



Geothermische Potenzialanalyse

Projektstandort Darmstadt

November 2024

URL zum Herunterladen:

https://redaktion.hessen-agentur.de/publication/2024/4374_P236031GEO_StandortDarmstadt_PotentialanalyseGeothermie_PUBLIC_2024.pdf

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	6
2. Aufgabenstellung / durchgeführte Untersuchungen.....	8
3. Geographische Einordnung.....	9
3.1. Standortbeschreibung	9
3.2. Schutzgebiete	10
3.2.1. Landschaftsschutzgebiete	11
3.2.2. Naturschutzgebiete im weiteren Sinne.....	12
3.2.3. Wasser-, Trinkwasser- und Heilquellenschutzzonen.....	13
3.3. Bewertung der Berührung / Beeinflussung von Schutzgebieten / Schutzgütern	15
4. Datenrecherche.....	16
4.1. Aufschlussituation	17
4.2. Nutzung der Projekte Hessen 3D und Hessen 3D 2.0	20
4.3. Geothermisches Informationssystem (GeotIS).....	21
4.4. Bewertung der Datenlage und Aufschlussituation	22
5. Geologische Einordnung.....	24
5.1. Geologischer Überblick	24
5.2. Strukturgeologie.....	30
5.3. Stratigraphie und Lithologie	31
5.4. Vorprofile.....	34
6. Hydrogeologische Situation	36
7. Geothermische Standortbetrachtung	42
7.1. Geothermische Rahmenbedingungen	42
7.1.1. Terrestrischer Wärmestrom / Wärmestromdichte q [W / m ²].....	42
7.1.2. Geothermischer Gradient ∇T [K / 100 m].....	44
7.2. Grundlegende petrophysikalische Eigenschaften.....	48
7.2.1. Gesteinsdichte ρ [kg / m ³]	48
7.2.2. Porosität Φ [-]	49
7.3. Hydraulische Gesteins- und Gebirgseigenschaften	50

7.3.1.	Permeabilität K [m^2 oder D].....	50
7.3.2.	Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s]	52
7.3.3.	Transmissivität T [m^2/s]	53
7.4.	Thermophysikalische Gesteinseigenschaften	54
7.4.1.	Wärmeleitfähigkeit λ [$W / (m \cdot K)$]	54
7.4.2.	Wärmekapazität c_p [$J / (kg \cdot K)$].....	56
7.4.3.	Temperaturleitfähigkeit κ [m^2/s]	57
7.5.	Leistungscharakterisierende Kennwerte.....	58
7.5.1.	Thermische Leistung P_{th} [W].....	58
7.5.2.	Spezifische Entzugsleistung P_s [W / m] bzw. [W / m^2]	58
7.5.3.	Produktivitätsindex PI [$m^3 / (s \cdot MPa)$]	59
7.6.	Standortspezifische Bewertung des geothermischen Potenzials.....	60
7.7.	Möglichkeiten der Nutzbarmachung von Erdwärme.....	61
7.7.1.	Technische Erschließungsformen oberflächennaher Erdwärme	61
7.7.2.	Technische Erschließungsformen mitteltiefer bis tiefer Erdwärme.....	64
7.7.3.	Standortspezifisch empfohlene Erschließungsmethode.....	67
8.	Erkundungsempfehlung.....	73
8.1.	Erkundungsbohrung	73
8.2.	Thermal Response Test.....	75
8.3.	Nullfeldmessung	75
9.	Mögliche Risiken beim bohrtechnischen Erschließen des Untergrunds	76
10.	Genehmigungsverfahren bei Projektfortführung.....	79
11.	Schlussbemerkung.....	82
12.	Abbildungsverzeichnis	83
13.	Tabellenverzeichnis	84
14.	Literaturverzeichnis	85

Abkürzungsverzeichnis

AwSV	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
BBerG	Bundesberggesetz
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
bzw.	beziehungsweise
bzgl.	bezüglich
bspw.	beispielsweise
ca.	circa
COP	Coefficient of Performance
3D	dreidimensional
DIN	Deutsches Institut für Normung
ETRS	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem
EWS	Erdwärmesonde
FIS GP	Fachinformationssystem Geophysik
GeotIS	Geothermisches Informationssystem für Deutschland
GFZ Potsdam	Geoforschungszentrum Potsdam
ggf.	gegebenenfalls
GIS	geografisches Informationssystem
GLU	Geologische Landesuntersuchung GmbH Freiberg
GeolDG	Geologiedatengesetz
GOK	Geländeoberkante
u. GOK	unter Geländeoberkante (Teufenbezug)
GWK	Grundwasserkörper
HAOI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
HUEK	Hydrogeologische Übersichtskarte
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
HAGBNatSchG	Hessisches Ausführungsgesetz zum Bundesnaturschutzgesetz
HMUELV	Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
HMWVW	Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum
HQ10 und HQ100	10- bzw. 100-jähriges Hochwasser
KMRD	Kampfmittelräumdienst
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Niedersachsen
LIAG	Leibniz Institut für Angewandte Geophysik
LEA Hessen	LandesEnergieAgentur Hessen
Lph.	Leistungsphase
Nr.	Nummer
§	Paragraf
SprengG	Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe
TRT	Thermal Response Test
u. NN	unter Normal Null (Teufenbezug)
UTM	Universal Transverse Mercator
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
vgl.	vergleiche

Einheiten- und Symbolverzeichnis

A	Fläche	PI	Produktivitätsindex
a	Jahr	%	Prozent
bar	Bar	‰	Promille
°C	Grad Celsius	Φ	Porosität
C	Wärmekapazität	Φ_{eff}	Effektive Porosität
c_p	Massenspezifische Wärmekapazität	Φ_d	Durchflusswirksame Porosität
c_v	Volumenspezifische Wärmekapazität	Q	Volumenstrom
D	Darcy	ρ	Dichte
E	Energie	s	Sekunden
E_{el}	Elektrische Energie	S	Salinität
E_{th}	Thermische Energie	T	Transmissivität
€	Euro (Währung)	T	Temperatur
Δ	Differenz	W	Watt
°C	Grad Celsius		
CO ₂	Kohlenstoffdioxid		
ct	Cent		
g	Gramm		
∇	Gradient		
∇T	Geothermischer Gradient		
GW	Gigawatt		
GWh	Gigawattstunden		
h	Stunden		
i	Hydraulischer Gradient		
J	Joule		
K_M	Permeabilität		
K_G	Gebirgspermeabilität		
K	Kelvin		
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert		
kg	Kilogramm		
kJ	Kilojoule		
km	Kilometer		
kPa	Kilopascal		
kW	Kilowatt		
kWh	Kilowattstunden		
l	Liter		
λ	Wärmeleitfähigkeit		
m	Meter		
m ²	Quadratmeter		
m ³	Kubikmeter		
M	Mächtigkeit		
MJ	Megajoule		
MPa	Megapascal		
MW	Megawatt		
MWh	Megawattstunden		
n	Hohlraumanteil		
Δp	Druckabsenkung		
P	Leistung		
Pa	Pascal		
P_{el}	Elektrische Leistung		
P_{th}	Thermische (Entzugs-) Leistung		
P_s	Spezifische Entzugsleistung		

1. Zusammenfassung

Im Zuge der vorliegenden Potenzialanalyse wurde vor dem Hintergrund einer kommunalen Wärmeplanung eine konzeptionelle Gliederung des Stadtgebietes Darmstadt auf Grundlage strukturgeologischer Einheiten und damit zusammenhängender identifizierter und vermuteter geo- sowie hydrothormaler Potenziale vorgenommen. Unterschieden werden dabei räumlich der Bereich der Grabenschulter im östlichen und südöstlichen Stadtgebiet sowie, innerhalb der Grabenstruktur des Oberrheingrabens, die Hochscholle Nord im nördlichen Stadtgebiet sowie die Tiefscholle West im westlichen Stadtgebiet von Darmstadt. Die Tiefscholle West zeigt sowohl ein hydrothermales als auch geothermales Potenzial. Die im Grabeninneren auf dem mehr als 1.500 m tiefen, nach Westen abfallenden kristallinen Grundgebirge aufliegenden Gesteinsfolgen des Rotliegend wurden, unter der Voraussetzung einer nachgewiesenen ausreichenden hydraulischen Durchlässigkeit bzw. Grundwasserschüttung, als interessante durch Brunnensysteme zu erschließende Zielaquifere identifiziert. Infolge von erwarteten Reservoirtemperaturen über 100 °C kann eine Wärmeeinspeisung in Fernwärmenetze oder eine Wärmeversorgung energieintensiver Gewerbe und Energien, ein potenzielles Nutzungsszenario für das Erschließen der Rotliegend-Aquifere im Bereich der Tiefscholle West darstellen.

Auch im Bereich der Hochscholle Nord bedecken die Gesteinsfolgen des Rotliegend das dort, im Bereich des nördlichen Stadtzentrums, in einer Tiefe von etwa 750 m unter Gelände anstehende kristalline Grundgebirge. Auch hier ist, bei gegebener hydraulischer Leitfähigkeit, eine Erschließung vermuteter hydrothormaler Systeme durch Brunnen möglich, jedoch sind die Reservoirtemperaturen mit erwarteten um die 40 °C kaum noch für eine wirtschaftliche Wärmeversorgung höhertemperierter Systeme geeignet.

Oberflächennah bis mitteltief ist eine Nutzbarmachung vorhandener geothermischer Potenziale unter Einsatz von Erdwärmesonden generell im gesamten Stadtgebiet möglich. In den Bereichen erhöhter und vor allem differenzierter Quartärer Sedimentbedeckungen sowie darunter anstehender Tertiärer Sedimentgesteinsfolgen, also in den Bereichen der Hochscholle Nord sowie der Tiefscholle West, stellt die existierende Grundwasserstockwerksgliederung eine besondere Herausforderung für ein bohrtechnisches Erschließen des lokalen Untergrundes dar. Im Bereich des östlichen Stadtgebietes auf der Schulter des Oberrheingrabens ist ebenfalls ein Erschließen des geothermischen Potenzials durch flache bis mitteltiefe Erdwärmesonden möglich. Die dort anstehenden Granite bis Granodiorite des kristallinen Grundgebirges weisen geringe hydraulische Durchlässigkeiten auf, sodass ein konvektiver Wärmetransport zur Sonde hin eingeschränkt ist. Dem hingegen zeigen die Gesteine vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeiten, sodass beim Einsatz von Erdwärmesonden potenziell erhöhte spezifische Entzugsleistungen realisiert werden können.

Weiterhin wurden exemplarisch die im Stadtgebiet Darmstadt verorteten Standorte Mathildenhügel im Bereich der östlichen Grabenschulter des Oberrheingrabens sowie das Quartier nördliche Rheinstraße innerhalb des Oberrheingrabens bzw. im Bereich der Tiefscholle West bzgl.

möglicher nutzbarer geo- sowie hydrothermalen Potenziale betrachtet. Dabei wurde das geologische und geothermische Setting und die im geologischen Untergrund realisierten Gesteinsfolgen standortspezifisch beschrieben sowie für entscheidende Gesteinsintervalle physikalische Eigenschaften, dabei insbesondere thermische und hydraulische Parameter, angegeben. Projekt- bzw. standortbezogen erfolgte eine Diskussion möglicher Risiken sowie Empfehlungen bzgl. im Zuge einer Projektentwicklung zielführender Erkundungen. Weiter erfolgte eine Beschreibung des genehmigungsrechtlichen Vorgehens bei angestrebter Erschließung bzw. Nutzbarmachung von Erdwärme bzw. Grund- / Thermalwässern.

2. Aufgabenstellung / durchgeführte Untersuchungen

Um den gestiegenen Informationsbedarf im Bereich der Geothermie zu decken und die bereits aufbereitete Datengrundlage zu verbreitern, hat die LandesEnergieAgentur Hessen (LEA Hessen) im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum (HMWVW) geothermische Potenzialanalysen an ausgewählten Standorten in Hessen durchgeführt. Kommunen soll dabei eine Hilfestellung bzgl. der kommunalen Wärmeplanung gegeben sowie ein Anreiz zur Entwicklung geothermischer Projekte als Teil eines Dekarbonisierungsansatzes der Wärmeinfrastrukturtransformation geschaffen werden.

Die allgemeine Zielstellung der geothermischen Potenzialanalyse ist es, eine grundlegende Einschätzung des geothermischen Potenzials für ausgewählte Standorte im Stadtgebiet Darmstadt zu erarbeiten. Zu diesem Zweck sind neben einer umfassenden Daten- und Literaturrecherche vor allem eine Recherche zu verfügbaren Bohr- und Fachdaten innerhalb des betrachteten Untersuchungsgebiets sowie deren ergebnisorientierte Aufarbeitung notwendig. Im Ergebnis dieser Studie werden anhand identifizierter geothermischer Potenziale standortspezifische Empfehlungen für ein weiterführendes Vorgehen zur Nutzbarmachung von Erdwärme sowie ein diesbezüglich vertiefendes Untersuchungsprogramm gegeben. Weiter werden für entsprechende Empfehlungen hinsichtlich einer möglichen Projektumsetzung Hinweise zu bergrechtlichen Genehmigungsverfahren inklusive einer Aufstellung einzuholender bergrechtlicher Genehmigungen gegeben.

Im Zuge der vorliegenden Potenzialbewertung sollen für die ausgewiesenen Untersuchungsstandorte Darmstadt, Mathildenhügel sowie Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße Aussagen bzgl. der folgenden Punkte gegeben werden (sofern im Rahmen zugänglicher / verfügbarer Daten durchführbar):

- der geologische sowie hydrogeologische Situation im Stadtgebiet Darmstadt,
- der tiefenbezogene Temperaturentwicklung im lokalen Untergrund,
- geologische Profile für betrachtete Untersuchungsstandorte,
- der Ausweisung geothermisch relevanter Kennwerte zu erschließender Gesteinsintervalle (Tiefe, Mächtigkeit, Lithologie, Porosität, Permeabilität, Wärmeleitfähigkeit),
- den Grundwassereigenschaften (Druck, Temperatur, Salinität, Chemismus),
- Erschließungsmöglichkeiten für die Nutzbarmachung von Erdwärme
- der Beschreibung und Bewertung potenzieller Risiken im Zusammenhang einer Erkundung / Erschließung.

3. Geographische Einordnung

3.1. Standortbeschreibung

Die Stadt Darmstadt liegt im Süden des Bundeslandes Hessen, im Randbereich des Oberrheinischen Tieflandes bzw. des Rhein-Main-Tieflandes. Der nordöstliche Teil des Stadtgebiets ist Teil des Messeler Hügellands, welches eine Übergangslandschaft zwischen Untermainebene und Odenwald darstellt. Westlich der Stadt Darmstadt beginnt das Hessische Ried. Die Stadt Darmstadt liegt außerdem im östlichen Randbereich des strukturgeologischen Raumes des Oberrheingrabens. Das Stadtgebiet der Stadt Darmstadt erstreckt sich auf einer mittleren Höhe von ca. 144 m NHN über eine Fläche von 122,05 km². Darmstadt ist in neun Stadtteile unterteilt. In Darmstadt leben etwa 165.000 Einwohner, bei einer mittleren Bevölkerungsdichte von etwa 1.330 Einwohnern pro Quadratkilometer (2022) [1]. Der wichtigste Fluss, der durch Darmstadt fließt, ist die Modau, ein Nebenfluss des Mains. Darmstadt liegt in der gemäßigten Klimazone Mitteleuropas mit warmen Sommern und milden Wintern sowie über das Jahr gleichmäßig verteilten Niederschlägen. Geologisch betrachtet berührt das Stadtgebiet Darmstadt die Strukturräume des Oberrheingrabens (W bis N), des kristallinen Odenwalds (E bis SE) und des Spremlinger Horsts (S).

In Absprache mit der LEA Hessen sowie dem Amt für Klimaschutz und Klimaanpassung der Stadt Darmstadt wurde in der vorliegenden Studie der Standort Mathildenhügel exemplarisch hinsichtlich einer potenziellen Nutzung geothermischer Energie bewertet. Bei dem Untersuchungsstandort Mathildenhügel handelt sich um ein bestehendes Wohnquartier im Stadtbezirk Darmstadt-Ost. Das Wohnquartier Mathildenhügel wird im Norden durch die Dieburger Straße im Osten und Süden durch den Hoetgerweg und im Westen durch Lucasweg eingegrenzt und hat eine Grundfläche von etwa 14.000 m². Alternativ zum Untersuchungsstandort Mathildenhügel erfolgt außerdem eine konzeptionelle Betrachtung und Bewertung eines geothermischen Potenzials am Standort Quartier nördliche Rheinstraße, welches, gelegen im Stadtteil Darmstadt-West durch die Mornewegstraße im Norden, die Feldbergstraße im Osten, die Rheinstraße im Süden sowie die Goebelstraße im Westen umfasst wird. Die geographische Lage der Untersuchungsstandorte im Stadtgebiet Darmstadt wird in Abbildung 1 visualisiert.

