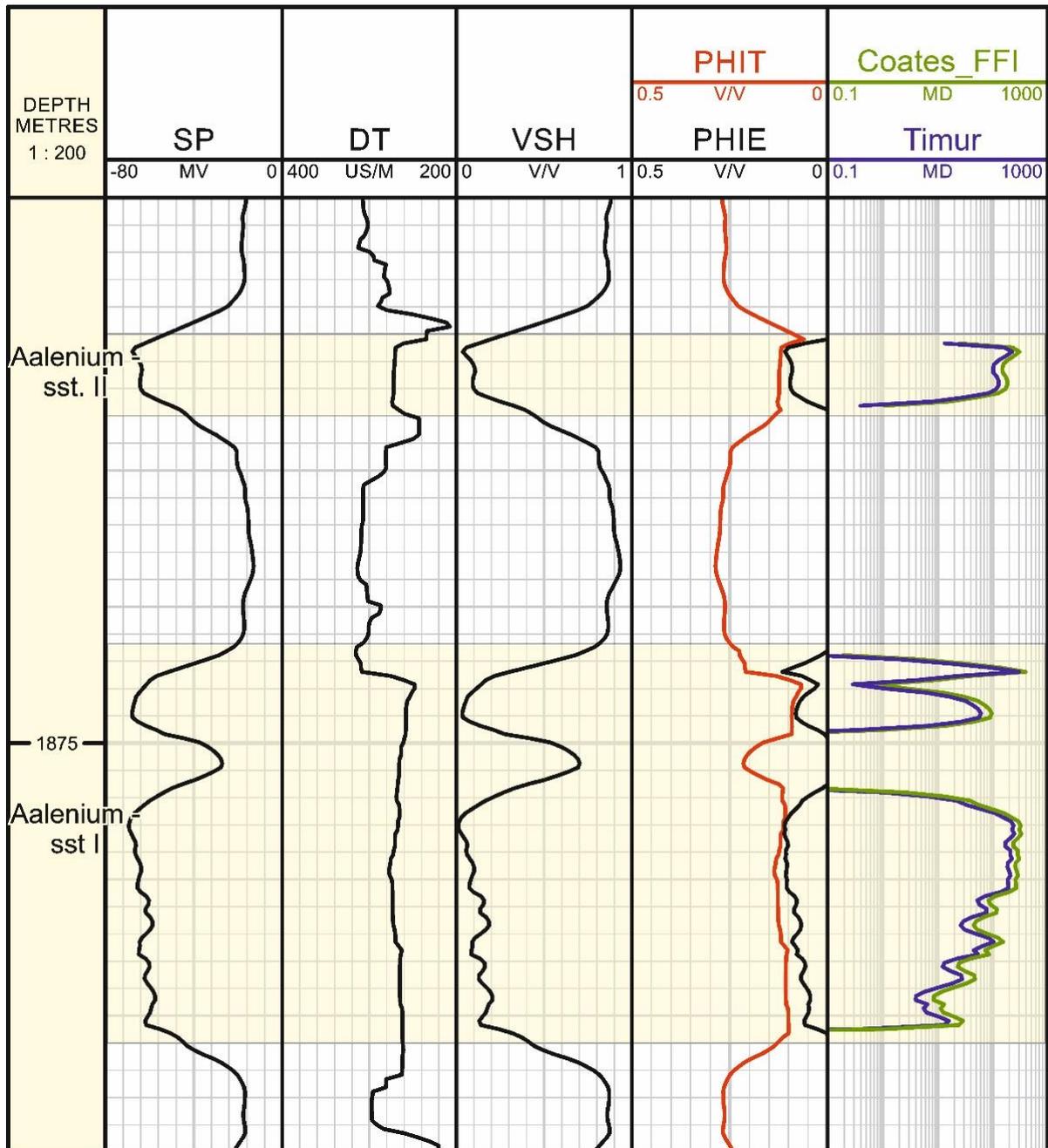
$RHO_{MA}$  entspricht bei einem Sandstein ungefähr 2645 kg/m<sup>3</sup> und die Bohrspülung ( $RHO_{FL}$ ) bei einer reinen Wasserspülung 1000 kg/m<sup>3</sup>. Die exakten Werte können häufig dem Messprotokoll entnommen werden.

Die totale Porosität ( $PHIt$ ) wird dann berechnet nach:

$$PHIt = PHIe + V_{SH_{Larinov}} \cdot PHIt_{shale} \quad (8)$$

$PHIt_{shale}$  repräsentiert das Volumen des tongebundenen Wassers. Auch beim Density-Log muss es wie beim Sonic-Log abgeleitet werden:

$$PHIt_{shale} = \frac{RHO_{SH} - RHO_{MA}}{RHO_{FL} - RHO_{MA}} \quad (9)$$



**Abb. 4.3:** Beispiel für die Ableitung der Porosität und Permeabilität anhand der geophysikalischen Log-Auswertung. Sandsteinintervalle sind gelb hinterlegt. Die Mächtigkeit des Aalenium Sandsteinintervalls I beträgt 19,6 m und die des Aalenium Sandsteins II 4,4 m. Für eine Reservoirbetrachtung kommt aufgrund der Mächtigkeit nur der Aalenium Sandstein I in Betracht. SP = Eigenpotential-Log, DT = Sonic-Log, VSH = Tongehalt, PHIT = totale Porosität, PHIE = effektive Porosität, Coates\_FFI = Permeabilität nach Coates-Free-Fluid-Index, Timur = Permeabilität nach der Methode von Timur.

#### 4.1.5 Permeabilität

Für die Permeabilitätsbestimmung aus Logs gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Methoden (z.B. Wyllie-Rose Gleichung, Coates-Dumanoir, Coates-FFI, Abb. 4.3). Allen Methoden gemein ist, dass die Kenntnis des Anteils an kapillargebundenem Wasser ( $SW_{irr}$  = irreducible water saturation) an der gesamten Wassersättigung nötig ist.

$$SW_{irr} = \frac{\frac{KBUCKL}{PHIe}}{1 - V_{shLarinov}} \quad (10)$$

Dabei ist KBUCKL eine dimensionslose Konstante, genannt Buckles' Number, die in einem Konzept von BUCKLES (1965) eingeführt wurde. Die Buckles' Number wurde definiert als das Produkt aus Porosität und  $SW_{irr}$ . Um dieses Modell auch auf tonige Sande anwenden zu können wurde der Term  $(1 - V_{shLarinov})$  hinzugefügt.

Daraus ergeben sich näherungsweise folgende Buckles' Numbers:

*Sehr feinkörniger Sandstein* = 0,12

*Feinsandstein* = 0,06

*Mittelsandstein* = 0,03

*Grobsandstein* = 0,02

Zur Bestimmung der Permeabilität ( $k$ ) wurden hier zwei verschiedene Methoden gewählt. Die erste und in der Kohlenwasserstoffindustrie gebräuchlichste Methode ist die Anwendung der **Wyllie-Rose** Gleichung:

$$k_{Wyllie-Rose} = \left( C \cdot \frac{PHIe^D}{SW_{irr}^E} \right)^2 \quad (11)$$

Eine Bestimmung der Parameter C, D und E wurde von verschiedenen Autoren empirisch durchgeführt (z.B. Morris-Biggs, Timur, Coates). Für tonige Sandsteine mit Wasserführung ist besonders die Methode nach **Timur** geeignet (TIMUR, 1968). Daraus ergeben sich für C = 100, D = 2,25 und E = 1.

Eine weitere Methode, die optimistischere Werte bei geringer Porosität liefert ist die Coates-Free-Fluid-Index-Methode (Coates\_FFI).

$$k_{Coates_{FFI}} = \left( A \cdot PHIe^2 \cdot \frac{1 - SW_{irr}}{SW_{irr}} \right)^2 \quad (12)$$

Hierbei ist A wiederum eine Konstante, die durch SCHLUMBERGER (1987), empirisch mit dem Wert 70 approximiert wurde. Wenn möglich sollten die Daten immer anhand von Kernmessungen kalibriert werden.

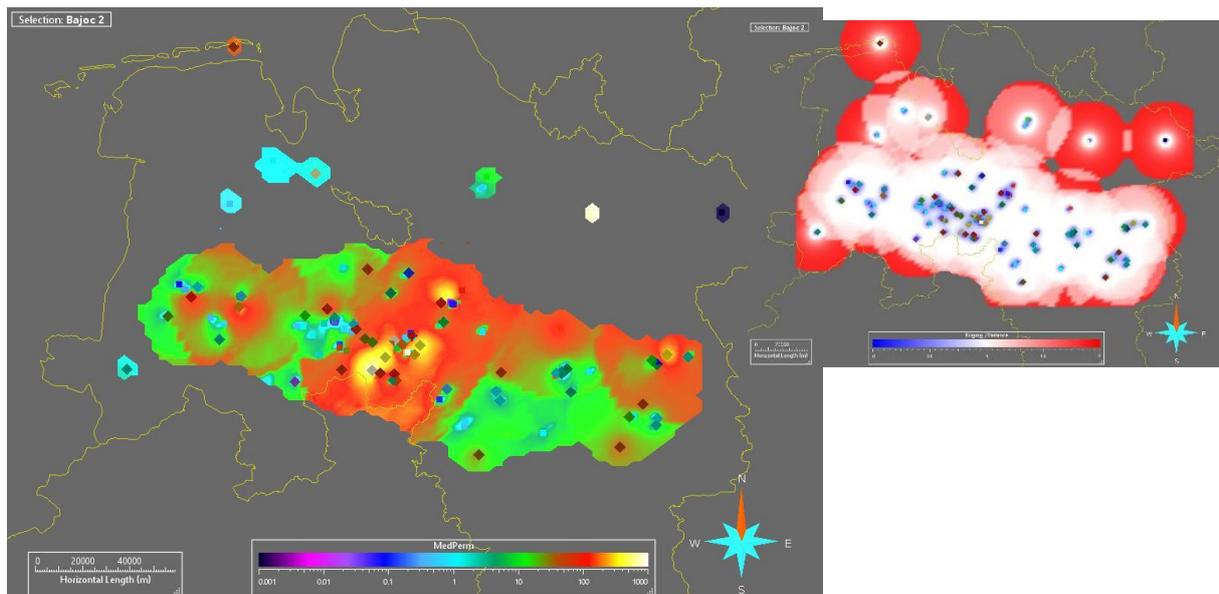
Beim Vergleich der Logauswertung mit den gemessenen Plugmessungen zeigt sich, dass die Ergebnisse gut übereinstimmen (Tab. 4.1). Bei der Permeabilität gibt der Durchschnittswert für den Aalenium Sandstein I mit der optimistischeren Coates-FFI-Methode einen höheren Wert und mit der Methode nach Timur einen etwas niedrigeren Wert als bei der Plugmessung an. Leider sind häufig keine Plugmessungen vorhanden, so dass ein direkter Vergleich nicht möglich ist.

**Tab. 4.1:** Vergleich von Porosität und Permeabilität aus der Logauswertung mit Kernmessungen. Bei der Messung am Plug kann nur die totale Porosität gemessen werden. Bei der Permeabilität gibt der Durchschnittswert für den Aalenium Sandstein I mit der optimistischen Coates-FFI-Methode einen höheren Wert und mit der Methode nach Timur einen etwas niedrigeren Wert als bei der Plugmessung an. Die Ergebnisse stimmen gut überein.

Methoden	Aalenium Sandstein I - LOG	Aalenium Sandstein - PLUG
Porosität		
PHIt	21	18
PHIe	12	-
Permeabilität (mD)		
Coates_FFI	387	351
Timur	294	

#### 4.1.6 Kriging

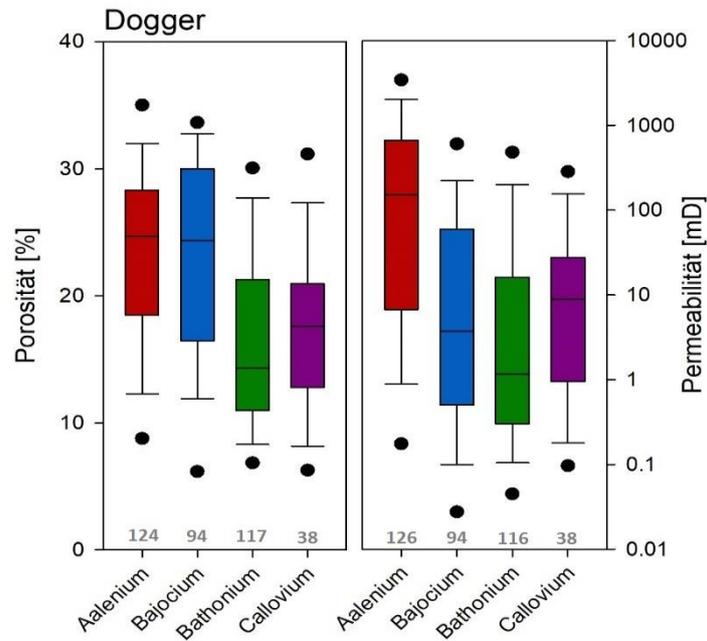
Um einen Überblick über die räumliche Permeabilitätsverteilung im Untergrund zu bekommen wurde die Ordinary Kriging Methode in GOCAD® benutzt. Für die Medianwerte des Bajocium wurde eine Übersichtskarte erstellt (Abb. 4.4). Dabei wurden nur Regionen mit einer normalisierten Varianz bis eins berücksichtigt.



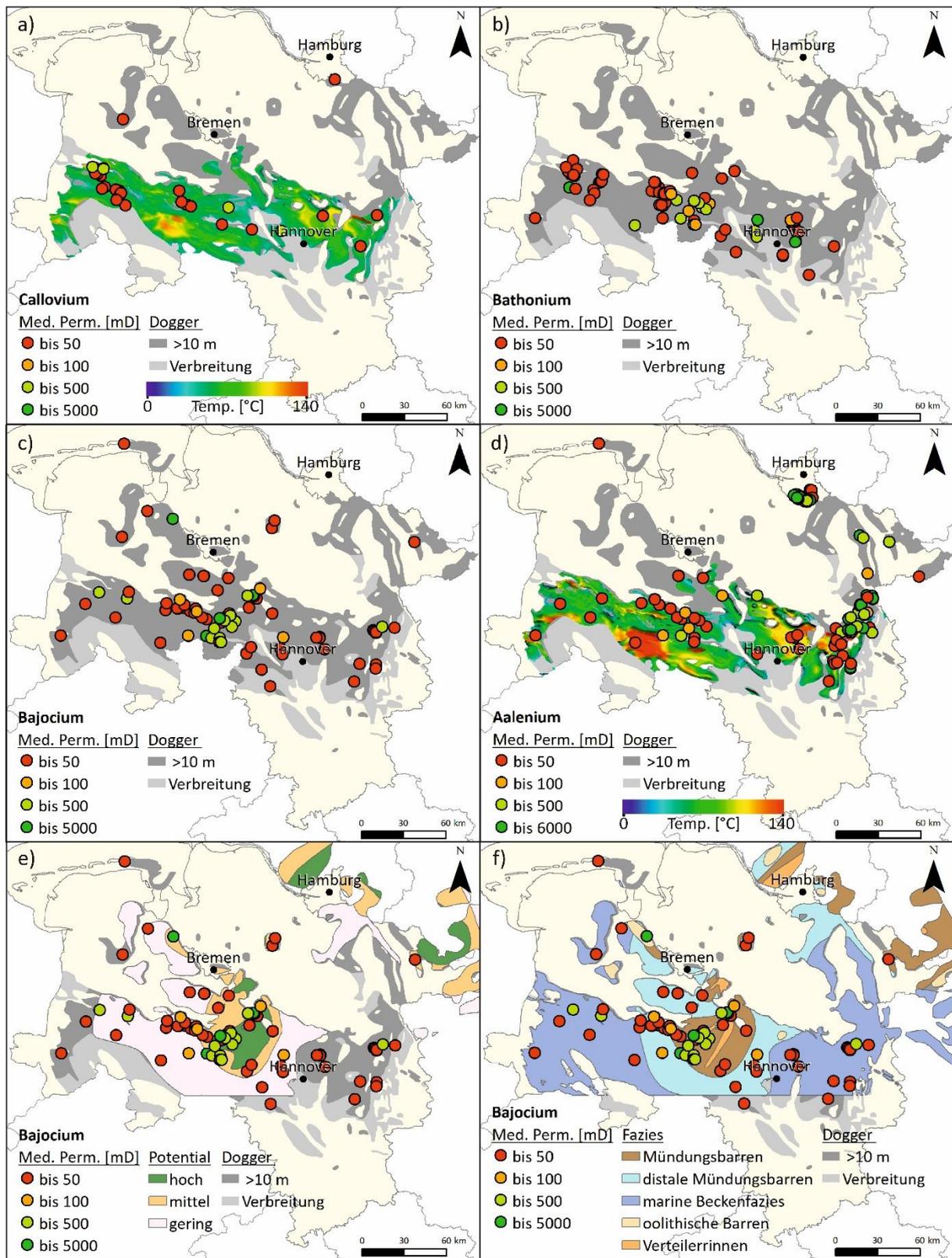
**Abb. 4.4:** Permeabilitätsverteilung des Bajocium ermittelt durch die Ordinary Kriging Methode. Die Varianzverteilung ist in der kleinen Abbildung oben rechts dargestellt.

#### 4.1.7 Ergebnisse Dogger

Betrachtet man die Median-Werte, finden sich die höchsten Porositäten in den Aalenium und Bajocium Formationen, gefolgt von den Sandsteinen des Callovium. Die schlechteste Porosität weisen die Bathonium Sedimente auf. Bei der Permeabilität zeigen die Aalenium Sandsteine mit Abstand die besten Werte. Die schlechtesten Werte finden sich wie bei der Porosität im Bathonium (Abb. 4.5).



**Abb. 4.5:** Boxplots mit Median und 5, bzw. 95 Perzentile der Porositäts- und Permeabilitätsdaten für Sandsteine der Dogger Formationen. Die Zahlen unter den Boxplots geben die Probenanzahl an.



**Abb. 4.6:** Räumliche Verbreitungskarten der Medianwerte der Permeabilität in den verschiedenen Dogger Formationen. Dargestellt sind sowohl die Daten aus Plug-Messungen als auch aus der Log-Interpretation. Die Dogger Verteilung ist aus KNOFF (2011). Dunkelgraue Bereiche zeigen Sandsteine mit einer Mächtigkeit von mindestens 10 m bei einer Topteufe von mehr als 800 m. Außerdem ist die Temperaturverteilung am Top (Callovium Formation) und an der Basis (Aalenium Formation) des Doggers dargestellt. Die beiden untersten Karten in der Abbildung zeigen zum einen das Reservoirpotential (links) und zum anderen die Faziesverteilung (rechts) aus FRANZ ET AL. (2015).

Insgesamt decken die Porositäts- und Permeabilitätswerte einen weiten Bereich ab, was von einem sehr guten bis zu einem sehr schlechten Speicherpotenzial reicht. Die Permeabilitätskarten zeigen räumliche Variationen in allen Formationen (Abb. 4.6).

In den Sandsteinen des Aalenium treten die höchsten Werte in einem von Ost nach Nordwesten verlaufenden Bogen von der Ostgrenze des Untersuchungsgebietes bis Hamburg und nordwestlich von Hannover in der Nähe der Stadt Nienburg im Zentrum Niedersachsens auf. Die Temperaturen erreichen meist ca. 70 °C, aber es gibt auch mehrere Regionen mit Temperaturen bis zu 140 °C. Die Permeabilitätsverteilung im Bajocium zeigt auch eine Region mit hohen Werten im Zentrum Niedersachsens, das sogar weitreichender und mit noch höheren Permeabilitätswerten als im Aalenium ist. Hinzu kommen einzelne Werte mit hohen Permeabilitäten, die räumlich stark streuen. Über die Temperatur im Bajocium liegen keine Ergebnisse vor, da nur für den Top und die Basis des Doggers Strukturmodelle und damit Kenntnisse über die exakte Tiefenlage vorhanden sind. Die Sedimente des Bathonium zeigen ebenso die besten Permeabilitätswerte im Zentrum Niedersachsens in einem west-ost verlaufenden Band von Nienburg nach Hannover. Temperaturen liegen nicht vor. Die Datengrundlage ist im Callovium am Kleinsten. Es existieren nur einzelne verstreute und isolierte hohe Permeabilitätswerte. Räumliche Trends können nicht erkannt werden. Die Temperaturen erreichen meist ca. 70 °C. Lokal können aber Temperaturen bis zu 140 °C vorkommen. Ein weiterer Ansatz zur Kartierung hydraulischer Eigenschaften basiert auf der Anwendung geostatistischer Methoden. Dazu wurde das Ordinary Kriging auf die Median Permeabilitätswerte des Bajocium angewandt. Für die Interpretation wurden nur Regionen mit einer normierten Krigingvarianz von bis zu eins berücksichtigt. Die Karte zeigt Regionen mit hoher Permeabilität im Zentrum und in den nordöstlichen Regionen Niedersachsens (Abb. 4.4). In den westlichen Teilen Niedersachsens kommen nur einzelne höhere Werte vor.

#### 4.1.8 Interpretation und Diskussion

Im Projektgebiet gibt es mehrere regionale positive Temperaturanomalien zwischen Lingen und Celle, die jedoch nicht auf aufsteigendes Tiefengrundwasser, sondern höchstwahrscheinlich auf unterschiedlich wärmeleitende Sedimente im niedersächsischen Becken zurückzuführen sind (AGEMAR ET AL. 2012). Diese Anomalien manifestieren sich lokal durch Temperaturen, die bis zu 30 °C höher sind als erwartet. Die Tiefe des Aquifers bleibt jedoch der wichtigste Steuerungsfaktor für die Temperatur.

Beim Vergleich der Permeabilitätsverteilung dieser Arbeit mit den Fazieskarten von FRANZ ET AL. (2015), zeigt sich, dass hohe Permeabilitätswerte vor allem in den Verteilerrinnen und in den Mündungsbarren zu erwarten sind (Abb. 4.6 f). Die hohen Permeabilitätswerte fallen ebenfalls in den Bereich mit hohem Reservoirpotential aus der Studie von FRANZ ET AL. (2015) (Abb. 4.6 e). Es kommen lediglich einige isolierte hohe Permeabilitätswerte im Westen und im Osten vor, die nicht faziesabhängig scheinen. Für diese kleinräumigen Regionen sind weitere detaillierte lokale Untersuchungen erforderlich.

Insgesamt zeigt die Krigingkarte die gleichen Merkmale wie die Fazieskarten, aber der räumliche Einfluss der Einzelwerte ist zu hoch. Der Kriging Algorithmus mittelt über räumliche Entfernungen unabhängig von geologischen Strukturen. Außerdem wurden verschiedene Arten von Datenqualität, wie zum Beispiel Permeabilität von Plug-Messungen vs. Permeabilität aus der Log-Interpretation, nicht berücksichtigt. Die Werte wurden nicht gewichtet. Für eine detailliertere Studie ist die Datenmenge zu gering. Diese Methode wurde daher nicht weiterverfolgt.

#### 4.1.9 Ergebnisse Unterkreide

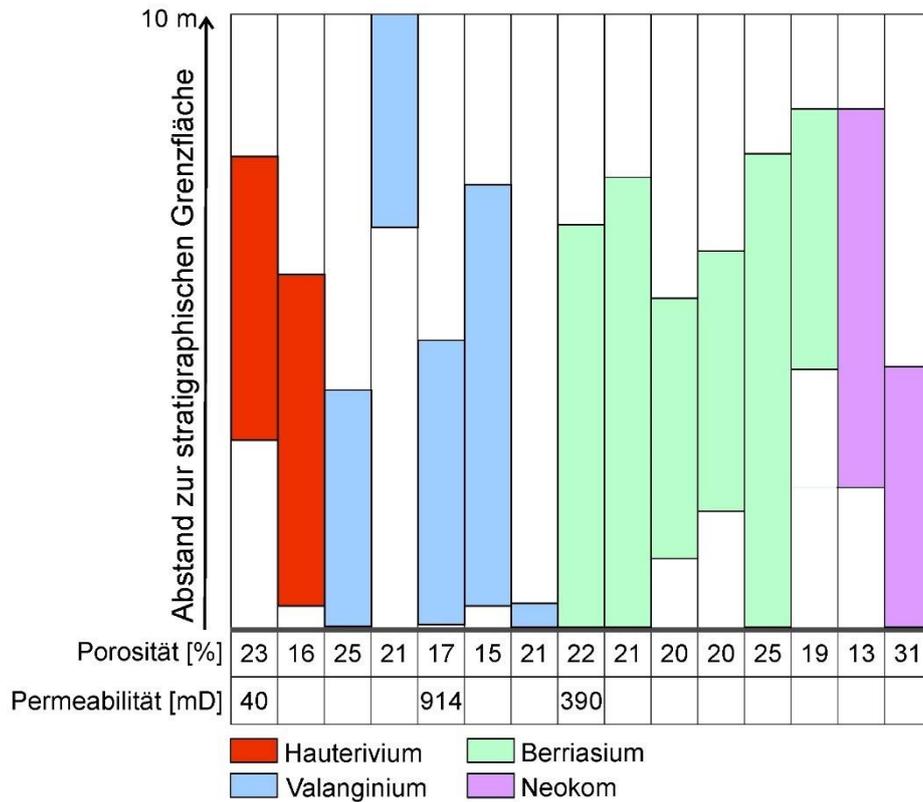
Meistens werden hydraulische Parameter in geologischen Bohrberichten für ein Intervall und nicht für eine bestimmte Tiefe angegeben. Um den Einfluss stratigraphischer Grenzen, wie Transgressions- oder Hiatusflächen, auf hydraulische Eigenschaften zu beurteilen, werden nur Daten mit einem Abstand von weniger als 10 m zu einer stratigraphischen Grenze und einer Intervalllänge von maximal 10 m betrachtet (Abb. 4.7).

An Transgressions- und Hiatusflächen zeigen die untersuchten geophysikalischen Logs nur Werte für die totale Porosität, die effektive Porosität ist gleich null oder kann nicht bestimmt werden. Eine Permeabilitätsabschätzung aus Logs ist daher nicht möglich. Aus Kernmessungen stehen nur einige wenige Daten zur Verfügung.

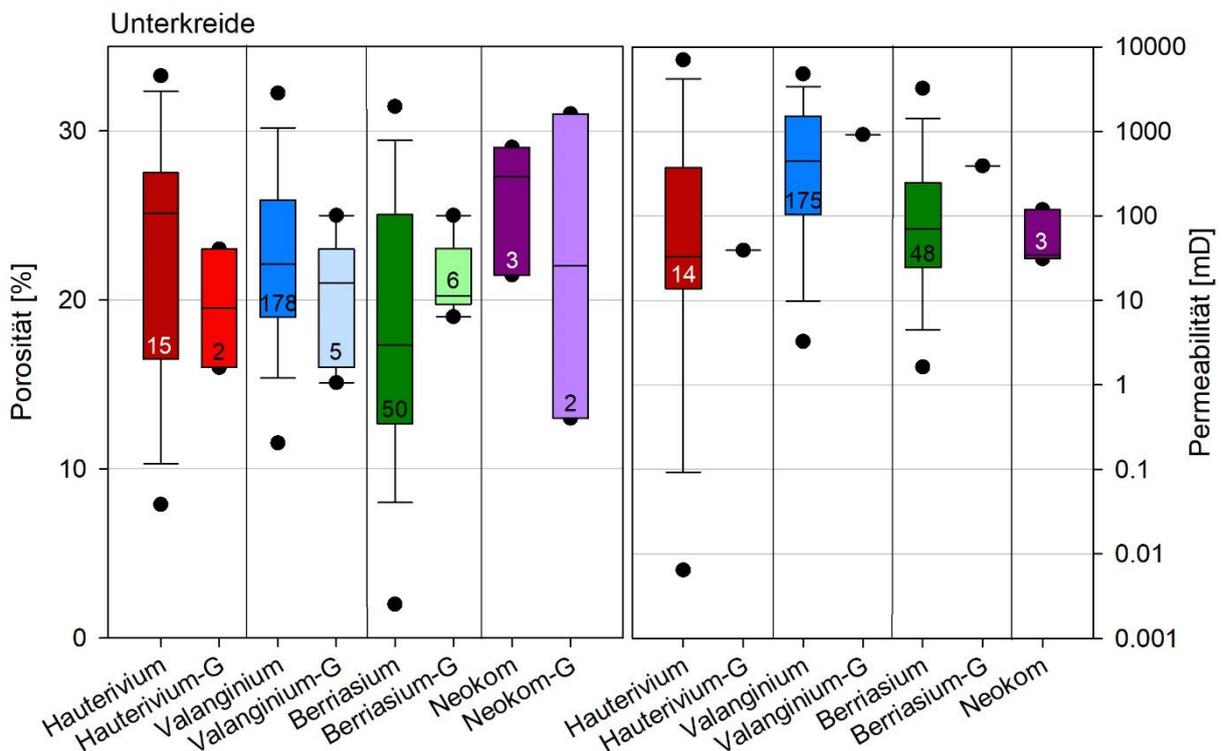
Die Porositätswerte, die alle in einem Abstand von 0,5 bis 10 m zur stratigraphischen Grenze gemessen wurden, liegen zwischen 13 % und 31 %. Höchste Medianwerte treten im Neokom auf, hierbei handelt es sich jedoch nur um zwei Datenpunkte mit einer sehr großen Spanne, gefolgt von Valanginium-, Berriasium- und Hauterivium-Werten mit einer viel kleineren Datenspanne (Abb. 4.8).