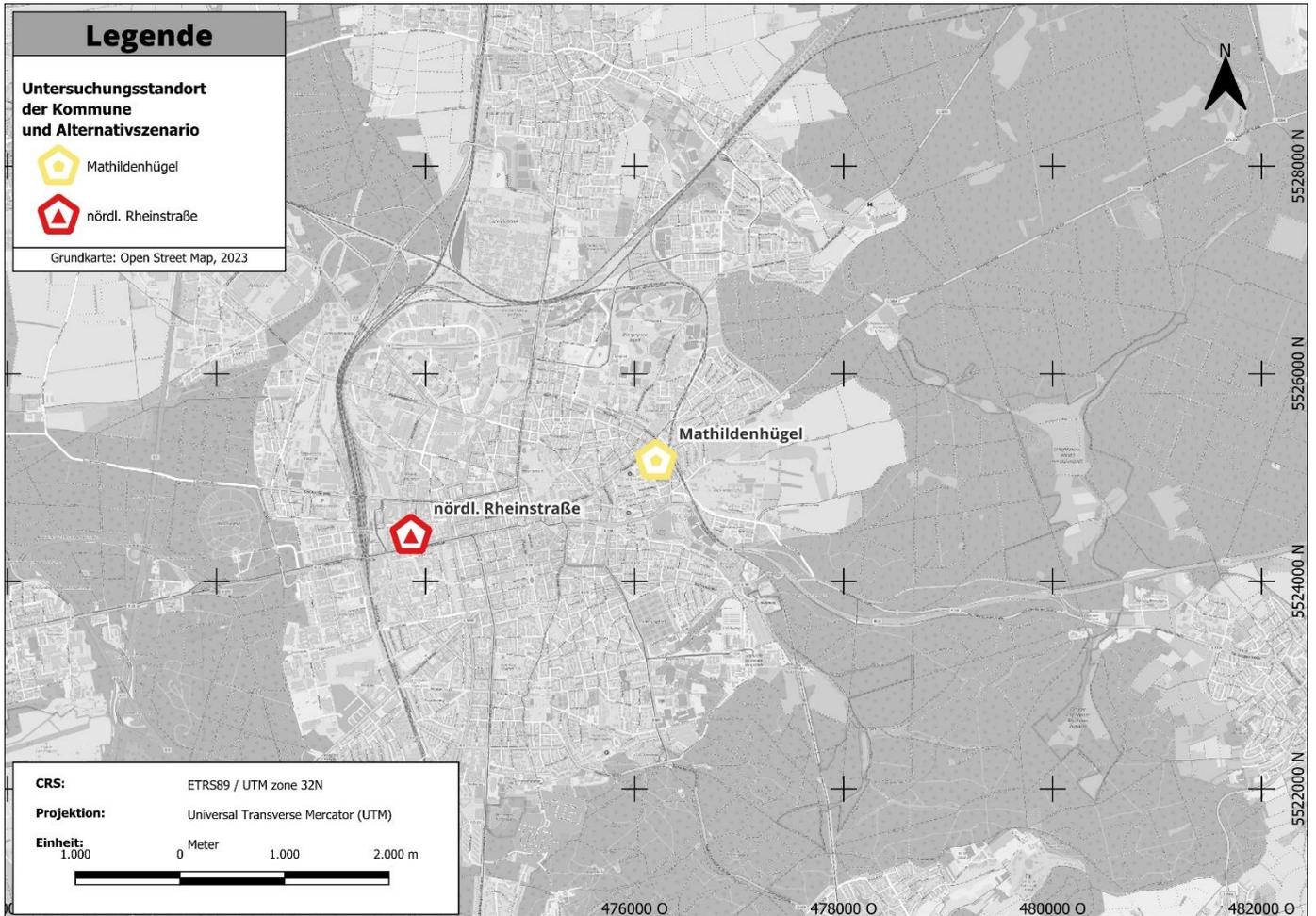


Abbildung 1: Geographische Lage der Untersuchungsstandorte im Stadtgebiet Darmstadt.
(Grundkarte: OpenStreetMap)

3.2. Schutzgebiete

Bezüglich der Durchführbarkeit einer angedachten Erschließung geothermaler Energie kann die Standortlage im Bezug zu Schutzgebieten einen limitierenden Faktor darstellen. Je nach Art des berührten Schutzgebietes können bei Projektumsetzung zusätzliche vorhergehende Verträglichkeitsprüfungen sowie zusätzliche technische, operative sowie überwachende Auflagen behördlich angeordnet oder eine Projektausführung gänzlich untersagt werden. Im Folgenden werden durch eine betrachtete geothermale Erschließung des geologischen Untergrunds an den Untersuchungsstandorten berührte oder nahegelegene Schutzgebiete beschrieben sowie darauf basierend eine erste Standorteignungsbewertung vorgenommen.

3.2.1. Landschaftsschutzgebiete

Landschaftsschutzgebiete stellen Gebiete dar, in denen laut §26 des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) alle Handlungen verboten sind, die den Charakter des Gebietes verändern oder dem besonderen Schutzzweck widerlaufen [2]. Bei der Planung von Geothermieanlagen innerhalb von Landschaftsschutzgebieten sind frühzeitig die zuständigen Behörden (Präsidium Darmstadt – Dezernat V 53.1 - Naturschutz) hinzuzuziehen. Ggf. können von Amtsseite zusätzliche Auflagen wie z.B. Umweltverträglichkeitsprüfungen verlangt werden. In den meisten Fällen stellt die Umsetzung von Geothermieprojekten lediglich einen auf die Bohrarbeiten beschränkten, temporären Eingriff in das Landschaftsbild dar. Erdwärmekollektoren, Sonden und Brunnenbauwerke sowie die dazugehörige Anschlussinfrastruktur sind meist größtenteils untertägig ausgeführt. Die Untersuchungsstandorte Mathildenhügel und Quartier nördliche Rheinstraße liegen außerhalb von Landschaftsschutzgebieten (Abbildung 2).

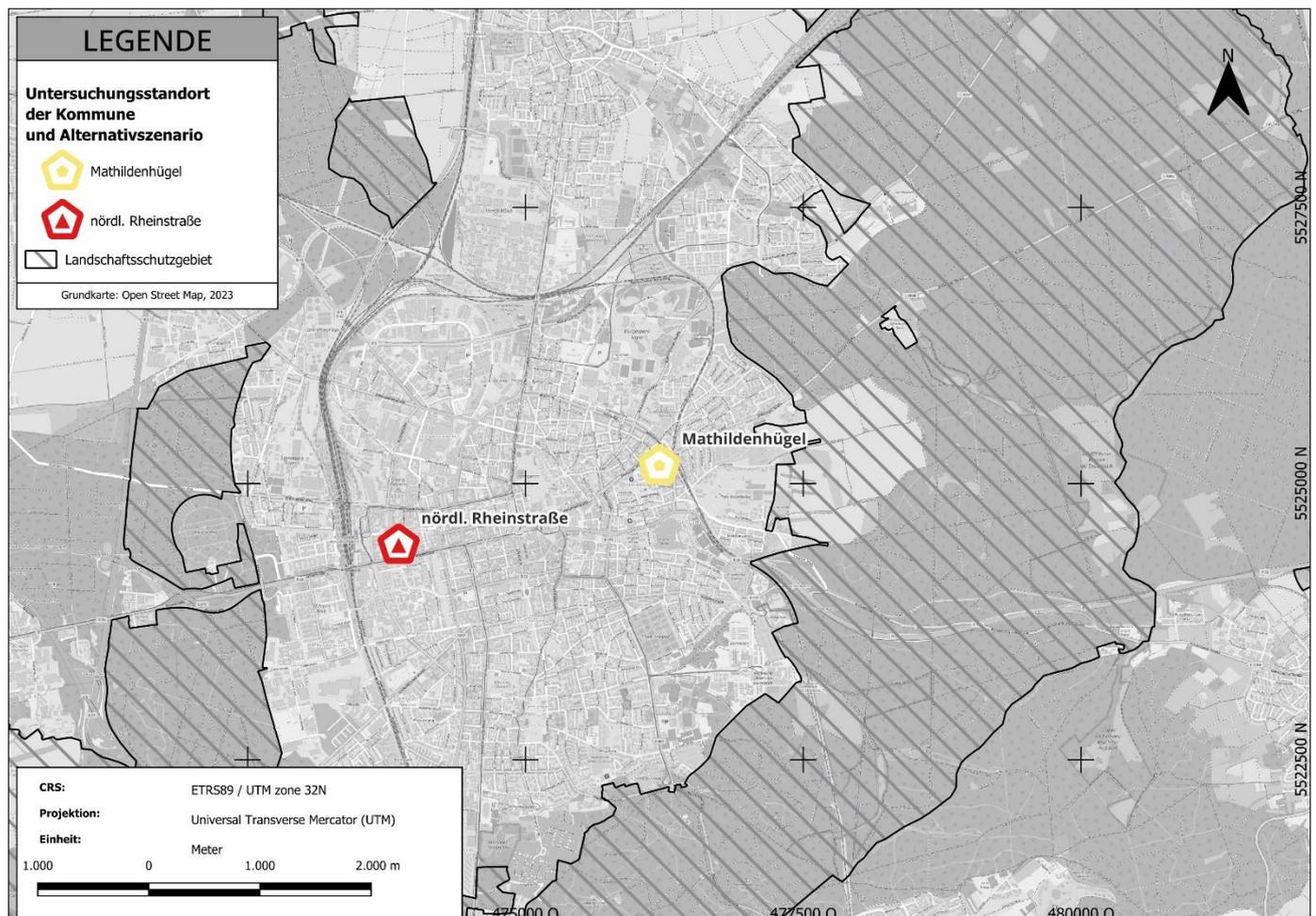


Abbildung 2: Landschaftsschutzgebiete in der Umgebung der Untersuchungsstandorte in Darmstadt.

3.2.2. Naturschutzgebiete im weiteren Sinne

Unter der Überschrift der Naturschutzgebiete werden im Folgenden Naturschutzgebiete im eigentlichen Sinne, Naturparke, Vogelschutzgebiete sowie Flora-Fauna-Habitate betrachtet.

Naturschutzgebiete sind nach §23 des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) rechtsverbindlich festgesetzte Gebiete, in denen ein besonderer Schutz von Landschaft und Natur alle Handlungen, die zu einer Zerstörung, Beschädigung oder Veränderung dieser führen können, verbietet. In der näheren Umgebung der Standorte Mathildenhügel sowie Quartier nördliche Rheinstraße befinden sich keine Naturschutzgebiete (Abbildung 3).

Naturparke setzen sich aus häufig aus Landschaftsschutzgebieten und Naturschutzgebieten zusammen, daher sind §23 und §26 BNatSchG für diese zu berücksichtigen. Große Bereiche des östlichen Stadtgebietes von Darmstadt sind Teil des Naturparks „Bergstraße-Odenwald“ (Abbildung 3). Der Standorte Mathildenhügel liegt etwa 50 m außerhalb, östlich des Naturparks „Bergstraße-Odenwald“. In der näheren Umgebung des Alternativstandortes Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße werden keine Naturparke ausgewiesen.

Vogelschutzgebiete und Flora-Fauna-Habitate werden zu den Natura-2000-Gebieten gezählt, in denen Veränderungen und Störungen, die zu einer erheblichen Beeinträchtigung entsprechender Naturräume im Sinne von §33 BNatSchG führen können, zu unterbinden oder zu beseitigen sind. Natura-2000-Gebieten erfüllen den Zweck des länderübergreifenden Schutzes gefährdeter wildlebender heimischer Pflanzen- und Tierarten sowie der entsprechenden natürlichen Lebensräume. Unmittelbar am Untersuchungsstandort Mathildenhügel wie auch am Untersuchungsstandort Quartier nördliche Rheinstraße sind keine Flora-Fauna-Habitate ausgewiesen (Abbildung 3). Im Stadtgebiet Darmstadts befinden sich hingegen mehrere Schutzgebiete, das größte darunter im Nordosten an der Grenze zur Gemeinde Messel. Auch Vogelschutzgebiete werden an den betrachteten Untersuchungsstandorten nicht berührt (Abbildung 3). Die zwei im betrachteten Stadtgebiet vorhandenen Vogelschutzgebiete befinden sich westlich des Stadtteils Eberstadt und am August-Euler-Flugplatz, angrenzend an die Gemeinde Grießheim.

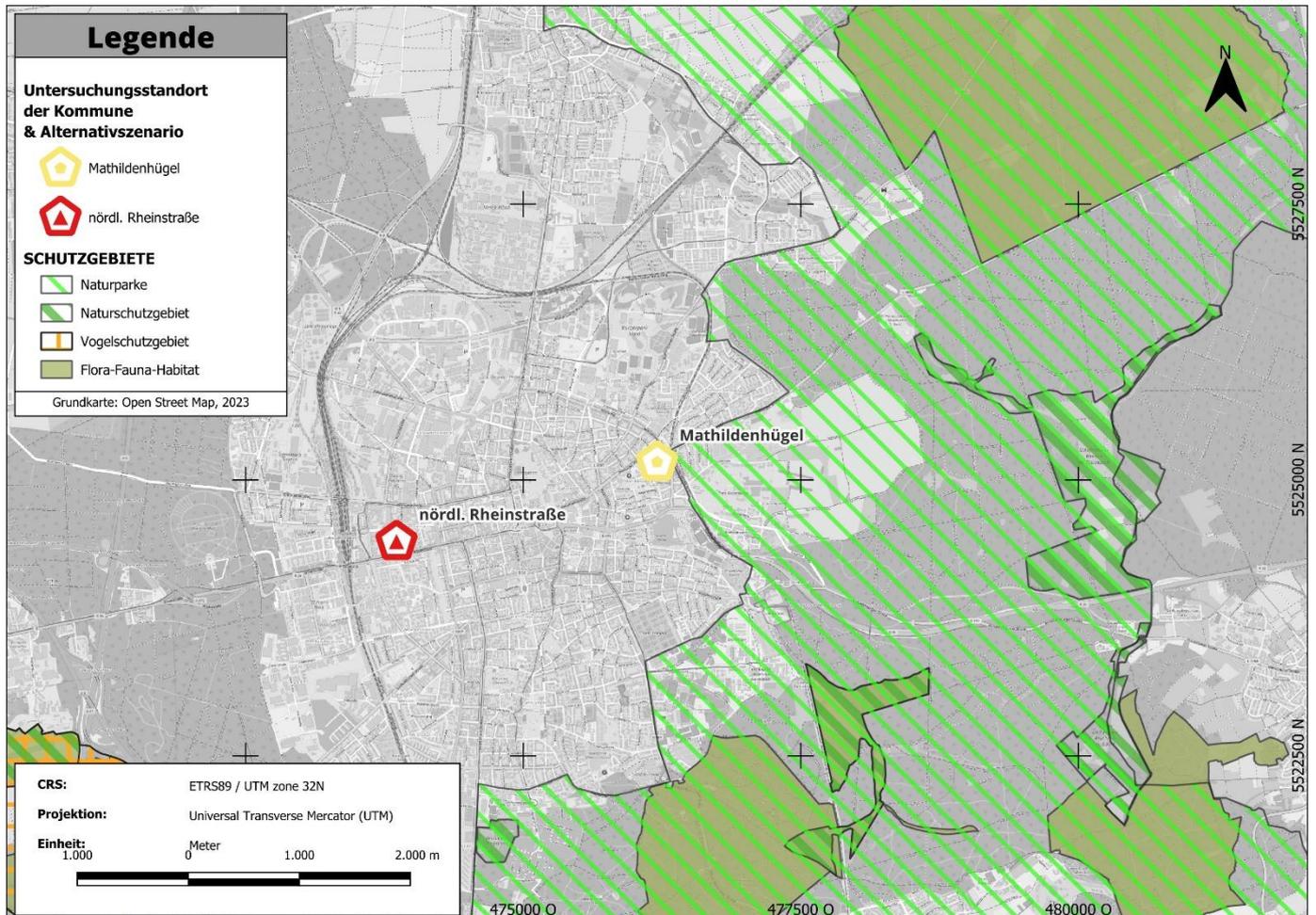


Abbildung 3: Flora-Fauna-Habitate, Naturschutzgebiete, Vogelschutzgebiete und Naturparke in der Umgebung der Untersuchungsstandorte in Darmstadt.

3.2.3. Wasser-, Trinkwasser- und Heilquellenschutzzonen

In Abhängigkeit der hydrogeologischen Situation eines Standortes können Eingriffe in den Untergrund unterschiedliche, auch nachteilige Auswirkungen auf das Schutzgut Grundwasser haben. In Gebieten, die zum Wohl der Allgemeinheit als Wasser- oder Heilquellenschutzgebiete festgesetzt oder vorgesehen sind, können entsprechend bestimmte Handlungen wie z.B. Bohrungen nach §§ 50 bis §§ 53 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) verboten oder nur eingeschränkt zulässig sein [3]. Wasserwirtschaftlich unzulässig sind dabei geothermische Betriebsstandorte in den Schutzzonen I, II, IIIA und IIIB festgesetzter Trinkwasserschutzgebiete sowie in den Schutzzonen I, II, III und III/1 (qualitativ) und A (quantitativ) von Heilquellenschutzgebieten. Die thermische Nutzung des Untergrundes in Trinkwasserschutzzonen (TWSZ) ist in der Regel ausgeschlossen [4]. Für die TWSZ III sind jedoch Ausnahmegenehmigungen nach erfolgter behördlicher Prüfung der lokalen Gegebenheiten sowie des geplanten technischen Erschließungskonzeptes möglich [4].

Die Stadt Darmstadt umgeben mehrere TWSZ der Kategorien I, II, IIIA und IIIB, von denen jedoch keines in das eigentliche Stadtgebiet hineinreicht (Abbildung 4). Heilquellenschutzgebiete sind im betrachteten Untersuchungsraum nicht ausgewiesen. Entsprechend stehen die Untersuchungsstandorte Mathildenhügel sowie Quartier nördliche Rheinstraße nicht im Konflikt zu Trinkwasser- und Heilquellenschutzzonen. Auch befinden sich in unmittelbarer Nähe zu den Untersuchungsstandorten keine fließenden oder stehenden Gewässer. Die Untersuchungsstandorte liegen nicht innerhalb der von möglichen Überschwemmungsgebieten von Jahrzehnt- (HQ10) sowie Jahrhundert-Hochwasserereignissen (HQ100) [5].

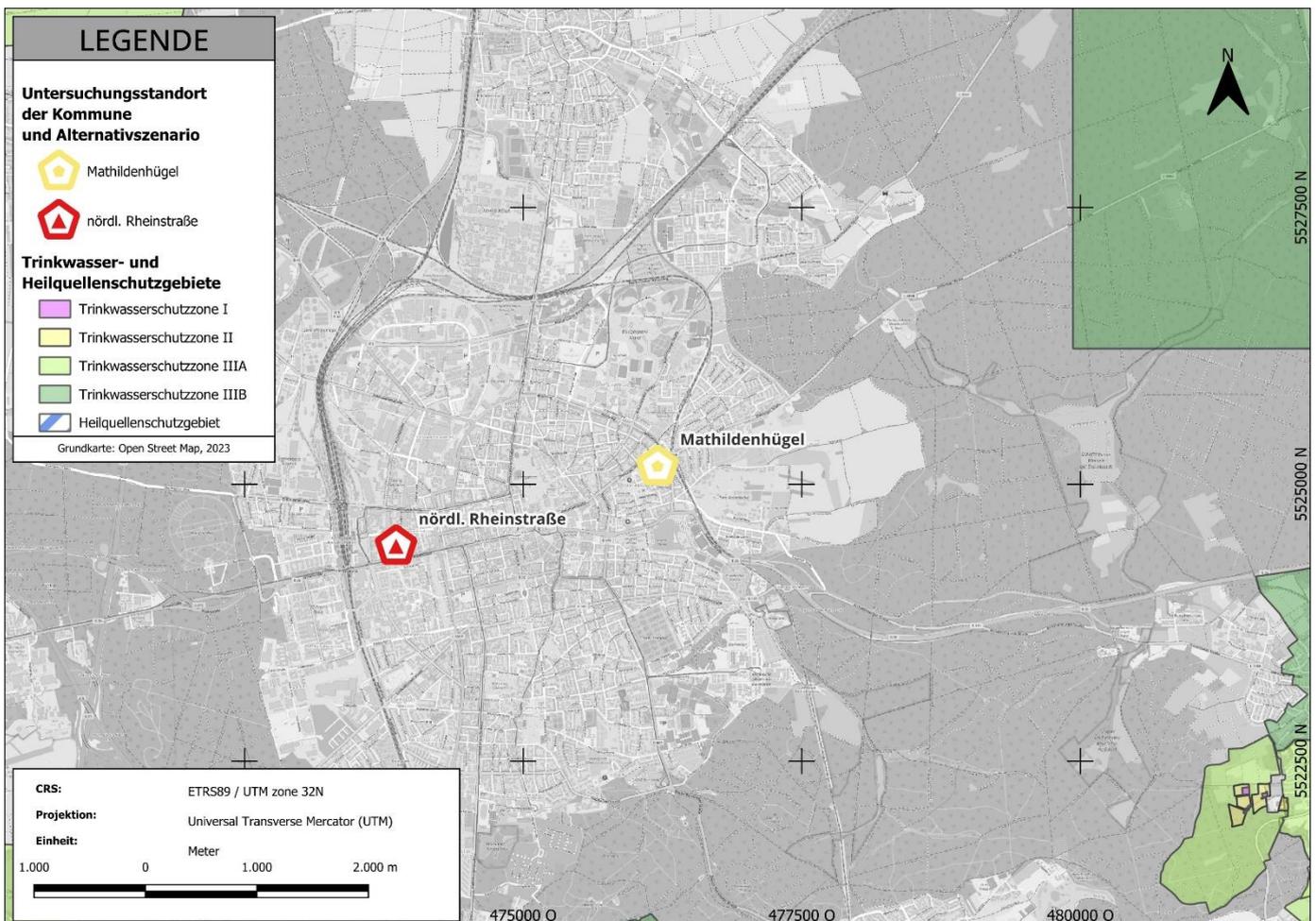


Abbildung 4: Heilquellenschutzgebiete und Trinkwasserschutzgebiete in der Umgebung der Untersuchungsstandorte in Darmstadt.

3.3. Bewertung der Berührung / Beeinflussung von Schutzgebieten / Schutzgütern

Die Lage der Untersuchungsstandorte Mathildenhügel und Quartier nördliche Rheinstraße im Stadtgebiet Darmstadt zeigen sich hinsichtlich existierender Schutzgebiete als günstig gelegen. Die betrachteten Flächen liegen weder in, noch grenzen sie, mit Ausnahme des Naturparks „Bergstraße-Odenwald“ für den Standort Mathildenhügel, an bestehende Schutzgebiete an. Infolge der räumlichen Distanz zu existierenden Schutzgebieten wird eine Beeinflussung dieser durch eine mögliche Projektumsetzung am Standort Mathildenhügel sowie am Standort Quartier nördliche Rheinstraße nicht erwartet. Auch Grundwasserschutzgebiete / -zonen und / oder Heilquellenschutzgebiete würden bei einer geothermischen Erschließung des geologischen Untergrundes an den betrachteten Standorten nicht berührt werden. Ebenfalls befindet sich der betrachtete Untersuchungsstandort nicht innerhalb eines möglichen Überschwemmungsgebietes entsprechend der Angaben HQ10 und HQ100 oder in unmittelbarer Nähe fließender und / oder stehender Gewässer. Es werden keine über den gängigen Umfang hinausgehende, aus einer Interferenz mit Schutzgebieten / natürlichen Schutzgütern resultierende behördliche Auflagen erwartet. Die letztendlich tatsächliche Bemessung planerischer sowie operativer Auflagen erfolgt allerdings durch die zuständige Bergbehörde bzw. Wasserbehörde. Infolge der Lage der betrachteten Standorte innerhalb von Wohngebieten können, im Zusammenhang mit dem technischen Erschließen des Untergrundes für geothermische Zwecke, also dem Abteufen von Bohrungen oder dem Ausheben von Gruben oder Gräben, Emissionen in Form von Lärm- oder Staubbelastungen entstehen. Entsprechend mitgliedernde Maßnahmen, welche über die in der VDI-Richtlinie VDI 4640 [4] beschriebenen Bestimmungen hinausgehen können, können behördlich vorgeschrieben bzw. angeordnet werden [39]. Hinsichtlich der Lage des Untersuchungsstandortes bzgl. existierender Schutzgebiete bzw. schützenswerter Güter wird der sowohl der Standort Mathildenhügel als auch der Alternativstandort Quartier nördliche Rheinstraße als gut bewertet.

4. Datenrecherche

Aussagekräftige Standortcharakterisierungen hinsichtlich der Bewertung lokal vorhandener geothermischer Potenziale setzen eine ausreichende Daten- bzw. Aufschlusslage voraus, welche es im Zuge einer umfangreichen, fachbezogenen Recherche zu erfassen und aufzuarbeiten gilt. Die im Zusammenhang mit der vorliegenden Studie durchgeführte Recherche auf regional sowie standortspezifisch nutzbare Fachinformationen ist dabei thematisch in mehrere Prüfkategorien zu unterteilen:

- Verfügbare Literatur, Studien und Veröffentlichungen in Verbindung mit geologischen, strukturgeologischen, hydrogeologischen sowie insbesondere geothermischen Fragestellungen;
- Vorhandene geologische und hydrogeologische Kartenwerke und Profilschnitte;
- Am und in der Umgebung des Untersuchungsgebietes existierende Schutz- und Überschwemmungsgebiete;
- Nutzbare Informationen aus im Untersuchungsgebiet vorhandenen direkten Aufschlüssen wie Bohrungen, Baugruben oder natürlichen Aufschlüssen;
- Daten zu vergleichbaren Geothermieprojekten sowie in der Umgebung des Untersuchungsgebietes bereits existierenden Anlagen;
- Informationen aus indirekten Aufschlüssen im Umfeld des Untersuchungsgebietes insbesondere interpretierten Seismikprofilen oder sonstige flächenhafte oder punktuelle Geophysikdaten;
- Modelle zum Vorkommen und zur Ausbildung potenziell nutzbarer Grundwasserleiter, sowie geothermischen Gradienten bzw. zu Temperaturverläufen im Untergrund.

Die im Zuge der vorliegenden geothermischen Potenzialbewertung der Untersuchungsstandorte Mathildenhügel sowie Quartier nördliche Rheinstraße im Stadtgebiet Darmstadt ausgeführte Datenrecherche erfolgte dabei in Form von

- umfassenden Literaturrecherchen,
- Sichtung von Online zugänglichen Bohrdatenbanken des BGR, und des HLNUG,
- (Daten-)Exporten aus Fachinformationssystemen und Modellen,
- Korrespondenz mit Landesämtern,
- Datenbezug aus Bohrarchiven.

Das Ergebnis der Recherche ist eine Informationsbasis auf deren Grundlage sowohl die Potenzialbewertung als auch die standortspezifische Ausweisung einer technischen Variante zur Erschließung des geothermischen Potentials erarbeitet werden kann. Im Zusammenhang der mit dem Auftraggeber abgestimmten Projektbezüge waren erste Überslagsbetrachtungen zu realisierenden Leistungen und bereitstellbaren Energiemengen durchführbar. Auch konnten weiterführende, projektindividuelle zielgerichtete Untersuchungsempfehlungen im Zuge einer fortschreitenden Projektentwicklung ausgewiesen werden.

Die in dieser Studie berücksichtigten Fachdaten und Untergrundmodelle sind in den nachfolgenden Unterkapiteln aufgeführt.

4.1. Aufschlusssituation

Daten aus direkten sowie indirekten Aufschlüssen stellen die fundamentale Grundlage für eine möglichst realitätsnahe Abbildung der geologischen und geothermischen Situation sowie der daraus resultierenden Einschätzungen und Bewertungen definierter Untersuchungsstandorte dar. Nutzbare direkte Aufschlüsse sind in der Umgebung der oder idealerweise innerhalb der Untersuchungsgebieten abgeteufte Bohrungen, ausgehobene Gruben oder natürliche Gesteinsaufschlüsse für welche zugängliche Dokumentationen verfügbar sind. Dokumentationen sind dabei etwa Schichtenverzeichnisse, Ausbaudaten, geophysikalische Logs, Auswertungen hydraulischer sowie thermophysikalischer Versuche oder sonstige assoziierte Fachdaten.

Ein Überblick über die im Bereich der Untersuchungsgebiete abgeteuften und vor dem Projekt-hintergrund verwendbaren Bohrungen wurden durch die Sichtung von Bohrdatenbanken und zusätzlichen Archivanfragen zusammengetragen. Die Bohrdatenbanken, die für die Identifikation aussagegebender Bohrungen ausgewertet wurden, sind im Folgenden aufgeführt:

- Geoportal des Hessischen Landesamts für Natur, Umwelt und Geologie (HLNUG) [5],
- Bohrpunktkarte Deutschland der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [6],
- Geothermisches Informationssystem (GeotIS) des Leibnitz-Instituts für Angewandte Geophysik (LIAG) [7],[8],[9],
- Fachinformationssystem Geophysik (FIS-GP) des Leibnitz-Instituts für Angewandte Geophysik (LIAG)[10],[11].

Für den Standort Darmstadt wurden Schichtenverzeichnisse von insgesamt 165 Bohrungen mit Endteufen zwischen 50,0 und 2.153 m u. GOK vom Geoportal des Hessischen Landesamts für Natur, Umwelt und Geologie (HLNUG) [5] abgefragt. Als Radius zur Auswahl für die Sichtung und Berücksichtigung vorhandener Bohrungen zur Abschätzung des geothermischen Potenzials wurde eine maximale Entfernung zu den Untersuchungsstandorten in Darmstadt von 10 km gewählt. Die ausgewählten Bohrungen sind, gestaffelt nach Endteufen, in Abbildung 8 dargestellt. Die tiefsten der im Stadtgebiet Darmstadt abgeteuften Bohrungen sind im Folgenden in der Tabelle 1 mit Angabe der Koordinaten sowie der Endteufe aufgelistet.

Tabelle 1: Bohrungen mit Endteufen tiefer 200 m u. GOK im Umkreis der ausgewiesenen Untersuchungsstandorte im Stadtgebiet Darmstadt.

Bohrungsname	Koordinaten	Endteufe	Stratigraphischer Endhorizont
	ETRS89 UTM 32N	[m u. GOK]	
Darmstadt-Südwest	468363 O 5519656 N	2153,0	Grundgebirge
Darmstadt 2	471359 O 5527936 N	1.506,6	Perm (Rotliegend)
Darmstadt 2a	471360 O 5527936 N	1.475,5	Perm (Rotliegend)
Darmstadt 1	472436 O 5527443 N	928,0	Perm (Rotliegend)
Darmstadt-Nordwest 1	471549 O 5524822 N	835,0	Tertiär (Miozän)
Darmstadt-West 1	471403 O 5523257 N	730,0	Tertiär (Miozän)
Darmstadt 9	473116 O 5524428N	628,0	Tertiär (Miozän)
Darmstadt 3	473310 O 5527600 N	600,2	Perm (Rotliegend)
Darmstadt 5	472695 O 5526578 N	492,0	Tertiär (Miozän)
Darmstadt 8	472506 O 5527278 N	488,4	Tertiär (Miozän)
Darmstadt 6	472556 O 5526578 N	475,0	Tertiär (Miozän)
Brunnen Frankfurter Straße	474655 O 5527388 N	257,0	Tertiär (Miozän)
EWS Bau 13 Darmstadt	475617 O 5523028 N	250,0	Devon bis Unterkarbon (Frankenstein-Massiv)

Ferner wurde der GLU durch das HLNUG ein Temperatur-Log der Bohrung Darmstadt Südwest 1, welche sich ca. 2 km nördlich von Eschollbrücken und ca. 8 km südwestlich des Zentrums von Darmstadt befindet, übergeben.

Als indirekte Aufschlussinformationen sind für das Untersuchungsgebiet Darmstadt auf Daten und deren Interpretationen bezüglich Teufenlagen und ausgebildeter Mächtigkeiten, identifizierten Gesteinsschichten aus den strukturgeologischen Modellen Hessen 3D 1.0 [13] und Hessen 3D 2.0 [12] sowie dem geothermischen Informationssystem GeotIS [7] zur Verfügung. Im Bereich des Oberrheingrabens existieren außerdem eine Vielzahl von Graben-parallelen sowie senkrecht zur Grabenstruktur verlaufenden 2D-Seismikprofile. Weiter in Richtung Zentralbereich des Oberrheingrabens wurden 3D seismische Erkundungen ausgeführt. Die im Folgenden aufgelisteten, nächstgelegenen 2D Seismik Profile waren nicht frei zugänglich einsehbar, stellen allerdings eine Grundlage der zuvor genannten Strukturmodelle dar.

- WSW nach ONO verlaufende 2D Seismik Darmstadt-1951 und Darmstadt-1982 der DEA Deutsche Erdöl AG im nördlichen Stadtgebiet von Darmstadt in einer Distanz von etwa 2,5 km NW des Untersuchungsstandortes Mathildenhügel und 2 km N des Alternativstandortes Quartier nördliche Rheinstraße.
- SW nach NO orientierte 2D Seismik Darmstadt-1981 der DEA Deutsche Erdöl AG im südwestlichen Stadtgebiet von Darmstadt in einer Distanz von etwa 3,5 km SW des Untersuchungsstandortes Mathildenhügel und 2 km SE des Alternativstandortes Quartier nördliche Rheinstraße.

4.2. Nutzung der Projekte Hessen 3D und Hessen 3D 2.0

Für eine bestmögliche geothermische Standortbewertung der im Zuge der vorliegenden Studie betrachteten Untersuchungsgebiete im Stadtgebiet Darmstadt wurden Daten zu Teufenlagen, Mächtigkeiten sowie Gesteins-, Gebirgs-, und Grund- / Thermalwasserparametern aus der Datenzusammenstellung sowie Strukturmodellen Hessen 3D [13] und Hessen 3D 2.0 [12] genutzt und abgeleitet.

Im Rahmen des Forschungsprojektes Hessen 3D bzw. "3D-Modellierung der Geothermischen Tiefenpotenziale von Hessen" erfolgte eine quantifiziert und qualitativ Beurteilung des tiefengeothermischen Potenzials für verschiedene geologische, wirtschaftliche und geothermische Nutzungsarten in ganz Hessen. Das Modell wurde in Zusammenarbeit des Instituts für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Darmstadt sowie dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) entwickelt und vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUELV) finanziert [13].

Aufbauend auf dem Modell Hessen 3D wurde, zur Konkretisierung flächendeckender Angaben über bzgl. petrothermaler oder hydrothermaler Potenzialangaben, Anfang 2016 vom Fachgebiet Angewandte Geothermie der Technischen Universität Darmstadt in Kooperation mit der Sektion 6.1 - Sedimentbeckenmodellierung des Geoforschungszentrums (GFZ) Potsdam das Verbundvorhaben „Hessen 3D 2.0“ begonnen. Im Rahmen dieses Projektes wurden existierende Datenbanken zu Gesteins-, Thermalfluid- und Reservoireigenschaften erweitert, auf deren Basis verbesserte geothermische Untergrundmodelle erstellt werden konnten [12]. Das entwickelte dreidimensionale Strukturmodell des geologischen Untergrundes zielt darauf ab, verständliche Informationen über das tiefengeothermische Potenzial und die Beschaffenheit des tieferen Untergrundes in Hessen bereitzustellen. Die an das Geothermische Informationssystem für Deutschland (GeotIS) angelehnte Methodik der Potenzialbetrachtung ermöglicht den Datenaustausch zwischen den beiden Systemen Hessen 3D und GeotIS [7].

4.3. Geothermisches Informationssystem (GeotIS)

Um flächendeckende Informationen bzgl. der Temperaturverteilung und -Entwicklung an den betrachteten Untersuchungsstandorten Mathildenhügel und Quartier nördliche Rheinstraße im Stadtgebiet Darmstadt abzufragen, wurde das geothermische Informationssystem (GeotIS) des Leibniz-Instituts für angewandte Geophysik (LIAG) genutzt.

GeotIS ist ein deutschlandweit auf geothermische Fragestellungen und Bewertungen spezialisiertes Fachinformationssystem, welches auf den Daten von über 30.000 Bohrungen, darunter Erdöl-, Erdgas-, Wasser- und Geothermie- sowie Bohrungen im Zusammenhang bergbaulicher Projekte, aufgebaut wurde. Veröffentlichte hydraulische Kennwerte geothermisch relevanter Gesteinseinheiten stammen dabei größtenteils aus dem Fachinformationssystem Kohlenwasserstoffe (KW-FIS) des Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie, Niedersachsen (LBEG). Auf Landesebene im geologischen Untergrund modellierte Temperaturdaten wurden mithilfe des Fachinformationssystems Geophysik (FIS-GP) des LIAG integriert. Informationen über die strukturelle Beschaffenheit des geologischen Untergrundes wurden durch strukturelle Modelle auf Basis vorhandener Bohr- und sonstiger Aufschlüsse sowie regionalen Seismikprofilen und 3D Seismikvolumen berücksichtigt [7].