Die Verteilung der Permeabilitätsdaten ist die gleiche wie bei den Porositätsdaten, jedoch stehen nur drei Werte zur Verfügung. Der höchste Wert liegt im Valanginium, gefolgt vom Berriasium und der minimale Permeabilitätswert liegt im Hauterivium (Abb. 4.8).

Beim Vergleich der Mediane der Porositätswerte in der Nähe der Grenzfläche mit den Medianen für die gesamte Formation ist der Median in der Nähe der stratigraphischen Grenzfläche beim Hauterivium und Valanginium geringer und beim Berriasium höher. Die drei Permeabilitätswerte an Grenzflächen zeigen höhere Medianwerte als bei der Gesamtpermeabilität einer Formation (Abb. 4.8).



**Abb. 4.7:** Abstand der berücksichtigten Intervalle zur stratigraphischen Grenzfläche mit Porosität und Permeabilität.

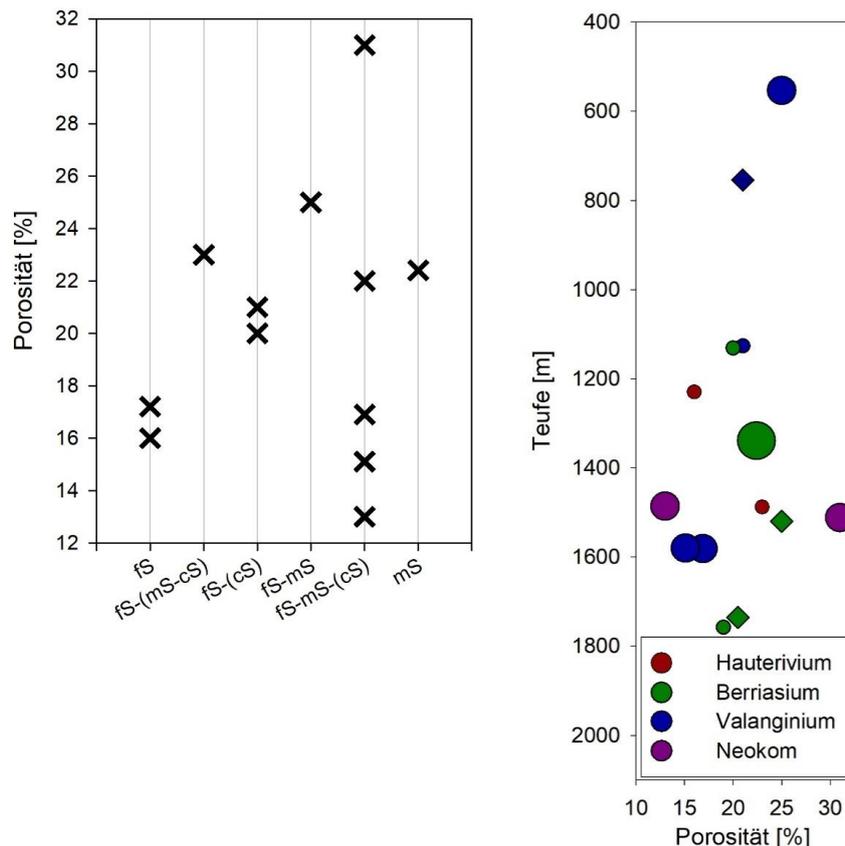


**Abb. 4.8:** Boxplots der Porosität und Permeabilität für Formationen der Unterkreide. Es werden Daten ohne (z.B. Hauterivium) und mit Nähe (z.B. Hauterivium-G) zur Grenzfläche verglichen. Das G hinter der Formation steht für Grenzfläche. Die Zahl in den Boxplots ist die Probenanzahl.

Mit zunehmender Tiefe ist eine leichte Abnahme der Porosität nur im Valanginium sichtbar (Abb. 4.9). Insgesamt sind die Sandsteine meist feinkörnig oder fein- bis mittelkörnig. Die Feinsandsteine weisen Porositäten zwischen 16 und 23 % auf, während die Porositätswerte bei gröbere Sandsteinen bis zu 31 % erreichen können. Eine klare Korrelation zwischen Porosität und Korngröße ist jedoch nicht erkennbar.

#### 4.1.10 Interpretation

Es könnte möglich sein, dass die untersuchten Transgressions- und Hiatusflächen einen abdichtenden Einfluss haben, da die effektive Porosität nicht aus geophysikalischen Logs abgeleitet werden kann. Die Medianwerte der Porosität, gemessen in einem Abstand von 0,5 bis 10 m zur stratigraphischen Grenzfläche, und die wenigen Permeabilitätswerte von Plugmessungen liegen jedoch im für die geothermische Nutzung geeigneten Bereich. Porositätswerte sind unabhängig von der Korngröße, nehmen aber mit der Tiefe leicht ab. Dies liegt vermutlich an Kompaktion und Versenkungstiefe während der Diagenese. Die Datenlage für die Permeabilität ist zu gering um sie interpretieren zu können, aber die Porositätswerte sind am höchsten in den Sandsteinintervallen des Valanginium und Berrasium in der Nähe zu stratigraphischen Grenzflächen.



**Abb. 4.9:** Links: Korngröße aus dem Schichtenverzeichnis gegen Porosität. fS = Feinsandstein, mS = Mittelsandstein, cS = Grobsandstein. Korngrößen in Klammern kommen untergeordnet vor. Rechts: Cross-Plot von Porosität gegen die Tiefe. Die Größe der Kreise spiegelt die Korngröße aus den Schichtenverzeichnissen wider. Rauten repräsentieren Datenpunkte ohne Korngrößenangabe.

Da die Grenzflächen selbst aber nicht beprobt wurden, ist nur die Annahme möglich, dass Transgressions- und Hiatusflächen einen abdichteten Charakter haben und dass dieser Effekt nicht weit in das umgebene Sediment reicht. Da der Einfluss von Grenzflächen auf die Porosität und Permeabilität mit den vorliegenden Daten nicht ausreichend untersucht werden kann, ist es nicht möglich die Rolle von Grenzflächen zur räumlichen Abschätzung der Gebirgsdurchlässigkeit zu nutzen

#### 4.1.11 Literatur

- AGEMAR, T., SCHELLSCHMIDT, R. & SCHULZ, R. (2012): Subsurface temperature distribution in Germany. *Geothermics* 44:65-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.07.002>.
- BETZ D., FÜHRER F., GREINER, G. & PLEIN, E. (1987): Evolution of the Lower Saxony Basin. *Tectonophysics* 137:127-170. DOI: 10.1016/0040-1951(87)90319-2.
- BRAND, E. & MÖNNING, E. (2009): Litho- und Biostratigraphie des Mittel-Jura (Dogger) in Bohrungen Norddeutschlands. *Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 54:5-77.
- BUCKLES, R.S. (1965): Correlating and Averaging ornate Water Saturation Data. 16th Annual Technical Meeting, P&NG Division, CIMM, Calgary, May, 1965.
- DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (2012): Stratigraphische Tabelle von Deutschland Kompakt 2012. Menning, G. & Hendrich, A. (Hrsg.), Potsdam.
- FELDRAPPE, H., OBST, K. & WOLFGGRAMM, M. (2008): Die mesozoischen Sandsteinaquifere des Norddeutschen Beckens und ihr Potential für die geothermische Nutzung. *Z. geol. Wiss.* 36:199-222.
- FRANZ, M., WOLFGGRAMM, M., BARTH, G., NOWAK, K., ZIMMERMANN, J., BUDACH, I. & THORWART, K. (2015): „Verbundprojekt: Identifikation hydraulisch geeigneter Bereiche innerhalb der mesozoischen Sandsteinaquifere in Norddeutschland“ - Schlussbericht -, Technische Universität Bergakademie Freiberg. pp. 333.
- KNOFF, S. (2011): Verbreitung und Charakterisierung von tiefliegenden Speicher- und Barrierehorizonten in Niedersachsen und Bremen, in: C. Müller and K. Reinhold (Eds.), *Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland - Speicher-Kataster Deutschland*, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Hannover. pp. 127-147.
- KUDER, J., BINOT, F., HÜBNER, W., ORILSKI, J., WONIK, T. & SCHULZ, R. (2014): Für die Geothermie wichtige hydraulische Parameter von Gesteinen des Valangin und der Bückeberg-Formation (Wealden) in Nordwestdeutschland. *Z. Dt. Ges. Geowiss.* 165:455-467.
- LARINOV, V. V. (1969): Radiometry of boreholes (in Russisch), NEDRA, Moscow
- MUTTERLOSE, J. (2000): Unterkreide im Niedersächsischen Becken, in: M. Hiss, et al. (Eds.), *Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland*, Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg, Frankfurt am Main. pp. 207.
- SCHLUMBERGER (1987): *Log Interpretation Principles/Applications* Schlumberger Educational Services, Houston, Texas.
- SCHULZ, R. & RÖHLING, H.-G. (2000): Geothermische Ressourcen in Nordwestdeutschland. *Z. Angew. Geol.* 46:122-129.

- TIMUR, A. (1968): An Investigation of Permeability, Porosity and Residual Water Saturation Relationships for Sandstone Reservoirs. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- TRUSHEIM, F. (1957): Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands. Z. Dtsch. Geol. Ges. 109:111-151.
- VOIGT, S., WAGREICH, M., SURLYK, F., WALASZCZYK, I., ULICNY, S., CECH, S., VOIGT, T., WIESE, F., WILMSEN, M., NIEBUHR, B., REICH, M., FUNK, H., MICHALIK, J., JAGT, J.W.M., FELDER, P.J. & SCHULP, A.S. (2008): Cretaceous, in: T. McCann (Hrsg.), The Geology of Central Europe - Volume 2: Mesozoic and Cenozoic, The Geological Society, London. pp. 923-998.
- ZIMMERMANN, J., FRANZ, M., SCHALLER, A. & WOLFGRAMM, M. (2018): The Toarcian–Bajocian deltaic system in the North German Basin: Subsurface mapping of ancient deltas-morphology, evolution and controls. *Sedimentology* 65:897-930. DOI: 10.1111/sed.12410.

## 4.2 Zusammenstellung und Evaluation hydraulischer Testdaten geringer Tiefen (Nordbayern)

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 (AGEMAR ET AL., 2012; BAUER, 2000). 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). 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).

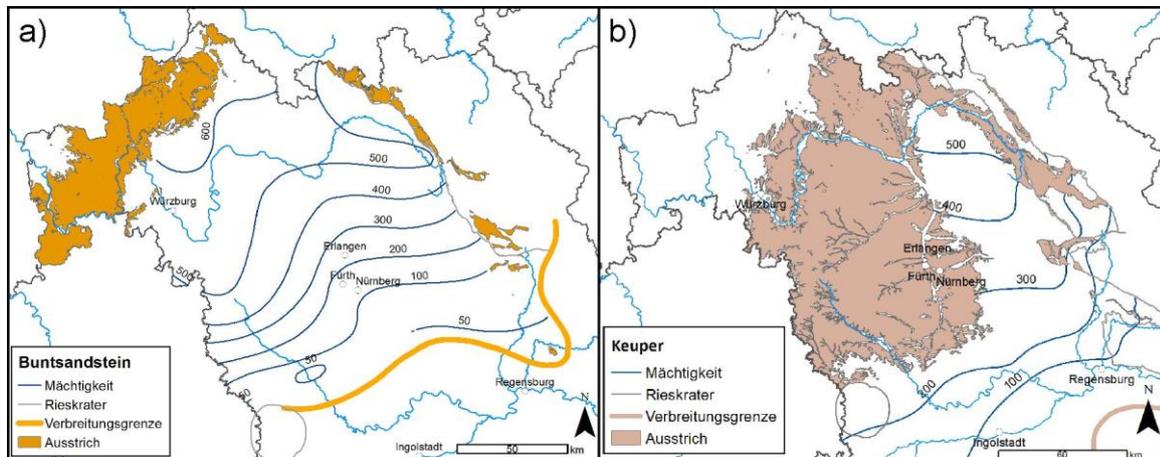
Im Untersuchungsgebiet wurden vorhandene hydraulische Daten in Form von Pump-tests und Förderdaten (z.B. Absenkung, spezifische Ergiebigkeit, Förderrate) mit dem Ziel zusammengetragen und interpretiert, die hydraulische Leitfähigkeit und Transmissivität der Aquifere zu erfassen und graphisch darzustellen.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

### 4.2.1 Geothermische Nutzungsmöglichkeiten in Nordost Bayern

Die Tiefenlage der beiden wichtigsten Festgesteinsaquifere in NO-Bayern macht sie als potentielle 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.

#### Aquifere im Fränkischen Becken



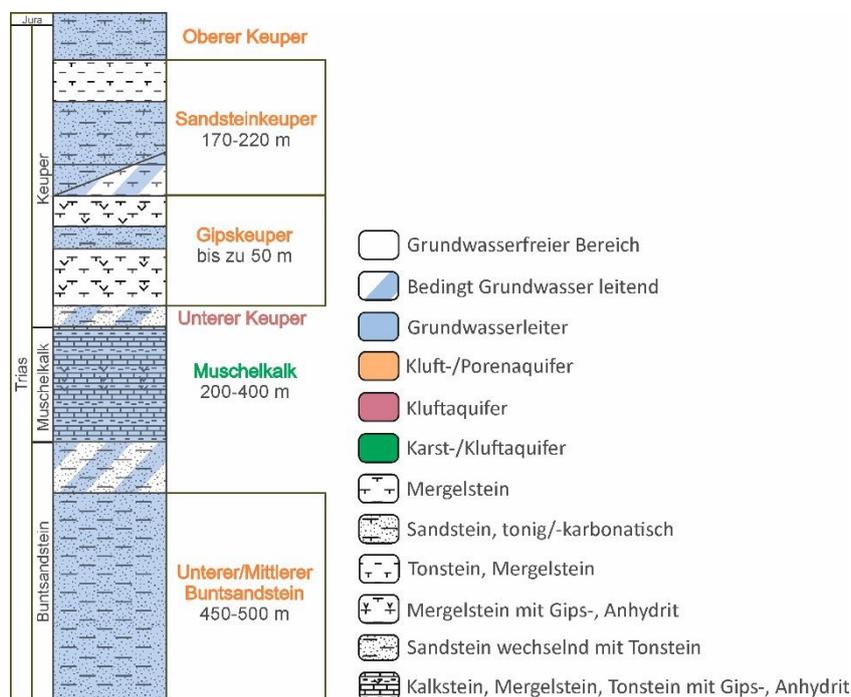
**Abb. 4.10:** Verbreitungs- und Mächtigkeitskarten des Buntsandsteins a) und Keupers b) in Nordbayern. Ausstrich in orange und braun. Südliche Verbreitungsgrenze als dicke orange und braune Linien. Karten modifiziert nach FRITZER ET AL. (2014) und Mächtigkeiten des Keupers aus HAUNSCHILD (2000).

Potentielle Aquifere im Fränkischen Becken bilden das Oberkarbon/Rotliegend, Zechstein, Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper und Dogger. Die beiden wichtigsten siliziklastischen Aquifere mit einem Potential für geothermische Nutzungen bilden aufgrund ihrer weiten räumlichen Verbreitung, ihrer Tiefenlage (Abb. 4.10), 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. 4.10). 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 stratigrafische Einteilung des Buntsandsteins erfolgt anhand lithologischer Kriterien nach den zyklisch wiederkehrenden Sedimentationsfolgen von grobklastischem Material über klastisch-pelitische Wechsellagerungen hin zu pelitischen Ablagerungen (LEPPER & RÖHLING, 1998). Der Untere Buntsandstein wird so in zwei (Calvörde, Bernburg), der Mittlere Buntsandstein in vier (Volpriehausen, Detfurth, Hardeggen, Solling) Formationen und der Obere Buntsandstein in eine Formation (Röt) untergliedert (FREUDENBERGER & 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 Geröllfächer am Beckenrand und tektonisch beanspruchte Bereiche gute Speichereigenschaften auf, während die feinkörnigen 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 (MÄRZ, 1977; UDLUFT, 1969). Im Oberen Buntsandstein kann der zwischen den Röttonen auftretende Rötquarzit 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 (FRITZER ET AL., 2014; MÄRZ, 1977). In der sandig ausgebildeten Randfazies bilden Mittlerer und Oberer Buntsandstein ein zusammenhängendes Grundwasserstockwerk (Abb. 4.11) (BAUER, 2000).



**Abb. 4.11:** Schematische Profilabfolge der hydrogeologischen Einheiten der Trias in Oberfranken mit mittleren Mächtigkeiten im Untersuchungsgebiet. Modifiziert nach KUS ET AL. (2007).

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 (BAUER, 2000; KLARE, 1989).

Der Ausstrich des Keupers verläuft bogenförmig aus dem Raum Stuttgart-Heilbronn über Mittelfranken nach Südthüringen (Abb. 4.10). Die Schichten tauchen von ihrem Ausstrichbereich nach SE unter der 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) (BAUER, 2000; FREUDENBERGER & SCHWERD, 1996). 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 & 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 & 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. 4.11). 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).

#### 4.2.2 Untersuchungsmethoden

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  $5E-5$  m<sup>2</sup>/s sein und die Durchlässigkeitsbeiwerte höher als  $1E-6$  m/s (STOBER ET AL., 2016).

Als Datengrundlage dienen 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 & 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 Durchlässig-

keitsbeiwerten 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 (ANDRES & GEORGOTAS, 1978; ANDRES & WIRTH, 1981; MÄRZ, 1977; NOSRAT-NEZAMI, 1975; RIETZLER, 1979; RIETZLER, 1984; UDLUFT & BAUER, 1997).

Häufig standen zur Beurteilung der Durchlässigkeit jedoch nur Leistungsdaten von Brunnen und Bohrungen, bzw. Protokolle von Leistungspumpversuchen zur Verfügung. Daher konnten in diesen Fällen lediglich Abschätzungen der Transmissivitäten und Durchlässigkeitsbeiwerte mit Hilfe der Brunnencharakteristika vorgenommen werden.

Transmissivität (T)

Ausgehend von den Methoden von THIEM (1906) hat LOGAN (1964) die spezifischen Ergiebigkeiten aus Brunnentests 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:

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

Mit

Q = Förderrate [ $m^3/s$ ] und s = Absenkung [m]

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

$$T = 1,22 \cdot C \quad (m^2/s) \quad (2)$$

Und für Aquifere mit freier Oberfläche zu:

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

Mit

C = spezifische Ergiebigkeit [ $m^2/s$ ], m = wassererfüllte Mächtigkeit [m] und Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert)

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

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

Leider ist die wassererfüllte Mächtigkeit nicht immer bekannt. Nach GRIMM & HOFBAUER (1967) gibt es auf Grundlage der allgemeinen Formel von THIEM (1870) die Gleichung:

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

Mit

H = Höhe ungesenkter Wasserstand, h = Höhe abgesenkter Wasserstand, R = Radius des Absenktrichters und r = Radius des Brunnens

Wobei  $(H-h)$  der Absenkung  $s$  entspricht. SICHARDT (1927) ermittelte  $k_f$ -Werte mittels eines statistischen Probierversfahrens 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:

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

Mit Hilfe des Verfahrens nach SICHARDT (1927) und seiner Annahme eines Filterradius von 30 cm lässt sich Gleichung (6) umformen zu:

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

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

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

Methode 1: Transmissivitäts- oder  $k_f$ -Wert aus Literatur übernommen.

Methode 2: Bei bekannter Mächtigkeit kann nach Gleichung (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 Gleichung (2) die Transmissivität berechnet. Der  $k_f$ -Wert wird aus Gleichung (7) anhand Förderrate, Absenkung und der Höhe des ungesenkten Wasserstandes (Ruhewasserspiegel) berechnet.

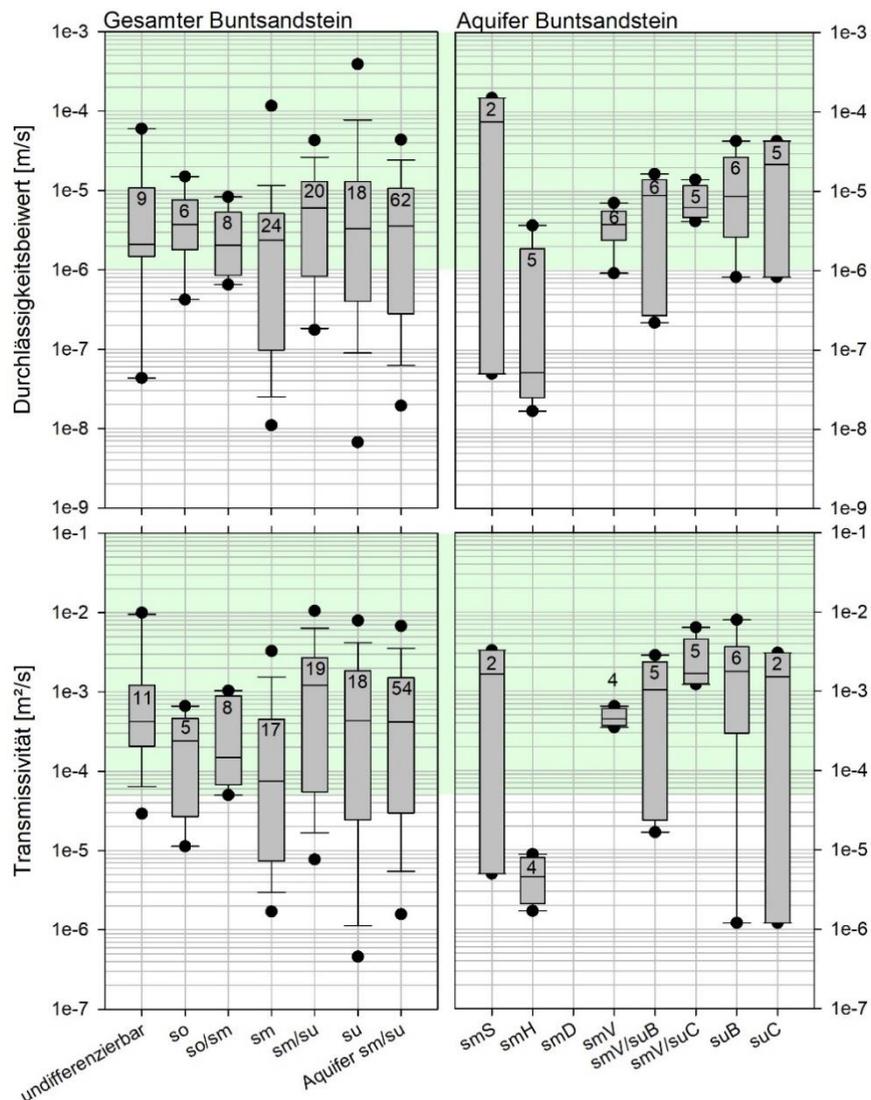
Methode 4: Die 4. Methode berechnet Transmissivität, bzw.  $k_f$ -Wert wiederum nach Gleichung (4). Hier sind die eingehenden Transmissivitäten bzw.  $k_f$ -Werte allerdings nach Methode 3 (Gleichung (2), bzw. Gleichung (7)) berechnet.

### 4.2.3 Ergebnisse

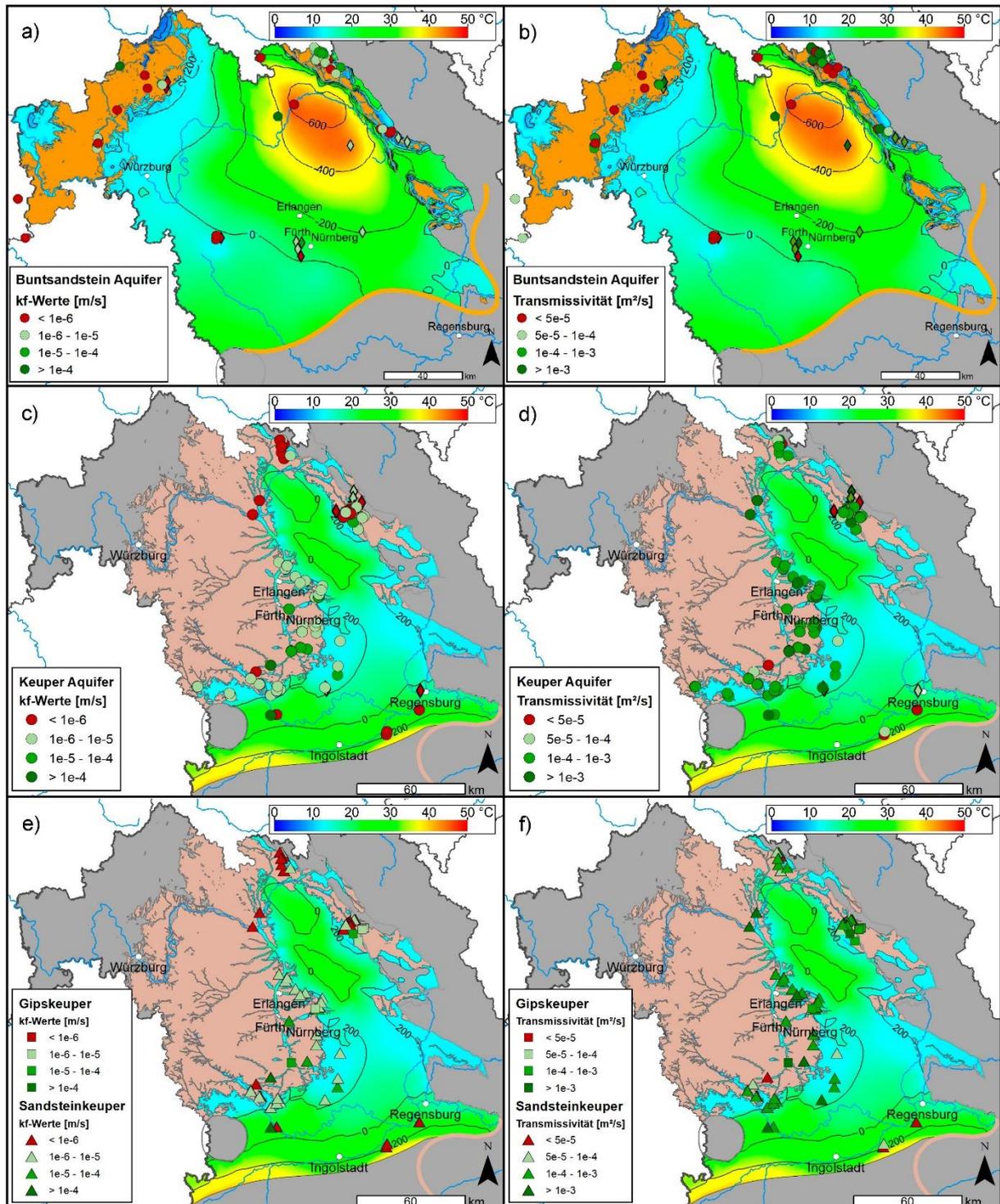
#### *Hydraulische Eigenschaften*

Rund 70 % aller Werte des gesamten Buntsandstein-Datensets sind nach der Definition von STÖBER ET AL. (2016) für eine geothermische Nutzung geeignet (Abb. 4.12). Die Medianwerte der Durchlässigkeitsbeiwerte und der Transmissivitätswerte liegen, bis in der 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 Mittlere Buntsandsteins (sm) weisen die größte Daten-spanne 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. 4.12). 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. 4.13). Für den deutlich tiefer versenkten Buntsandstein im Oberrheingraben wurden geringere Durchlässigkeiten ermittelt (STOBER & BUCHER, 2014). Allerdings steigt die Mächtigkeit des Buntsandsteins im Oberrheingraben bereichsweise auf über 500 m an.