GeotIS wird im Rahmen der vorliegenden Standortbewertung für die Einschätzung lokaler geothermischer Gradienten und Temperaturen im Untergrund sowie die Lokalisierung geothermisch wichtiger Aquifere verwendet. Konkret werden Vertikal- und Horizontalschnitte generiert, die neben stratigraphischen Horizonten und naheliegenden Bohrungen auch Temperaturverläufe als Isolinien darstellen. Dies ermöglicht einen Blick auf laterale Temperaturverteilungen sowie die Darstellung von Temperaturverläufen an Basis oder Top einer stratigraphischen Einheit. Die im GeotIS-Portal hinterlegten Daten entsprechen den im Datenportal des HLNUG (Geoviewer) [5] zur Verfügung gestellten Daten.

4.4. Bewertung der Datenlage und Aufschlusssituation

Die Datenlage am Untersuchungsstandort Darmstadt, Mathildenhügel wird als moderat eingeschätzt. Das Abteufen mindestens einer Erkundungsbohrung bis auf eine Teufe von 400 m u. GOK (in Abhängigkeit der bei Projektfortführung tatsächlich zu realisierenden Erschließungstiefe) zur Validierung der lokal rekonstruierten Geologie sowie der thermophysikalischen und hydraulischen Kennwerte wird dringend empfohlen. Zwar ist die Aufschlusssichte in Folge einer Vielzahl in näherer Umgebung zum Untersuchungsstandort Mathildenhügel mit der Zielstellung der Baugrunderkundung abgeteufte Bohrungen relativ hoch und auch am Untersuchungsstandort selbst sind Bohrungen vorhanden, allerdings erschließen diese Bohrungen den Untergrund meist nicht in ausreichender Teufe. Die zugänglichen Schichtenverzeichnisse enthalten meist nur sehr rudimentäre Informationen bzgl. der durchteuften Gesteine. Eine Untergliederung des oberflächennah anstehenden Grundgebirges unter dem Gesichtspunkt des zur Geländeoberfläche zunehmenden Zersetzungsgrades wurde nicht vorgenommen. Da der geologische Untergrund am Untersuchungsstandort innerhalb der zu betrachtenden Teufenlagen als lithologisch relativ gleichbleibend angesehen wird, fällt eine fehlende Differenziation unter der Zielstellung einer geothermischen Potenzialbewertung unterhalb der Erkundungstiefen vorhandener Bohrungen weniger schwer ins Gewicht. Infolge der Lage des Untersuchungsstandortes im Bereich der östlichen Grabenschulter des Oberrheingrabens sowie dem daraus resultierenden Vorkommen tlw. unerörterter, Graben-paralleler Störungen ist einer Übertragbarkeit lokaler Schichtinformationen nur unter Vorbehalt möglich. Westlich der Stadt Darmstadt wurden in Richtung Oberrheingraben mehrere 2D-Seismik Erkundungen ausgeführt. Im östlichen Teil des Stadtgebietes wurde keine seismischen Erkundungen durchgeführt. Strukturgeologische Modellbetrachtungen wie etwa aus Hessen 3D 1.0 [13] sowie Hessen 3D 2.0 [12] bauen auf diesen Daten auf und liefern unter Berücksichtigung der lokal vergleichsweise kleinskaligen Strukturen verwendbare Informationen. Aus der dem geothermischen Informationssystem GeotIS [8] entnommenen Modellbetrachtung sind Aussagen bzgl. des lokalen geothermischen Gradienten möglich. Recherchierte Aussagen bzgl. der Klüftigkeit lokal anstehender Gesteine sind teilweise widersprüchlich. Für den Standort Mathildenhügel liegen In situ erhobene Daten bzw. Angaben zu im oberflächennahen geologischen Untergrund gemessenen Wärmeleitfähigkeiten vor. Ergänzende, für die Potentialbewertung sowie die nachfolgenden Berechnungen angenommene Kennwerte resultieren aus Analogiebetrachtungen regional anzutreffender Gesteine.

Für den Alternativstandort Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße wird die Datenlage als schlecht bewertet. Die für die Erschließung eines mitteltiefen bis tiefen geothermischen Potentials, unter Nutzung einer hydrothermalen Dublette relevanten Gesteinsschichten des Rotliegend, sind am Untersuchungsstandort erst in Teufen unterhalb 2.000 m u. GOK verortet und entsprechend nur durch einzelne, mindestens 5 km entfernte Erkundungsbohrungen erschlossen. Verwertbare konkrete Beschreibungen und Angaben zur lithologischen Ausprägung sind den

Bohrdaten nur bedingt, zu thermophysikalischen und hydraulischen Gesteins- und Gebirgseigenschaften des Zielaquifers nicht zu entnehmen. Für eine konzeptionelle Betrachtungen können entsprechen nur auf Analogieschlüssen beruhende Annahmen verwendet werden. Die Nähe des Untersuchungsstandortes Quartier nördliche Rheinstraße zu einer mit dem Randbereich des Oberrheingrabens assoziierten ausgedehnten und versatzstarken Störungszone bedingt lokale Unsicherheiten bzgl. der Teufenlage sowie hydraulischen Kennwerten der zu Erschließenden Gesteinsschichten.

5. Geologische Einordnung

Im folgenden Text wird ein umfassender Überblick über die geologische Entwicklung und den strukturgeologischen Aufbau des Darmstädter Stadtgebiets geboten. Dabei wird zunächst die geographische Lage der Stadt eingehend betrachtet, wobei sowohl ihre Position als auch Ausdehnung sowie weitere geographische Merkmale beleuchtet werden. Anschließend wird ein zusammenfassender Blick auf die paläogeographische und tektonische Entwicklung des Gebiets um Darmstadt geworfen. Dieser Abschnitt untersucht die dynamischen Prozesse, die im Laufe der Zeit zur Formung der heutigen Strukturen beigetragen haben. Im Weiteren wird ein geologischer Überblick über das Stadtgebiet Darmstadt gegeben, der Einblicke in die strukturelle Zusammensetzung und geologischen Charakteristika bietet. Dabei werden die verschiedenen Gesteinsschichten und geologischen Formationen vorgestellt, welche den Untergrund Darmstadts prägen. Darüber hinaus wird eine eingehende Untersuchung ihrer tektonischen und strukturgeologischen Merkmale durchgeführt, um die gegenwärtigen geologischen Strukturen zu verstehen. Abschließend erfolgt eine detaillierte Beschreibung der zeitlichen Abfolge der Gesteinsschichten.

5.1. Geologischer Überblick

Das Untersuchungsgebiet Darmstadt wird aus drei verschiedenen regionalgeologischen Einheiten aufgebaut. Im westlichen Teil erstreckt sich der nördliche Oberrheingraben in N-S Richtung, südlich bzw. südöstlich befindet sich der Bergsträßer Odenwald als Subeinheit des Kristallinen Odenwalds und östlich bzw. nordöstlich finden die Gesteine des Sprendlinger Horstes ihre Verbreitung. Die Lage des Untersuchungsgebietes ist auf der geologischen Übersichtskarte Hessens (GÜK 300) in Abbildung 5 dargestellt.

Oberrheingraben

Der Oberrheingraben ist ein von Norden nach Süden verlaufendes Riftsystem und gilt als zentraler Teil des känozoischen Grabenbruchsystems Europas [16]. Begrenzt wird der Oberrheingraben im Westen vom Pfälzer Wald, im Osten vom Odenwald und Sprendlinger Horst sowie im Norden durch den Taunus mit südlich vorgelagerter Phyllitzone als Bestandteile des Rheinischen Schiefergebirges und der Wetterau-Senke. Nach Süden schließt der Schweizer Faltenjura an. Die Entwicklung des Känozoischen Riftsystems, dessen prägendes Element der Oberrheingraben ist, begann vor etwa 47 Mio. Jahren als Folge veränderter lithosphärischer Spannungen im nordwestlichen Vorland der Alpen [18]. Die Bildung des Oberrheingrabens wird als typisches Beispiel für synorogenetisches intrakontinentales Vorland-Rifting betrachtet, wobei dessen geologische Entwicklung durch ein komplexes Set von permokarbonisch angelegten Krustendiskontinuitäten geprägt und beeinflusst ist [18].

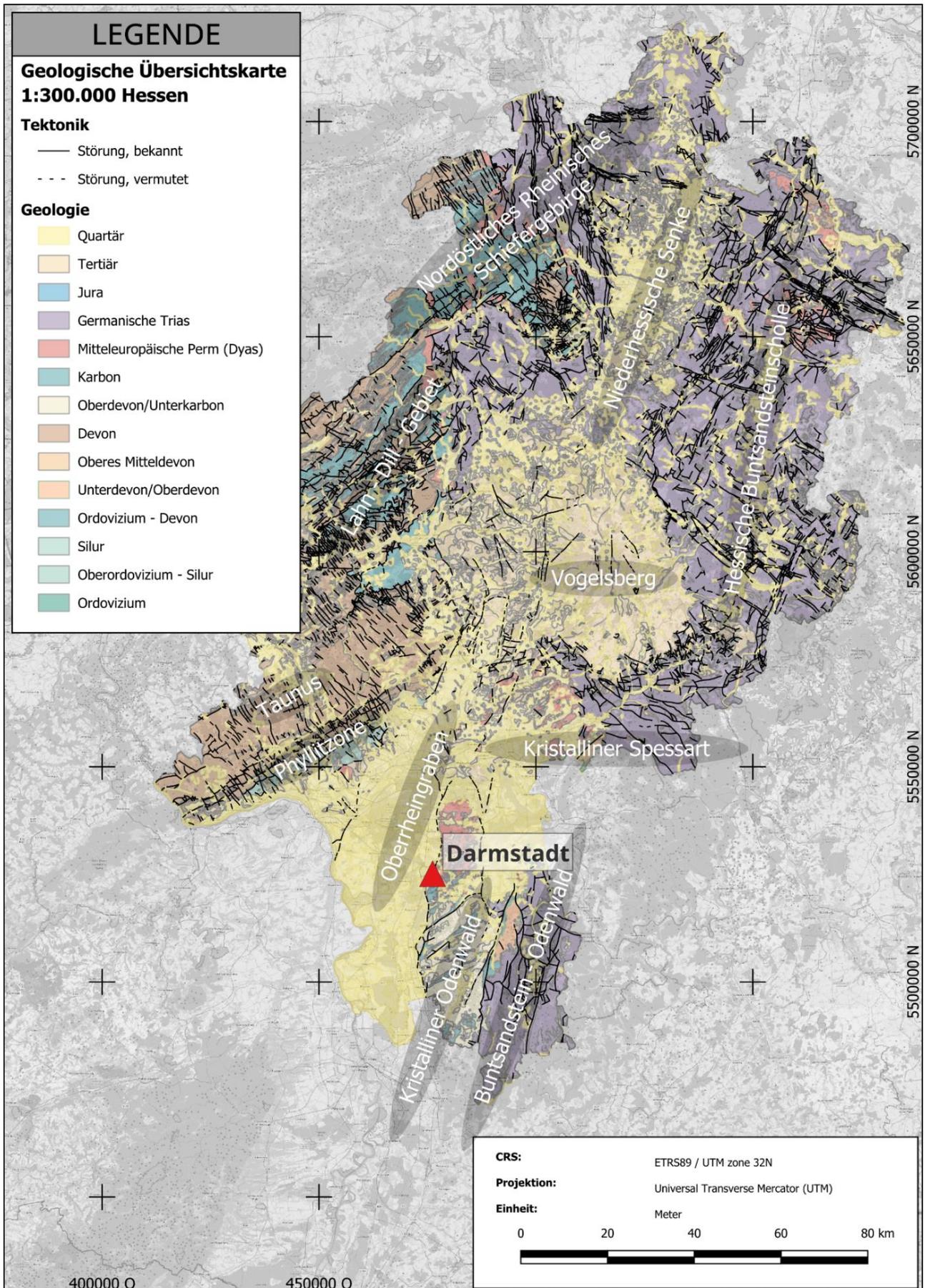


Abbildung 5: Geologische Strukturräume Hessens nach HEGGEMANN (2021) [17].
 Das Untersuchungsgebiet Darmstadt ist durch ein rotes Dreieck hervorgehoben.

Die Grabenstruktur verläuft in Richtung SSW - NNE, ist nach [20] in dieser Richtung etwa 300 km lang und variiert den Ausführungen von [18] entsprechend in der Breite zwischen 30 und 40 km, weitet sich aber an der südlichen Begrenzung bis auf etwa 60 km und an der nördlichen Begrenzung sogar auf bis zu 80 km auf. Ferner lässt sich die Grabenstruktur nach den Autoren [18], [20], in der Hauptrichtung SSW - NNE in drei Segmente gliedern, wobei jedes Segment etwa 100 km lang ist. Die Nordgrenze des Grabens wird durch die Verwerfung am Südostrand des Taunus gebildet, während nach Süden hin eine Abnahme der Sprunghöhe der Hauptverwerfungen erkennbar ist, sodass diese in einfache Flexuren übergehen und schließlich im Süden vom Schweizer Faltenjura begrenzt werden, wo sich die einheitliche große Grabenstruktur zerschlägt und in eine Vielzahl von einzelnen kleineren Teilgräben und Störungen übergeht [20]. Die Autoren weisen auf unterschiedliche Verwerfungsbeträge zwischen Grabenfüllung und Grabenflanke jeweils an der westlichen und östlichen Grabenseite hin und geben diese mit bis zu 4.000 m für die östliche Seite und bis zu 3.000 m für die westliche Seite an.

Die Geometrie des Oberrheingrabens wird ausführlich in [21] beschrieben. Demnach führte die Reaktivierung von bereits variszisch angelegten Strukturen im Zuge der Riftphasen zunächst vornehmlich zur Ausbildung von sinistralen Seitenverschiebungen, die mit fortlaufender Entwicklung in Auf- und Abschiebungen übergehen und schließlich ein Mosaik aus Bruchschollen im Bereich der Grabenstruktur herausbilden. Die unterschiedliche Tiefenlage der Bruchschollen bestimmt im Wesentlichen das heutige Bild der känozoischen Sedimentschichten im Oberrheingraben. Zur Ablagerung gelangten mächtige tertiäre Feinklastika (Tone bis Kalkmergel, teilweise bituminös), eingeschaltete Kalke und Dolomite sowie Psammite und grobklastische Sedimente.

Kristalliner Odenwald

Der Odenwald wird im regionalgeologischen Sinne zweigeteilt betrachtet. Der westliche Teil besteht aus magmatischen und metamorphen Gesteinen (Kristalliner Odenwald) und der östliche Teil aus flach nach Osten abdachendem Buntsandstein [20]. Da lediglich der Kristalline Odenwald das Untersuchungsgebiet tangiert, beschränkt sich die regionalgeologische Betrachtung auf diese Einheit. Der Kristalline Odenwald wird im Norden vom Spremlinger Horst und der Reinheimer Bucht, im Osten und Süden vom Buntsandstein-Odenwald und im Westen vom Oberrheingraben begrenzt [17]. Er wird als variszische Einheit der Mitteldeutschen Kristallinzone (MKZ) zugeordnet. Die MKZ wird als ehemaliger Inselbogen des variszischen Orogenes interpretiert und stellt eine Trennlinie zwischen den variszischen Einheiten des Saxothuringikum und Rhenoherynikum dar. Die Abbildung 6 (links) vermittelt einen Überblick über die Lage und Konfiguration der benannten variszischen Einheiten im weiteren Umfeld des hier betrachteten Untersuchungsgebietes (gelb).

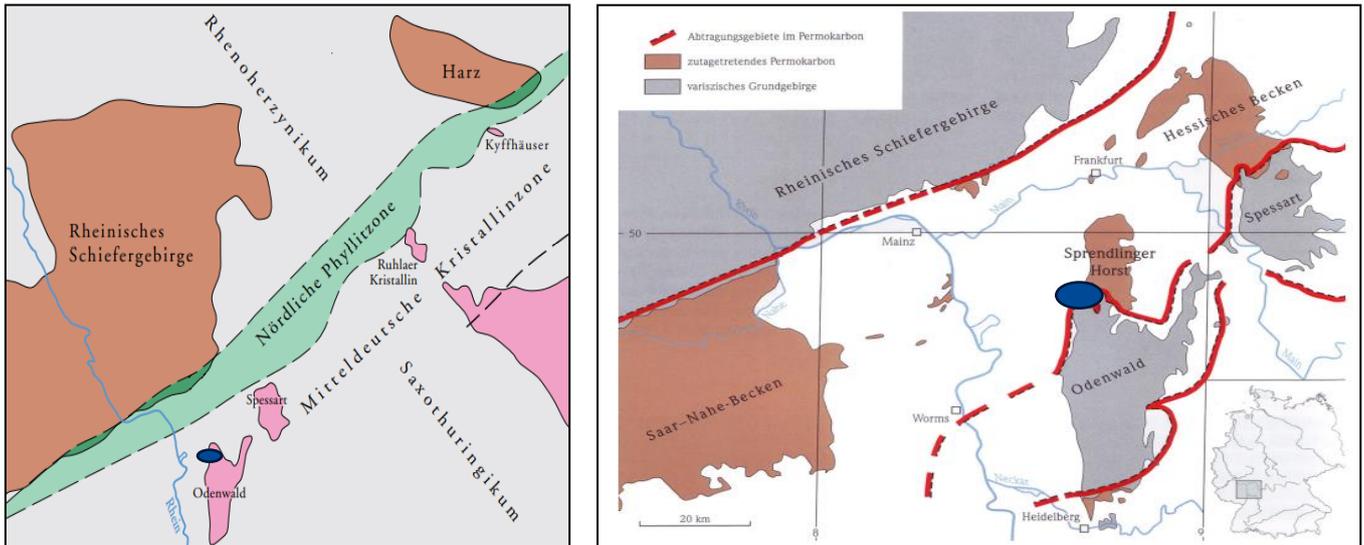


Abbildung 6: Links: variszische Einheiten im weiteren Umfeld des Untersuchungsgebietes (verändert aus [22], Standort gelb markiert); rechts: Paläogeographie des permokarbonischen Sedimentationsraumes im weiteren Umfeld des Untersuchungsgebietes (verändert aus [22]).