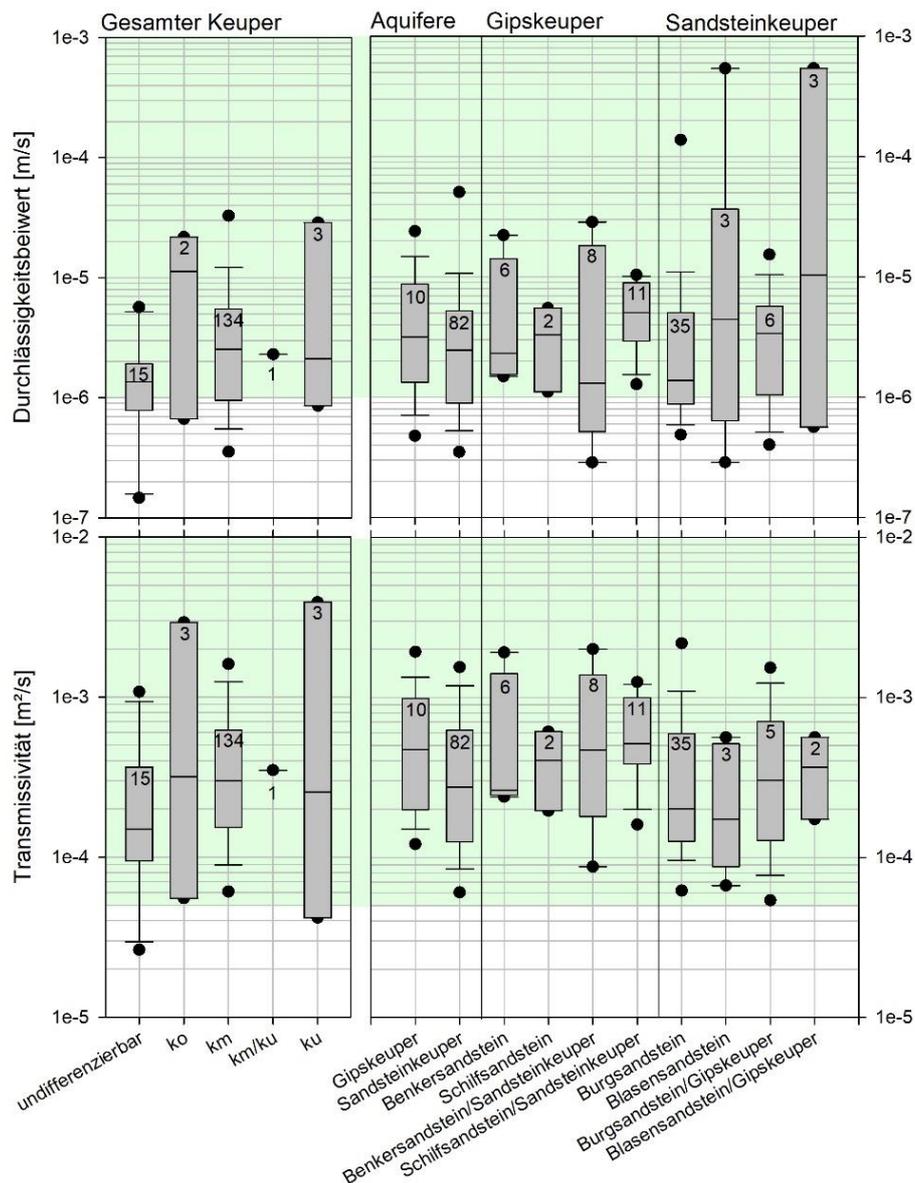
**Abb. 4.12:** Übersicht der hydraulischen Eigenschaften in Form von Box-Whisker Plots mit 5 und 95 Perzentile des Buntsandsteins. Die Linie im Boxplot zeigt den Median. Zahl im Boxplot = Anzahl der Werte. Für eine hydrothermale Nutzung geeignet sind alle Werte im grün hinterlegten Bereich. so = Oberer Buntsandstein, sm = Mittlerer Buntsandstein, su = Unterer Buntsandstein, smS = Solling Formation, smH = Hardeggen Formation, smD = Detfurth Formation, smV = Volpriehausen Formation, suC = Calvörde



**Abb. 4.13:** 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).

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. 4.13).

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. 4.14).



**Abb. 4.14:** 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.

Für die Aquifere im Unteren und Oberen Keuper (ko) sind nur wenige Daten vorhanden (Abb. 4.14). 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  $k_f$ -Wert bzw.  $4,7E-4$  m<sup>2</sup>/s bei der Transmissivität) höher als der Median im Sandsteinkeuper ( $2,5E-6$  m/s beim  $k_f$ -Wert bzw.  $2,8E-4$  m<sup>2</sup>/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. 4.14). Die beiden Aquifere Benkersandstein, ausschließlich am nordöstlichen Beckenrand, und Schilfsandstein liegen in Teufen bis zu 400 m 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 in Frage. Von den 82 Werten des Sandsteinkeupers können 38 Werte weiter stratigraphisch in die Aquifere Burgsandstein und Blasensandstein differenziert werden. Die vorliegenden Werte und die dazugehörigen Mediane unterscheiden sich kaum (Abb. 4.14).

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. 4.13). Die 35 % der ungeeigneten Durchlässigkeitsbeiwerte befinden sich im Norden des Untersuchungsgebietes und in größeren Teufen im Süden bei Ingolstadt und Regensburg (300 bis 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. 4.13).

#### *Temperaturverhältnisse im Buntsandstein und Keuper*

Insgesamt liegen in dem Untersuchungsgebiet für ca. 400 Lokalitäten Temperaturmessdaten mit unterschiedlicher Datenqualität vor. Die niedrigste Datenqualität (Messung ohne bekannte Stillstandszeit) wurde für die Prognose des Temperaturfelds 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 im Bereich des Fränkischen Beckens ein.

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. 4.13). Der Keuper liegt hier deutlich höher bei ca. 400 m Tiefe (TVD) und weist eine Temperatur von wahrscheinlich 25 °C auf. Die höchsten

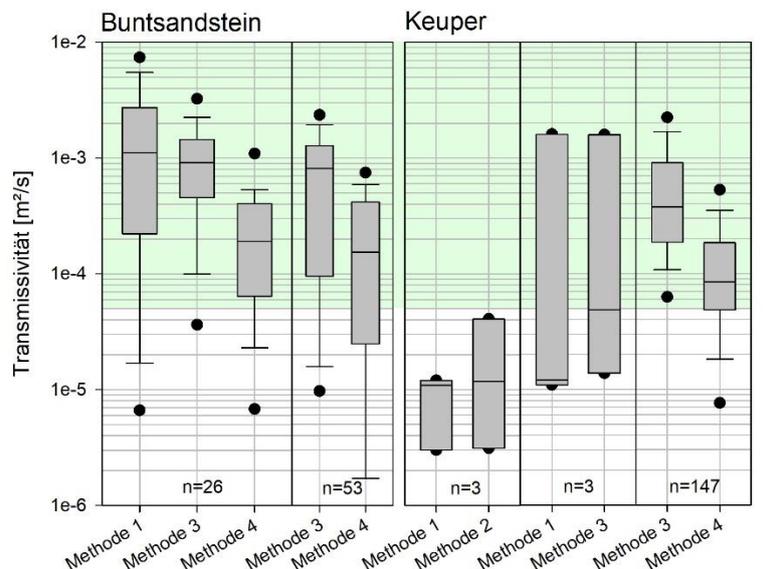
Keuper-Temperaturen sind mit ca. 40 °C am Südrand des Modellgebiets in ca. 800 m Tiefe (TVD) zu erwarten (Abb. 4.13).

### 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. 4.15). 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 STÖBER 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. 4.15). 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 gewählten Methode. Das Gleiche gilt für den Vergleich der Methoden 1 und 3.



**Abb. 4.15:** 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 Gleichung (4) aus Literatur- $k_f$ -Werten, Methode 3 = berechnet nach Gleichung (2), Methode 4 = Transmissivität berechnet nach Gleichung (4) aus selbst berechneten  $k_f$ -Werten nach Gl. (7).

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 Gleichung (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. 4.15).

Beim direkten Vergleich sind die Werte nach Methode 3 meistens deutlich höher als für die nach Methode 4 berechneten (Abb. 4.15). 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 Literatur 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.

#### 4.2.4 Fazit

Der Großteil der vorliegenden Werte liegt in Teufen bis zu 300 m, vereinzelt auch bis 650 m. Mit zunehmender Teufe nimmt das Potential für eine geothermale Nutzung meist ab. Insgesamt sind 76 % aller Transmissivitäts- und Durchlässigkeitsbeiwerte bei Temperaturen zwischen  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  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, 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  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  aufweisen, etwas weiter nördlich bei Erlangen etwa  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ . In den nordöstlichen und nordwestlichen Beckenrandgebieten sind es dagegen nur ca.  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

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.  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Diese fällt jedoch nach Südwesten hin auf ca.  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  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. Des Weiteren wird empfohlen, im Vorfeld eine thermisch-hydraulisch gekoppelte Modellierung durchzuführen und den Einfluss der Hydrochemie wegen der wechselnden Temperaturen (Einspeicherung, Entladung) zu berücksichtigen.

#### 4.2.5 Literatur

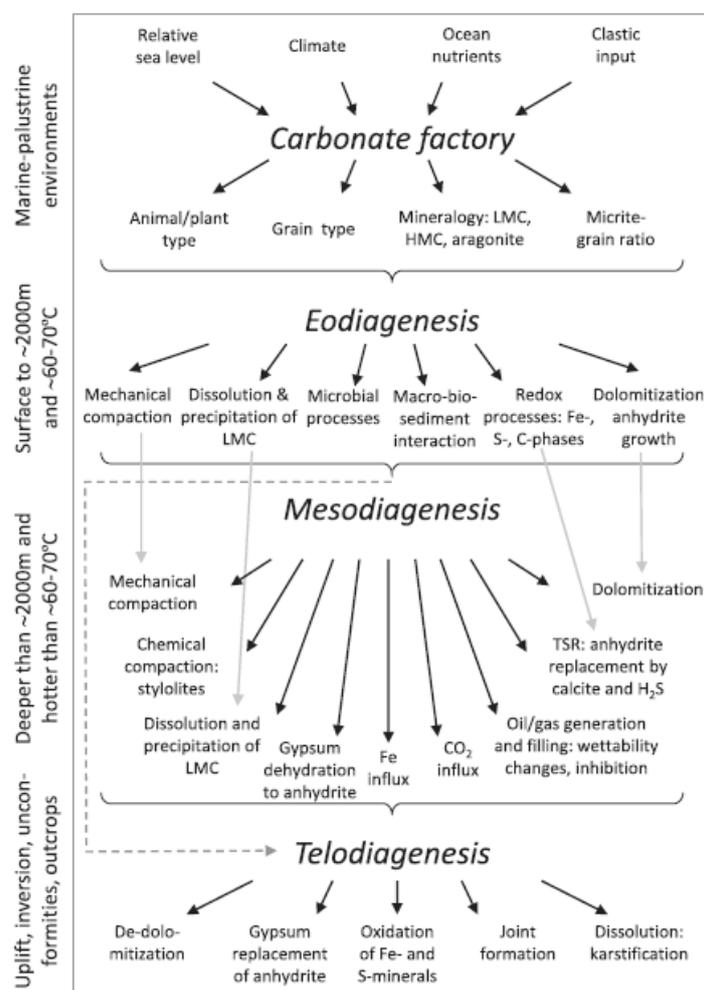
- AGEMAR, T., WEBER, J. & SCHULZ, R. (2014): Deep Geothermal Energy Production in Germany. *Energies* 7: 4397-4416.
- ANDRES, G. & GEORGOTAS, N. (1978): Das Mainprojekt. Schriftenr. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft H. 7:240-250.
- ANDRES, G. & WIRTH, H. (1981): Die Thermal- und Schwefelwasservorkommen von Bad Gögging. Schriftenr. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 15.
- BAUER, W. (2000): Geothermische Verhältnisse des Fränkischen Beckens (Nordbayern/Südthüringen) Lehr- und Forschungsbereich Hydrogeologie und Umwelt, Universität Würzburg, Würzburg.
- EMMERT, U. (1964): Keuper, Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000, Bayer. Geol. L.-Amt, München. 91-120.
- FREUDENBERGER, W. (2005): Der Keuper in Franken und der Oberpfalz (Bayern), in: G. Beutler (Ed.), *Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper*, Courier Forschungsinstitut Senckenberg, Frankfurt. 203-213.
- FREUDENBERGER, W. & SCHWERD, K. (1996): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500000, Bayerisches Geologisches Landesamt, München. 329 S.
- FRITZER, T., SETTLES, E. & DORSCH, K. (2014): Bayerischer Geothermieatlas, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, München. 96 S.
- GEOTIS (2019): Geothermisches Informationssystem GeotIS. Verfügbar online: <https://www.geotis.de>, Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Hannover.
- HAUNSCHILD, H. (1985): Der Keuper in der Forschungsbohrung Obernsees. *Geologica Bavarica* 88:103-130.
- HAUNSCHILD, H. (2000): Die Trias, in: GROISS, J. et al. (Eds.), *Das Ries und sein Vorland*, Borntraeger, Berlin. 18-54.
- KÄß, W. & KÄß, H. (2008): *Deutsches Bäderbuch*. 2. ed. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- KLARE, B. (1989): *Gliederung und Paläogeographie des Buntsandsteins im Ostteil der Süddeutschen Scholle*, Ruhr-Universität, Bochum. 150 S.
- KUNKEL, C., AGEMAR, T. & STOBER, I. (2019): Geothermisches Nutzungspotential der Buntsandstein- und Keuperaquifere im NO Bayerns mit Fokus auf tiefe Aquiferspeicher. – *Grundwasser*, Volume 24, Issue 4, 251–267.
- KUS, G., SIEBLITZ, S., WILFERTH, T., PUKOWIETZ, C., LISCHIED, G. & PAMER, R. (2007): *Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planungsregion 4 Oberfranken*

- West - Erläuterungen zur Hydrogeologischen Karte 1 : 100 000, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg. 224 S.
- LEPPER, J., RAMBOW, D. & RÖHLING, H.G. (2013): Lithostratigraphie des Buntsandstein in Deutschland, in: J. Lepper, et al. (Eds.), Stratigraphie von Deutschland XI - Buntsandstein, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Stuttgart. 69-149.
- LEPPER, J. & RÖHLING, H.G. (1998): Buntsandstein. Hallesches Jb. Geowiss. B6:27-34.
- LOGAN, J. (1964): Estimating Transmissibility from Routine Production Tests of Water Wells. *Groundwater* 2:35-37. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1964.tb01744.x>.
- MÄRZ, K. (1977): Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Buntsandstein und Muschelkalk Nordbayerns, *Hydrochem. und hydrogeol. Mitt.* 170 S.
- NOSRAT-NEZAMI, M. (1975): Hydrogeologische und Hydrochemische Untersuchungen im Großraum Bayreuth, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg. 87 S.
- RIETZLER, J. (1979): Zur Hydrogeologie des Raumes südöstlich von Nürnberg, LMU München, München. 195 S.
- RIETZLER, J. (1984): Unterirdische Erdgasspeicherung in der Aquifer-Struktur "Alte Bürg". *Erdöl und Kohle* 37:357-363.
- SICHARDT, W. (1927): Über Tiefsenkung des Grundwasserspiegels. *Bautechnik*: 683, 718, 730.
- STOBER, I. & BUCHER, K. (2014): Hydraulic and hydrochemical properties of deep sedimentary reservoirs of the Upper Rhine Graben, Europe. *Geofluids* 15:164-482. DOI: <https://doi.org/10.1111/gfl.12122>.
- STOBER, I., FRITZER, T., OBST, K., AGEMAR, T. & SCHULZ, R. (2016): Tiefe Geothermie - Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. 4. Aufl. ed. LIAG, Hannover.
- THIEM, A. (1870): Die Ergiebigkeit artesischer Bohrlöcher, Schachtbrunnen und Filtergalerien. *Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung* 14:450-467.
- THIEM, G. (1906): *Hydrogeologische Methoden* Gebhardt, Leipzig.
- UDLUFT, P. (1969): Hydrogeologie und Hydrochemie der Südrhön unter besonderer Berücksichtigung der Mineralquellen im Brückenauer Raum, *Allgemeine Wissenschaften*, TU München, München. 132 S.
- UDLUFT, P. & BAUER, W. (1997): Erkundungsbohrungen zur Erschließung von zusätzlichen Heil- und Mineralwasser in Bad Kissingen, Abschlussbericht Untersuchungsphase 1, Institut für Geologie, Universität Würzburg, Würzburg (unveröff. Bericht).
- WAGNER, B., KUS, G., KAINZMAIER, B., SPÖRLEIN, T., WILFERTH, T., VEIT, W., FRITSCH, P., WROBEL, M., LINDENTHAL, W., NEUMANN, J. & SPRENGER, W. (2009): Erläuterungen zur Hydrogeologischen Karte von Bayern 1:500000, Bayerisches Landesamt für Umwelt. 88 S.

## 5 Numerische Modellierung des Porenraums

### 5.1 Einführung

Gegenstand dieses Arbeitspakets sind Stofftransport und Lösungsvorgänge für Sandsteine mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung und Zementierung. Ziel ist es zu klären, über welche Zeiträume und unter welchen klimatischen Bedingungen eine signifikante und tiefreichende Porenraumerweiterung durch die Infiltration von Oberflächenwasser, die gegenüber den Mineralphasen in Sandsteinen untersättigt sind, stattfindet. Dies ist wichtig, da im Unterschied zu Karbonatgestein (Abb. 5.1)  $\text{SiO}_2$  ein deutlich langsames Lösungsverhalten zeigt. Die Ergebnisse sollten für eine Bewertung des geothermischen Potentials von Störungen und Diskordanzen im Norddeutschen Becken genutzt werden.



**Abb. 5.1:** Übersicht über mögliche Prozesse in der Diagenetik von Karbonaten (WORDEN ET AL., 2018).

Auf die Fallstricke bei der Qualitätsabschätzung weisen AJDUKIEWICZ & LANDER (2010) hin. Sie stellen fest, dass statistische Korrelationen, wie z. B. Diagramme der Porosität aufgetragen über die Tiefe, im Allgemeinen nicht geeignet sind die Qualität eines Reservoirs in Gebieten außerhalb der Datenerhebung genau vorherzusagen. Dies ist bedingt durch die Unterschiede der relativen Aussagekraft der kontrollierenden geologi-

schen Prozesse. TALYOR ET AL. (2010) zeigen, dass mit zunehmender Ablagerungstiefe Porositäts-Tiefe-Relationen, die mit petrologischen Daten aus flachen Schichten erstellt wurden, auseinanderbrechen und das Porositäts-Tiefe-Relationen aus flachen Schichten von unterschiedlichen Becken stark variieren.

Zusätzlich haben für AJDUKIEWICZ & LANDER (2010) die meisten aktuellen First-Principle geochemischen Reaktionsmodelle nur begrenzte Vorhersagekapazitäten, weil sie auf im Labor abgeleiteten kinetischen Reaktionsparametern beruhen und nicht die Änderungen in der Gesteinstextur und der Reaktionsoberfläche der Porensysteme während der diagenetischen Alteration berücksichtigen. Auf die diagenetischen Veränderungen durch chemische Reaktionen und die Auswirkungen auf die Porosität im Gestein gehen u. a. GILES (1987), GILES & DE BOER (1990) und MORAD ET AL. (2000) ein.

Für tiefreichende Lösungsvorgänge in Sandsteinen, also der Porositätserhöhung durch mesogenetische Auflösung stellt TALYOR ET AL. (2010) fest, dass dies in den meisten Fällen nur einen relativ geringen Anteil an der Gesamtporosität darstellt. EHRENBURG ET AL. (2012) empfehlen die Annahme, dass mesogenetische Auflösung die sekundäre Porosität erhöht, nicht in der Vorhersage der Reservoirqualität von Karbonaten zu verwenden. Um diese Problematiken aufzulösen, folgt für die Vorgehensweise, dass eine allgemeine Methode entwickelt werden muss, mit der Modelle zum reaktiven Stofftransport von repräsentativen Fluiden auf geothermisch nutzbare Reservoirgesteine gerechnet werden können.

Das bedeutet, dass nur die einzugebenden Parameter die zu berechnende geologische Situation repräsentieren. Beginnend mit der kleinstmöglichen Skala des Porenraumes müssen Parametersätze, die der geologischen Situation angemessen sind, für das System Fluid/Gesteinsmatrix zusammengestellt und das Geschehen in einem kleinen Volumen durchgerechnet werden. Durch die Variation dieser Parameter können dann iterativ größere Volumina aufgebaut und ihre Parameterverteilungen berechnet werden, bis das repräsentative Elementarvolumen erreicht wird. Damit wird der Anschluss der für Reservoirmodelle benötigten Parameter an die mikroskopische Ebene hergestellt und die von AJDUKIEWICZ & LANDER (2010) angesprochenen Fallstricke umgangen.

In Folgenden werden die notwendigen Methoden vorgestellt mit denen solche Berechnungen durchgeführt werden können.

## **5.2 Methodenauswahl**

Nach KRÜGER ET AL. (2017) liegt der größte Vorteil der Lattice-Boltzmann Methode darin, dass sie auf der Boltzmann-Gleichung basiert und nicht auf den Gleichungen der Fluidmechanik. In den konventionellen Methoden der Fluidmechanik beruht der größte Anteil an der Komplexität der Lösung in der nicht lokalen Bestimmung von abgeleiteten Näherungslösungen in den benachbarten Knotenpunkten der numerischen Gesteinsmatrix. Im Gegensatz dazu liegt der Schwerpunkt der Lattice-Boltzmann Methode auf der Beschreibung der Partikel auf den jeweilig betrachteten Gitterknoten. Interaktionen zwischen den Knoten sind gänzlich linear, während der nicht lineare Teil der Methode der lokale Kollisionsprozess der Partikel auf den Knoten ist.

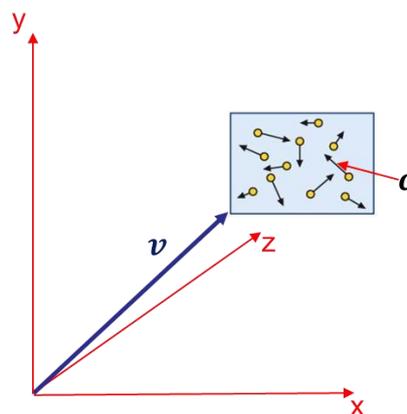
Ein weiterer Vorteil der Methode ist die Möglichkeit, während des lokalen Kollisionsprozesses die chemische Reaktion zwischen Fluidpartikel und Gestein zu behandeln. Dieser Prozess könnte zum Beispiel an den chemischen Solver PHREEQC (APPELO ET AL. (2005)) ausgelagert werden.

### 5.3 Lattice Boltzmann Methode

Die Lattice Boltzmann Methode, siehe z. B. HÄNEL (2004), KRÜGER ET AL. (2017), SUCCI (2001) oder SUKOP (2007), wurde aus der molekularen Gasdynamik entwickelt und wird im Folgenden kurz skizziert. Die Methode wird in unterschiedlichen Einsatzgebieten häufig eingesetzt, da sie aber relativ jung ist, existieren bisher nur einige Programm libraries zur Unterstützung der Programmierung der Methode. Viele von den freien Libraries sind universitäre Entwicklungen, die unter mangelnder Kontinuität und Dokumentation leiden.

In der molekularen Gasdynamik wird, stark vereinfacht, die Bewegung einzelner Partikel beobachtet. Die sogenannte Knudsen-Zahl  $Kn$  gibt das Verhältnis der mittleren freien Weglänge  $l_f$  der betrachteten Partikel und der charakteristischen Länge  $L$  des betrachteten Raumes an. Die mittlere freie Weglänge  $l_f$  ist die Flugstrecke eines Partikels zwischen zwei Stößen. Das bedeutet, wenn der betrachtete Raum voller sich bewegender Partikel ist, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die Flugstrecke eines Partikels zwischen zwei Stößen klein ist. Also ist die Knudsen-Zahl  $Kn$  niedrig.

Als Beispiel könnte man ein Fluid in einem Rohr nehmen. Nach entfernen fast aller Partikel des Fluides ist die Wahrscheinlichkeit, dass die verbleibenden Partikel mit einander kollidieren kleiner und dies bedeutet, dass  $l_f$  wesentlich größer ist und damit auch die Knudsen-Zahl. Dieses Beispiel zeigt auf, dass ein Fluid mit Methoden der molekularen Gasdynamik beschrieben werden kann, unter der Annahme, dass ein Fluid aus Partikel besteht, aber nur nicht aus wenigen wie in der Gasdynamik, sondern aus vielen.



**Abb. 5.2:** Absolutgeschwindigkeit ( $\xi$ ) der Moleküle  $\xi = v + c$ .  $v$  = Schwerpunkts- bzw. Strömungsgeschwindigkeit,  $c$  = relative bzw. thermische Geschwindigkeit.

Um den Ort und die Geschwindigkeiten der Partikel zu beschreiben, unterteilt man den betrachteten Raum in unendliche viele kleine sogenannte Phasenräume. In diesen Boxen sind Partikel mit fast gleichen Orten und Geschwindigkeiten. Um die Partikel zu

beschreiben, wird nur eine Bilanz der Partikel erstellt, die den Phasenraum verlassen. Vergleichbar mit einem Eisenbahnabteil, welches sich mit Zuggeschwindigkeit, der Schwerpunktsgeschwindigkeit, fortbewegt und mit Fahrgästen, die sich im Abteil bewegen, mit einer relativen Geschwindigkeit.

Die Absolutgeschwindigkeit der Fahrgäste, betrachtet von außerhalb des Zuges, ergibt sich aus der Summe von Schwerpunkt- und Relativgeschwindigkeit. Übertragen auf ein Fluid wären dies die Strömungsgeschwindigkeit und die thermische Geschwindigkeit der Partikel. Mit der Bilanzgleichung werden nur die Fahrgäste gezählt, die das Abteil verlassen oder neu hinzukommen. Wenn die Partikel oder die Fahrgäste immer den gleichen Ort und die gleiche Geschwindigkeit zueinander haben, dann passiert eigentlich nichts. Das bedeutet, dass Partikel nur wegen einer Kollision den Phasenraum verlassen. Mit diesem Argument wird die folgende Bilanzgleichung aufgestellt:

$$\frac{df}{dt} |_{Transport} = \frac{df}{dt} |_{Kollision}$$

$f$  ist dabei die Verteilungsfunktion der Moleküle/Partikel. Die Transportgleichung besteht aus folgenden Bestandteilen: Der zeitlichen Änderung der Anzahl der Moleküle im Phasenraum  $\Delta N_t$ , der räumlichen Änderung der Anzahl  $\Delta N_r$  und der Änderung der Anzahl der Moleküle mit der Geschwindigkeit  $\xi$ . Die Bilanzgleichung kann wie folgt formuliert werden:

$$\left( \frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \xi_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \sum_{i=1}^3 \frac{F_i}{m} \frac{\partial f}{\partial \xi_i} \right) \cdot \Delta \xi \cdot \Delta V \cdot \Delta t = \frac{df}{dt} |_{Kollision}$$

Wobei der Phasenraum durch  $\Delta \xi \Delta V$  aufgespannt wird und  $\Delta t$  die entsprechende Durchflugzeit ist. Der Kollisionsterm kann in zwei weitere Terme aufgeteilt werden: dem Verlustanteil und dem Gewinnanteil. Der Erste zählt die Moleküle die nach einer Kollision aus dem Phasenraum fliegen und der Zweite die in den Phasenraum fliegen. Die Subtraktion des Verlust- und Gewinnanteils ergibt die resultierende Verteilungsfunktion der Partikel gemäß:

$$\left( \frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \xi_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \sum_{i=1}^3 \frac{F_i}{m} \frac{\partial f}{\partial \xi_i} \right) = \iint_{\xi_i A_c} f' \cdot f'_1 - f \cdot f_1 \cdot \mathbf{g} \cdot dA_c \cdot d\xi_1$$

Diese Bilanzgleichung ist eine Form der Boltzmann-Gleichung, mit den Verteilungsfunktionen  $f, f'$  der Moleküle aus dem Phasenraum vor und nach dem Stoß, der Verteilungsfunktionen  $f_1, f'_1$  der Moleküle aus dem kollidierenden Phasenraum vor und nach dem Stoß, der Relativgeschwindigkeit  $\mathbf{g} = \xi_1 - \xi$  zwischen den Molekülen aus den beiden kollidierenden Phasenräumen, der Kraft  $F_i$  und dem differentiellen Wirkungsquerschnitt  $dA_c$ .

### BGK-Modell

Um für das komplexe Doppelintegral der Kollision eine Lösung zu finden, schlugen BHATNAGAR ET AL. (1954) das BGK-Modell vor. Ausgehend von der Grundannahme, dass jede beliebige Nichtgleichgewichtsverteilung ( $f$ ) nach einer gewissen Zeit und ei-

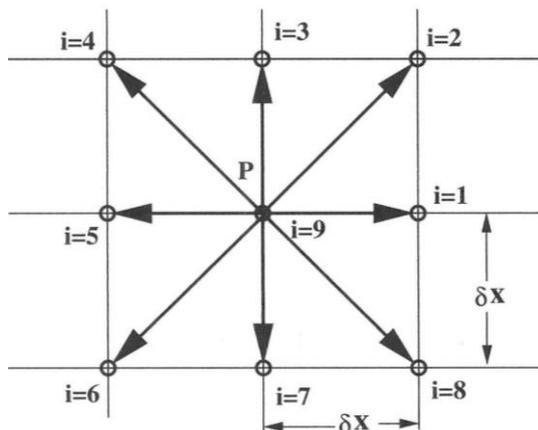
ner Anzahl von intermolekularen Stößen in eine Gleichgewichtsverteilung ( $F$ ) übergeht. Auf der rechten Seite der folgenden Formel wird die Relaxation einer Verteilungsfunktion ( $f$ ) mittels  $\Omega$  zur Maxwell-Verteilung beschrieben:

$$\left( \frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \xi_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \sum_{i=1}^3 \frac{F_i}{m} \frac{\partial f}{\partial \xi_i} \right) = \omega \cdot (F - f)$$

$\omega$  wird Kollisionsfrequenz, Kollisionsfaktor oder auch Relaxationsparameter genannt. Der Kollisionsterm  $\omega \cdot (F - f)$  des BGK-Modells beschreibt die Relaxation einer beliebigen Nichtgleichgewichtsverteilung gegen eine Maxwell-Verteilung. Die weitere Entwicklung des Terms unterliegt den betrachteten Randbedingungen. Eine Übersicht über die Vielfalt der entwickelten Lösungsansätze gibt u. a. KRÜGER ET AL. (2017).