Der Kristalline Odenwald wird strukturräumlich in den westlich gelegenen Bergsträßer Odenwald und den östlich befindlichen Böllsteiner Odenwald gegliedert. Beide Strukturräume werden nach [17] und [20] durch die Otzberg-Zone, eine etwa Nord-Süd-verlaufende, vorwiegend variszisch angelegte, sinistrale Scherzone, voneinander getrennt. Außerdem verweist [20] auf das Auftreten von permischen, teilweise ignimbritischen Porphyren und assoziierte Tuffe im südlichen Odenwald sowie Melaphyren im nördlichen Odenwald.

Für den hier betrachteten Untersuchungsraum ist in Anbetracht der geologischen Verbreitung nur der Bergsträßer Odenwald relevant und wird im Folgenden beschrieben. Der Bergsträßer Odenwald besteht nach [17] und [20] vorwiegend aus Dioriten, Graniten und Gabbros, die durch schmale, südwest-nordöstlich verlaufende Zonen aus Glimmerschiefern, untergeordnet auch Gneisen und Marmoren, unterteilt sind. Die Gliederung des Bergsträßer Odenwalds erfolgt nach [23] in das Frankenstein-Massiv im Norden, die Flasergranitoid-Zone in der Mitte und den Wechnitz-Tromm-Heidelberg-Granitkomplex im Süden. Insgesamt werden vom Autor [23] für den Bergsträßer Odenwald vier Deformationsphasen angegeben, wobei die frühen Phasen D1 und D2 lediglich in den Metamorphiten nachweisbar sind, die späteren Phasen D3 und D4 hingegen auch die Plutonite erfasst haben.

Das Frankenstein-Massiv setzt sich aus dem überwiegend gabbroiden Frankenstein-Pluton, welcher an der Devon / Karbon-Grenze in den Eberstadt-Roßdorf-Schieferzug intrudierte, den gleichaltrigen Dieburg-Granit des Mainzer-Berg-Plutons und karbonischen Graniten und Granodioriten, wie dem Darmstadt-Pluton, zusammen [23]. Im Bereich des Untersuchungsgebietes treten neben dem Darmstadt-Pluton Amphibolite des Eberstadt-Roßdorf-Schieferzugs auf,

die in [23] als vulkano-sedimentäre Abfolge beschrieben werden und aus basaltischen Vulkaniten hervorgegangen sind. Sie bestehen vorwiegend aus Plagioklasen und Amphibolen und weisen teilweise noch magmatische Gefüge auf. Der Darmstadt-Pluton besteht aus Granodiorit und untergeordnet aus Quarz-Monzodiorit, in mineralogischer und geochemischer Hinsicht aus kalkalkalinen I-Typ-Magmatiten, die synkinematisch in SW-NE-streichende divergente, duktile D3-Blattverschiebungen mit deutlichen Abschiebungskomponenten intrudierten [23].

Sprendlinger Horst

Der Sprendlinger Horst stellt eine von Nord-Süd-streichenden Abschiebungen flankierte Hochscholle an der nordöstlichen Grabenschulter des Oberrheingrabens dar, die nach [15] bereits im Permokarbon als lokale Horst-Struktur angelegt war. Durch differenzierte tektonische Bewegungen wurde das Gebiet demnach postvariszisch herausgehoben. Hier folgen über dem kristallinen Grundgebirge (als nördliche Fortsetzung des Odenwaldes) diskordant die Ablagerungen des Rotliegend (siehe *Abbildung 7*, rechts). Diese werden [15] entsprechend als kondensierte Randfazies der permischen Sedimentationsbecken angesehen, da das Gebiet vom Oberkarbon bis in das untere Rotliegend als Beckenbereich ohne Sedimentation und bereits zum Ablagerungszeitraum der oberen Nahe-Subgruppe als Schwellenregion, ebenfalls ohne Sedimentation, ausgebildet war. Diese Entwicklung ist in *Abbildung 7* dargestellt.

Die permischen Ablagerungen bestehen aus Konglomeraten, (Arkose-) Sandsteinen, Tonsteinen und in geringerem Maße aus Kalksteinen. In die Sedimente, deren Liefergebiet/Ursprung nach [15] Amphibolite, Gabbros und Diorite des Frankensteinkomplexes und weiter Richtung Osten die Gneise, Phyllite und Glimmerschiefer der Otzberg-Zone des im Süden angrenzenden kristallinen Odenwalds sind, schalten sich entsprechend [20] basische Vulkanite in Form von Melaphyren ein.

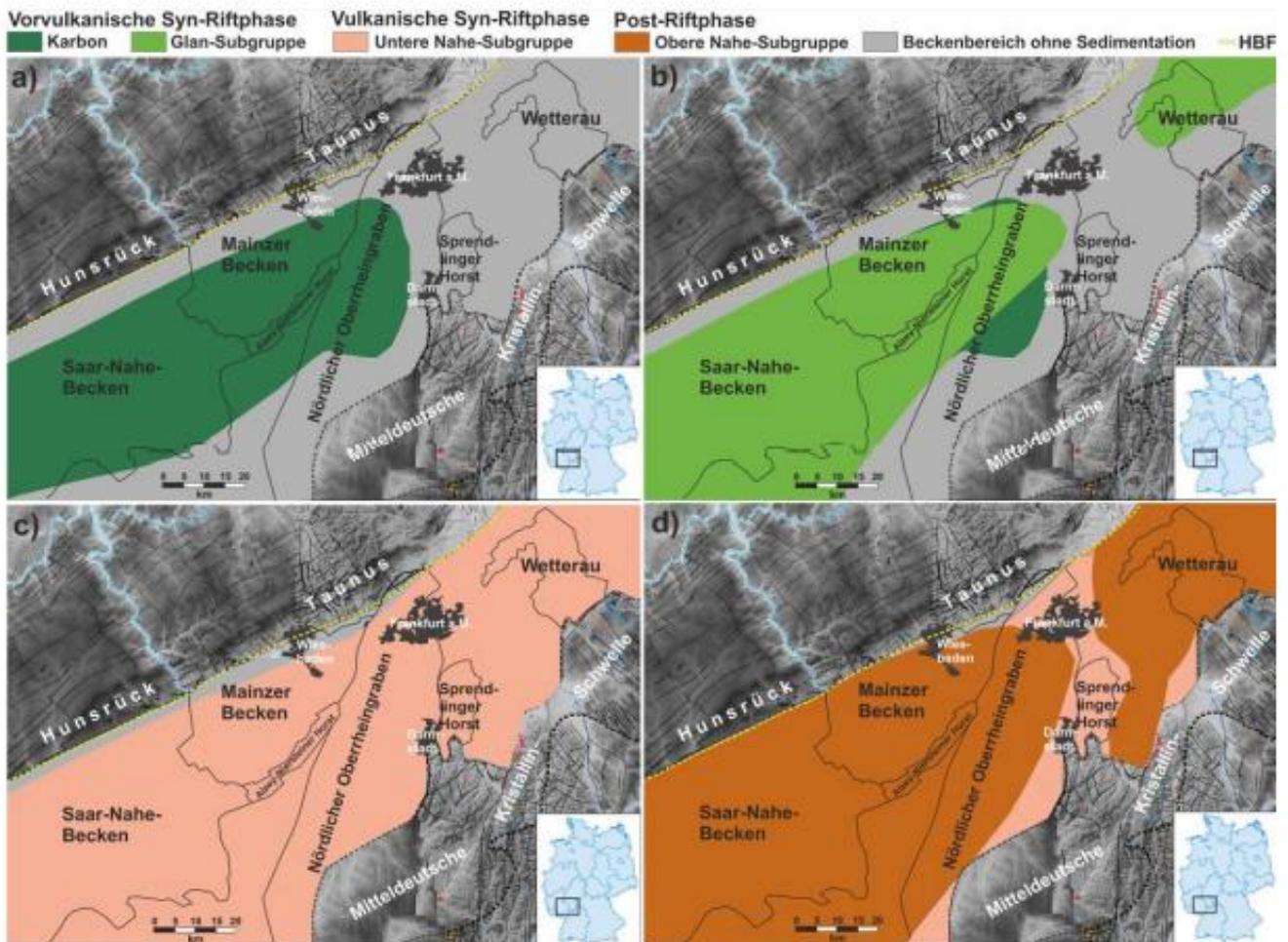


Abbildung 7: Permokarbone Ablagerungsräume im weiteren Umfeld des Untersuchungsgebietes in vier Zeitschnitten (a: Westphal bis Stephan, b: Ablagerungszeitraum Glan-Subgruppe, c: Ablagerungszeitraum untere Nahe-Subgruppe, d: Ablagerungszeitraum obere Nahe-Subgruppe; aus [24]).

5.2. Strukturgeologie

Einen detaillierten Einblick in die geologischen Verhältnisse des Untersuchungsraumes im Stadtgebiet von Darmstadt wird in [25] gegeben. Die darin enthaltenen Informationen dienen als Quellengrundlage der hier folgenden Ausführungen. Ferner wurden standortrelevante Angaben und Informationen aus [26] und [27] verwendet (Abbildung 8).

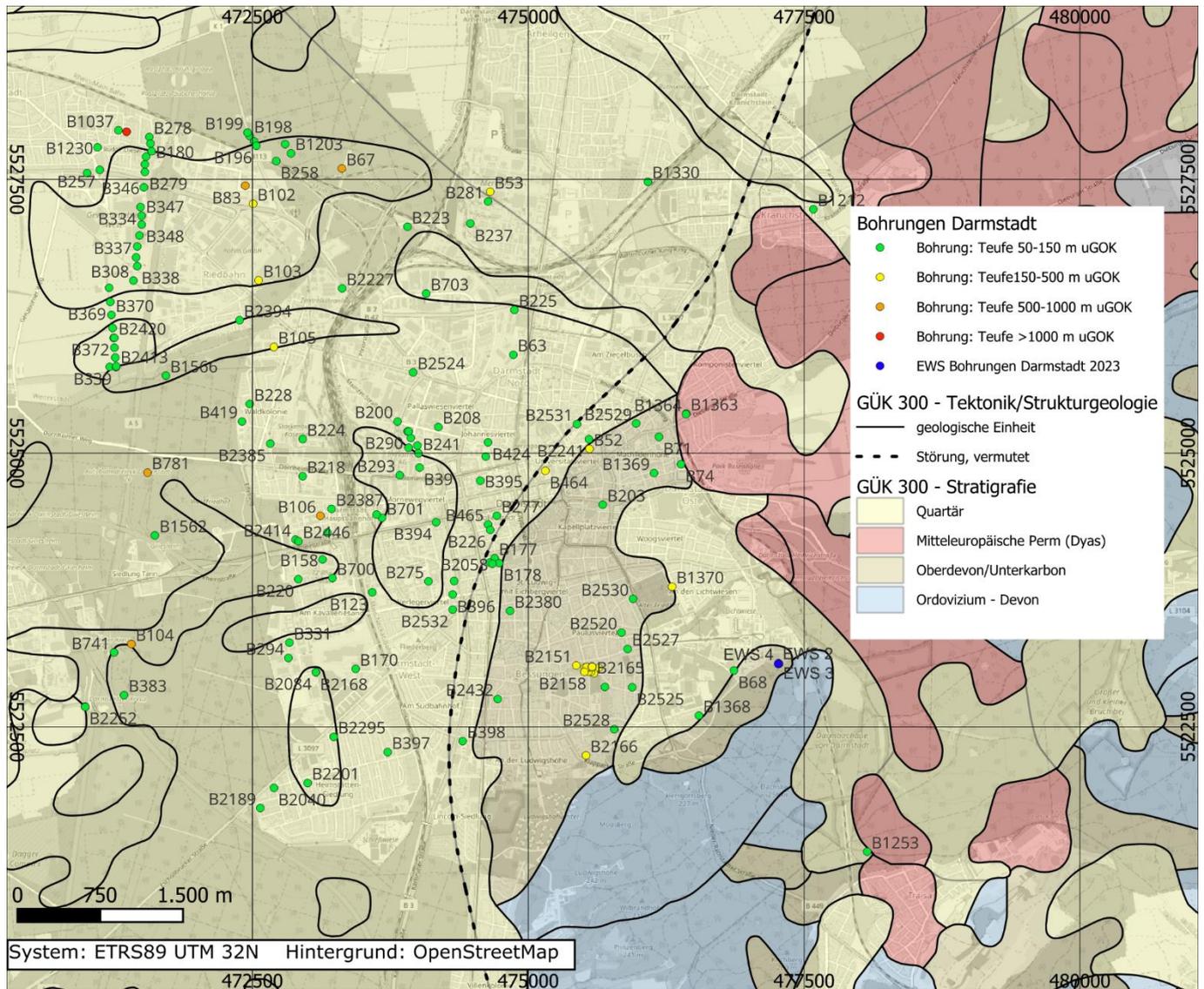


Abbildung 8: Geologische Karte [26] und verfügbare Bohraufschlüsse [27] im Stadtgebiet von Darmstadt. (Grundkarte: OpenStreetMap)

Zentrales und prägendes Strukturelement der geologischen Verhältnisse ist das in Abbildung 8 als vermutete Störung gekennzeichnete, in N-S bis NNE-SSW Richtung verlaufende Hauptlineament, welches den nördlichen Oberrheingraben im Westen gegen das Frankenstein-Massiv des Bergsträßer Odenwalds im Osten und in nordwestlicher Fortsetzung den Sprendlinger Horst abgrenzt. Die Grabenrandverwerfung gestaltet sich als Staffelbruch mit treppenartigen Abschiebungen nach Westen und zwei Hauptkluftrichtungen mit rheinischem und herzynischem Streichen. Etwa entlang der Linie Schloss-Johannesplatz-Gräfenhäuser Straße ist der Grabenrand als

Gräfenhäuser Bruchzone ausgebildet. Dort wird die Hochscholle durch erzgebirgisch streichende Störungen in ein Schollenmosaik gegliedert. Demnach befindet sich das Stadtgebiet auf hoch gelegenen Randschollen, wobei das Stadtzentrum durch flach nach Westen einfallende Schollen mit Sprunghöhen von 10 bis 30 m gekennzeichnet ist. Die Grabenrandverwerfung streicht im Süden parallel zur Heidelberger Straße, verläuft vom Staatstheater in Richtung Nordost über den Luisenplatz zum Schloss und dem Karolinenplatz, über das Verwaltungsgebäude der Technischen Universität, nördlich der Bahnbrücke an der Dieburger Straße und von dort wieder Richtung Norden.

5.3. Stratigraphie und Lithologie

Im Folgenden wird die Lithologie der einzelnen Schichten am Untersuchungsstandort Mathildenhügel von der ältesten zur jüngsten Einheit wiedergegeben, die am Standort tatsächlich vermutet bzw. gesichert sind.

Prä-Perm

Das Kristalline Grundgebirge ist im Untersuchungsgebiet im Bereich des Bergsträßer Odenwalds aufgeschlossen. Es besteht im Stadtzentrum aus einem Granodiorit [26], der in Verwitterungszonen tertiären Alters stark vergrust ist, sodass sphärische Granodioritkörper in einer Matrix aus vertonten Verwitterungsprodukten schwimmen und durch pleistozäne Frostverwitterung geformte erratische Blöcke typische Wollsackverwitterungsformen zeigen [22]. In den Granodiorit sind erzgebirgisch und herzynisch streichende Ganggesteine unterschiedlicher Genese und Petrologie intrudiert [23]. Südöstlich des Granodiorites schließen Amphibolite und untergeordnet Kalksilikatfelsen an, die schließlich von einem etwa 800 m breiten Diabaszug begrenzt werden [26]. In den Bohrungen EWS 2, EWS 3 und EWS 4 [44], südöstlich der Technischen Universität Darmstadt (Abbildung 8), sind unter permischem Basalt zunächst der kambrische Dieburger Granit (bis 470 m u. GOK) und im Liegenden bis 755 m der karbonische Darmstädter Granit aufgeschlossen.

Perm

Permische Gesteine sind im unmittelbaren Untersuchungsgebiet ausschließlich dem Rotliegend zuzuordnen [28]. Sie bestehen einerseits aus Sedimentgesteinen und andererseits aus Vulkaniten [28]. Entsprechend der GÜK 300 (siehe Abbildung 8) sind die Rotliegendgesteine im Nordosten und Osten an der Oberfläche aufgeschlossen. Im Norden des Verbreitungsgebietes lagern Sand- und Tonsteine, Konglomerate und Arkosen diskordant auf dem Grundgebirge [26]. Die terrigenen Klastika sind als Verwitterungsprodukte durch äolischen oder fluviatilen Transport in SW-NE-orientierten Trögen abgelagert worden [28]. Im Bereich des Vivariums und nördlich der Dieburger Straße [22] lagern die terrigenen Klastika dann direkt über permischen Basalten, die als

Melaphyre mit typischem amygdaloidem Gefüge ausgebildet sind und Kalzit als Hohlraumfüllungen aufweisen. Diese wurden historisch in Melaphyr-Steinbrüchen am Oberfeld und östlich der Rosenhöhe abgebaut [22]. Weitere Aufschlüsse sind im Bereich der Schnittspahnstraße und auf der Lichtwiese bekannt. Östlich der Mathildenhöhe ist die Grenze zwischen Grundgebirgskristallin und Rotliegend durch einen Bahnanschnitt aufgeschlossen [22]. Im Bereich der Erbacher Straße steht Melaphyr etwa 2,8 m u. GOK an. Das Rotliegend ist im Innenstadtbereich nicht kontinuierlich vorhanden, sondern lagert in Form von treppenartig nach Westen bis Nordwesten auf listrischen Flächen verschobenen und gegeneinander versetzten Schollen. Belege dafür finden sich in Aufschlüssen am Luisenplatz, an der Wilhelminenstraße, am Staatstheater und am Schloss [22]. In der Goethestraße sind rote Sand- und Tonsteine mit dolomitischen Kalksteinbänken nachgewiesen. Im Südosten haben Bohrungen für Erdwärmesonden Melaphyre von der GOK bis in eine Teufe etwa 200 m aufgeschlossen [29]. Im Bereich des Oberrheingrabens folgt das Rotliegend, durch mehrere Tiefbohrungen belegt, unter z.T. mächtigem Tertiär [30]. Beispielsweise, wurde Rotliegend bei Weiterstadt als Wechselfolge von Mittelsand- und Siltsteinen mit Einschaltungen von Melaphyren in einer Teufe von 1.773 bis 2.170 m oder in der Bohrung 732 Darmstadt-SW 1 [30] von 2.118,5 bis 2.152,5 m als Melaphyr mit Verwitterungszonen erbohrt. Die Tiefenlage der Rotliegendoberkante variiert, nimmt aber tendenziell Richtung Osten gegen die Ostflanke des Oberrheingrabens ab [29]. So steht Rotliegend in der Bohrung 0063 von 1.445,7 bis 1.506 m als hangender Melaphyr, gefolgt von Sandsteinen und Tonsteinen, in der Bohrung 0066 von 1.463 bis 1.475,5 m als Melaphyr, in der Bohrung 0083 von 914,5 bis 928 m als Tonstein und in der Bohrung 0067 von 462 bis 600 m als Wechselfolge aus Melaphyren und Tonsteinen, unterlagert von mächtigen Tonsteinen, an [29].

Trias

Am Untersuchungsstandort sind alle triassischen Sedimente entweder nicht abgelagert oder erodiert worden, so dass über diese Zeitspanne keine standortspezifischen Aussagen gemacht werden können [5].

Jura & Kreide

Am Untersuchungsstandort sind alle jurassischen und kretazischen Sedimente entweder nicht abgelagert oder erodiert worden, so dass über diese Zeitspanne keine standortspezifischen Aussagen gemacht werden können [5].

Tertiär

Das Tertiär folgt im Bereich Darmstadt-Mitte bis Darmstadt-West in Tiefen ab etwa 80 m u. GOK. Südlich von Arheiligen ist es hingegen ab 35 m u. GOK aufgeschlossen, ebenso an der Mauerstraße im Universitätsviertel ab 32,5 m u. GOK [29]. Lokale Erhebungen sind allerdings auch in der Stadtmitte (Probebohrung 0221 am alten Gaswerk) an der Julius-Reiber-Straße bei 13,5 m

u. GOK nachgewiesen. Das Pliozän ist im oberen Bereich mit typischen grauen, gelblichen und weißen feinkörnigen, meist tonhaltigen Sanden entwickelt, die Beimengungen von Braunkohle und Tonlinsen enthalten. Ferner sind Kiese mit gebleichten Buntsandsteingeröllen und Klasten aus scharfkantigen Gangquarzen, Quarziten und Hornsteinen nachgewiesen. Mehrheitlich sind die pliozänen Ablagerungen aber durch mächtige Tone (oft lehmig ausgebildet) im Bereich des Nördlichen Oberrheingrabens repräsentiert. Ebenso ist die Iffezheim-Formation mit Schluffen, schluffigen Sanden und Grobsand-Kies-Assoziationen (Bohrungen 2524 in der Pallaswiesenstraße, 2532 in der Eschollbrücker Straße, 2531 Darmstadt-Martinsviertel und 2387 am Europa-platz) vertreten. Miozäne Sedimente sind in ehemaligen Tongruben in der Nähe des Karlshofes in Form von marinen dunklen Tonmergeln sowie hell- bis dunkelgrauen und tiefschwarzen Tonen mit kalkigen Bändern aufgeschlossen. Ansonsten wurden Nachweise östlich der Oberrheingrabenverwerfung nur in den Bohrungen 0052 an der Mauerstraße in einer Teufe von 150 bis 215 m und 464 am Karolinenplatz von 87 bis 150 m u. GOK erbracht [29]. Im Bereich des Oberrheingrabens ist das Miozän in zahlreichen Aufschlüssen erbohrt worden. Die Oberkante liegt dabei in unterschiedlichen Teufen zwischen 130 m (Bohrung 0067) und 536 m (Bohrung 0066). Aufgeschlossen ist meist die typische tonige bis mergelige Fazies. Ältere tertiäre Ablagerungen (Oligozän und Eozän) treten im östlichen und zentralen Stadtgebiet nicht auf und bleiben auf das Gebiet des Oberrheingrabens beschränkt [26].

Quartär

Im Bereich des Nördlichen Oberrheingrabens ist an der Oberfläche eine quartäre Bedeckung der Staffelbrüche aus sandigen und kiesigen Ablagerungen von Flussterrassen und Hochflutablagerungen des Rheins und Mains, aus Flugsanden und aus Löß entwickelt [26]. Die quartären Decksedimente weisen unterschiedliche Mächtigkeiten auf und können im SW über 100 m mächtig sein.

5.4. Vorprofile

In Tabelle 2 und Abbildung 9 wird ein Muster-Vorprofil für den Untersuchungsstandort Mathildenhügel dargestellt, welches auf den Informationen der unter Kapitel 4.1 aufgeführten Bohrungen und auf Literaturangaben basieren. Die Teufenlagen wurden aus Schichtenverzeichnissen abgeleitet. Bohrung 0071 schließt bis Teufe 12 m u. GOK unbestimmt quartäre Sedimente auf [31]. Bis 74 m u. GOK sind verwitterte (vergruste) Granite mit teils schwefelkieshaltigen Ganggesteinen aufgeschlossen, die dem paläozoischen Odenwald Kristallin zuzuordnen sind. Bis Endteufe von 82 m u. GOK sind unverwitterte Granite aufgeschlossen, die ebenso dem Odenwaldkristallin zuzuordnen sind. Bohrung 0732 schließt bis 103 m quartäre Sedimente auf. Bis 2.120 m ist eine Wechselfolge tertiäre Mergelsteine, Tonsteine, Kalksteine, Dolomitsteine, Kies und Sand aufgeschlossen. Bei 2.120 m findet sich das Top des Rotliegend, dessen Mächtigkeit infolge der nicht erbohrten Basis im Untergrund nicht weiter nachvollzogen werden kann.

Tabelle 2: Geologisches Vorprofil für die Untersuchungsstandorte Mathildenhügel und Quartier nördliche Rheinstraße mit Angabe der zu erwartenden Lithologien.

Teufe in m u. GOK	(Litho-) Stratigraphische Einheit	Lithologie
Vorprofil Mathildenhügel		
0 bis >12 m	Quartär	unbestimmt
12 bis 74 m	Paläozoikum	Verwitterter Granitgrus
74 bis 82 m	Paläozoikum	Granit
> 82 m	Paläozoikum	Granit / Kristallin
Vorprofil nördliche Rheinstraße		
0 bis 103 m	Quartär	Verwitterungslehm, Sand, Kies
103 bis 2.120 m	Tertiär	Mergelsteine, Tonsteine, Kalksteine, Dolomitsteine, Kies, Sand
>2120 m	Perm	Rotliegendes, Vulkanite, Melaphyr

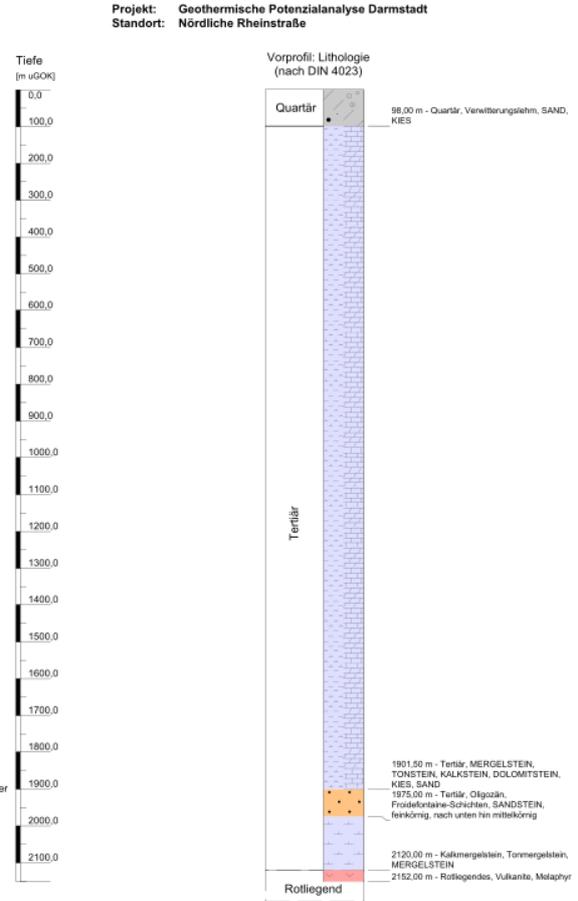
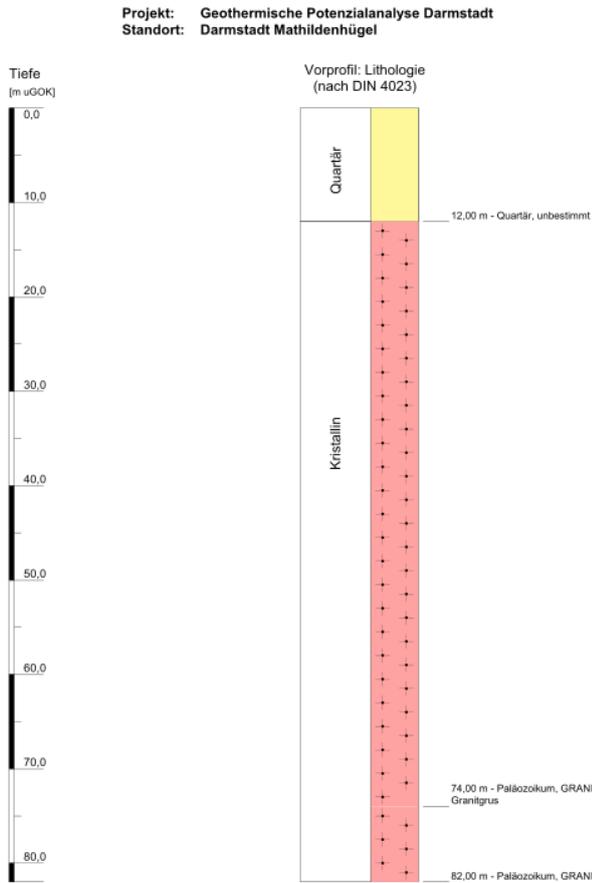


Abbildung 9: Geologische Vorprofile für den Untersuchungsstandort Mathildenhügel (links, nach Bohrung 0071 Wasserbohrung Brauerei Fay [31]) und nördliche Rheinstraße (rechts, nach Bohrung 0732 Darmstadt – Südwest 1 und 0701 Bohrung 1 Rummelbräu Darmstadt [31])

6. Hydrogeologische Situation

Die Hydrogeologie des Standortes Darmstadt wird maßgeblich durch die strukturellen und tektonischen Verhältnisse sowie die petrologischen/lithologischen Eigenschaften der am Aufbau der regionalgeologischen Einheiten beteiligten Gesteine bestimmt. In diesem Sinne weist [25] auf die differenzierte Betrachtung dreier unterschiedlicher Bereiche hin, der quartären Deck- und Lockersedimente westlich des Hauptlineamentes der Oberrheingrabenverwerfung, der magmatischen und metamorphen Gesteine des kristallinen Grundgebirges im Osten und Südosten und der Sedimentgesteine des Rotliegenden im Nordosten. Der Autor stellt die hydrogeologischen Verhältnisse sehr anschaulich durch zwei modellhafte Profilschnitte (Schnitt I in etwa in W-E Richtung und Schnitt II ungefähr in N-S Richtung verlaufend) dar (siehe Abbildung 10).

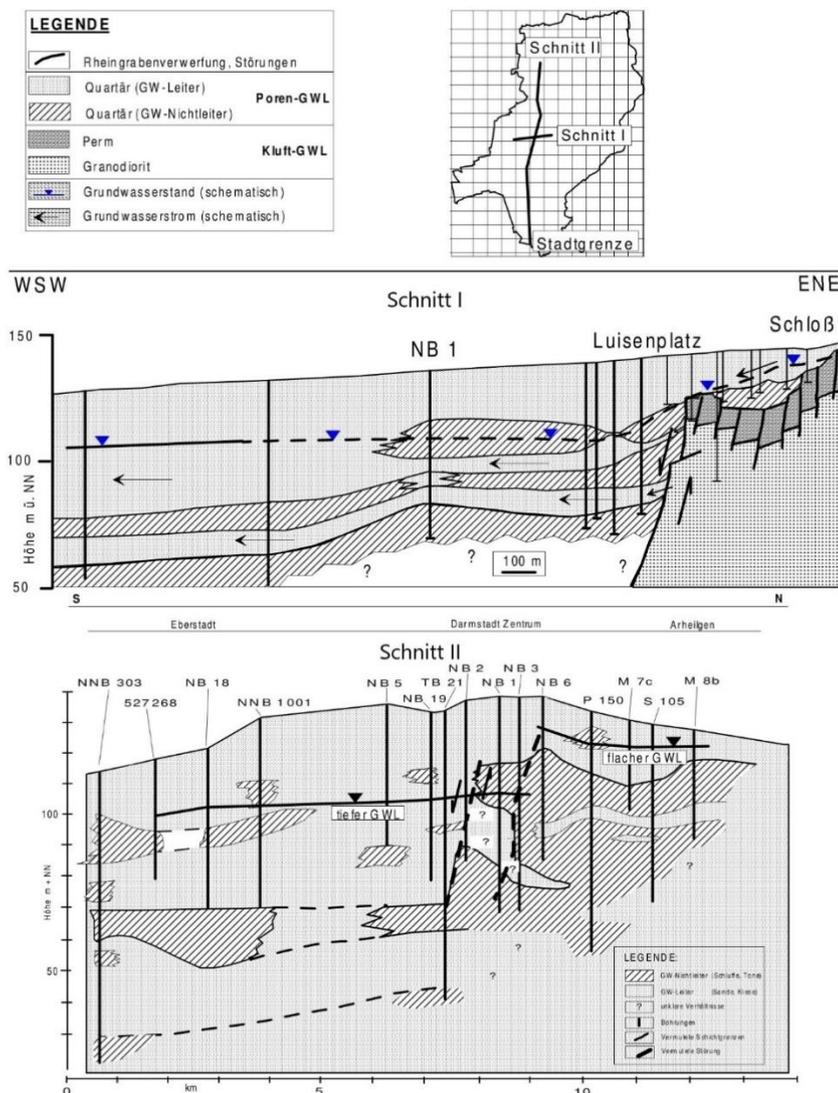


Abbildung 10: Hydrogeologische Profilschnitte im Untersuchungsgebiet Darmstadt. (Verändert zusammengestellt aus [25]).

Der östliche Bereich des Profilschnittes ist durch Grundgebirgskristallin und diskordant überlagerndes Rotliegend (in Abbildung 10 als Perm ausgewiesen) geprägt, welche als Staffelbrüche mit relativ flach nach Westen einfallenden Schollen und markant durch steil nach Westen einfallende Abschiebungen segmentiert, modellhaft dargestellt sind. In diesem Bereich wird die Wasserwegsamkeit im stark geklüfteten Kristallin des Grundgebirges nach [25] maßgeblich durch die Raumstellung, Geometrie und Häufigkeit von hydraulisch kommunizierenden Klüften bestimmt. In den hangenden Rotliegend-Schollen sind Grundwasserstände dem Autor entsprechend bei 123 bis 126 m NN, mit der Oberkante des Kristallins nach NW abtauchend, nachgewiesen. Diese Gesteinseinheiten sind als Kluftgrundwasserleiter ausgebildet. Über dem Rotliegend sind quartäre Aquifugen (wasserundurchlässige Schicht) in Bereichen von relativ tiefer gelegenen Schollen angedeutet, was durch mehrere Bohrungen dort bestätigt wird. Darüber schließen wiederum relativ geringmächtige quartäre Lockersedimente als Porengrundwasserleiter an.

Ein deutlich anderes Bild ergibt sich im Bereich westlich der Hauptverwerfung des Oberrheingrabens, wo mächtige quartäre Porengrundwasserleiter ausgebildet sind. Nach Angaben aus [25] ist im Brunnen NB 1 ein Flurabstand von etwa 30 m messbar und der untere Aquifer ist in Teufen von ca. 40 bis 50 m mit gespanntem Grundwasser nachgewiesen. Ferner ist der obere Aquifer durch einen unterschiedlich mächtigen Ton-Schluff-Horizont in einer Teufenlage von 20 bis 35 m zweigeteilt, wobei der Zwischenaquifer in Richtung Süden auskeilt und nach Norden hin mächtiger wird, sodass er dort die Basis eines oberen Aquiferstockwerkes bildet. Der Flurabstand ändert sich im Profilverlauf deutlich in Abhängigkeit vom geologischen Aufbau. Im Bereich des kristallinen Grundgebirges beträgt er am Luisenplatz etwa nur 3 bis 4 m und steigt mit dem Übergang zum Oberrheingraben auf 10 bis 15 m. Auch im Bereich des Staatstheaters ist eine sprunghafte Zunahme des Flurabstandes Richtung Westen durch Bohrungen nachgewiesen. Dort beträgt er nach Angaben aus [25] rund 10 m westlich der Ausstrichlinie des Grundgebirges etwa 10 m und liegt 30 m weiter westlich bereits mehr als 24 m, sodass das Grundwasser generell Richtung Westen und im zentralen Stadtbereich von Südosten nach Nordwesten fließt.