### Lattice

Für die numerische Berechnung der Partikelverteilungen wird angenommen, dass die Bewegungen der Partikel nur auf Gitterbahnen erfolgen können. Für einen zweidimensionalen Fall könnte man das D2Q9 Modell wählen. D2 steht für zweidimensional und Q9 für 9 Geschwindigkeiten im Phasenraum (Abb. 5.3).



**Abb. 5.3 :** 2D Lattice Boltzmann Modell mit 9 Geschwindigkeiten: D2Q9.

Die Geschwindigkeiten  $\xi_i$  der Partikelverteilungen werden so gewählt, dass sie von P den nächsten Punkt/Knoten in dem Zeitschritt  $\delta t$  erreichen. Die Gitterabstände sind gleich der mittleren freien Weglänge  $\delta x = l_f$  und mit  $\xi_0 = |\xi_1|$  folgt  $\delta x = \xi_0 \delta t$ . Durch die Wahl des Gitterabstandes  $\delta x = l_f$  erfolgen die Kollisionen auf den Gitterknoten, d. h. die Berechnung zerfällt in einen Transport und einen Kollisionsschritt entsprechend der oben entwickelten Boltzmann-Gleichung.

Die Geschwindigkeiten im Phasenraum des D2Q9 Modells können mit Hilfe von  $\xi_1$  und  $\xi_2$  folgendermaßen ausgedrückt werden (Tab. 5.1).

**Tab. 5.1:** Geschwindigkeiten im Phasenraum (HÄNEL 2004).

$\xi_i$	$\xi_1/\xi_0$	$\xi_3/\xi_0$	$(\xi_1^2 + \xi_3^2)/\xi_0^2$
1	1	0	1
2	1	1	2
3	0	1	1
4	-1	1	2
5	-1	0	1
6	-1	-1	2
7	0	-1	1
8	1	-1	2
9	0	0	0

Als nächstes muss beantwortet werden, wie viele Partikel oder Anteile der Partikelverteilungsfunktion in welche Richtung fliegen. Dies kann mit der Diskretisierung der Gleichgewichtsverteilung  $f_i^{eq}$  (Maxwell-Verteilung) mit den Machzahlansatz beantwortet werden (HÄNEL, 2004):

Die Maxwell-Verteilung kann wie folgt geschrieben werden:

$$F(x_a, t, \xi_a) = \frac{m \cdot n}{(2\pi RT)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{(\xi_a - v_a)^2}{2RT}\right)$$

mit der Molekülmasse  $m$ , der Anzahl der Moleküle  $n$ , der Gaskonstante  $R$ , der Temperatur  $T$ , der Dichte  $\rho = m \cdot n$ , der Strömungsgeschwindigkeit  $v_{a=1,2,3}$  bezogen auf die drei Raumachsen und der molekularen Geschwindigkeit im Absolutsystem  $\xi_a$ . Die Gleichgewichtsfunktion kann mit der mittleren Molekülgeschwindigkeit  $c_s = \sqrt{RT}$  (thermodynamisch hat es die Bedeutung einer isothermischen Schallgeschwindigkeit) und dem Faktor  $A' = c_s^{-3}(2\pi)^{-3/2}$  in folgender Form geschrieben werden:

$$f^{eq}(x_a, t, \xi_a) = \rho A'(T) \cdot \exp\left(-\frac{(\xi_a - v_a)^2}{2c_s^2}\right)$$

Mit den Machzahlansatz, d. h. die Strömungsgeschwindigkeit ist sehr viel kleiner als die Schallgeschwindigkeit:  $m = |v_a|/c_s \ll 1$  und einer Taylorreihenentwicklung der Exponentialfunktion folgt für die obige Gleichung:

$$f^{eq}(x_a, t, \xi_a) = \rho t_p \cdot \left[ 1 + \frac{v_a \xi_a}{c_s^2} + \frac{v_a v_\beta}{2c_s^2} \left( \frac{\xi_a \xi_{a\beta}}{c_s^2} - \delta_{a\beta} \right) \right]$$

mit den Raumrichtungen  $a = 1,2,3$ ,  $\beta = 1,2,3$ , dem Kroneckersymbol  $\delta_{a\beta} = 1$  für  $a = \beta$

und den Wichtungskoeffizient  $t_p = A' \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{\xi_a^2}{c_s^2}\right)$ . Für den Wichtungskoeffizienten  $t_p$ , das  $p = 1,2,3$  kennzeichnet die drei Raumrichtungen und  $p = 0$  zeigt auf den Punkt P, ergeben sich für die Modelle D1Q3, D2Q9 und D3Q15 die in Tab. 5.2 gelisteten Werte.

**Tab 5.2.:** Wirkungskoeffizienten  $t_p$  (HÄNEL 2004)

	$p = \xi_a^2 / \xi_0^2$	$c_s^2 / \xi_0^2$	$t_0$	$t_1$	$t_2$	$t_3$
D1Q3	0,1	1/3	2/3	1/6		
D2Q9	0,1,2	1/3	4/9	1/6	1/36	
D3Q15	0,1,3	1/3	2/9	1/6		1/72

KRÜGER ET AL. (2017) leiten den Wichtungskoeffizienten unter Einsatz von Hermite-Polynomen her. Zudem muss die Gleichgewichtsfunktion die Momente der Stoßinvarianten für Masse, Impuls und Energie erfüllen. Die diskreten Momente werden über die Summation aller Raumrichtungen berechnet. Für das Model D2Q9 ergeben sich zum Beispiel folgende Gleichungen:

$$\text{Masse} \quad \rho(r, t) = \sum_{i=1}^{i=9} f_i(r, t) = \sum_{i=1}^{i=9} f_i^{eq}(r, t)$$

$$\text{Impuls} \quad \rho v_a(r, t) = \sum_{i=1}^{i=9} \xi_{i,a} f_i(r, t) = \sum_{i=1}^{i=9} \xi_{i,a} f_i^{eq}(r, t)$$

$$\text{Energie} \quad \rho E(r, t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=9} \xi_{i,a}^2 f_i(r, t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=9} \xi_{i,a}^2 f_i^{eq}(r, t)$$

Die Lattice-Boltzmann Methode muss auch die Bedingungen der Massenerhaltung, der Impulserhaltung und der Energieerhaltung entsprechend den Gleichungen im Kontinuum erfüllen.

#### 5.4 BGK-Modell mit Chemie

PATEL ET AL. (2014) zeigen eine Möglichkeit der Koppelung eines BGK-Modells ( $\Omega^{BGK}(\vec{r}, t)$ ) mit chemischen Reaktionen im Porenraum auf:

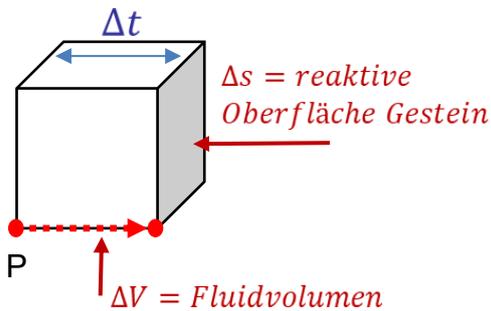
$$\left( \frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \xi_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \sum_{i=1}^3 \frac{F_i}{m} \frac{\partial f}{\partial \xi_i} \right) = \omega \cdot (F - f) = \Omega^{BGK}(\vec{r}, t) + \Omega^{rxn}(\vec{r}, t)$$

Der Kollisions-Reaktions-Term  $\Omega^{rxn}(\vec{r}, t)$  beinhaltet die Reaktionen ( $R$ ) aller chemischen Spezies ( $j$ ) an den Fluid-Festkörper Interfaces (*surf*) und im Fluid (*fluid*). Der Term  $\Omega^{rxn}(\vec{r}, t)$  (DAWSON ET AL., 1993) berechnet sich aus:

$$\Omega^{rxn}(\vec{r}, t) = \Delta t \cdot w_i \cdot (R_{fluid}^j + R_{surf}^j)$$

mit dem diskreten Zeitschritt  $\Delta t$ , die der Zeit entspricht die ein Partikelverteilung benötigt, um ohne Kollision von einem Knoten zum anderen zu gelangen und dem Wichtungsfaktor  $w_i$  entsprechend dem gewählten Modell DxQy. Diese Reaktionsberechnungen können an PHREEQC übergeben werden, wobei u. a. die Reaktionsfläche, die Reaktionszeit im Verhältnis zur Diffusionszeit und die Lösungs-Fällungsbedingung berücksichtigt werden muss.

Zur Bestimmung des Verhältnisses der Reaktionsfläche zum Volumen wird ein Quader eines 3D Lattice Boltzmannmodells mit der Achsenlänge eines Knotenabstandes  $\Delta x$  betrachtet:



**Abb. 5.4:** Reaktionsfläche

Die reaktive Oberfläche  $\Delta s$  der Gesteinspore steht im Verhältnis  $\frac{1}{\Delta x}$  zum Fluidvolumens  $\Delta V$  welches in einem Zeitschritt  $\Delta t$  wirken kann:

$$\frac{1}{\Delta x} = \frac{\Delta s}{\Delta V}$$

## 5.5 Chemische Gleichgewichts- und Diffusionszeit

In der Lattice-Boltzmann Methode werden die Kollisionsberechnungen immer auf den Knoten durchgeführt. Im Transportschritt werden die Partikelverteilungen ohne Wechselwirkung auf den nächsten Knoten geschoben. Da die chemische Reaktion auch während des Transportschrittes erfolgen kann, muss mit Hilfe einer Time Splitting Technik (ALEMANI ET AL., 2005) die Reaktionen zwischen allen Beteiligten chemischen Spezies betrachtet werden. Zur Verdeutlichung wird im Folgenden als Beispiel zwei Möglichkeiten vorgestellt.

Im ersten Fall wird angenommen, dass sich bei Reaktion sofort ein chemisches Gleichgewicht einstellt. Die Reaktionszeit  $\Delta t_{\text{Reaktion}}$  ist sehr viel kleiner als die Diffusionszeit  $\Delta t_{\text{Diffusion}}$ . Am Gitterknoten wird die Konzentration der Spezies des Fluides unter Einfluss der Diffusion für den Zeitschritt  $\Delta t$  berechnet. Diese Konzentration geht dann in die Berechnung der Konzentration durch chemische Reaktionen für denselben Zeitschritt  $\Delta t$  ein. Durch die Erstberechnung des Vorganges mit der kleinsten Konzentrationsänderung  $\Delta t$  wird der Fehler für die eigentlich gleichzeitig ablaufenden Prozesse möglichst kleingehalten.

Im zweiten Fall wird angenommen, dass die Reaktionszeit  $\Delta t_{\text{Reaktion}}$  sehr viel größer ist als die Diffusionszeit  $\Delta t_{\text{Diffusion}}$ . Aus diesem Grund wird nun als erstes die Konzentrationsänderung der chemischen Spezies durch Reaktionen berechnet, weil dies die kleinere Konzentrationsänderung in einem Zeitschritt  $\Delta t$  ist. Anschließend wird mit der berechneten Konzentration durch Reaktionen die Konzentration nach einer Diffusion für den Zeitschritt  $\Delta t$  ermittelt.

Je nach chemischer Zusammensetzung des Fluides und des Gesteins können diese beiden Fälle kombiniert und mehrfach aneinandergereiht werden, um die herrschenden Konzentrationen der chemischen Spezies zu ermitteln. Dies bedeutet für die Programmerstellung zur Nutzung der Lattice-Boltzmann Methode, dass die chemischen Spezies des Fluides und des Gesteins genau definiert sind und die entsprechenden Reaktionsraten bekannt sind.

## 5.6 Lösung und Fällung

Auf den Knoten des Lattice-Boltzmann Gitters wird auch berechnet, ob die Knoten auf der Solid-Fluid Grenzschicht gelöst und zum Fluid werden oder durch Fällung zum Festkörper werden. Dazu muss als erstes das maximal erreichbare Volumen der Mineralphasen  $\Delta V_{eff}$  an einem Knoten in Abhängigkeit der chemischen Spezies in Fluid und Gestein sowie mögliche Mineralphasen definiert werden. Das Volumen der an einem Knoten vorhandenen Mineralphasen  $\Delta V_{tot}$  kann nach PATEL ET AL. (2014) mit der Formel

$$\Delta V_{tot}(t + \Delta t) = \sum_m \Delta V_m(t + \Delta t) = \sum_m \Delta V_m(t) + \bar{V}_m [N_m(t + \Delta t) - N_m(t)]$$

mit dem Volumen einer festen Mineralphase  $\Delta V_m$  für  $m$  Mineralphasen, dem molaren Volumen einer festen Mineralphase  $\bar{V}_m$  und der Anzahl der Mole einer festen Mineralphase  $N_m$ . Die Formel berechnet die Zu- und Abnahme der festen Mineralphasen für jeden Zeitschritt  $\Delta t$ . Ein Knotenpunkt wird zum Fluid wenn  $\varphi = \Delta V_{tot} / \Delta V_{eff} \leq 0,5$  ist und zum Festkörper mit  $\varphi = \Delta V_{tot} / \Delta V_{eff} \geq 0,5$ . Nach PATEL ET AL. (2013) wird durch den Grenzwert von 0,5 die Moving Boundary Probleme akkurater gelöst als durch die von KANG ET AL. (2007) vorgeschlagene vollständige Lösung oder Fällung.

## 5.7 Numerische Probenkörper

Um mit numerischen Methoden die Aussagekraft von Fluidtransport- und Reaktionssimulationen zu steigern, müssen die verwendeten Probekörper möglichst genau und repräsentativ beschrieben werden. WANG ET AL. (2007) z. B. beschreiben einen durch vier Parameter gesteuerten Algorithmus der poröse morphologische Eigenschaften erzeugt, die der Formierungsabfolge von vielen realen porösen Medien entsprechen soll.

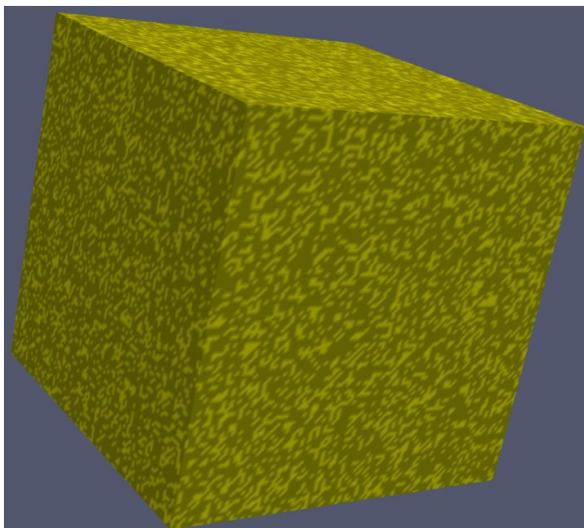


Abb. 5.5: Modellkörper mit 30 % Porosität

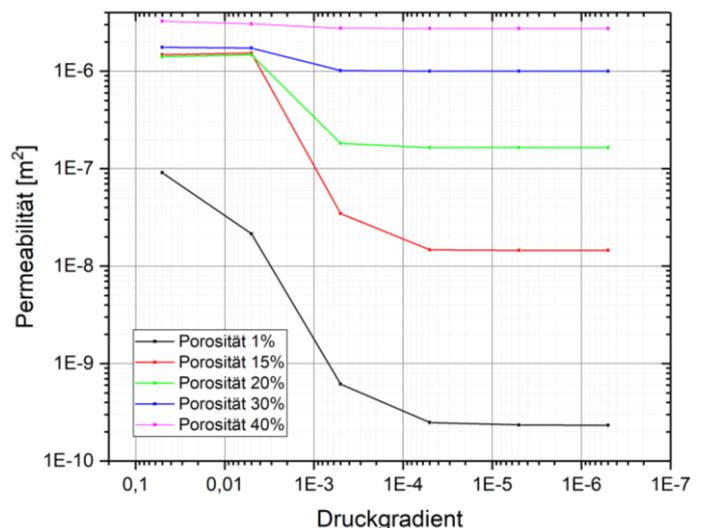


Abb. 5.6: Permeabilitäten unterschiedlicher Proben.

Der Ansatz ist aber recht aufwändig, zum Beispiel hat jeder Punkt im 2D-System acht Wachstumsrichtungen, in einem 3D-System 14. Wenn nun noch vielfältige Mineralphasen in Betracht gezogen werden, wird der hohe Aufwand zur Programmierung und zur Erstellung von Probenkörper deutlich.

Aus diesem Grund werden hier ein stark vereinfachter Ansatz gewählt und die Modellkörper für bis zu fünf Gesteinsarten mit Hilfe von statistischen und Zufallswerten erzeugt. Das GNU Octave/Matlab – Programm benötigt als Eingabeparameter die Auswahl des 3D Geschwindigkeitsmodell, die Prozentangabe der Gesteinsarten, die Porosität sowie die Kontenanzahl in x-, y- und z-Richtung. Danach werden die Kontenpunkte zufällig mit den Gesteinsarten mit einer Basiskorngröße von  $2 \times 2 \times 2$  belegt, entsprechend der Prozentangaben. Die Gesteinskorngröße ist mindestens ein Quader mit einer Kantenlänge von 2 Knoten. Zufallsbedingt können sich auch größere Bereiche bilden. Im nächsten Schritt werden in Abhängigkeit von der Porosität beliebige zufällig ausgesuchte Punkte in Poren umgewandelt und die umgebenden Punkte in Abhängigkeit vom gewähltem Lattice-Boltzmann Modell als Fluid-Gestein-Interface markiert. Bei diesem Vorgehen ist die effektive Porosität und Permeabilität zufallsabhängig, das bedeutet, dass jede Probe trotz gleicher Eingaben unterschiedliche Eigenschaften haben kann. Für die Berechnung der Permeabilität werden alle Quaderseiten bis auf die x-Richtung abgedichtet. In Abb. 5.5 ist als Beispiel ein Modellkörper aus einem Gestein mit 30 % Porosität zu sehen. Die gelben Flächen repräsentieren die Poren. Das Diagramm zeigt die Permeabilitäten für Probenkörper mit unterschiedlichen Porositäten mit einem durchschnittlichen Porendurchmesser von 150  $\mu\text{m}$ .

## 5.8 Fazit

Es sind die methodischen Grundlagen zur numerischen Modellierung des Porenraumes mit Lattice-Boltzmann Methoden gelegt worden. Wegen der großen Komplexität und Vielfältigkeit der chemischen kinetischen Reaktionen kann kein allgemeines Programm mit Lattice-Boltzmann Methoden erstellt werden. Die chemischen Parameter und Randbedingungen müssen als erstes herausgearbeitet werden und dann ein entsprechendes Simulationsprogramm erstellt werden.

## 5.9 Literatur

- AJDUKIEWICZ, J. M. & LANDER, R. H. (2010): Sandstone reservoir quality prediction: The state of the art. *AAPG Bulletin*, v. 94, No. 8, pp. 1083-1091.
- ALEMANI, D., CHOPARD, B., GALCERAN, J. & BUFFLE, J. (2005): LBGK method coupled to time splitting technique for solving reaction-diffusion processes in complex systems. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 7, pp. 3331-3341.
- APPELO, C. A. J. & POSTMA, D. (2005): *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2 ed., CRC Press, Boca Raton.
- BHATNAGAR, P. L., GROSS, E. P. & KROOK, M. (1954): A Model for Collision Processes in Gases. *Phys. Rev.*, 94:511.
- CHEN, L., KANG, Q., VISWANATHAN, H. S. & TAO, W.-Q. (2014): Pore-scale study of dissolution-induced changes in hydrologic properties of rocks with binary minerals. *Water Resour. Res.*, 50, pp. 9343-9365, doi:10.1002/2014WR015646.

- DAWSON, S. P., CHEN, S. & DOOLEN, G. D. (1993): Lattice Boltzmann computations for reaction-diffusion equations. *J. Chem. Phys.* **98** (2), pp. 1514-1523.
- EHRENBERG, S. N., WALDERHAUG, O. & BJØRLYKKE, K. (2012): Carbonate porosity creation by mesogenetic dissolution: Reality or illusion? *AAPG Bulletin*, v. 96, No. 2, pp. 217-233.
- GILES, M. R. (1987): Mass transfer and problems of secondary porosity creation in deeply buried hydrocarbon reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, Vol 4, pp. 188-204.
- GILES, M. R. & DE BOER, R. B. (1990): Origin and significance of redistributive secondary porosity. *Marine and Petroleum Geology*, Vol 7, pp. 378-397.
- HÄNEL, D. (2004): *Molekulare Gasdynamik*. Springer, New York.
- KANG, Q. & LICHTNER, P. C. (2013): A Lattice Boltzmann Method for Coupled Fluid Flow, Solute Transport, and Chemical Reaction. *Progress in Computational Physics (PiCP)*, Vol. 3, pp. 184-198.
- KANG, Q., LICHTNER, P. C. & ZHANG, D. (2007): An improved Lattice Boltzmann model for multicomponent reactive transport in porous media at the pore scale. *Water Resour. Res.* 43, 1-12.
- KRÜGER, T., KUSUMAATMAJA, H., KUZMIN, A., SHARDT, O., SILVA, G. & VIGGEN, E. M. (2017): *The Lattice Boltzmann Method. Principles and Practise.* – Graduate Texts in Physics. Springer, Switzerland.
- MORAD, S., KETZER, J. M. & DE ROS, L. F. (2000): Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins. *Sedimentology*, **47**, (Suppl. 1), pp. 95-120.
- PATEL, R. A., PERKO, J., JACQUES, D., DE SCHUTTER, G., VAN BREUGEL, K. & YE, G. (2014): Lattice Boltzmann based multicomponent reactive transport model coupled with geochemical solver for pore scale simulation. In: Idelsohn, S., Papadarakakis, M., Schrefler, G. (Eds.), *V International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems 2013*. CIMNE, Barcelona, Ibiza, Spain.
- PATEL, R. A., PERKO, J., JACQUES, D., DE SCHUTTER, G., YE, G. & VAN BREUGEL, K. (2013): A versatile pore-scale multicomponent reactive transport approach based on lattice Boltzmann Method: Application to portlandite dissolution, *J. Phys. Chem. Earth*.
- SUCCI, S. (2001): *The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond*. Oxford University Press, Oxford.
- SUKOP, M. & THORNE, D. T. (2007): *Lattice Boltzmann Modeling*. Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- TAYLOR, T. R., GILES, M. R., HATHON, L. A., DIGGS, T. N., BRAUNSDORF, N. R., BIRBIGLIA, G. V., KITTRIDGE, M. G., MACAULAY, C. I. & ESPEJO, I. S. (2010): Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: Models, myths, and reality. *AAPG Bulletin*, v. 94, No. 8, pp. 1093-1132.
- WANG, M., WANG, J., PAN, N. & CHEN, S. (2007): Mesoscopic predictions of the effective thermal conductivity for microscale random porous media. *Physical Review E* **75**, 036702, The American Physical Society.

WORDEN, R. H., ARMITAGE, P. J., BUTCHER, A. R., CHURCHILL, J. M., CSOMA, A. E., HOLLIS, C., LANDER, R. H. & OMMA, J. E. (2018): Petroleum reservoir quality prediction: overview and contrasting approaches from sandstone and carbonate communities. From ARMITAGE, P. J., BUTCHER, A. R., CHURCHILL, J. M., CSOMA, A. E., HOLLIS, C., LANDER, R. H., OMMA, J. E. & WORDEN, R. H. (eds) 2018: Reservoir Quality of Clastic and Carbonate Rocks: Analysis, Modelling and Prediction. Geological Society, Special Publications, **435**, pp. 1-31, London.

## 6 Weiterentwicklung und Anpassung von GeotIS

### 6.1 Weiterentwicklung der Visualisierungs-Algorithmen

Die im Vorgängerprojekt StörTief erstellten Visualisierungs-Algorithmen zur Darstellung von SGrids wurden so optimiert, so dass der Arbeitsspeicherbedarf der Anwendung deutlich verringert werden konnte. Fehler bei der Darstellung von SGrid-Volumengitter wurden behoben und die Visualisierung von SGrids im Produktivsystem freigeschaltet. Die Darstellung von SGrids erfolgt in GeotIS bei der Generierung von Vertikalschnitten. Die Darstellung von SGrids in der Aufsicht wurde soweit vorbereitet, dass Sie bei der nächsten Aktualisierung implementiert werden kann. Gegenüber der bisherigen Darstellungstechnik auf Basis von orthogonalen 2DGrids  $[x,y, f(x,y)]$  kann an einer Lokation Top oder Basis eines Horizonts mehrfach auftreten, wodurch es möglich wird, überkippte Formationen oder Überschiebungen darzustellen. Auch kann die Störungsgeometrie mit höherer Komplexität (z. B. Flower-Structures) dargestellt werden, da die Geometrie der 3D-Modelle aus Hexaedern zusammengesetzt wird und jeder Hexaeder für sich die Information bereithält, ob eine Seitenfläche die jeweilige Formation begrenzt, fortsetzt oder Teil einer Störung ist. Damit entfällt die unpräzise und fehleranfällige Überlagerung von Störungslinien, die aus Shape-Dateien generiert wurden, die ja nur maximal für Top- und Basis-Fläche vorliegen.

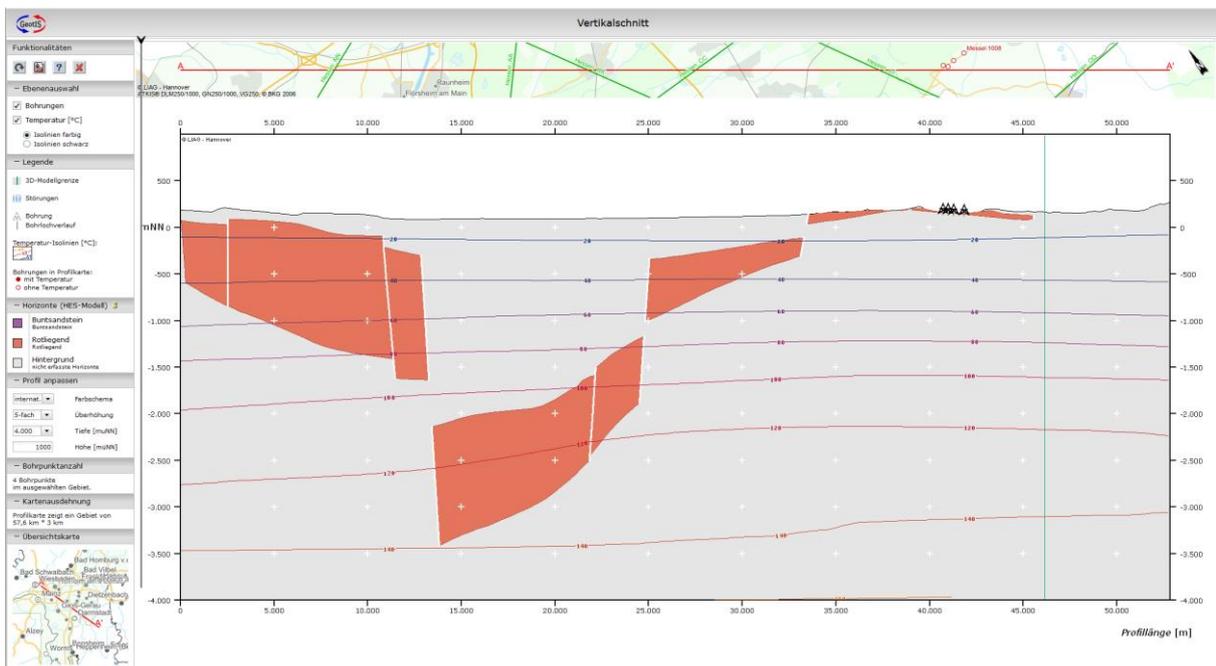


Abb. 6.1: Darstellung eines Profilschnitts durch das Volumenmodell von Hessen (Oberheingraben).