Aus dem Profilverlauf des Schnittes II ist ersichtlich, dass im Bereich des Oberrheingrabens kein einheitlicher und lateral kontinuierlicher Aufbau des Grundwasserstocks vorliegt. So kommt [25] zu der Feststellung, dass im Süden des Untersuchungsgebietes ein mächtigeres, tiefer liegendes quartäres Grundwasserstockwerk und im Norden ein geringmächtigerer und näher an der Oberfläche befindlicher Aquifer ausgebildet ist. Der Autor vermutet einen ursächlichen Zusammenhang mit den tektonischen Verhältnissen (Nähe zur Grabenrandstörung, Verbindung zur Gräfenhäuser-Bruchzone), wobei sicherlich auch die fazielle Ausprägung der quartären Ablagerungen unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.1 beschriebenen Ausbildung von Flussterrassen, Hochflutablagerungen, Flugsand- und

Lößakkumulationen sowie vorwiegend toniger bis schluffiger Sedimentation in basalen Bereichen des Quartärs den Aufbau des Grundwasserstockwerkes bestimmen. Hinsichtlich der hydraulischen Kennwerte lässt sich naturgemäß feststellen, dass der Speicherkoeffizient und der Durchlässigkeitsbeiwert der Kluftgrundwasseraquifere des Kristallins um ein bis zwei Zehnerpotenzen niedriger liegen als in den quartären Porengrundwasseraquiferen. Die Abbildung 11 zeigt die oberflächennahe Durchlässigkeit im Bereich des Untersuchungsstandortes Mathildenhügel aus [5].

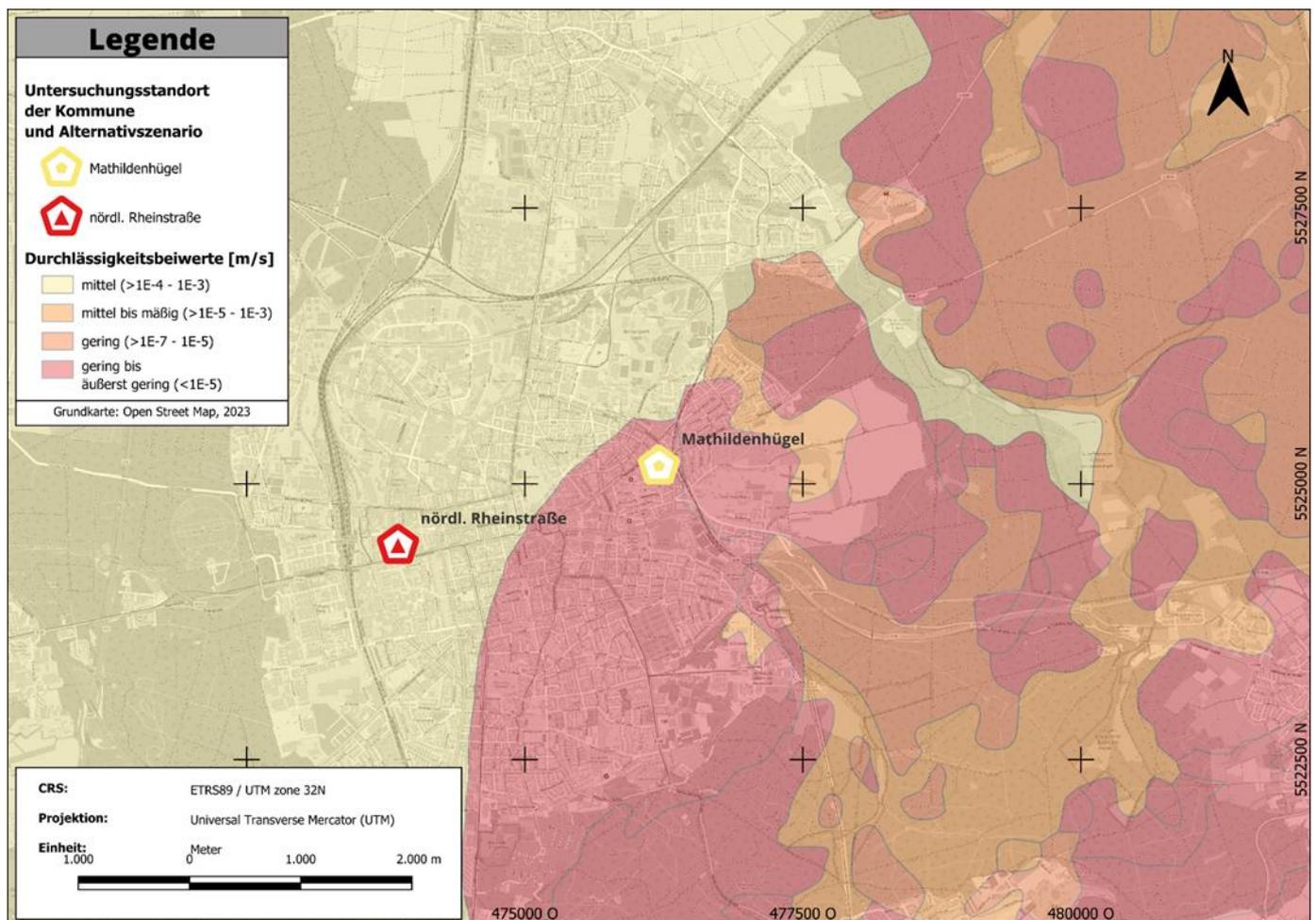


Abbildung 11: Oberflächennahe Durchlässigkeitsbeiwerte im Stadtgebiet Darmstadt nach [5].

In [25] wird darauf verwiesen, dass im Bereich der etwa in N-S Richtung verlaufenden Verwerfung höhere Ergiebigkeiten erzielt werden, als im Umfeld der erzgebirgisch streichenden Störungszone. Weiterhin nehmen die Durchlässigkeiten von W nach E ab, wobei im Bereich von Störungen und Gängen höhere Werte nachweisbar sind und Richtung Norden die Ergiebigkeiten in unmittelbarer Umgebung des Grabenrandes wesentlich geringer ausfallen. Für den Granodiorit werden nach Verwitterungsgrad differenzierte Werte angegeben. Der Verwitterungsgrus lässt demnach Durchlässigkeiten von 3×10^{-5} bis 2×10^{-4} m/s und Speicherkoeffizienten zwischen 2 und 8 % erwarten, während die Durchlässigkeitsbeiwerte im unverwitterten Granodiorit zwischen

6×10^{-7} und 5×10^{-6} m/s liegen und die Speicherkoeffizienten zwischen 1 und 3 % variieren. Zwei Pumpversuche ermittelten für das Rotliegend Durchlässigkeiten von 6×10^{-7} bis 7×10^{-7} m/s und einen Speicherkoeffizient von 0,35 %. Die Mächtigkeit des Rotliegend-Aquifers wird mit 30 m angegeben. Auch für tertiäre Ablagerungen erfolgten im Stadtzentrum Bestimmungen der Kennwerte in der Nähe der Störungszone. Der k_f -Wert beträgt hier 10^{-5} m/s. Den Angaben in [25] entsprechend können für Sandsteine und Konglomerate Kluftvolumen von 1 bis 1,5 % und für schluffige Sandsteine 0,1 bis 0,5 % angenommen werden.

Demgegenüber treten im quartären oberen freien Porenwasseraquifer südlich der Gräfenhäuser Bruchzone Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen 2×10^{-4} und 4×10^{-4} m/s bei Mächtigkeiten zwischen 5 und 30 m auf. Im Stadtgebiet Arheiligen wurden für den oberen Aquifer k_f -Werte zwischen 3×10^{-5} und 7×10^{-5} m/s bestimmt. Nördlich der Bruchzone ist im tieferen Aquifer (Mächtigkeit dort etwa 5 m) ein Wert von 3×10^{-5} m/s nachgewiesen. Die Speicherkoeffizienten liegen im Bereich der erzgebirgisch streichenden Verwerfungszone zwischen 3 und 7 %. Der tiefere Aquifer im südlichen Bereich (Mächtigkeiten zwischen 10 und 18 m) ist durch einen k_f -Wert von 10^{-4} m/s gekennzeichnet. Hier liegen die Speicherkoeffizienten bei 8 bis 19 %.

Die Grundwasserbeschaffenheit wird in [25] explizit für das Untersuchungsgebiet Darmstadt detailliert beschrieben. Alle folgenden Angaben wurden aus dieser Arbeit entnommen.

Der natürliche pH-Wert des Grundwassers liegt in Darmstadt zwischen 6 und 7,7, wobei oberflächennahe Grundwässer im Stadtgebiet einen weiteren Wertebereich von 6,2 bis 9,9 aufweisen und tiefere Grundwässer Werte zwischen 7 und 7,8 zeigen. Das gemittelte Redoxpotential beträgt 190 mV. Oberflächennah liegen etwa 80 % aller Messwerte im Bereich von 5 bis 390 mV, allerdings wurden in 9 Grundwassermessstellen auch negative Werte zwischen -3 und -164 mV bestimmt. Westlich von Arheiligen traten insgesamt die meisten niedrigen Werte auf (-117 bis 163 mV). An einem Notbrunnen am Botanischen Garten, der in Vulkaniten des Rotliegend verfiltert ist, wurden -43 mV und ein pH-Wert von 6,9 gemessen. Ferner wurde ein deutlicher H_2S Geruch festgestellt. Die elektrische Leitfähigkeit des natürlichen Grundwassers liegt im Anstrom zwischen 210 und 610 $\mu S/cm$ bei einem Mittelwert von 440 $\mu S/cm$. Im Stadtgebiet wurden allerdings im oberflächennahen, anthropogen beeinflussten Grundwasser Werte zwischen 700 und 3.700 $\mu S/cm$ (Mittelwert rund 1.050 $\mu S/cm$) gemessen. Auch im tieferen Grundwasser zeigte sich im Stadtgebiet ein Mittelwert von etwa 1.000 $\mu S/cm$, wobei die Messwerte in einem Wertebereich zwischen 650 und 1.380 $\mu S/cm$ lagen. Der Sauerstoffgehalt schwankte zwischen 0,7 und 9,8 mg/l. Sehr niedrige Konzentrationen von < 2 mg/l zeigten sich vor allem im oberflächennahen Grundwasser im zentralen Stadtgebiet, im Rotliegend, im Kristallin sowie im Westen vom Darmstadt. Im tieferen Grundwasserleiter lagen die Sauerstoffkonzentrationen zwischen 4,2 und

5,7 mg/l. Der Autor verweist ferner darauf, dass bei allen Grundwassermessungen die Temperatur bestimmt wurde. Unter natürlichen Bedingungen entspricht sie im bodennahen Bereich der Jahresmitteltemperatur von etwa 10 °C. Der Wertebereich reicht dabei von 7 bis 24 °C, was durch zahlreiche zusätzliche Wärmequellen im Stadtgebiet zu erklären ist. So steigen die Messwerte im Stadtzentrum auch im natürlichen Anstrom auf bis zu 18 °C.

Ebenso zeigt sich eine deutliche anthropogene Beeinflussung der Grundwasserbeschaffenheit bei den Konzentrationen der Kat- und Anionen. Der natürliche Gehalt von Na⁺ schwankt im Anstrom zwischen 5 und 23 mg/l, während im zentralen Stadtgebiet oberflächennah Werte von 4 bis 285 mg/l bestimmt wurden. Auch im tieferen Grundwasserleiter reichen die Messwerte dort von 17 bis 74 mg/l. Die Kaliumgehalte weisen ebenso in 30 % aller analysierten Proben und an 32 % aller 106 Messstellen Ergebnisse über dem Grenzwert von 12 mg/l auf. Das Mittel beträgt 19 mg/l. Im natürlichen Anstrom konnten K⁺ Konzentrationen zwischen 0,7 und 5 mg/l ermittelt werden. Im tiefen gespannten Grundwasser lagen alle Messwerte bei < 5 mg/l. Die Konzentrationen der Ca²⁺ Ionen liegen im natürlichen Anstrom zwischen 25 und 105 mg/l. Im zentralen Stadtgebiet hingegen konnten Messwerte im oberflächennahen Grundwasser zwischen 120 und 220 mg/l und im tiefen Grundwasser zwischen 80 und 230 mg/l ermittelt werden. Ein ähnlicher Trend zeigt sich für Mg²⁺. Der natürliche Gehalt im Grundwasser liegt zwischen 2 und 22 mg/l bei einem Mittelwert von 18,6 mg/l. Im zentralen Stadtgebiet zeigen die Mg²⁺ Konzentrationen im oberflächennahen Grundwasser Werte zwischen 13 und 24 mg/l und im tiefen Grundwasser 12 bis 22 mg/l.

Ein analoges Bild zeigt sich bei den Konzentrationen der Anionen. Die natürlichen Gehalte von Cl⁻ schwanken zwischen 4 und 37 mg/l. Im zentralen Stadtgebiet aber, liegt der Wertebereich im oberflächennahen Aquifer zwischen 112 und 116 mg/l und im tieferen Aquifer zwischen 60 und 150 mg/l. Auch für Stickstoff zeigt sich, dass der natürliche Nitratgehalt in Darmstadt zwischen 1 und 25 mg/l liegt, im zentralen Stadtgebiet aber oberflächennah Konzentrationen von 0,2 bis 42 mg/l und im tieferen Aquifer 30 bis 126 mg/l gemessen wurde. Die Ammoniumkonzentration bewegt sich zwischen 0,01 und 3,4 mg/l. Phosphorkonzentrationen wurde nur in reduziertem Umfang bestimmt. Die Werte reichen von 0,04 bis 2,2 mg/l, wobei die höchsten Werte auf das Stadtzentrum von Arheiligen entfallen. Die Aussagen zu Sulfatgehalten stützen sich auf zahlreiche Messungen. Im natürlichen Anstrom lagen die Konzentrationen bei 26 bis 80 mg/l. Das Mittel aller Messwerte entspricht 143 mg/l, wobei durch die räumliche Nähe eines Deponiestandortes ein Maximum von 1.840 mg/l ermittelt wurde. Somit ist eine sehr große Spannweite der Messwerte aller Analysen von 2 bis 1840 mg/l festgestellt worden. Hinsichtlich der Konzentration von Hydrogenkarbonationen lassen sich im Untersuchungsgebiet zwei verschiedene Grundwassertypen entsprechend des Einzugsgebietes des Schwarzbaches mit karbonatreichen und

karbonatarmen Sedimenten unterscheiden. Im Süden sind mit 12 bis 24 °dH mittelharte bis harte Grundwässer entwickelt, im Norden hingegen weiche Grundwässer mit 4 bis 12 °dH. Die Gesamthärte in den Notwasserbrunnen in Darmstadt schwankt zwischen 11 und 36 °dH. Der natürliche Gehalt von HCO_3^- liegt bei 50 bis 310 mg/l, im zentralen Stadtgebiet oberflächennah zwischen 60 und 420 mg/l und im tieferen Grundwasser zwischen 40 und 1.800 mg/l, wobei der Mittelwert dieser Messreihe ohne den Ausreißer von 1.800 mg/l nur 300 mg/l beträgt.

Darmstadt liegt auf vier Grundwasserkörpern (GWK) nach WRRL (Wasserrahmenrichtlinie [46]). Im westlichen Bereich Darmstadts liegen die beiden Grundwasserkörper GWK 2396_3101 und GWK 2398_3101 und im Osten die beiden Grundwasserkörper GWK 2396_10102 und GWK 2398_10103. Der Standort Mathildenhügel befindet sich im Bereich des GWK 2398_10103.

Der Zustand von GWK wird nach WRRL durch chemische Grenzwerte für u. a. Nitrat und Pestizide und der mengenmäßige Zustand über die Verfügbarkeit von Grundwasser bewertet. Der Zustand der beiden Grundwasserkörper im Osten GWK 2398_10103 (Mathildenhügel) und GWK 2396_10102 wird nach dem WRRL-Bewirtschaftungsplan 2021 chemisch und mengenmäßig als gut eingestuft [46]. GWK 2398_3101 und GWK 2396_3101 im Westen werden mengenmäßig als gut jedoch chemisch als schlecht bewertet [46]. Hierbei werden unter anderem die Werte für Sulfat, Nitrat und Pflanzenschutzmittel überschritten.

7. Geothermische Standortbetrachtung

Eine geothermische Energiegewinnung beschreibt den Prozess der Nutzung der natürlichen, aus dem Erdinneren stammenden Wärme für verschiedene energietechnische Anwendungen. Dies umfasst die Nutzung von gespeicherter Wärmeenergie im Gestein, sowie heißem Wasser oder Dampf aus geothermischen Reservoirien zur Wärmeversorgung von Gebäuden, zur Gewinnung von Prozesswärme in industriellen Anlagen sowie zur Stromerzeugung durch Geothermiekraftwerke. Die geothermische Energie kann entweder durch Bohrungen bzw. Brunnen, durch in den Untergrund eingebrachte Kollektoren oder durch Erdwärmesonden erschlossen werden. Die über ein Wärmeträgerfluid an die Oberfläche transportierte Wärmeenergie wird unter Nutzung von Wärmetauschern und / oder Wärmepumpen sowie ggf. Turbinen nutzbar gemacht. Geothermie ist eine nachhaltige und emissionsarme Energiequelle, die dazu beiträgt, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern und den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Energieversorgung zu unterstützen.

7.1. Geothermische Rahmenbedingungen

Im Folgenden werden die für die Einschätzung des geothermischen Potenzials an einem Projektstandort wichtigen geothermischen, petrophysikalischen sowie hydraulischen Größen und Kennwerte erläutert. Ebenfalls werden die leistungscharakterisierenden Parameter geothermaler Systeme diskutiert, welche als Ergebnis der zuvor aufgezählten Größen in Kombination mit einer technischen Erschließungsform die Bemessungsgrundlage für die Einsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit einer geothermischen Anlage darstellen.

7.1.1. Terrestrischer Wärmestrom / Wärmestromdichte q [W / m^2]

Der aus dem Erdinneren zur Erdoberfläche stattfindende Wärmetransport wird als terrestrischer Wärmestrom (auch Wärmestromdichte) bezeichnet. Der terrestrische Wärmestrom entspricht der von der Erde abgegebenen flächenbezogenen Leistung. Der terrestrische Wärmestrom stellt für die Ermittlung des geothermischen Potentials eines Standortes eine grundlegende Kenngröße dar, da er den Wärmenachschub aus dem Erdinneren quantifiziert. Die natürliche mittlere Wärmestromdichte beträgt an der Erdoberfläche durchschnittlich $0,065 W/m^2$ ($65 mW/m^2$). Die räumliche Verteilung der Temperatur des Untergrundes ist jedoch heterogen ausgebildet. Der Wärmetransport im Untergrund erfolgt durch Wärmeleitung im Gestein (Konduktion) oder durch die Wärmemitführung (Konvektion) mit Hilfe von Fluiden (z.B. aufsteigenden Thermalwässern).