### 6.2 Datenbasis

#### 6.2.1 Bohrungsdaten

Die GeotIS-Datenbasis wurde, mit aufwändigen Anpassungen an die geänderten Datenmodelle der beiden Quell-Datenbanken (FIS-Geophysik und Kohlenwasserstoff-FIS), aktualisiert und dabei um obsoletere GeotIS-Datenbankstrukturen bereinigt. Die

Datenbankdokumentation wurde besser an die Möglichkeiten des vorhandenen Datenbanksystems angepasst, sie ist jetzt direkt mit den Datenbankstrukturen (Tabellen, Spalten, Funktionen, Gespeicherte Prozeduren) verknüpft. Im Rahmen der Aktualisierung wurde die Koordinatentransformation in den Java-Workflow übernommen. Im Laufe des Projektes fand auch eine Migration auf Microsoft SQL Server 2017 statt.

### 6.2.2 Temperaturdaten

Es wurde ein neues 3D-Temperaturmodell für Deutschland, Oberösterreich und weitere, angrenzende Gebiete berechnet und in GeotIS übernommen. Dieses Temperaturmodell basiert auf einer aktualisierten Datengrundlage. Sämtliche Untergrundtemperaturen wurden aus dem FIS-Geophysik entnommen, dass über Temperaturdaten von ca. 12.000 Bohrungen verfügt (KÜHNE ET AL., 2003).

Ein Teil dieser Temperaturdaten stammt aus kontinuierlichen Temperatur-Logs in Tiefbohrungen, die jedoch teilweise zu einem Zeitpunkt gemessen wurden, als das Bohrloch noch durch die Bohrspülung thermisch beeinflusst war und daher nicht die ursprüngliche, ungestörte Temperatur wieder erreicht hatte. Stark gestörte Temperaturlogs sind im FIS-Geophysik deaktiviert. Zuverlässigere Temperaturwerte stammen entweder von ungestörten Messungen, die erst mehrere Wochen oder Monate nach dem Spülungsstopp gemessen wurden, oder von längeren Pumptests.

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 (AGEMAR, 2017; AGEMAR ET AL., 2012; BOLOTOVSKIY ET AL., 2015; SCHULZ & SCHELLSCHMIDT, 1991; SCHULZ & WERNER, 1987). Verbessert wurde das Korrekturverfahren für BHT-Messungen, für die nur eine Standzeit vorliegt. Für gestörte Temperaturlogs im Ostteil des Norddeutschen Beckens wurde erstmals ein Korrekturverfahren eingeführt. So konnte die Datenbasis in dieser Region verbessert, bzw. erweitert werden.

Die Untergrundtemperaturdaten werden ergänzt durch Bodentemperaturen, die wie in AGEMAR ET AL. (2012) beschrieben, aus Lufttemperaturmessungen des Deutschen Wetterdienstes und anderer Meteorologischer Dienste des Zeitraums 1961-1990 abgeleitet sind.

Das Temperaturmodell wurde mit 3D-Kriging weitgehend nach dem in AGEMAR ET AL. (2012) beschriebenen Verfahren 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 Temperaturmes-

sungen 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 Bohrlochtiefsten (Bottom Hole Temperatures, BHT) sind. Es erfolgt eine Einteilung der Untergrundtemperaturmessungen in 4 Qualitätskategorien:

1. Ungestörte Logs und Lagerstättentemperaturen (*exzellent*)
2. Temperaturmessungen bei Pumptests (*gut*)
3. gestörte Logs und korrigierte BHTs mit Standzeit(en) ab Spülstopp (*befriedigend*)
4. Korrigierte BHTs mit geschätzter Standzeit ab Spülstopp (*ausreichend*)

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 zunehmenden Abstand abnimmt. Die Verschärfung der Abstandsregeln gegenüber AGEMAR ET AL. (2012) erfolgte aufgrund einer neuen Einschätzung der Datenqualität, bzw. realistischeren Abschätzung der Spannbreite und Häufigkeit von Messfehlern.

Dieses neue 3D-Temperaturmodell wurde auch auf bestehende und neue Horizontflächen, sowie auf statische Profilschnitte projiziert. Damit sind nun alle in GeotIS abrufbaren Untergrundtemperaturprognosen auf aktuellem Stand. Je nach regionaler Datenlage erstreckt sich das Untergrundtemperaturmodell bis in eine Tiefe 5000 m unter NHN und deckt im Wesentlichen Deutschland und Oberösterreich ab. Abb. 6.2 zeigt die Temperaturverteilung im Untergrund für verschiedene Tiefen, abgeleitet aus dem neuen 3D-Temperaturmodell.

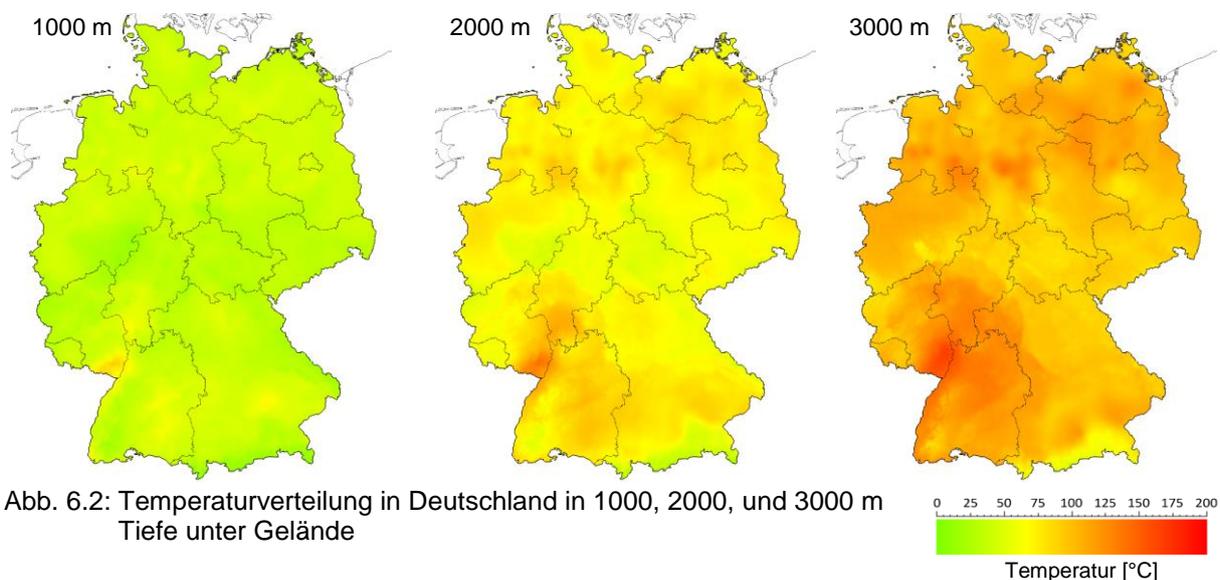


Abb. 6.2: Temperaturverteilung in Deutschland in 1000, 2000, und 3000 m Tiefe unter Gelände

### 6.3 Projektinfrastruktur

Aufgrund von neuen Richtlinien des hiesigen Rechenzentrums und eines internen Sicherheitsaudits musste die Projektinfrastruktur (u. a. Application Lifecycle Management) im Intranet komplett aktualisiert sowie modernisiert werden und gegen Ende des Projektes auch noch auf einen neuen virtuellen Server umziehen. Hervorzuheben ist bei der Modernisierung der Einsatz von „JIRA“, einer Webanwendung zur Fehlerverwaltung und Problembehandlung und „Confluence“, eines Enterprise-Wikis (Abb. 6.3). Confluence dient dabei als zentrale Wissensdatenbank und Informationsquelle im Projekt. Die gesamte technische und nicht-technische Projektdokumentation in unterschiedlichen Formaten ist damit einfach durchsuchbar und versionierbar, Dokumente können auch gemeinsam erstellt werden. Der Bottom-Up-Ansatz eines Wikis – jeder kann Dokumente erstellen, bearbeiten oder fertige Dokumente auf dem System ablegen –, unterstützte dabei die Selbstorganisation des Teams, eine zentrale Instanz zur Aktualisierung und Pflege der Dokumente war nicht nötig.

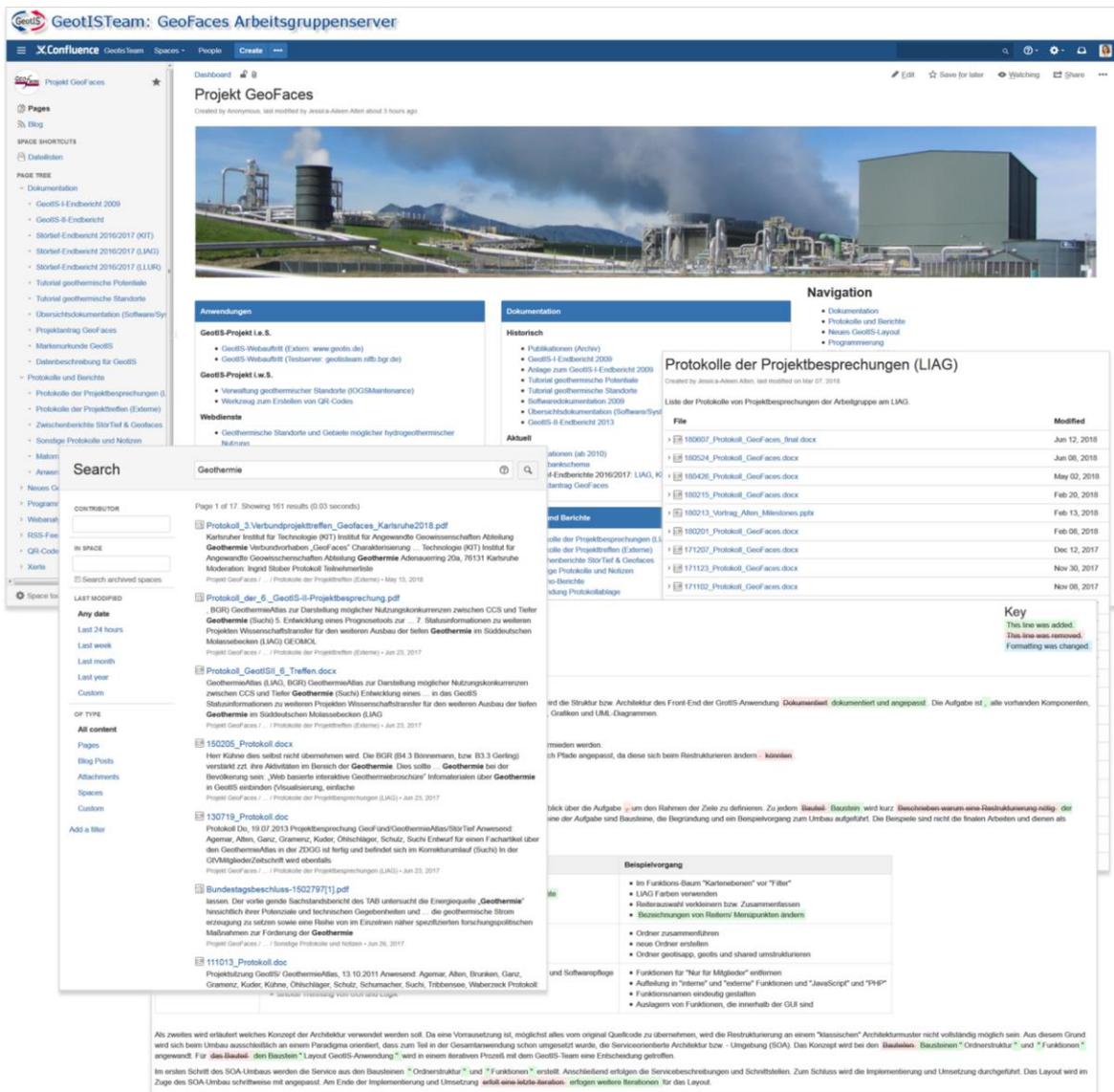


Abb. 6.3: Geofaces Enterprise-Wiki (Confluence): Hintergrund – Dashboard-Ansicht; rechts – Projektdokumentation; unten – Versionsverwaltung eines Dokumentes, Visualisierung der Unterschiede; links – Ergebnis einer Volltextsuche über alle enthaltenen Dokumente verschiedener Formate

## 6.4 Erweiterung der GeotIS-Web-Anwendung

### 6.4.1 Website

Die GeotIS-Webseite wurde auf der Basis eines „responsive Webdesigns“ neugestaltet, für Suchmaschinen optimiert und ihre Inhalte neu organisiert. Darin enthalten sind nun auch die rekonstruierten Seiten des GeoTOOL-Projekts (methodische Ansätze zur standortbezogenen Abschätzung von Untergrundparametern, die bei der Fündigkeit hydrogeothermischer Projekten relevant sind; FKZ: 0325136).

Einen erheblichen Aufwand verursachte die Anpassung der Website an die Erfordernisse der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO).

### 6.4.2 Anwendung

Das 3D-Modell für das nordalpine Molassebecken wurde grundlegend überarbeitet. Das neue Modell ist ein Verbundmodell aus dem GeoMol-Modell Bayern-Oberösterreich (Oberjura) und dem bisherigen Modell des Top-Malms auf der Grundlage der Karte Oberjura Bodensee-Oberschwaben sowie der Oberjura-Karte aus dem Bayerischen Geothermie-Atlas von 2010. Für den Baden-Württembergischen Teil des Molassebeckens wurde ein neuer Horizont (Muschelkalk) hinzugefügt. Im Rahmen einer weiteren Aktualisierung wurde das sogenannte „Molasse-Modell“ um Keuper- und Buntsandstein-Horizonte in Nordbayern erweitert (siehe Kapitel 3 & 4).

Auch das Modell für den Bereich Nordwestdeutschland wurde erweitert. In der Webanwendung musste in diesem Zuge die Verarbeitung mehrerer verschiedener Nutzhorizonte innerhalb einer geologischen Serie (Unterkreide) ermöglicht werden. Ein neues 3D-Modell steht für das Münsterländer Kreidebecken (Cenoman bis Turon) bereit (siehe Kapitel 3).

Die Karten aus dem Projekt Sandsteinfazies, insbesondere die Karten des Schilfsandsteins, wurden in Absprache mit Herrn Dr. Franz von der Universität Göttingen kartographisch überarbeitet, mit Belegpunkten versehen und in GeotIS integriert.

Die bestehenden Gebirgsdurchlässigkeitskarten wurden im Bereich der Belegpunkte überarbeitet. Es wurden neue Gebirgsdurchlässigkeitskarten für Nordostbayern (Fränkisches Becken), sowie hydrothermische Potenzialkarten für untersuchungswürdige Gebiete in Nordrhein-Westfalen, Hessen, Baden-Württemberg und Bayern eingefügt. Die Konzessionsgebiete sowie die Lage der seismischen 2D- und 3D-Surveys wurden auf den neuesten Stand gebracht.

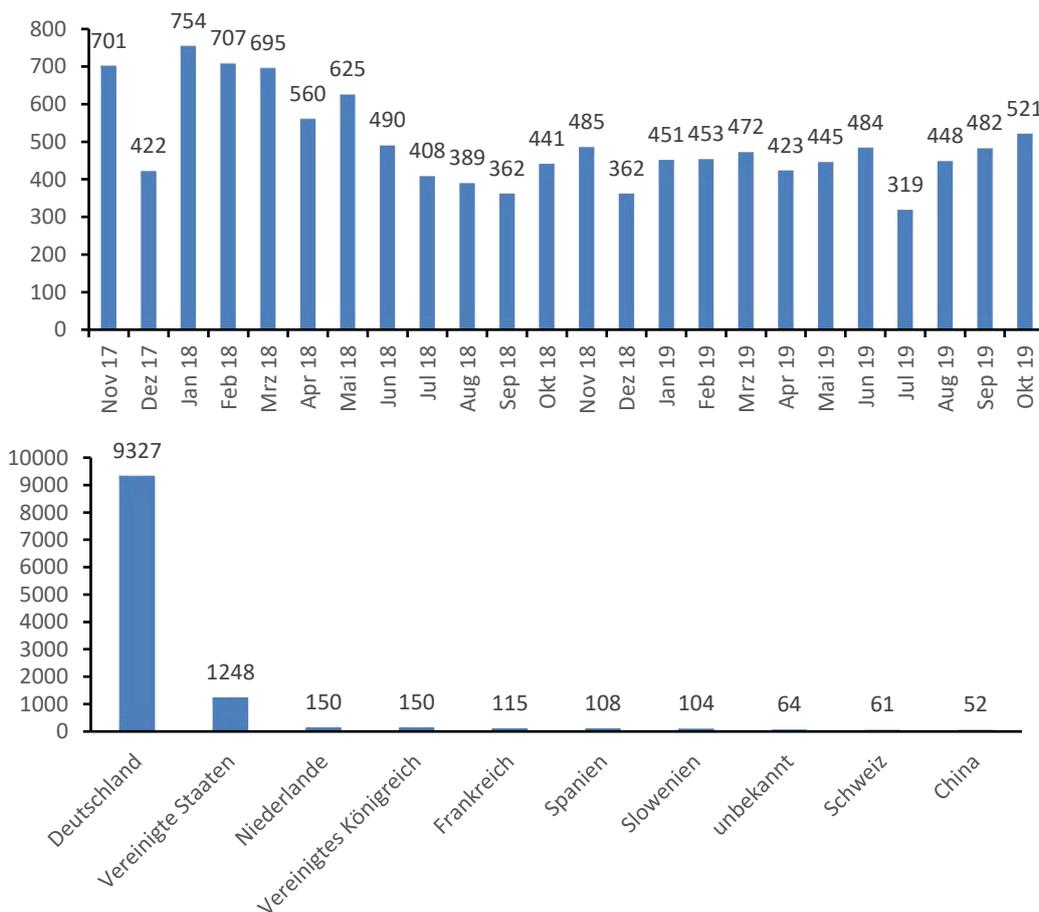
Für die Darstellung der Energiestatistiken in GeotIS wurden die entsprechenden Visualisierungs- und Ausgabemethoden angepasst. Im Bereich der Exportschnittstellen wurde die Möglichkeit geschaffen, die Energiestatistiken als Excel-Datei, sowie die Daten einzelner oder mehrerer geothermischer Standorte als CSV-Datei zu exportieren. Für den Import von 2D/3D-Daten in die Datenbank wurde ein CLI geschaffen.

Aufgrund der Zunahme von Daten außerhalb Deutschlands (zusätzlich zu den Bohrungen wurden geothermische Standorte und 3D-Untergrundinformationen aufgenommen) wurde der alte Kartenhintergrund durch eine Europakarte mit Fokus auf Deutschland ersetzt. Die Karte wurde mit Hilfe des BKG-Datensatzes von 2017 aktualisiert.

Weiterhin erfolgten verschiedene Fehlerbehebungen und Aktualisierungen, hervorzuheben ist hier der Ersatz der GoogleMaps-API durch OpenLayers und OpenStreetMap beim KML-Export.

### 6.4.3 Nutzungsanalyse

Um einen besseren Überblick über die Interessenschwerpunkte der Benutzer zu erhalten und die Webanwendung entsprechend zielgerichteter auszubauen zu können, wurde eine statistische Auswertung des Nutzerverhaltens in die GeotIS-Anwendung integriert. Dazu wurde die Open-Source-Anwendung „Matomo“ (ursprünglicher Name „Piwik“) eingesetzt, die eine datenschutzkonforme statistische Auswertung verschiedener Parameter ermöglicht. Dies erforderte einen sehr aufwändigen Abstimmungsprozess mit dem hiesigen Datenschutzbeauftragten und zusätzliche Maßnahmen bei der Integration von GeotIS und Matomo. Die Funktionalität von Matomo wurde um die Möglichkeit erweitert, die Interessenschwerpunkte der Benutzer auch in einem räumlichen Bezug als Kartendarstellung zu visualisieren.



**Abb. 6.4:** Oben: Besucherzahlen der GeotIS-Webanwendung. Im Juli 2019 fehlen Daten von ca. 2 Wochen. Unten: Besucherzahlen nach Ländern (Top 10, hinzu kommen noch Besucher aus 46 weiteren Ländern).

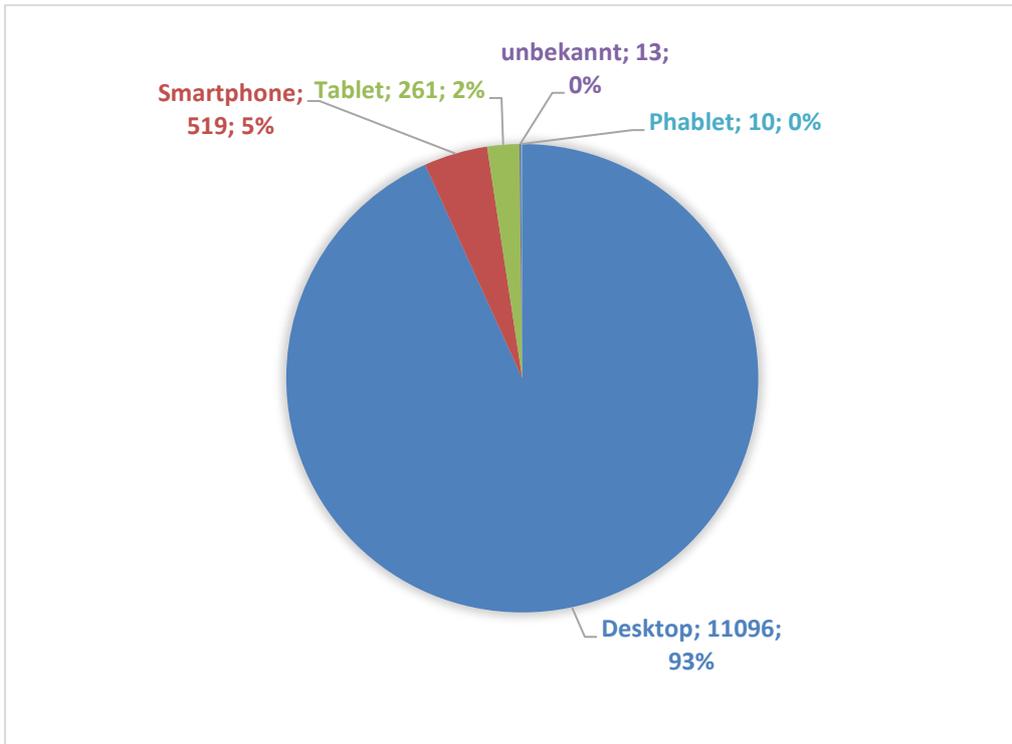


Abb. 6.5: Gerätetypen der Besucher.

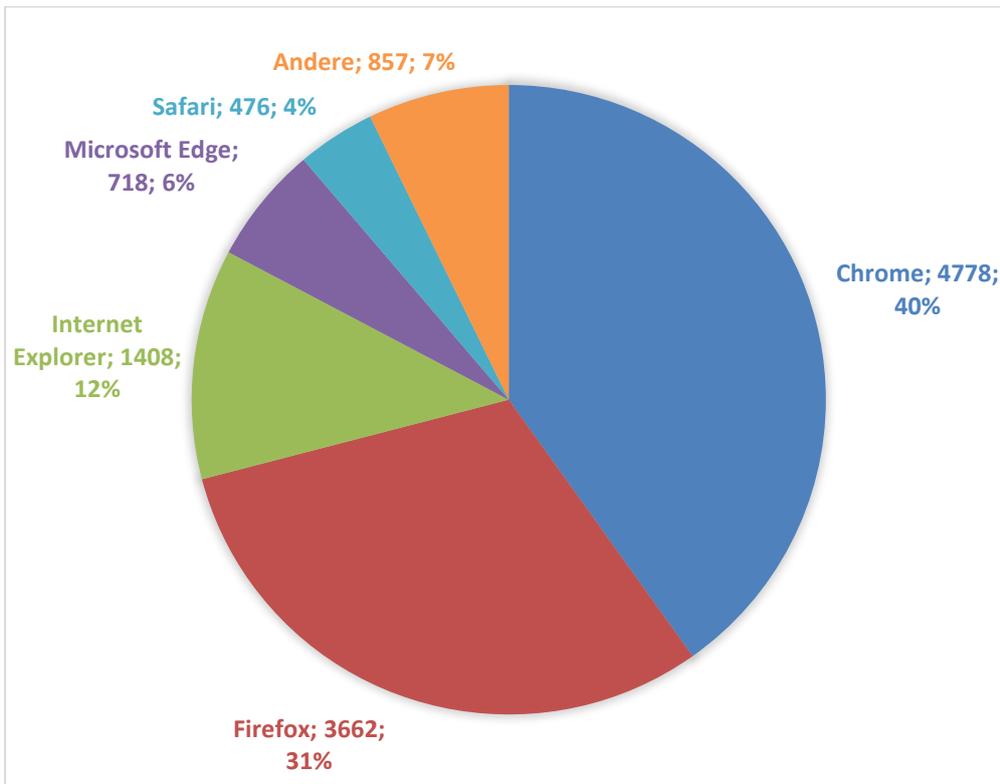
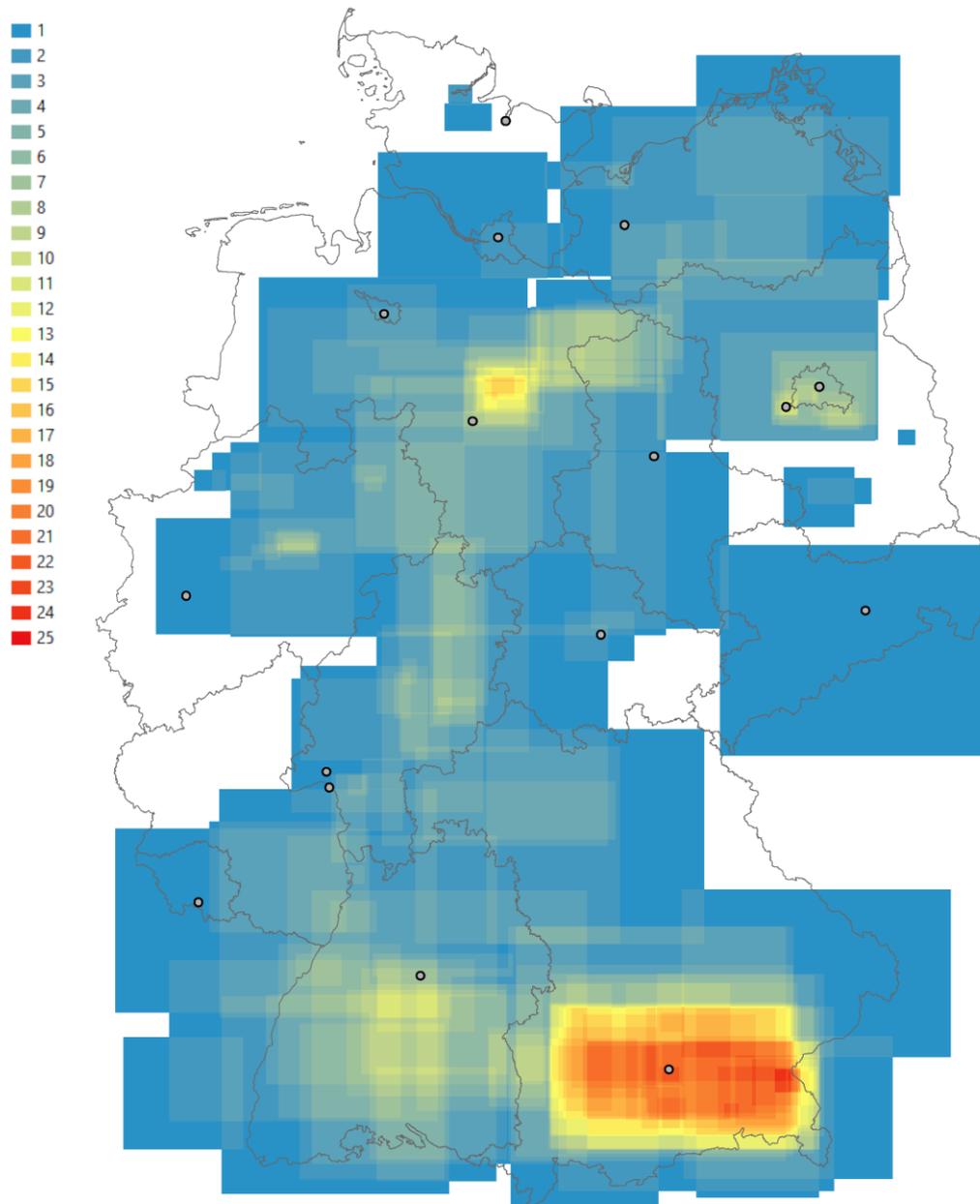


Abb. 6.6: Browsertypen der Besucher.



**Abb. 2.7:** Benutzeraktivität – Heatmap mit Horizontalschnitten. Bei dieser Darstellung wurden die überlappenden Polygone der von den Benutzern ausgewählten Rechtecke (160 Stück) gezählt und entsprechend der Anzahl der Überlappungen eingefärbt. Der Zeitraum ist Juli 2018 bis Oktober 2019.

Die Erhebung der Daten erfolgt freiwillig und DSGVO-konform, d.h., die Benutzer werden gefragt, ob sie mit der Nutzung ihrer Daten für statistische Zwecke einverstanden sind. In den vergangenen Jahren führte die Diskussion über Benutzertracking jedoch dazu, dass Benutzer dies zunehmend ablehnen und Browsereinstellungen z.T. standardmäßig die Erhebung verbieten. Deshalb sind die Benutzerstatistiken der vergangenen 2 1/4 Jahre mit denen der davorliegenden Jahre nicht vergleichbar. Es ist zu vermuten, dass die tatsächlichen Besucherzahlen höher sind. Die Abb. 6.4 bis 6.7 stellen nur eine sehr kleine Auswahl aus den zahlreichen Auswertungsmöglichkeiten von Matomo dar, die automatisch erzeugten monatlichen Reports umfassen 54 Seiten mit Tabellen und Abbildungen. Sofern nicht anders vermerkt, ist der Auswertungszeitraum jeweils November 2017 bis Oktober 2019.

#### 6.4.4 Infrastruktur und Systemsicherheit

Im Bereich Hardware wurde ein neuer Server mit 14 Kernen, 28 Threads, 2,2 GHz, 96 GB RAM und 1,8 TB Festplattenspeicher beschafft. Dieser wird einen älteren Server ersetzen, dessen Support abgelaufen ist.

Die aus IT-Sicherheitsgründen notwendige Umstellung auf PHP 7 zog unerwartet viele Änderungen nach sich. Während die meisten Abhängigkeiten problemlos angepasst werden konnten, erwies sich die Umstellung der Mapserver-Schnittstelle MapScript als besonders arbeitsintensiv, konnte aber noch im Rahmen der Projektlaufzeit abgeschlossen werden. Die Java-Migration von Oracle JDK 8 auf OpenJDK 8 ließ sich dagegen problemlos durchführen, eine Migration auf neuere Java-Versionen wurde zurückgestellt, da OpenJDK 8 bis 2023 mit Sicherheitsupdates versorgt werden wird.

Zur Gewährleistung der Systemsicherheit fanden regelmäßig Aktualisierungen von Serverkomponenten und Laufzeitumgebungen der GeotIS-Webanwendung statt.

#### 6.5 Literatur

- AGEMAR, T. (2017): Fachinformationssystem Geophysik: Änderung der BHT-Korrekturverfahren für einfach belegte Messungen, LIAG-Bericht, Hannover. 8 S.
- AGEMAR, T., BRUNKEN, J., JODOCY, M., SCHELLSCHMIDT, R., SCHULZ, R. & STOBER, I. (2013): Untergrundtemperaturen in Baden-Württemberg. Z. Dt. Ges. Geowiss. 164:49-62. DOI: <https://doi.org/10.1127/1860-1804/2013/0010>.
- AGEMAR, T., SCHELLSCHMIDT, R. & SCHULZ, R. (2012): Subsurface temperature distribution in Germany. Geothermics 44:65-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.07.002>.
- BOLOTOVSKIY, I., SCHELLSCHMIDT, R. & SCHULZ, R. (2015): Fachinformationssystem Geophysik: Temperaturkorrekturverfahren, LIAG-Bericht, Hannover.
- KÜHNE, K., GORLING, L. & MAUL, A.-A. (2003) Aufbau eines Fachinformationssystems Geophysik. - Z. Angew. Geol., 49 (2): 48-53; Hannover.
- KUTASOV, I.M. (1999): Applied Geothermics for Petroleum Engineers Elsevier Science B. V., Niederlande.
- SCHULZ, R. & SCHELLSCHMIDT, R. (1991): Das Temperaturfeld im südlichen Oberrheingraben. Geol. Jb. E48:153-165.
- SCHULZ, R. & WERNER, K. H. (1987): Einfache Korrekturverfahren für Temperaturmessungen, GGA-Bericht, NLFb, Hannover.

## **7 Algorithmen zur Generalisierung von Störungen**

### **7.1 Einführung**

Störungen werden derzeit in den GeotIS-Ansichten der Hauptkarte, in den Tiefenschnitten der Horizonttemperatur und schematisiert auch in Vertikalschnitten gezeigt. Die Anwendung eines entwickelten Generalisierungs-Workflows wäre besonders für die Hauptkarte in GeotIS sinnvoll, da hier eine variable Maßstabssteuerung vorliegt.

Unter kartographischer Generalisierung versteht man den Prozess der Reduzierung und Vereinfachung von Kartendetails, um die Lesbarkeit einer Karte beim Übergang vom großen Ausgangsmaßstab zu kleineren Zielmaßstäben zu erhöhen. Von erfahrenen Kartographen wird dieser Vorgang manuell durchgeführt, in einem oftmals nicht nach klaren Vorgaben definierten Prozess. Dies führt zu Ergebnissen, die subjektiv sind und in der Regel durch andere Bearbeiter nicht reproduziert werden können. Mit dem Aufkommen von ersten GIS-Systemen gegen Ende der 1960er Jahre stieg der Bedarf an algorithmischen, automatischen Generalisierungstechniken deutlich. Dadurch können kartographische Produkte nicht nur schneller und kostengünstiger erzeugt werden, auch der Grad der Reproduzierbarkeit und Objektivität erhöht sich erheblich. Eine Automatisierung des Generalisierungsprozesses ist auch deshalb erstrebenswert, weil dadurch nur ein einziger, hoch aufgelöster Datensatz aufwendig gesammelt, gepflegt und fortgeführt werden muss. Die Ableitung aller anderen, weniger hoch aufgelösten Datensätze und Folgeprodukte kann dann mit vergleichsweise wenig Aufwand, automatisiert und in einigen Anwendungsfällen sogar dynamisch erfolgen.

Die Besonderheit von Web-GIS oder Web-Mapping-Systemen wie GeotIS ist, dass ein Benutzer beliebig hinein oder heraus zoomen kann, der Maßstab ist dadurch stufenfrei wählbar. Begrenzt wird das nur durch den maximal und minimal möglichen Darstellungsmaßstab, ein zoomen darüber hinaus ist nicht möglich. Bei der Darstellung von GeotIS auf handelsüblichen Desktop-Monitoren (mit 96 bis 110 dpi) liegen diese Grenzen in etwa bei einem Maximalmaßstab von 1 : 50.000 und einem Minimalmaßstab von 1 : 5.000.000. Für die dazwischenliegenden Maßstäbe ist es bei Web-GIS-Systemen üblich, generalisierte Daten in mehreren Stufen in einer Multiskalen-Datenbank vorzuhalten.

### **7.2 Automatisierte kartographische Generalisierung**

Einzelne Algorithmen, die eine regelbasierte, teilautomatische Generalisierung ermöglichen, werden seit den 1970er Jahren entwickelt. Beispielhaft sei hier ein Algorithmus zur Vereinfachung von Linien genannt (DOUGLAS & PEUCKER, 1973), er ist in vielen Softwarepaketen implementiert. Viele dieser Algorithmen sind auf die Anforderungen der topographischen Landesaufnahme zugeschnitten, sie wurden gezielt zur Generalisierung von topographischen Karteninhalten entwickelt. Als Beispiele seien hier ein Algorithmus zur topologisch korrekten Vereinfachung von Gebäudegrundrissen (HAUNERT & WOLFF, 2010) und ein Algorithmus zur Generalisierung von Straßennetzen genannt (ZHANG, 2005). Solche spezialisierten Algorithmen sind nur in Ausnahmefällen auf Objekte übertragbar, die in geologischen Karten dargestellt werden.

Die weitgehende oder vollständige Automatisierung des Generalisierungsprozesses war und ist Gegenstand laufender Forschung. Eine frühe Durchsicht von Algorithmen zur Generalisierung von Punkt-, Linien- und Flächenobjekten und ein konzeptionelles Grundgerüst zur automatisierten Generalisierung wurde bereits durch BRASSEL & WEIBEL (1988) erarbeitet. PETZOLD ET AL. (2006) untersuchen Web-Services und automatisierte Generalisierungs-Workflows, wie sie mit Werkzeugen der Programme ArcGIS® (von ESRI), FME® (von Safe Software) und axpand® (von Axes Systems) realisiert werden können. STOTER ET AL. (2016) beschreiben den Stand der automatischen Generalisierung in den für Kartographie zuständigen, weltweit verteilten regionalen und nationalen Behörden. All diese Arbeiten haben gemeinsam, dass sie sich hauptsächlich mit der Generalisierung topographischer Karten auseinandersetzen.

### **7.3 Generalisierung geologischer Strukturen**

Geologische Karten sind thematische Karten, die andere Objekte darstellen als beispielsweise topographische Karten. Dabei stehen Flächenpolygone für Verbreitungsgebiete bestimmter Gesteinsarten oder geologischer Einheiten. Linien symbolisieren Verwerfungen, Schichtgrenzen, Umrisse von Erdfällen und ähnliches. Punkte sind Symbole für Aufschlüsse und andere kleinräumige, geologisch bedeutende Objekte. Zwischen den Objekten bestehen spezifische topologische Beziehungen. So sind Schichtgrenzen immer auch die Grenzen benachbarter Flächenpolygone. Am selben Ort können keine zwei Flächenpolygone koexistieren. Vereinfacht oder vereinigt man zwei benachbarte Flächenpolygone, dann muss man auch die dazwischenliegende Trennfläche oder Schichtgrenze entsprechend vereinfachen oder weglassen.

Vergleichsweise wenige Autoren beschäftigen sich mit den theoretischen und praktischen Aspekten der automatisierten Generalisierung von geologischen Datensätzen und Karten. In einer frühen Fallstudie von ARTIOLI ET AL. (1995) werden die Ergebnisse einer konventionellen, manuellen Generalisierung verwendet, um Kriterien und Regeln für eine algorithmische Generalisierung mit dem Programm ARC/INFO® abzuleiten. DOWNS & MACKANESS (2002) entwickeln eine regelbasierte, attributgestützte und objektorientierte Methodik zur teilautomatischen Generalisierung eines geologischen Datensatzes. Ihr Ansatz berücksichtigt auch das spezielle Zusammenspiel von Linien (Störungen) und Flächenpolygonen (geologische Einheiten). MCCABE (2008) führt eine Fallstudie zur Generalisierung von Störungen und Flächenpolygonen durch, in der er einen teilautomatischen, vektororientierten und attributgestützten Workflow für ArcGIS®-Werkzeuge und die inzwischen kommerzielle ArcGIS®-Erweiterung ET Geowizards entwickelt. SMIRNOFF ET AL. (2008) vergleichen die sequentielle Abfolge von vektorbasierten ArcGIS®-Werkzeugen zur Generalisierung mit der Anwendung von rasterbasierten zellulären Automaten, die einfachen algebraischen Regeln folgen. Sie kommen zu dem Schluss, dass das rasterbasierte Modell der zellulären Automaten Vorteile bei der automatisierten Generalisierung von flächenhaften Objekten (wie Verbreitungsgebiete geologischer Einheiten) aufweisen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen erstellen SMIRNOFF ET AL. (2012) die ArcGIS®-Toolbox GeoScaler, mit der man alle punkt-, linien- und flächenartigen Objekte in geologischen Karten generalisieren

kann. SCHUFF (2019) benutzt den zellulären Automaten aus dieser Toolbox und entwirft einen Workflow zur Generalisierung von Fachdaten aus den Bereichen Geologie, Bodenkunde und Hydrogeologie. Den zentral steuerbaren Gesamtprozess implementiert er mit der Software FME®. Daneben gibt er einen ausführlichen und derzeit aktuellen Überblick zur einschlägigen Literatur und zum Stand der Forschung zu diesem Themengebiet. In den letzten Jahren werden verstärkt sogenannte Multiagentensysteme zur automatischen Generalisierung von geologischen Karten eingesetzt (ZHANG ET AL., 2016). Die Agenten sind eigenständige und spezialisiert handelnde Software-Einheiten, die kollektiv das Problem der Generalisierung lösen oder zu lösen versuchen.

#### **7.4 Ausgangsdaten**

Als Ausgangsdaten für die Entwicklung eines automatisierten Generalisierungsablaufs wurden primär Daten von Störungen und Störungszonen aus der GeotIS-Datenbank benutzt. Diese können bisher als Linien in ihrem abgespeicherten Zustand, das heißt ohne maßstabsbedingte Anpassung, in allen Zoomstufen von GeotIS einheitlich angezeigt werden. Daneben wurden frei verfügbare Daten aus digitalen geologischen Karten benutzt, um die Wirkung einzelner Algorithmen an flächenhaften geologischen Strukturen wie den Verbreitungsgebieten geologischer Einheiten zu überprüfen.

Innerhalb von GeotIS können Störungen an verschiedenen Stellen eingeblendet und angezeigt werden, wobei den jeweiligen Darstellungen verschiedene Ausgangsdaten zugrunde liegen. In der Hauptkartenansicht sind Störungszonen darstellbar, die im Rahmen des Projektes „Geothermie-Atlas“ erarbeitet wurden (SCHULZ ET AL., 2013, SUCHI ET AL., 2014). Genau genommen handelt es sich um Störungen, Störungszonen und Störungssysteme, die aus Kartenwerken der Maßstäbe 1 : 300.000 bis 1 : 3.000.000 entnommen, ausgewählt, geometrisch bearbeitet und schließlich für den festen Maßstab von 1 : 1.000.000 manuell generalisiert wurden. Ausgewählt wurden Störungen in möglichst alten Gesteinshorizonten, deren horizontaler Verlauf mindestens 5 km umfasst. Näherungsweise parallele, bis zu 5 km neben einander liegende Störungen wurden zu Störungszonen zusammengefasst und durch eine manuell konstruierte Mittellinie repräsentiert (SCHULZ ET AL., 2013; S. 63). Aus den Originaldaten ableitbare Eigenschaften der Störungen und Störungszonen wurden dem generalisierten Datensatz als Attribute (wie Horizont, Störungsname, Quelle, Kategorie usw.) hinzugefügt. Der resultierende 2D-Datensatz umfasst 919 Linien. Zoomt man in GeotIS stark herein (große Maßstäbe), erscheinen die Linien wohl verteilt. Zoomt man jedoch heraus (kleine Maßstäbe), dann wirken die Linien überladen. Deshalb ist dieser Datensatz weiterhin generalisierungswürdig.

In den Vertikalschnitten und in den grundrißartigen Ansichten der Horizonttemperaturen von GeotIS können Störungen visualisiert werden, die im Rahmen des jetzigen Projektes „GeoFaces“ und im Rahmen früherer Projekte bei der Erstellung von geologischen 3D-Untergrundmodellen (AGEMAR & TRIBBENSEE 2018; AGEMAR ET AL., 2018) zusammengetragen und geometrisch bearbeitet wurden. Es handelt sich um Störungen, die an den unteren und oberen Trennflächen (Liegend- und Hangendflächen) geothermischer Nutzhorizonte vermutet, seltener auch nachgewiesen sind. Sie sind

im Rahmen der 3D-Modellierung regionalen Kartenwerken mittlerer Maßstäbe (etwa 1 : 200.000 bis 1 : 500.000) entnommen und dann bearbeitet worden (AGEMAR ET AL., 2018). Das gesamte Störungsinventar besteht derzeit aus 21 nach Horizonten und Modellgebieten aufgeteilten Datensätzen, mit minimal 5 (Basis Buntsandstein, 3D-Modell Hessen), maximal 767 (Malm, 3D-Modell süddeutsches Molassebecken), zusammengenommen aus 5.027 Linien. Sie sind nicht weiter generalisiert. Die Daten wurden über viele Jahre von verschiedenen Bearbeitern mit unterschiedlicher Software zusammengetragen. Sie verfügen deshalb über recht unterschiedliche Attributfelder. Viele dieser Attributfelder wurden automatisch generiert, z.B. beim Export aus der Software GOCAD®. Für den durchzuführenden Generalisierungsvorgang haben sie keinerlei Nutzen oder weitere Bedeutung.

Die dritte Gruppe an Ausgangsdaten besteht aus digitalen (amtlichen) geologischen Karten unterschiedlicher Maßstäbe. Im Gegensatz zu den oben genannten Ausgangsdaten (Störungen) handelt es sich um heterogene Datensätze, die sowohl Linien (Störungen, Trennflächen) als auch Punkte (Symbole) und Flächen (geologische Einheiten) beinhalten. Derartige Datensätze können kostenfrei (als OpenData) über die Internetportale von den Staatlichen Geologischen Diensten bezogen werden. Dabei sind die Landeseinrichtungen für die großen Maßstäbe (etwa 1 : 25.000 bis 1 : 50.000) zuständig. Die mittleren und kleinen Maßstäbe stellt auch der Bund zur Verfügung (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). Im Rahmen dieses Projektes wurden Daten verschiedener Blätter der Geologischen Karten 1 : 25.000 (GK25), der Geologischen Übersichtskarten 1 : 200.000 (GÜK200), und die Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 1.000.000 (GK1000) auf ihre Eigenschaften untersucht. Sie bilden, als Serie betrachtet, das gleiche Gebiet in unterschiedlich starker (manueller) Generalisierung ab, sie können deshalb als Vorlage und zur Justierung einer automatisierten Generalisierung dienen. Ferner wurden einige Objekte (Linien und Flächen) der großmaßstäbigen GK25 (Blatt 6639) zur Überprüfung der entwickelten und verfügbaren Algorithmen und zur Ausarbeitung eines allgemeingültigen Verarbeitungs-Workflows benutzt. Die Daten der geologischen Karten aller Maßstäbe weisen Attributfelder auf, die für eine Generalisierung genutzt werden können. So kann man bei Störungen und Verwerfungen zwischen vermuteten und nachgewiesenen Objekten unterscheiden und somit eine Klassifizierung vornehmen, die die Sichtbarkeit der Objekte in kleinen Maßstäben beeinflusst.

## **7.5 Dateneigenschaften und Datenqualität**

Die drei Datentypen (Störungen aus der GeotIS-Hauptkarte, Störungen aus den Ansichten der Horizonttemperaturen und Störungen aus digitalen geologischen Karten) unterscheiden sich untereinander bezüglich Erfassungsart (nur in 2D oder in 3D, mit anschließendem 2D-Datenexport), Erfassungszeitpunkt (und den zu diesem Zeitpunkt verfügbaren geologischen Informationen), geometrischer Genauigkeit, Vollständigkeit und Umfang der Attribuierung. Allen drei Datentypen ist gemein, dass langgezogene Störungen häufig durch mehrere Linien abgebildet werden, die Störungen sind segmentiert. Diese Segmentierung ist für das Kartenbild nicht störend, man kann einzelne Segmente nicht erkennen und erfasst optisch nur eine einzige, langgezogene Störung.

Bei einer automatisierten Generalisierung, bei der die räumliche Ausdehnung einer Störung, mangels anderer bekannter Parameter, über die Sichtbarkeit dieser Störungen in verschiedenen Maßstäben entscheidet, ist dies von erheblicher Bedeutung. Entsprechende Datensätze müssen in Vorbereitung oder im Zuge einer Generalisierung entweder als zusammengehörend erkannt und markiert oder zusammengeführt (aggregiert) werden.

Neben segmentierten Störungen bereiten auch zu stark zusammengefügte (ungünstig aggregierte) Störungen Probleme bei einer automatisierten Generalisierung. Diese entstehen beispielsweise, wenn dreidimensionale Objekte (Flächen in GOCAD®) in zweidimensionale Objekte (Linien in ArcGIS®) umgewandelt werden. Insbesondere in dem Datensatz, der in den Vertikalschnitten und in den Ansichten der Horizonttemperaturen einblendbar ist, existieren einige Störungslinien mit wenig plausibler Geometrie. Es gibt zusammengesetzte Linien, in denen Teile einer Störung mit Teilen einer anderen Störung, die im annähernd rechten Winkel kreuzt, zu einer Linie verbunden sind (Abb. 7.1). Ein automatisiertes Erkennen solcher Linien ist mit erheblichem Aufwand verbunden, im Rahmen dieser Arbeit wurde darauf vorerst verzichtet.

Eine weitere, für die angestrebte automatisierte Generalisierung ungünstige Eigenheit des Datensatzes aus den Ansichten der Horizonttemperaturen ist die Tatsache, dass er teilweise identische Linien (Dubletten) enthält. Im Teildatensatz Mittlerer Buntsandstein (Solling-Formation, 3D-Modell Nordwestdeutschland) sind beispielsweise 331 Störungen enthalten, wovon jedoch 140 Dubletten sind. Bei einer Generalisierung, bei der die Anzahl der darzustellenden Störungen mit abnehmendem Maßstab nach einer festen Regel abnimmt, verfälschen die Dubletten das Ergebnis.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für eine regelgestützte, automatisierte Generalisierung einheitliche, qualitativ gute oder zumindest im Rahmen der Generalisierung bereinigte Eingangsdaten benötigt werden. Das im nächsten Abschnitt beschriebene Vorgehen bei der Generalisierung umfasst deshalb sowohl Schritte der Datenbereinigung als auch Schritte der Generalisierung.

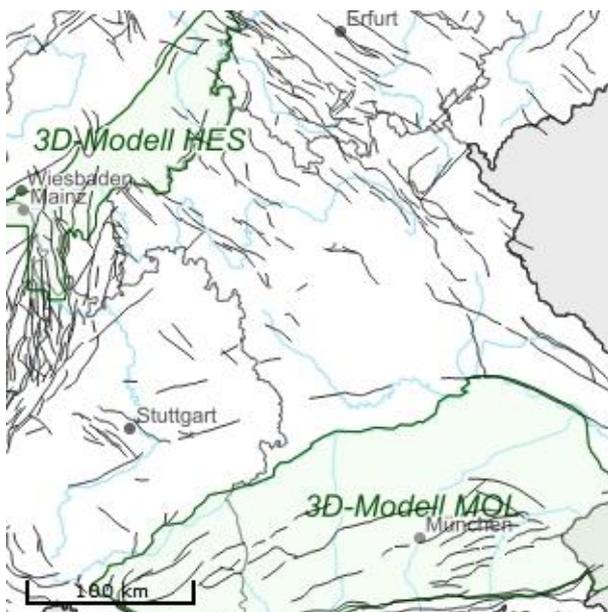
## **7.6 Methoden und deren Implementierung**

Im Allgemeinen kann man unterscheiden zwischen Operationen, die auf Punkte, Linien und Flächen anwendbar sind. Bei bekannten Algorithmen stehen topographische Karten im Fokus. Die Verwendung solcher Algorithmen für geologische Strukturen muss vorher verifiziert werden. Sollen Störungen bearbeitet werden, kommen nur Werkzeuge zur Linienbearbeitung in Frage. Die Reihenfolge der Operatoren ist bedeutend, denn sie beeinflusst das Ergebnis. Klassische Konfliktbehebung der Generalisierung mutiert zur Behebung von Geometriefehlern.

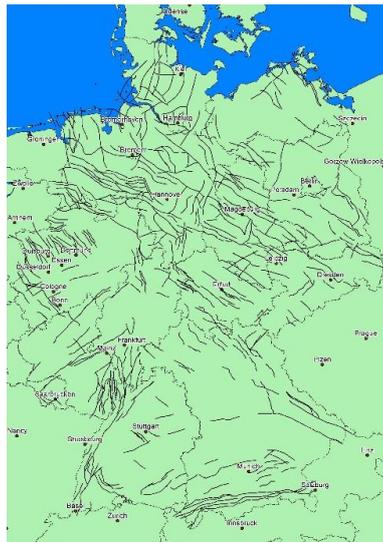
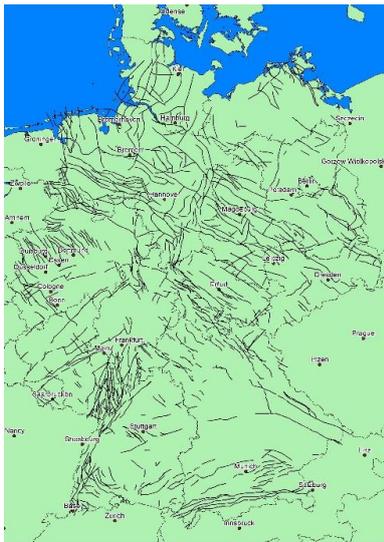
Da in den grundrissartigen Kartenansichten von GeotIS derzeit nur geologische Störungen in 2D dargestellt werden, konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf die Generalisierung eben dieser Strukturen. Sie werden als linienhafte Objekte behandelt und dementsprechend mit vektorbasierten und attributbasierten Operationen behandelt. Die Anzahl der ausgewählten Linien ergibt sich aus Töpfers Wurzelgesetz oder Auswahlkriterium (Li, 2006).



**Abb. 7.1:** Typische Datenfehler, die in dem Datensatz auftreten, der in Vertikalschnitten und in den grundrißartigen Ansichten der Horizonttemperaturen angezeigt werden.



**Abb. 7.2:** Darstellung von Störungen in der Hauptkartenansicht von GeotIS bei minimalem (links) und maximalem (rechts) Maßstab.



**Abb. 7.3:** Ergebnis der automatischen Generalisierung des Datensatzes, der in der Hauptkartenan-  
sicht von GeotIS angezeigt wird. Links oben das Original, danach die einzelnen Skalen.

## 7.7 Ergebnisse

Das Generalisierungswerkzeug GeneralisationTools für geologische Störungen wurde als ArcGIS® Toolbox mit Python realisiert. Diese Toolbox verfügt über eine Eingabe-Schnittstelle, mit der man die Datei mit den Eingangsdaten auswählen und den Dateinamen für die Ausgabe festlegen. Eine geografische Transformation muss nur dann angegeben werden, wenn aus einem anderen Bezugssystem als DHDN transformiert wird, beispielsweise aus ETRS89. Auf Wunsch lassen sich auch einzelne Generalisierungsparameter variieren oder bestimmte Optionen an- oder abwählen. Die Verarbeitung der Eingangsdaten erfolgt in fünf Schritten:

1. Initialisierung
2. Aggregation
3. Generalisierung
4. Anreicherung
5. Klassifizierung

In der Initialisierung werden die Eingangsdaten geprüft, bereinigt und, falls erforderlich, eine Transformation der Koordinaten vorgenommen. Sollen die Daten für GeotIS verwendet werden, erfolgt eine Transformation auf EPSG 31467. Außerdem werden Z- und M-Werte entfernt, da diese Merkmale nicht verarbeitet werden können. Im nächsten Schritt Aggregation werden Linien zusammengeführt (Dissolve). Im 3. Schritt Generalisierung erfolgt die Glättung (Smooth) und Vereinfachung (Simplification). Es stehen zwei Vereinfachungsalgorithmen zur Auswahl. Sowohl die Glättung als auch die Vereinfachung können durch Toleranzwerte variiert werden. In Schritt 4, Anreicherung, werden den Objekten neue Attributfelder (z. B. Geometrieattribute) hinzugefügt und mit vorgegebenen (initialen) Werten gefüllt. Tabelle 7.1 zeigt die Liste der Attributfelder.

**Tab. 7.1:** Vorgegebene und berechnete Felder im Schritt Anreicherung

RANKING	Rangfolge oder Gewichtung einer Störungslinie; Vorgegabewert ist 1 für alle Linien	vorgegeben
SCALE_1 bis SCALE_6	Schalter für Einordnung der Störung als sichtbar oder unsichtbar, in sechs aufeinander folgenden Maßstabsbereichen oder Zoomstufen	vorgegeben
F DISSOLVE	Dissolve-Feld für manuelle Zusammenführung über Attribute; Störungslinien, die in diesem Feld den gleichen Wert haben, können zusammengeführt werden	vorgegeben
PSEUDO_LEN	Pseudo-Länge jeder Störung, ergibt sich aus $PSEUDO\_LEN = LENGTH * RANKING$	vorgegeben
STRIKE	mittlere Streichrichtung der Störung	vorgegeben
MEAN_SEG_L	mittlere Segmentlänge oder mittlerer Abstand zwischen Linienstützpunkten	vorgegeben
LENGTH	Länge (wird in anderen Funktionen benötigt, Deaktivierung führt zum fehlerhaften Programmlauf)	berechnet
PART_COUNT	Anzahl der Parts	berechnet
POINT_COUNT	Anzahl der Punkte	berechnet
LINE_BEARING	Streichrichtung der Störung (Wertebereich 0° bis 180°) wird aus dem Azimut (Wertebereich 0° bis 360°) im Feld STRIKE berechnet	berechnet

Die Namen der Felder entsprechen den ArcGIS®-Vorgaben für Feature-Klassen. Für Shapefiles können die Namen geringfügig abweichen (z. B. PNT\_COUNT).

Im letzten Schritt Klassifizierung werden die Linien im Eingabe-Datensatz absteigend nach Länge sortiert und im Ausgabe-Datensatz gespeichert. Auch wird die Gesamtanzahl aller Linien für die Darstellung im Startmaßstab und die Anzahl der sichtbaren Linien in den Folgemaßstäben bestimmt.

In Abb. 7.2 sind die Störungen des Oberjura im Molassebecken einmal für den Originalmaßstab und einmal für den kleinsten Maßstab nach maximaler Generalisierung dargestellt. In Abb. 7.3 sind Originalkarte und fünf verschiedene Generalisierungsgrade für tiefreichende Störungen dargestellt, die mit der Toolbox GeneralisationTools automatisch erzeugt wurden.

## 7.8 Fazit

Mit der Toolbox GeneralisationTools kann in ArcGIS® automatisch und reproduzierbar die Generalisierung von geologischen Störungskarten für unterschiedliche Generalisierungsgrade durchgeführt werden. Hierfür wurden die verschiedenen Verarbeitungsschritte an die Anforderungen der Geologie angepasst. Für Spezialfälle können die Standard-Generalisierungsparameter und -Optionen für die einzelnen Verarbeitungsschritte individuell angepasst werden und ermöglichen so einen flexiblen Einsatz. Probleme bereiten jedoch noch falsch aggregierte Störungselemente in den Ausgangsdaten.

## 7.9 Literatur

- AGEMAR, T., TRIBBENSEE, K. (2018): GeotIS-Verbundmodell des Top-Malm im Bereich des nördlichen Vorlandbeckens der Alpen. *Z. Dt. Ges. Geowiss. (German J. Geol.)*, 169 (3): 335–341.
- AGEMAR, T., TRIBBENSEE, K., GÖRNE, S., OBST, K. (2018): 3D-Modell geothermischer Nutzhorizonte Nordostdeutschlands in GeotIS. *Z. Dt. Ges. Geowiss. (German J. Geol.)*, 169 (3): 343–351.
- ARTIOLI, G. P., CIARDI, G., GARBERI, M. L. & MARTELLI, L. (1995): The digitised geological cartography of the Emilia Romagna Region to scales 1 : 10 000 and 1 : 50 000: The cartographic generalization process. In: *Proceedings of the 17th International Cartographic Conference and the 10th Assembly of the International Cartographic Association*, September 3-9, Barcelona, Spain, 12 S.
- BRASSEL, K.E. & WEIBEL, R. (1988): A review and conceptual framework of automated map generalization. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2 (3): 229-244.
- DOUGLAS, D.H. & PEUCKER, T.K. (1973): Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a line or its caricature. *Canadian Cartographer* 10 (2), 112–122.
- DOWNS, T. C. & MACKANESS, W. A. (2002): An Integrated Approach to the Generalization of Geological Maps. *The Cartographic Journal*, 39 (2): 137–52.
- EDUARDES, A. & MACKANESS, W.A. (1999): Modelling Knowledge For Automated Generalisation of Categorical Maps - A Constraint Based Approach. In: *Third ICA*

- Workshop on Progress in Automated Map Generalization, Ottawa, Canada (12.08.1999 – 14.08.1999), 17 S.
- HAUNERT, J.-H. & WOLFF, A. (2010): Optimal and Topologically Safe Simplification of Building Footprints. Proceedings of the 18th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (ACM-GIS'10), November 2-5, 2010, San Jose, CA, USA.
- LI, ZHILIN (2006): Algorithmic Foundation of Multi-Scale Spatial Representation. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA.
- MCCABE, C. A. (2008): Vector Approaches to Generalizing Faults and Polygons in 1: 24,000 Geologic Maps: Santa Rosa, California, Case Study. Projektarbeit, 22 S.; Department of Geography, Pennsylvania State University. [https://www.geovista.psu.edu/publications/2008/CMcCabe\\_GeologicMapGeneralization.pdf](https://www.geovista.psu.edu/publications/2008/CMcCabe_GeologicMapGeneralization.pdf)
- PETZOLD, I., BURGHARDT, D. & BOBZIEN, M. (2006): Workflow management and generalisation services. In: Workshop of the ICA Commission on Map Generalisation and Multiple Representation. Portland, USA (25. Juni), 12 S.
- SAYIDOV, A. & WEIBEL, R. (2016): Constraint-based approach in geological map generalization. In: 19th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation. Helsinki, Finland (14.06.2016), 8 S.
- SAYIDOV, A. & WEIBEL, R. (2017): Automating geological mapping: A constraint-based approach. Proceedings of the 4th AGILE PhD School, Leeds, UK (30.10.2017 – 02.11.2017), 4 S.
- SCHUFF, J. (2019): Verfahren zur automatisierten Generalisierung flächenhafter Geofachdaten. Masterarbeit, 91 S.; Paris Lodron Universität Salzburg.
- SCHULZ, R., KNOPF, S., SUCHI, E. & DITTMANN, J. (2013): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und tiefer Geothermie – Endbericht. – LIAG u. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0131310; Hannover.
- SMIRNOFF, A., PARADIS, S. J. & BOIVIN, R. (2008): Generalizing surficial geological maps for scale change: ArcGIS tools vs. cellular automata model. *Computers & Geosciences*, 34 (11): 1550–68.
- SMIRNOFF, A., HUOT-VÉZINA, G., PARADIS, S. J. & BOIVIN, R. (2012): Generalizing geological maps with the GeoScaler software: The case study approach. *Computers & Geosciences*, 40: 66–86.
- STOTER, J. E., VAN ALTENA, V., POST, M., BURGHARDT, D. & DUCHÊNE, C. (2016): Automated generalisation within NMAs in 2016. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41: 647–652.
- SUCHI, E., DITTMANN, J., KNOPF, S., MÜLLER, C. & SCHULZ, R. (2014): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CO<sub>2</sub>-Einlagerung (CCS) und Tiefer Geothermie in Deutschland. *Z. Dt. Ges. Geowiss. (German J. Geosci.)*, 165 (3), 439–453.
- ZHANG, J., WU, C. & WANG, L. (2016): A Conceptual Framework for the Automated Generalization of Geological Maps Based on Multiple Agents and Workflow. *IEEE Access*, 4: 6374–6385.
- ZHANG Q. (2005): Road Network Generalization Based on Connection Analysis. In: *Developments in Spatial Data Handling*. Springer, Berlin, Heidelberg.

## 8 Interaktives E-Learning-Portal

### 8.1 Konzept und Umsetzung des E-Learning-Portals

Die Entwicklung des interaktiven E-Learning-Portals für die tiefe Geothermie erfolgte zu Beginn in Anlehnung an die Broschüre „Tiefe Geothermie“ (STOBER ET AL. 2016). Allerdings wurde schnell klar, dass die grundlegende Gliederung neu aufgebaut werden musste, um unnötige Wiederholungen zu vermeiden. Neben bewährten Inhalten aus der Broschüre wurden neue Themen aufgenommen oder bekannte Themen vertieft. Das Ziel war eine multimediale Präsentation technischer und geowissenschaftlicher Zusammenhänge zur geothermischen Energienutzung, ergänzt durch interaktive Übungen und Aufgaben, um den Lernerfolg selbst zu kontrollieren. Das Portal richtet sich an Personen mit naturwissenschaftlichem Hintergrund.

**GeotIS** Geothermisches Informationssystem  

GeotIS über uns Info

### E-Learning

Willkommen beim E-Learning-Portal auf GeotIS. Hier finden Sie mehrere Lernkapitel zum Thema Geothermie. Der Inhalt der Kapitel ist für Personen mit naturwissenschaftlichen, vorzugsweise geowissenschaftlichen Vorkenntnissen ausgelegt.

Zum Selbststudium empfiehlt es sich, die Kapitel in der angegebenen Reihenfolge durchzugehen. Zu Beginn wird eine kurze Einführung zum Thema tiefe Geothermie über verschiedene Lernmodule vermittelt. Ein Teil der Einführung in die Thematik ist z. B. die Klassifizierung geothermischer Systeme und die Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. Darauf folgen die Grundlagen der tiefen Geothermie. Dazu zählen z. B. die Eigenschaften der Thermalwasser und geothermische Reservoirereigenschaften. Am Ende wird anhand von Beispielen die Nutzung tiefer Geothermie in Deutschland vorgestellt. Jedes Kapitel ist unterschiedlich interaktiv gestaltet und beinhaltet Testaufgaben zur Überprüfung des neu erworbenen Wissens. Ein großer Teil der Inhalte (Texte, Abbildungen) basiert auf der Broschüre "Tiefe Geothermie - Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland" (Stober et al. 2016).

Wählen Sie ein Kapitel der folgenden Auflistung aus und erfahren Sie mehr zur tiefen Geothermie. Viel Erfolg.

- 1. Einführung**
  - 1.1 Definition geothermischer Energie und Klassifizierung geothermischer Systeme
  - 1.2 Geothermische Energiestatistik und Energieverbrauch Deutschlands
  - 1.3 Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland
- 2. Grundlagen der tiefen Geothermie**
  - 2.1 Eigenschaften der Thermalwässer
  - 2.2 Hydraulische Eigenschaften der Zielformation
  - 2.3 Geothermische Reservoirereigenschaften
  - 2.4 Thermische Eigenschaften der oberen Erdkruste
  - 2.5 Messverfahren
- 3. Hydrothermale Nutzung in Deutschland**
  - 3.1 Norddeutsches Becken
  - 3.2 Oberrheingraben
  - 3.3 Süddeutsches Molassebecken
  - 3.4 GeotIS

**Xerte**  
an apereo community project  
Xerte (© <https://www.xerte.org.uk/>)

**Nutzung der hydrothermalen Ressourcen in Deutschland**  
Ressourcen und Nutzungsmöglichkeiten

Auszug eines Lernmoduls im GeotIS

**Autorenteam:**

- Dr. Thorsten Agemar
- Dr. Thomas Fritzer
- Dr. Cindy Kunkel
- Dr. Karsten Obst
- Dr. Rüdiger Schulz
- Prof. Dr. Ingrid Stober
- Dr. Josef Weber
- Michael Wolf

**Technische Unterstützung:**

- Michael Wolf
- Jessica-Aileen Alten
- Jens Gramenz

Gefördert durch:

 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

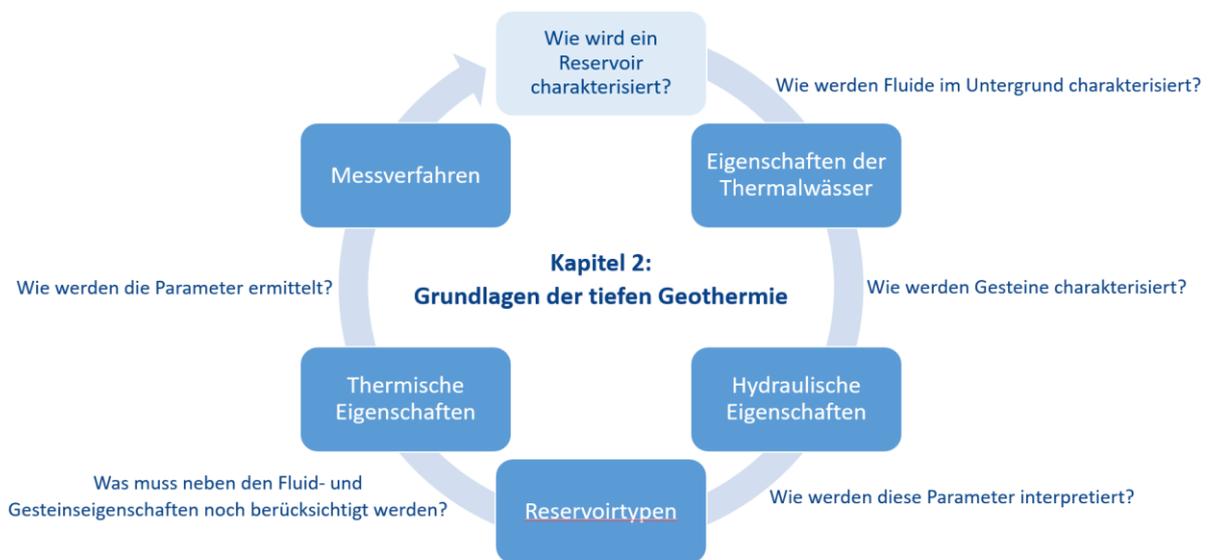
DOI: 10.17616/R3M89J

Impressum  
Datenschutz  
Nutzungsbedingungen

Abb. 8.1: Landing-Page für das E-Learning-Portal auf der GeotIS-Homepage.

Das E-Learning-Portal ist abrufbar über das Info-Menü der GeotIS-Startseite oder direkt über die URL <https://www.geotis.de/homepage/e-learning>. Dort findet sich eine Landingpage mit einem erklärenden Text und einer Anleitung für das Selbststudium (Abb. 8.1). Ebenfalls aufgeführt sind das gesamte E-Learning Team unterteilt nach Autoren und technischer Unterstützung. Auf der ersten Seite eines jeden Moduls findet sich jeweils ein Hinweis auf die verantwortlichen Autoren dieses Moduls.

Die Gliederung des E-Learning-Portals (Abb. 8.1) ist so angelegt, dass zuerst eine Einführung zur Definition geothermischer Energie und deren Nutzungen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland erarbeitet werden sollen (Kapitel 1). Darauf folgen die Grundlagen der tiefen Geothermie, die vor allem die geologischen und hydrologischen Eigenschaften erklären sowie einen Überblick über verschiedene Messmethoden zur Bestimmung dieser Eigenschaften geben. Das dritte Kapitel befasst sich mit den drei Hauptregionen in Deutschland, die das größte geothermische Potenzial aufweisen. Außerdem wird das geothermische Informationssystem GeotIS zur Datenrecherche vorgestellt.



**Abb. 8.2:** Beispiel des Konzepts für Kapitel 2: Grundlagen der tiefen Geothermie. Die einzelnen Module leiten durch Fragen sinnvoll zueinander über.

Der Aufbau der einzelnen Kapitel folgt jeweils einem bestimmten Konzept. Beim Kapitel 2: Grundlagen der tiefen Geothermie (Abb. 8.2) wird zum Beispiel von einer Grundfrage „wie wird ein Reservoir charakterisiert?“ ausgegangen, die durch verschiedene Module, die aufeinander aufbauen und durch überleitende Fragestellungen miteinander verknüpft sind, beleuchtet und beantwortet wird.

Um diese Konzepte in ein E-Learning-Portal zu überführen, wurde die Software „XERTE Online Toolkits“ (<https://xerte.org.uk>) benutzt, das auf dem internen GeotIS-Server installiert wurde. XERTE wird von der Universität Nottingham entwickelt und steht als OpenSource Software zur Verfügung. Es ist vor allem durch seine leichte Bedienbarkeit und seine Vielzahl von Gestaltungsmöglichkeiten auch ohne Programmierkenntnisse erste Wahl. Dank des OpenSource-Codes ist es individuell anpassbar.

Auch eine Bearbeitung durch verschiedene Autoren an den gleichen Modulen ist implementiert. Für Hilfestellungen steht eine aktive Community und ein Forum zur Verfügung.

Ein Auszug aus dem E-Learning-Portal für die tiefe Geothermie (Abb. 8.3) zeigt verschiedene Darstellungs- und Gestaltungsmöglichkeiten, die in diesem Projekt umgesetzt wurden.

**Geothermische Reservoreigenschaften**  
Was gehört zusammen?  
Ordnen Sie die Begriffe zu!

fluviatile Rinnen  
Sandsteinreservoir  
Kalksteinreservoir  
Aquifer  
Aquitarde  
Grundwasserleiter  
Grundwasserungesättigter

**Definition der geothermischen Energie und Klassifizierung geothermischer Systeme**  
Dubletten  
Das klassische System einer Dublette besteht aus zwei Vertikalbohrungen. Heute werden die Flöden- und Ringbohrung häufig von einem Bohrturm aus abgeteuert, wobei der Nutzhorizont durch absteigende Bohrungen erschlossen wird. Die hydraulische Anbindung an den Aquifer ist über geringere die bei Vertikalbohrungen, da der Aquifer auf einer größeren Bohrstrecke erschlossen wird. Die überlagerte Anlage benötigt zudem weniger Platz. Alle technischen Einrichtungen können an einem Ort installiert werden, lange überlagerte Verbindungsleitungen werden vermieden. Die Technik der hydrothermalen Nutzung mittels Dubletten ist weitgehend ausgereift. Besonders in Frankreich, aber auch in Italien, Polen, Österreich oder Deutschland (z. B. Neustadt-Glewe, Waren, Unterhaching, Bruchsal) existieren bereits seit einigen Jahren, teilweise seit Jahrzehnten, hydrothermale Anlagen. Das geförderte und nach der Abkühlung wieder geothermisch Wasser zirkuliert überlagert in einem geschlossenen Kreislauf, der oft mittels Stickstoff unter Druck gehalten werden muss, um Ausfällungen von Mineralen aus dem hochsalinen Wasser zu verhindern. Das mit Hilfe einer Tauchpumpe an die Oberfläche geförderte Thermalwasser erst über einen Wärmetauscher geleitet und die gewonnene Wärme in einen sekundären Kreislauf, beispielsweise in ein Fernwärmenetz, eingespeist.

Beschreiben Sie das Schema einer Dublette durch Drag & Drop!  
Abnehmer  
Abnehmer

**Physikalische Eigenschaften der Zielformation**  
 $k_f$  vs.  $\tau$   
unterscheiden sich Permeabilität, Durchlässigkeitsbeiwert und Transmissivität? Sortieren Sie folgende Parameter!

	Permeabilität $k_f$	Durchlässigkeitsbeiwert $k_f/\rho$	Transmissivität $T$
Berücksichtigte Eigenschaften	Gesteinseigenschaften	Gesteinseigenschaften + Fluideigenschaften	Gesteinseigenschaften
Bestimmung durch:	Messungen an Bohrerbohrschneidungen	Auswertung von Pump- und Injektionsversuchen	Auswertung von Pump- und Injektionsversuchen
Wahrscheinlich für geothermische Nutzung	$> 10^{-18}$ m <sup>2</sup>	$> 10^{-16}$ m/s	$> 10^{-12}$ m/s
Charakteristischer Gesteinsverband	Bevorzugung: Tertiäres Karstkarbonate	ungesättigtes, ungesättigtes Gestein	Belastung über alle Inhomogenitäten hinweg
Ausdehnungsbereich	Gleichzeitigkeit mit der ein Fluid einen 1 m breiten, vertikalen Zylinder des Aquifers mit einem hydraulischen Gradienten von 1 durchfließt	Abhängigkeit der Ergiebigkeit eines Aquifers und damit der zu erwartenden Peltzlast	Auslagen über das Volumen des im Gestein gespeicherten Fluids und über den Wärmeausgleich in der Gesteinsmatrix

Überprüfen

Abb. 8.3: Beispiele für Übungen und Gestaltungsmöglichkeiten, die im Rahmen der Erstellung des E-Learning Portals für die tiefe Geothermie in XERTE umgesetzt wurden.

## 8.2 Literatur

STOBER, I., FRITZER, T., OBST, K., AGEMAR, T. & SCHULZ, R. (2016): Tiefe Geothermie - Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. 4. Aufl. Hrsg. LIAG, Hannover.

## 9 IEA-GIA: Energiestatistiken und Datensammlungen

### 9.1 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Ende 2010 übernahm das LIAG die Funktion eines Operating Agent im Rahmen des IEA Geothermal TCP. Dabei handelt es sich um ein internationales Netzwerk unter dem Dach der Internationalen Energieagentur (IEA) mit dem Ziel, die Nutzung der geothermischen Energie weltweit zu fördern und Forschungsvorhaben zu unterstützen. Für die Umsetzung der operativen Ziele ist ein Exekutivkomitee (ExCo) aus Vertretern der aktuell 13 Mitgliedsstaaten, der Europäischen Kommission sowie 2 sogenannten Sponsoren verantwortlich. Aufgaben und Ziele sind unter anderem die Förderung internationaler Kooperationen im Bereich der Forschung und Entwicklung, Wissenstransfer und Informationsaustausch, Handlungsempfehlungen für die Politik und die Unterstützung kooperativer Forschungsaktivitäten.

Die Umsetzung der Arbeitsprogramme erfolgt in Working Groups, die jeweils von einem oder mehreren Annex Leadern geleitet werden. Die Leitung der bereits Ende 2010 initiierten Working Group 10 – „Data Collection and Information“ wird im Projekt „Geofaces“ von einem Mitarbeiter fortgeführt, der für die inhaltliche Umsetzung der Ziele verantwortlich ist. Dazu gehört die Sammlung von Daten über die Nutzung geothermischer Energie in den Mitgliedsländern (sowie einigen Nicht-Mitgliedsländern) nach einheitlichen Kriterien und die Veröffentlichung der Daten in Form der jährlich erscheinenden „Power Reports“ und „Trend Reports“. Im Projektzeitraum wurden drei „Trend Reports“ für die Berichtsjahre 2014, 2015 und 2016/17 sowie zwei „Power Reports“ für die Berichtsjahre 2016 und 2017 fertiggestellt.

Außerdem übernahm das LIAG als Operating Agent im Mai 2015 die Leitung der neu geschaffenen Working Group 13 – „Emerging Geothermal Technologies“. Der Leiter der Arbeitsgruppe wird ebenfalls aus dem Projekt „Geofaces“ gestellt. Der sogenannte Task A1 - „Exploration - Geothermal Playtypes“ der Arbeitsgruppe 13, der ebenfalls vom LIAG geleitet wird, war im Antragszeitraum sehr aktiv und hat an etlichen Workshops und Symposien teilgenommen und zusammen mit Mitgliedern des IEA Geothermal das Playtype Konzept weiterentwickelt. Der Task B – „Drilling Technologies“ produzierte ein Video über verschiedene Bohrmethoden, das 2019 erstmals im Zuge des Central America Symposiums in Costa Rica präsentiert wurde.

Im Rahmen der Tätigkeiten für das IEA Geothermal wurden außerdem folgende Arbeiten übernommen:

- Recherche internationaler Datenquellen
- Bereitstellung deutscher Daten für den WG 10 Länderreport
- Teilnahme an ExCo-Meetings mit Berichten an das ExCo
- Vorbereitung und Leitung von Working Group-Meetings
- Verfassung von Beiträgen für die IEA Geothermal Jahresberichte
- Teilnahme an Konferenzen und Erstellung von Präsentationen
- Umfangreiche internationale Korrespondenz
- Vernetzung mit weiteren internationalen Organisationen (z. B. IGA, IRENA)

- Mitglied des GeoStat Advisory Boards (Angleichung internationaler Geothermie-Statistiken verschiedener Organisationen)

## 9.2 Printmedien

Angesichts des weiterhin bestehenden großen Interesses an der deutsch- und englischsprachigen Auflage der Broschüre „Tiefe Geothermie – Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland“ wurde bereits 2015 das Manuskript der deutschen Fassung überarbeitet. Anfang 2016 erfolgte die Fertigstellung und der Druck der nun 4. deutschen Auflage, die als LIAG-Publikation mit der ISBN 978-3-9817896-0-7 erschienen ist. Die Fertigstellung einer 2. englischen und einer 1. spanischen Fassung hat sich aufgrund organisatorischer Probleme und Schwierigkeiten mit der spanischen Übersetzung leider verzögert und konnte nicht mehr im Rahmen des Projektes „Störtief“ abgeschlossen werden. Die Fertigstellung wurde jedoch im aktuellen Folgeprojekt abgeschlossen und 2017 in englischer und spanischer Sprache publiziert und gedruckt.

2018 wurde ein Positionspapier mit dem Titel „Die Rolle der tiefen Geothermie bei der Wärmewende. Wie Deutschland 60 % erneuerbare Wärme bis 2050 schaffen könnte“ publiziert. Gekürzte Fassungen dieses Positionspapiers erschienen in der Verbandszeitschrift *Geothermische Energie* und in der Fachzeitschrift *bbr – Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie*. In diesem Positionspapier wird dargestellt, dass ein Ausbau der Tiefengeothermie in Deutschland bis 2050 es ermöglichen könnte, hierüber 17 % des Wärmebedarfs zu decken. Grundvoraussetzung dafür wäre, dass die Tiefbohraktivität von Deutschland auf das Niveau von 1959 in Westdeutschland angehoben und ausschließlich der Erschließung geothermischer Energie statt fossiler Energie dienen würde.

Zusätzlich kann sich die Öffentlichkeit über die Nutzung der Geothermie mit Hilfe der neuen Broschüre „Wärmewende mit Geothermie – Möglichkeiten und Chancen in Deutschland“ informieren. Die Broschüre stellt die Möglichkeiten und Chancen der Wärmewende komprimiert in einer deutschen und einer englischen Version vor, und wird mittlerweile erfolgreich für die Beratung von Politikern und zur Information interessierter Bürger genutzt.

## 10 Publikationen und Vorträge

Im Folgenden werden alle im Rahmen des Projektes erstellten Publikationen, Poster und Vorträge aufgelistet.

### 10.1 Publikationen

#### 10.1.1 Zeitschriften

- AGEMAR, T., HESE, F., MOECK, I. & STOBBER, I. (2017): Kriterienkatalog für die Erfassung tieferreichender Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland. ZDGG 168(2), 285-300.
- AGEMAR, T., TRIBBENSEE, K. (2018): GeotIS-Verbundmodell des Top-Malm im Bereich des nördlichen Vorlandbeckens der Alpen. - ZDGG 169(3), S.335-341. DOI: 10.1127/zdgg/2018/0126.
- AGEMAR, T., SUCHI, E., MOECK, I. (2018): Die Rolle der tiefen Geothermie bei der Wärmewende. Wie Deutschland 60 % erneuerbare Wärme bis 2050 schaffen könnte. – Geothermische Energie, 89.
- AGEMAR, T., SUCHI, E., MOECK, I. (2018): Was kann die Geothermie zur Wärmeversorgung beitragen, um die Klimaziele für 2050 zu erreichen? - bbr Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie 69, 12-2018. S. 68-73.
- AGEMAR, T., TRIBBENSEE, K., GÖRNE, S., OBST, K. (2018): 3D-Modell geothermischer Nutzhorizonte Nordostdeutschlands in GeotIS. – ZDGG, DOI: <https://doi.org/10.1127/zdgg/2018/0127>
- AGEMAR T., WEBER J. & MOECK I. (2018): Assessment and Public Reporting of Geothermal Resources in Germany: Review and Outlook. - Energies 11(2), 332; DOI: <https://doi.org/10.3390/en11020332>
- KUDER, J. (2018): Assessment of the Geothermal Potential of Fault Zones in Germany by Numerical Modelling. – ZDGG, DOI: <https://doi.org/10.1127/zdgg/2018/0130>.
- KUNKEL, C., AEHNELT, M., PUDLO, D., KUKOWSKI, N., TOTSCHKE, K. U. & GAUPP, R. (2018): Subsurface aquifer heterogeneities of Lower Triassic clastic sediments in central Germany. - Marine and Petroleum Geology, 97: 209-222.
- KUNKEL, C., AGEMAR, T. & STOBBER, I. (2019): Geothermisches Nutzungspotential der Buntsandstein- und Keuperaquifere im NO Bayerns. – Grundwasser 24, 251-267. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00767-019-00430-1>
- Moeck, I., Agemar, T., Suchi, E., Weber, J. & Bracke, R. (2016) Geothermie in Deutschland - Installierte Leistung und Potential. - Geothermische Energie, Sonderheft Geothermie 2030, Nr. 84, Bundesverband Geothermie.
- MOECK, I., DUSSEL, M., AGEMAR, T. & WEBER, J. (2018/2019): Geothermie in Bayern – Installierte Leistung und Ausbaupotenzial. Geowissenschaftliche Rahmenbedingungen für die Wärmewende. - In: Geothermie in Deutschland – Profile, Porträts, Perspektiven. media mind GmbH & Co. KG, München.
- MOECK, I., DUSSEL, M., WEBER, J., SCHINTGEN, T. & WOLFGGRAMM, M. (2019): Geothermal play typing in Germany, case study Molasse Basin: A modern concept to categorize geothermal resources related to crustal permeability. - Netherlands Journal of Geosciences. 98, E14. DOI: <https://doi.org/10.1017/njg.2019.12>

SUCHI, E., AGEMAR, T. & VON HARTMANN, H. (2018): 3D-Modellierung einer Störungszone in geothermisch relevantem Gebiet anhand von 3D-Seismik unter Berücksichtigung geothermischer Nutzungsaspekte. – ZDGG, DOI: <https://doi.org/10.1127/zdgg/2018/0125>.

WEBER, J., ALTEN, J.-A. & MOECK, I. (2019): Mitteltiefe Geothermie als zentraler Baustein der Wärmewende in Deutschland. - bbr Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie, 70, 05-2019: 64–71; Bonn.

#### 10.1.2 Broschüren

STOBER, I., FRITZER, T., OBST, K., AGEMAR, T. & SCHULZ, R. (2017): Deep Geothermal Energy – Principles and Application Possibilities in Germany. 2. akt. Aufl., 87 Seiten; Hannover (LIAG).

STOBER, I., FRITZER, T., OBST, K., AGEMAR, T. & SCHULZ, R. (2017): Energía Geotérmica Profunda – Fundamentos y posibilidades de usos en Alemania. 1. Auflage, 87 Seiten; Hannover (LIAG).

WEBER, J., MOECK, I. (2018): Wärmewende mit Geothermie – Möglichkeiten und Chancen in Deutschland. 1. Auflage, 8 Seiten; Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover.

WEBER, J. & MOECK, I. (2019): Heat Transition with Geothermal Energy – Chances and Opportunities in Germany. - 1. Englische Auflage, 8 Seiten; Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover.

#### 10.1.3 Vortragsveröffentlichungen (Proceedings)

AGEMAR, T. (2019): Statistical Analyses of Subsurface Temperature Data and Correction Methods. - Proceedings European Geothermal Congress, 11.-14.06.2019; Den Haag, The Netherlands, 6 p.

ALTEN, J.-A., AGEMAR, T., GRAMENZ, J., TRIBBENSEE, K. & WOLF, M. (2019): GeotIS: Free Access to Maps and 3D Models for Geothermal Project Planning in Germany. - Proceedings European Geothermal Congress, 11.-14.06.2019; Den Haag, The Netherlands, 9 p.

KUDER, J. (2019): Assessment of the geothermal potential of fault zones in Germany by numerical modelling. - Proceedings European Geothermal Congress, 11.-14.06.2019; Den Haag, The Netherlands. 5 p.

KUNKEL, C. & AGEMAR, T. (2018): Geothermal Resources and Energy Storage in Northern Bavaria, Germany. – Ext. abstract, 80th EAGE Conference and Exhibition 2018. 11-15 June 2018, Copenhagen.

KUNKEL, C. & AGEMAR, T. (2019): Hydraulic Characterization of Potential Geothermal Reservoirs in the North German Basin. - Proceedings European Geothermal Congress, 11.-14.06.2019; Den Haag, The Netherlands. 8 p.

MOECK, I., BRACKE, R. & WEBER, J. (2019): The energy transition from fossil fuels to geothermal energy – a German case study. - Accepted abstract for World Geothermal Congress 2020.

SONG, Y., LINK, K., YASUKAWA, K. & WEBER, J. (2019): Proposal of New Data Collecting Spreadsheet for Geothermal Heat Pump Statistics: An Outcome of IEA Geothermal Working Group Activities. - Accepted abstract for World Geothermal Congress 2020.

- SUCHI, E. & AGEMAR, T. (2019): Development of 3D structural models of geothermal usable horizons in the area of Northwestern Germany. - Proceedings European Geothermal Congress, 11.-14.06.2019; Den Haag, The Netherlands, 7 p.
- WEBER, J., BORN, H. & MOECK, I. (2019): Geothermal Energy Use, Country Update for Germany 2016 – 2018. - Proceedings European Geothermal Congress, 11.-14.06.2019; Den Haag, The Netherlands.
- WEBER, J., BORN, H., PESTER, S. & MOECK, I. (2019): Geothermal Energy Use in Germany, Country Update 2015-2019. - Accepted abstract for World Geothermal Congress 2020.
- Weber, J., Ganz, B., Sanner, B. & Moeck, I. Geothermal Energy Use, Country Update for Germany. - Proceedings European Geothermal Congress 2016, 19.-24.09.2016; Strasbourg, Frankreich.
- WEBER, J. & WISSING, L. (2019): Ten years of Geothermal Trend Reporting and Statistics by IEA Geothermal. - Accepted abstract for World Geothermal Congress 2020.

#### 10.1.4 Poster

- AGEMAR, T. (2017): The Story of the Geothermal Information System. 15.-16.05.2017; Uni Göttingen, Deutschland.
- AGEMAR, T. (2017): Bestimmung geothermischer Ressourcen und Reserven in Deutschland. - Poster, Austauschitzung, 25.-26.10.2017; Hannover.
- AGEMAR, T. (2019): GeotIS is Breaking New Ground, 9<sup>th</sup> EUREGEO - Geology goes digital, 14.-16. Mai 2019, Hof.
- AGEMAR, T. (2019): Statistical Analyses of Subsurface Temperature Data and Correction Methods. - European Geothermal Congress, 11.-14.06.2019; Den Haag, The Netherlands.
- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., GRAMENZ, J., GORLING, L., KADNER, C., KUDER, J., KUNKEL, C., SUCHI, E., TRIBBENSEE, K. & WEBER, J. (2016): Principles of Geothermal Information Systems. LIAG-Austauschitzung, 09.-10.11.2016; Hannover.
- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., GRAMENZ, J., KADNER, C., KUDER, J., KUNKEL, C., MOECK, I., SUCHI, E., TRIBBENSEE, K. & WEBER, J. (2017): Geothermisches Informationssystem für Deutschland. - 9. Norddeutscher Geothermietag, Hannover.
- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., GRAMENZ, J., KUDER, J., KUNKEL, C., MOECK, I., SUCHI, E., TRIBBENSEE, K., WEBER, J., WOLF, M. (2018): Geothermisches Informationssystem für Deutschland. - 10. Norddeutscher Geothermietag, 16.5.2018, Hannover.
- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., KUNKEL, C., SUCHI, E., WEBER, J. (2018): Neue GeotIS-Daten. - Der Geothermiekongress DGK 2018, 27.-29. November 2018, Essen.
- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., VON HARTMANN, H., KADNER, C., KUDER, J., MOECK, I., SUCHI, E., TRIBBENSEE, K., WEBER, J. & GORLING, L. (2016): Die Rolle von tiefreichenden Störungszonen bei der geothermischen Energienutzung. LIAG-Austauschitzung, 09.-10.11.2016; Hannover.
- AGEMAR, T. & SCHELLSCHMIDT, R. (2017): 3D-Temperaturmodell von Deutschland. 15.-16.05.2017; Uni Göttingen, Deutschland.

- ALTEN, J.-A. (2018): GEOTHERMIK UND INFORMATIONSSYSTEME | Informationssysteme und Digitalisierung. - Workshop DGG- Arbeitskreis- Geothermie, 08.-09.11.2018, Johanniterhaus Wennigsen.
- ALTEN, J.-A. (2018): GEOTHERMIK UND INFORMATIONSSYSTEME | Informationssysteme und Digitalisierung. - LIAG-Austauschsitzung, 07.-08.11.2018; Hannover.
- ALTEN, J.-A., AGEMAR, T., GRAMENZ, J., TRIBBENSEE, K. & WOLF, M. (2019): GeotIS: Free Access to Maps and 3D Models for Geothermal Project Planning in Germany. - European Geothermal Congress, 11.-14.06.2019; Den Haag, The Netherlands.
- KUDER, J. (2017): Assessment of the geothermal potential of fault zones in Germany by numerical modelling. - Poster, European Geosciences Union General Assembly, 23.-28.04.2017; Wien, Österreich.
- KUDER, J. (2018): Assessment of the Geothermal Potential of Fault Zones in Germany by Numerical Modelling. - LIAG-Austauschsitzung, 07.-08.11.2018; Hannover.
- KUNKEL, C. (2017): Charakterisierung geothermischer Ressourcen im Bereich von Grenzflächen – Erfassung hydraulischer Daten. – Poster am LIAG Messestand auf der GeoTHERM 2017.
- KUNKEL, C. & AGEMAR, T. (2019): Geothermische Reservoirs im Nordwestdeutschen Becken: hydraulische Eigenschaften und geothermische Potentiale. - 11. Norddeutsche Geothermietagung, 15.05.2019; Hannover.
- KUNKEL, C., AGEMAR, T. & MOECK, I. (2017): Hydraulische Eigenschaften und diagenetische Änderungen geothermischer Reservoirs in NW-Deutschland. - Poster, Der Geothermiekongress DGK 2017, 12.-14.09.2017; München.
- SUCHI, E. (2018): 3D-Strukturmodelle geothermisch nutzbarer Horizonte im Bereich Nordwestdeutschlands. - - Der Geothermiekongress DGK 2018, 27.-29. November 2018, Essen.
- SUCHI, E. & AGEMAR, T. (2019): Development of 3D structural models of geothermal usable horizons in the area of Northwestern Germany. - European Geothermal Congress, 11.-14.06.2019; Den Haag, The Netherlands.
- SUCHI, E., AGEMAR, T. & VON HARTMANN, H. (2016): Weiterentwicklung geothermischer 3D-Strukturmodelle unter besonderer Berücksichtigung von Störungen. Der Geothermie Kongress 2016, 30.11.-01.12.2016; Essen.
- SUCHI, E. & GEOTIS-TEAM (2019): Dreidimensionale Erarbeitung von Diskordanzflächen für Nordwestdeutschland als Zusatzinformation bei der Bewertung geothermischer Nutzhorizonte. - 11. Norddeutsche Geothermietagung, 15.05.2019; Hannover.
- WEBER, J. (2017): Working Group 10 – Data Collection and Information: Collection and publication of data on geothermal energy uses, trends and developments in IEA Geothermal member countries. – Poster am LIAG Messestand und IEA Geothermal Messestand auf der GeoTHERM 2017.
- WEBER, J. (2017): Working Group 10 – Data Collection and Information: Collection and publication of data on geothermal energy uses, trends and developments in IEA Geothermal member countries. 15.-16.05.2017; Uni Göttingen, Deutschland.
- WEBER, J. (2018): Working Group 10 – Data Collection and Information: Collection and publication of data on geothermal energy uses, trends and developments in IEA

Geothermal member countries. – Poster am IEA Geothermal Messestand auf der GeoTHERM 2018.

WEBER, J. (2019): Working Group 10 – Data Collection and Information: Collection and publication of data on geothermal energy uses, trends and developments in IEA Geothermal member countries. - Messestand des IEA Geothermal auf der GeoTHERM 2019.

WEBER, J. & BORN, H. (2018): Geothermische Nutzung in Deutschland 2017/2018. - Der Geothermiekongress DGK 2018, 27.-29. November 2018, Essen.

WEBER, J., GANZ, B., SANNER, B. & MOECK, I. (2016): Geothermal Energy Use, Country Update for Germany. - Poster, European Geothermal Congress 2016, 19.-24.09.2016; Strasbourg, France.

WEBER, J. & GEOTIS-TEAM (2016): European Geothermal Congress 2016. - 19.-24.09.2016, Strasbourg, France, Messestand IEA Geothermal, 1 Annex 10 Poster & Trend Report.

WEBER, J. & LINK, K. (2017): The IEA Geothermal Trend Report - an Annual Survey on Geothermal Applications and Developments. – Poster, Der Geothermiekongress, 12.-14.09.2017; München.

WEBER, J. & LINK, K. (2017): The IEA Geothermal Trend Report - an Annual Survey on Geothermal Applications and Developments. – Poster, Austauschsitzung, 25.-26.10.2017; Hannover.

#### 10.1.5 Vorträge

AGEMAR, T. (2017): 'Das neue Standortauswahlgesetz: Mit welchen Ausschlussgebieten muss die Tiefengeothermie in Deutschland rechnen?' Workshop 'Auswirkungen des StandAG auf die Genehmigung von Geothermieprojekten', Bundesverband Geothermie, Berlin.

AGEMAR, T. (2017): Das neue GeotIS. - Festkolloquium "10 Jahre GeotIS", 25.10.2017, Hannover.

AGEMAR, T. (2019): Preparation of Input Data: Corrections of Bottom Hole Temperatures. - Joint Knowledge Exchange Workshop on Temperature Modelling (GeoERA, HotLime), 23./24. Januar, Zagreb, Kroatien.

AGEMAR, T. (2019): Methods of geostatistical temperature modelling – Example GeotIS. - Joint Knowledge Exchange Workshop on Temperature Modelling (GeoERA, HotLime), 23./24. Januar, Zagreb, Kroatien.

AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., GRAMENZ, J., GORLING, L., KADNER, C., KUDER, J., SUCHI, E., TRIBBENSEE, J. & WEBER, J. (2016): Data Management and Visualisation of 3D-Objects in the Geothermal Information System GeotIS. 3rd European Meeting on 3D Geological Modelling, 16.-17.06.2016; Wiesbaden.

AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., GRAMENZ, J., KADNER, C., KUDER, J., KUNKEL, C., MOECK, I., SUCHI, E., TRIBBENSEE, K. & WEBER, J. (2017): Geofaces. - LIAG-Seminar, 28.03.2017; Hannover.

AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., GRAMENZ, J., KADNER, C., KUDER, J., KUNKEL, C., SUCHI, E., TRIBBENSEE, J. & WEBER, J. (2016): Geofaces - Charakterisierung geothermischer Ressourcen unter Berücksichtigung von Grenz- und Trennflächen. Der Geothermie Kongress 2016, 30.11.2016; Essen.

- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., GRAMENZ, J., KADNER, C., KUDER, J., KUNKEL, C., SUCHI, E., TRIBBENSEE, K., WEBER, J. & MOECK, I. (2017): Neue Funktionen und aktuelle Daten in GeotIS, Der Geothermiekongress, München, 12.-14.9.2017.
- AGEMAR, T., HESE, F., MOECK, I. & STOBER, I. (2016): Kriterien für die Erfassung tieferreichender Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland. Der Geothermie Kongress 2016, 30.11.2016; Essen.
- AGEMAR, T. & SUCHI, E. (2019): 3D-Modelle in GeotIS. - Gocad-Anwendertreffen, 12.-13. März 2019, Freiberg (Sachsen).
- AGEMAR, T., SUCHI, E., MOECK, I. (2018): Die Rolle der tiefen Geothermie bei der Wärmewende - Wie Deutschland 60 % erneuerbare Wärme bis 2050 schaffen könnte. - Impulsvortrag Fachausschusssitzung Tiefe Geothermie. BVG, 29.10.2018, Berlin.
- AGEMAR, T., SUCHI, E., MOECK, I. (2018): Was kann die Geothermie zur Wärmeversorgung beitragen, um die EU-Klimaziele für 2050 zu erreichen? - Der Geothermiekongress DGK 2018, 27.-29. November 2018, Essen.
- AGEMAR, T., ÖZER, M. & BRUNKEN, J. (2019): Geostatistisches 3D-Temperaturmodell des Untergrunds von Deutschland auf Grundlage neu-korrigierter Messungen. - 79. Jahrestagung der Geophysikalischen Gesellschaft, 4.-7. März 2019, Braunschweig.
- AGEMAR, T., WEBER, J., ALTEN, J.-A., MOECK, I. (2018): Where in Germany the thermal energy transition may succeed: Looking for deep geothermal energy with the free web portal GeotIS. Leibniz Forschungsverbund Energiewende Fachtagung "Breaking the Rules! Energy Transitions as Social Innovations". 14-15 Juni 2018, Berlin.
- KUDER, J. (2016): Abschätzung des geothermischen Potenzials von Störungszonen. - Der Geothermie Kongress 2016, 29.11-01.12.2016, Essen.
- KUNKEL, C. & AGEMAR, T. (2019): Hydraulic Characterization of Potential Geothermal Reservoirs in the North German Basin. - European Geothermal Congress, 11.-14.06.2019; Den Haag, The Netherlands.
- KUNKEL, C., AGEMAR, T., STOBER, I. (2018): Geothermisches Nutzungspotential im Buntsandstein und Keuper in NO Bayern. - Der Geothermiekongress DGK 2018, 27.-29. November 2018, Essen.
- KUNKEL, C., AGEMAR, T., WEBER, J. & WOLF, M. (2019): Aufbau eines E-Learning-Portals für die Tiefe Geothermie. - LIAG-Seminar, 07.05.2019; Hannover.
- WEBER, J. (2016): Country Update Germany. - Vortrag im Workshop Anlagenstatistik (Oberflächennahe Geothermie), Der Geothermie Kongress 2016, 29.11.2016; Essen.
- WEBER, J. & MOECK, I. (2019): Internationale Zusammenarbeit im Projekt Geofaces: Das IEA Geothermal. - LIAG Seminar, 12.03.2019; Hannover.

#### 10.1.6 Berichte

- AGEMAR, T. (2018): Fachinformationssystem Geophysik: Änderung der BHT-Korrekturverfahren für einfach belegte Messungen, Archivnummer: 0135259. Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover.

- AGEMAR, T., SUCHI, E., MOECK, I. (2018): Die Rolle der tiefen Geothermie bei der Wärmewende. Wie Deutschland 60 % erneuerbare Wärme bis 2050 schaffen könnte. Positionspapier (Langfassung), Archivnummer: 0135181. Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover.
- GEOFACES-TEAM (2017): GeoFaces: Charakterisierung geothermischer Ressourcen unter Berücksichtigung von Grenz- und Trennflächen, Teilprojekt A. - 1. Zwischenbericht, LIAG Bericht, Archiv-Nr. 0134192: S. 7; Hannover.
- GEOFACES-TEAM (2017): GeoFaces: Charakterisierung geothermischer Ressourcen unter Berücksichtigung von Grenz- und Trennflächen, Teilprojekt A. - 2. Zwischenbericht, LIAG Bericht, Archiv-Nr. 0134858: S. 7; Hannover.
- GEOFACES-TEAM (2018): GeoFaces: Charakterisierung geothermischer Ressourcen unter Berücksichtigung von Grenz- und Trennflächen, Teilprojekt A. - 3. Zwischenbericht, LIAG Bericht, Archiv-Nr. 0135063: S. 7; Hannover.
- GEOFACES-TEAM (2018): GeoFaces: Charakterisierung geothermischer Ressourcen unter Berücksichtigung von Grenz- und Trennflächen, Teilprojekt A. - 4. Zwischenbericht, LIAG Bericht, Archiv-Nr. 0135224: S. 6; Hannover.
- GEOFACES-TEAM (2019): GeoFaces: Charakterisierung geothermischer Ressourcen unter Berücksichtigung von Grenz- und Trennflächen, Teilprojekt A. - 5. Zwischenbericht, LIAG Bericht, Archiv-Nr. 0135375: S. 7; Hannover.
- GEOFACES-TEAM (2019): GeoFaces: Charakterisierung geothermischer Ressourcen unter Berücksichtigung von Grenz- und Trennflächen, Teilprojekt A. - 6. Zwischenbericht, LIAG Bericht, Archiv-Nr. 0135672: S. 8; Hannover.
- WEBER, J. (2017): Working Group 10 Report - Data Collection and Information - 2016 Annual Report, IEA Geothermal, September 2017.
- WEBER, J. (2017): Übersicht über den Stand der tiefen Geothermie in Deutschland. - BGR Energiestudie 2017 - Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung. BGR, Hannover.
- WEBER, J. (2017): 2016 Working Group 10 Report – Data Collection and Information. IEA Geothermal, April 2017.
- WEBER, J. (2018): Working Group 10 Report - Data Collection and Information. 2017 Annual Report, IEA Geothermal, Januar 2018.
- WEBER, J. (2019): Working Group 10 Report - Data Collection and Information. 2018 Annual Report, - IEA Geothermal, Februar 2019.
- WEBER, J. & IEA GEOTHERMAL (2016): Trends in Geothermal Applications 2014. Survey Report on Geothermal Utilization and Development in IEA-GIA Member Countries in 2014, with Trends in Geothermal Power Generation and Heat Use 2000-2014. - Publication of the International Energy Agency, Geothermal Implementing Agreement.
- WEBER, J. & IEA GEOTHERMAL (2017): Trends in Geothermal Applications 2015. Survey Report on Geothermal Utilisation and Development in IEA Geothermal Member Countries in 2015, with Trends in Geothermal Power Generation and Heat Use 2000-2015. - Publication of the International Energy Agency, IEA Geothermal.
- WEBER, J. & IEA GEOTHERMAL TEAM (2018): Geothermal Power Statistics 2016. IEA Geothermal, Februar 2018.

- WEBER, J. & IEA GEOTHERMAL TEAM (2019): Geothermal Power Statistics 2017. - IEA Geothermal, Februar 2019.
- WEBER, J., LEE, T. J., RICHTER, M., MEIER, P., LINK, K., BROMLEY, C. & MULLER, J. (2017): Working Group 13 Report – Emerging Geothermal Technologies - 2016. IEA Geothermal, May 2017.
- WEBER, J., LEE, T. J., RICHTER, M., MEIER, P., LINK, K., BROMLEY, C. & MULLER, J (2017): Working Group 13 Report - Emerging Geothermal Technologies - 2016 Annual Report, IEA Geothermal, September 2017.
- WEBER, J., LEE, T. J., RICHTER, M., MEIER, P., LINK, K., BROMLEY, C. & MULLER, J (2018): Working Group 13 Report - Emerging Geothermal Technologies. 2017 Annual Report, IEA Geothermal, Februar 2018.
- WEBER, J., MINNIG, C., MOECK, I., LEE, T. J., RICHTER, M., MEIER, P., LINK, K., BROMLEY, C. & MULLER, J (2019): Working Group 13 Report - Emerging Geothermal Technologies. 2018 Annual Report, IEA Geothermal, Februar 2019.

## **10.2 Meetings / Bericht an IEA Geothermal Executive Committee**

- MOECK, I. & MINNIG, CH. (2018): IEA Geothermal Play Type Meeting: Geothermal play types: their fundamental characteristics, key workflows and recognition of uncertainties, risk and opportunities. 04.05.2018; Wien, Österreich.
- WEBER, J. (2016): IEA Geothermal Annex 13 - Emerging Geothermal Technologies. - Durchführung Annex Meeting, 13.09.2016; München.
- WEBER, J. (2016): Annex 10 - Data Collection and Information, Work Progress Report 2016. - Bericht an das Exekutivkomitee, 36. IEA Geothermal ExCo Meeting, 13.09.2016; München.
- WEBER, J. (2016): Annex 13 - Emerging Geothermal Technologies, Work Progress Report 2016. - Bericht an das Exekutivkomitee, 36. IEA Geothermal ExCo Meeting, 13.09.2016; München.
- WEBER, J. (2017): IEA Geothermal & IGA – Joint workshop on GSHP statistics. – Vorbereitung und Durchführung des Workshops, 01.05.2017; Florenz.
- WEBER, J. (2017): IEA Geothermal Working Group 13 - Emerging Geothermal Technologies. - Durchführung Working Group Meeting, 02.05.2017; Florenz.
- WEBER, J. (2017): IEA Geothermal WG 13 Task C – Reservoir Creation and Enhancement. – Teilnahme am Task Meeting, 02.05.2017; Florenz.
- WEBER, J. (2017): Working Group 10 - Data Collection and Information, Work Progress Report 2016. - Bericht an das Exekutivkomitee, 37. IEA Geothermal ExCo Meeting, 04.05.2017; Florenz.
- WEBER, J. (2017): Working Group 13 - Emerging Geothermal Technologies, Work Progress Report 2016. - Bericht an das Exekutivkomitee, 37. IEA Geothermal ExCo Meeting, 04.05.2017; Florenz.
- WEBER, J. (2017): Working Group 10 - Data Collection and Information, Work Progress Report 2017. - Bericht an das Exekutivkomitee, 38. IEA Geothermal ExCo Meeting; Hanoi, Vietnam.

- WEBER, J. (2017): Working Group 13 - Emerging Geothermal Technologies, Work Progress Report 2017. - Bericht an das Exekutivkomitee, 38. IEA Geothermal ExCo Meeting, 11.11.2017; Hanoi, Vietnam.
- WEBER, J. (2018): Working Group 10 - Data Collection and Information, Work Progress Report 2018. - Bericht an das Exekutivkomitee, 39. IEA Geothermal ExCo Meeting, 02.05.2018; Wien, Österreich.
- WEBER, J. (2018): Working Group 13 - Emerging Geothermal Technologies, Work Progress Report 2018. - Bericht an das Exekutivkomitee. 39. IEA Geothermal ExCo Meeting, 02.05.2018; Wien, Österreich.
- WEBER, J. (2018): Working Group 10 - Data Collection and Information, Work Progress Report 2018. - Bericht an das Exekutivkomitee, 40. IEA Geothermal ExCo Meeting, 07.11.2018; Daejeon, Südkorea.
- WEBER, J. (2019): Working Group 10 - Data Collection and Information, Work Progress Report 2018/19. - Bericht an das Exekutivkomitee, 41. IEA Geothermal ExCo Meeting, 04.04.2019; Gran Canaria, Spanien.
- WEBER, J. (2019): Working Group 13 - Emerging Geothermal Technologies, Work Progress Report 2018/19. - Bericht an das Exekutivkomitee. 41. IEA Geothermal ExCo Meeting, 04.04.2019; Gran Canaria, Spanien.
- WEBER, J., ALTEN, J.-A., GRAMENZ, J., KRAUSE, K. & WOLF, M (2017): Workshop für die International Geothermal Association zum Aufbau einer Datenbank zu geothermischen Energiestatistiken. LIAG, Hannover.
- WEBER, J., LEE, T. J., BROMLEY, C., MULLER, J., MINNIG, C. (2018): Working Group 13 – Emerging Geothermal Technologies, Work Progress Report 2018. - Bericht an das Exekutivkomitee, 40. IEA Geothermal ExCo Meeting, 07.11.2018; Daejeon, Südkorea.

## **10.3 Öffentlichkeitsarbeit**

### 10.3.1 Veranstaltungen

- Arbeitstreffen mit LBEG, Universität Göttingen & LUNG, Hannover, LIAG, 01.02.2017
- Arbeitstreffen zur Einbindung der Sandsteinfazies-Daten, Göttingen, Universität Göttingen, 26.05.2017
- AGEMAR, T., ALTEN, J. A., GRAMENZ, J., KUDER, J, KUNKEL, C., SUCHI, E., TRIBBENSEE, K., WEBER, J., WOLF, M. & MOECK, I (2017): Festkolloquium "10 Jahre GeotIS". LIAG, 25.10.2017, Hannover.
- AGEMAR, T. & ALTEN, J. A. (2017): Workshop 'Aufbau eines geothermischen Informationssystems am Beispiel von GeotIS' für Geologische Bundesanstalt (Wien), LIAG, Hannover, 24.10.2017.
- BINOT, F., SCHÜTZE, J. & AGEMAR. T. (2017): Festkolloquium „10 Jahre GeotIS“ - Der digitale Geothermie-Atlas für Deutschland erscheint in einem neuen Gewand. 25.10.2017.
- MOECK, I., AGEMAR, T., DUSSEL, M. & WEBER, J. (2017): Öffentlicher Informationstag zum Thema Geothermie in Poing. - 24.11.2017, Poing, Information zu Erdbeben-Gutachten, 8 Poster, Flyer, Broschüren, Live-Präsentation von GeotIS.

Projekttreffen, 1. Informationsaustausch des Verbundprojektes, Hannover, 04.05.2017  
Projekttreffen, 2. Informationsaustausch des Verbundprojektes, Güstrow, 18.10.2017  
Projekttreffen, 3. Informationsaustausch des Verbundprojektes, Karlsruhe, 11.04.2018  
Projekttreffen, 4. Informationsaustausch des Verbundprojektes, Hannover, 16.10.2018  
Projekttreffen, 5. Informationsaustausch des Verbundprojektes, Hannover, 14.04.2019

#### 10.3.2 Messestände

GEOFACES-TEAM (2017): Geothermiekongress München, 12.-14.09.2017.

GEOFACES-TEAM (2017): GeoTHERM, Messe & Kongress, Offenburg, 15.-16.02.2017.

GEOFACES-TEAM (2017): GeoTHERM, Messe & Kongress, Offenburg, 01.-02.03.2018.

GEOFACES-TEAM (2017): GeoTHERM, Messe & Kongress, Offenburg, 14.-15.02.2019.

#### 10.3.3 Pressemitteilungen und Internet

Pressemitteilung zur 1. englischen Auflage der Broschüre „Tiefe Geothermie“:

<https://idw-online.de/de/news616635> (deutsch)

<https://idw-online.de/de/news616660> (englisch)

Website des Projektes: <https://www.geotis.de>

### 10.4 Gutachten / Editorentätigkeit

Agemar, T. (2017): Kapitel 4 des 4. Zwischenbericht der UBA-Studie 'Kommunaler Klimaschutz durch Verbesserung der Effizienz in der Fernwärmeversorgung mittels Nutzung von Niedrigenergiequellens am Beispiel tiefegeothermischer Ressourcen' redigiert.

AGEMAR, T. (2017): Gutachten für die Zeitschrift Geothermics (Peer Review).

AGEMAR, T. (2017): Gutachten für die Zeitschrift Energies (Peer Review).

AGEMAR, T. (2018): Gast-Editor ZDGG Sonderheft: "Geothermal Reservoirs – Exploration, Characterization, Modelling".

AGEMAR, T. (2019): Gutachten für die Zeitschrift ZDGG (Peer Review).

AGEMAR, T. (2019): Gutachten für die Zeitschrift Geological Quarterly (Peer Review).

WEBER, J. (2016): International Energy Agency. - Renewable Energy 2016 - Medium-Term Market Report.

WEBER, J. (2017): Summary of New Drilling Technologies, Publication of the IEA Geothermal - Review.

WEBER, J. (2017): International Energy Agency. - Renewable Energy Market Report (REMR) 2017 - Review.

WEBER, J. (2018): Review für die International Energy Agency: "Renewable Energy Market Report (REMR) 2018".

WEBER, J. & MOECK, I. (2016): EGIP Expert Group, Geothermal ERA-NET. - European Geothermal Information Platform EGIP - An overview to prepare the implementation.