Es existieren Gebiete sowohl mit erhöhter als auch mit herabgesetzter Wärmestromdichte, welche als positive bzw. negative Wärmeanomalien bezeichnet werden. Positive Anomalien, also Bereiche mit erhöhtem Temperaturgradient bzw. erhöhter Wärmestromdichte können ihre

Ursache in Vulkanismus, Riftprozessen sowie im Auftreten von erhöht wärmeleitfähigen Gesteinen oder hydrothermalen Systemen haben. Die Wärmestromdichte q [W/m^2] stellt gemäß der Beziehung $q = \lambda \cdot \nabla T$ das Produkt aus der durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeit des geologischen Untergrundes λ [$W/(m \cdot K)$] und des lokalen geothermischen Gradienten ∇T [$K/100m$] dar. Hydrothermale Systeme sind größtenteils an tiefreichende, durchlässige Strukturen bzw. Störungen / Störungszonen oder an Graben- sowie Beckenstrukturen gebunden, an denen heiße Tiefenwässer aufsteigen können und so zu einem lokal erhöhten Wärmetransport beitragen. Positive Wärmeanomalien stellen generell Areale mit einem erhöhten Potential für eine geothermische Erschließung des Untergrundes dar, da Gesteinsintervalle mit förderwürdiger bzw. ausreichender Temperatur in vergleichbar geringer Teufe erreicht werden können.

Für das Bundesland Hessen liegen die Werte der Wärmestromdichte im Mittel zwischen 55 und 65 mW/m^2 . Die höchsten Wärmestromdichten werden mit Werten über 90 mW/m^2 im Oberrheingraben dokumentiert.

7.1.2. Geothermischer Gradient ∇T [K / 100 m]

Der geothermische Gradient ∇T beschreibt den Temperaturanstieg mit zunehmender Tiefe und steht in direktem Zusammenhang mit dem terrestrischen Wärmestrom. Der mittlere geothermische Gradient in der kontinentalen Erdkruste in Deutschland entspricht einer Zunahme der Temperatur von ca. 2,8 K bis 3,0 K pro 100 m Tiefe (bei einem mittleren terrestrischen Wärmestrom von ca. 0,065 W/m²). Dieser Mittelwert kann als Orientierungswert für eine erste Abschätzung des geothermischen Potenzials eines Standortes genutzt werden. Regionen mit einem geothermischen Gradienten größer als 3 K / 100 m zeigen ein erhöhtes geothermisches Potenzial.

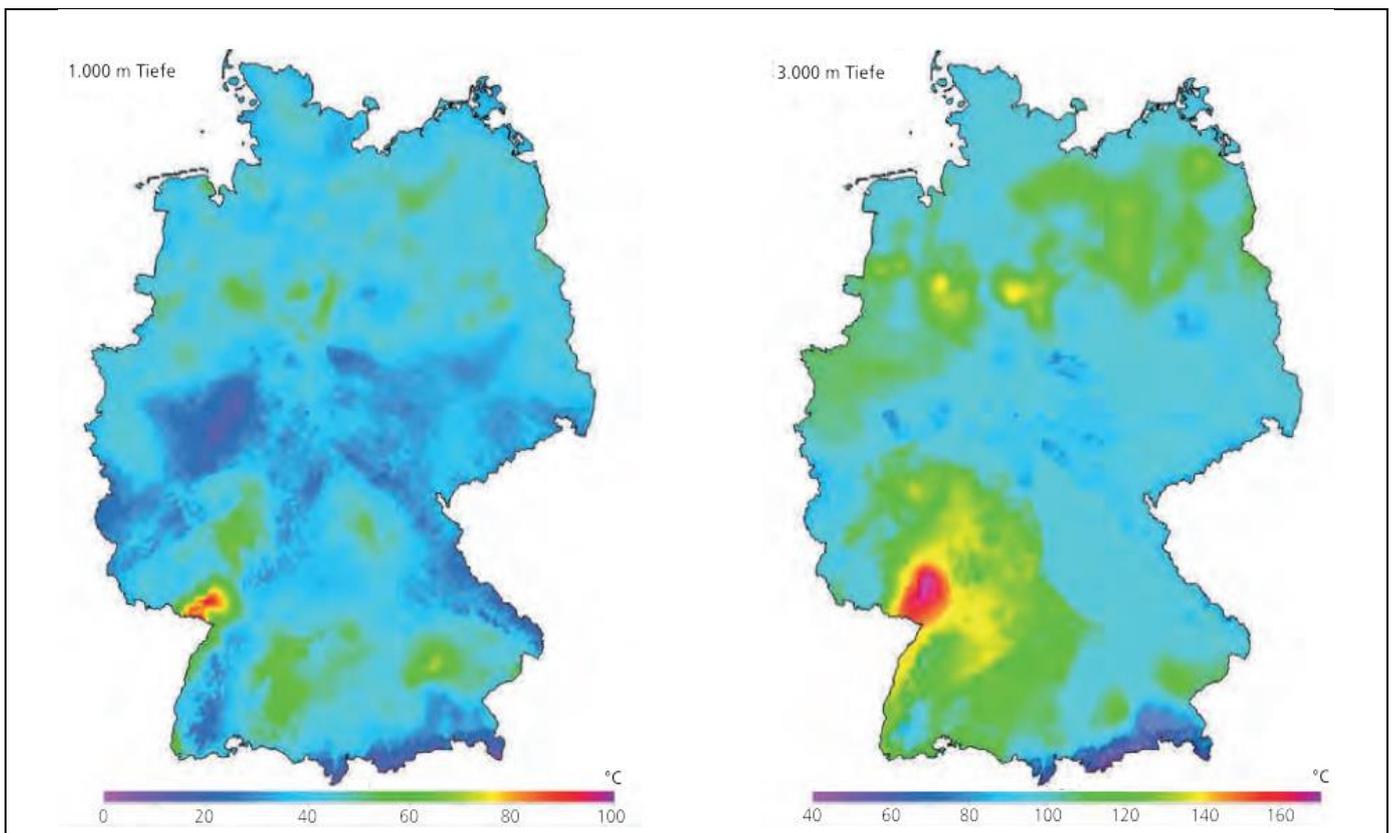


Abbildung 12: Temperatur im Untergrund Deutschlands für eine Teufenlage von 1 km (links) und 3 km (rechts). Regionen mit erhöhtem geothermischem Potenzial sind der Legende zu entnehmen. Entnommen von [7].

Abbildung 13 zeigt für die Region Darmstadt in aus dem geothermischen Informationssystem GeotIS [7] entnommenen Horizontalschnitten die Temperaturverteilung für die Teufenlagen 100, 500, 1.000 und 2.000 m u. NN. Die dargestellten, modellierten Temperaturverteilungen basieren auf aus abgeteufte Bohrungen erhobenen Temperaturmessungen unter Nutzung strukturgeologischer Modelle wie bspw. aus Hessen 3D [13].

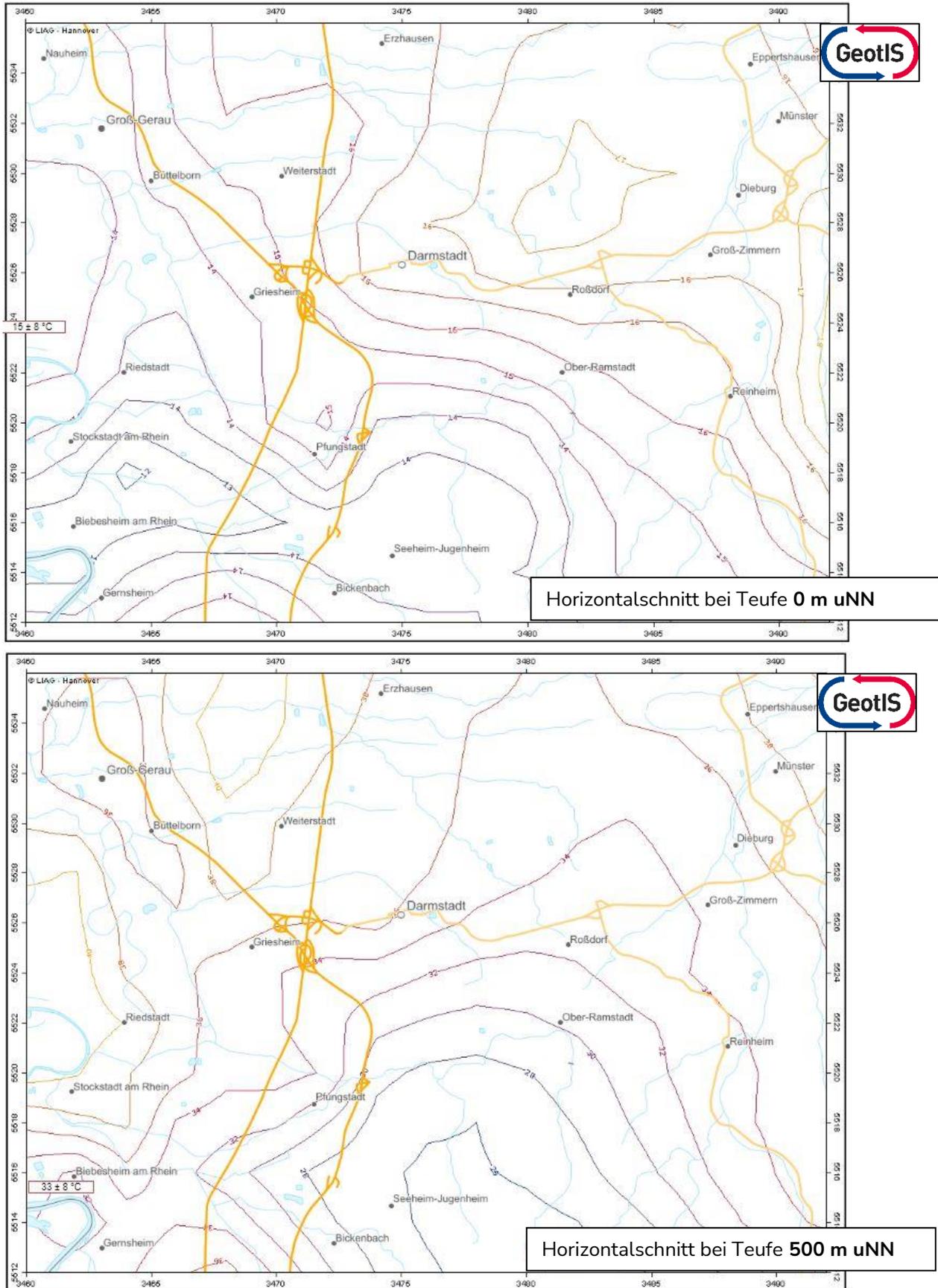


Abbildung 13: Temperaturverteilung im geol. Untergrund im Raum Darmstadt in den Tiefenlagen 0, 500, 1.000, 1.500 und 2.000 m u. NN. Schnittexport aus GeotIS [7].

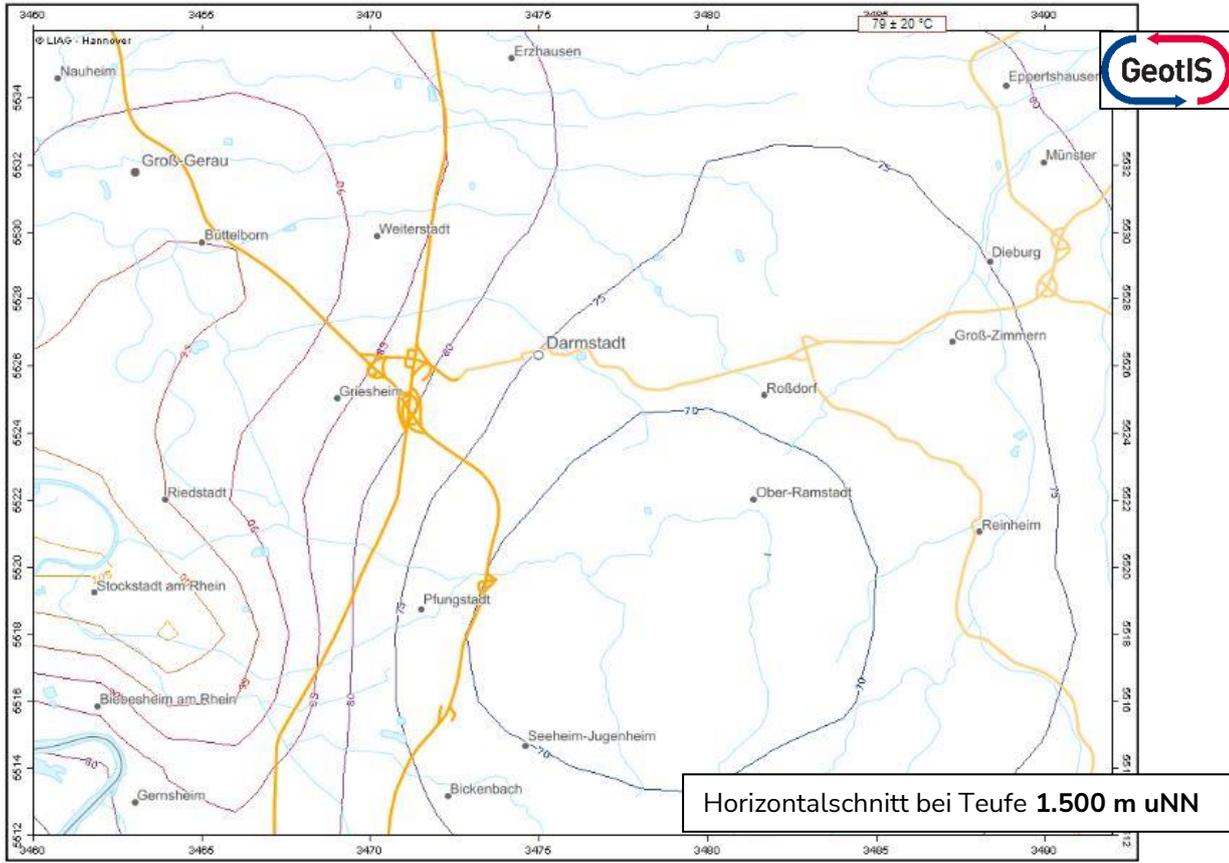
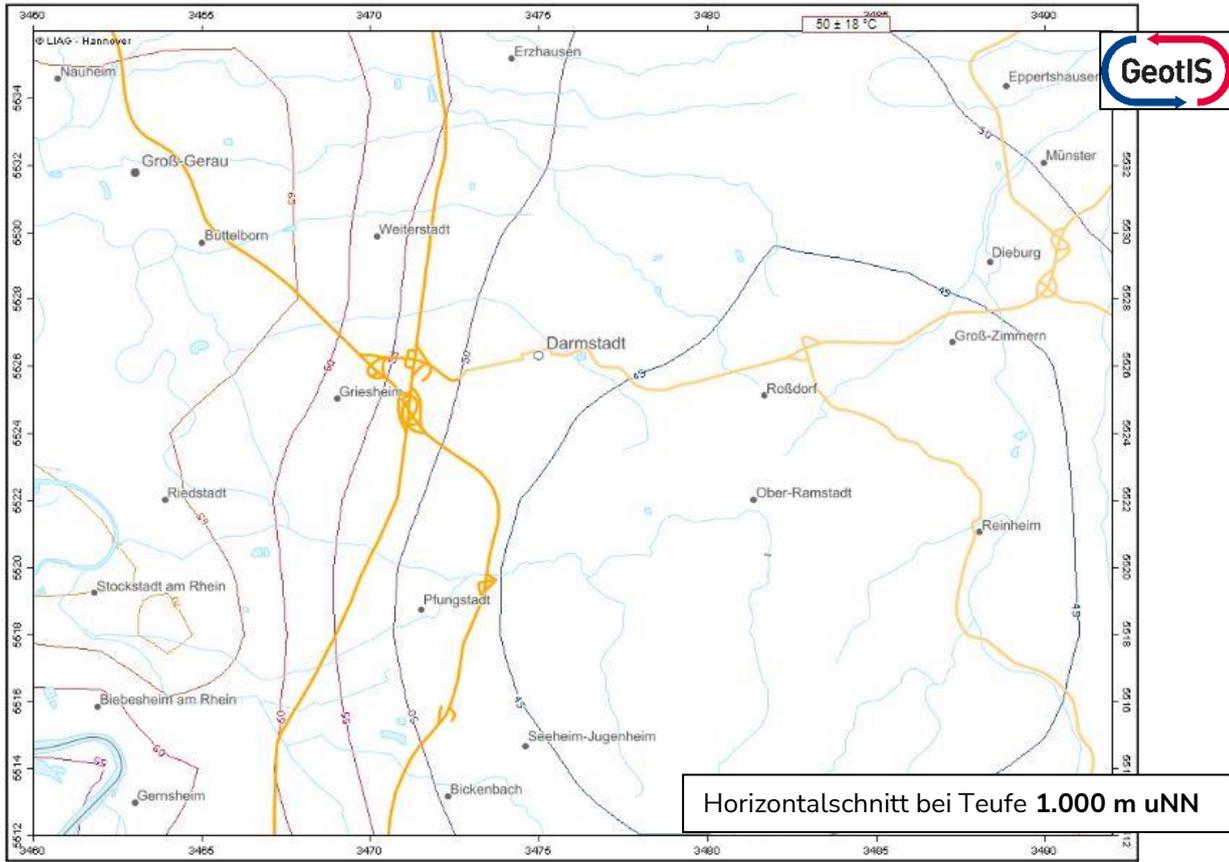


Abbildung 13: Temperaturverteilung im geol. Untergrund im Raum Darmstadt in den Tiefenlagen 0, 500, 1.000, 1.500 und 2.000 m u. NN. Schnittexport aus GeotIS [7] (Fortsetzung).

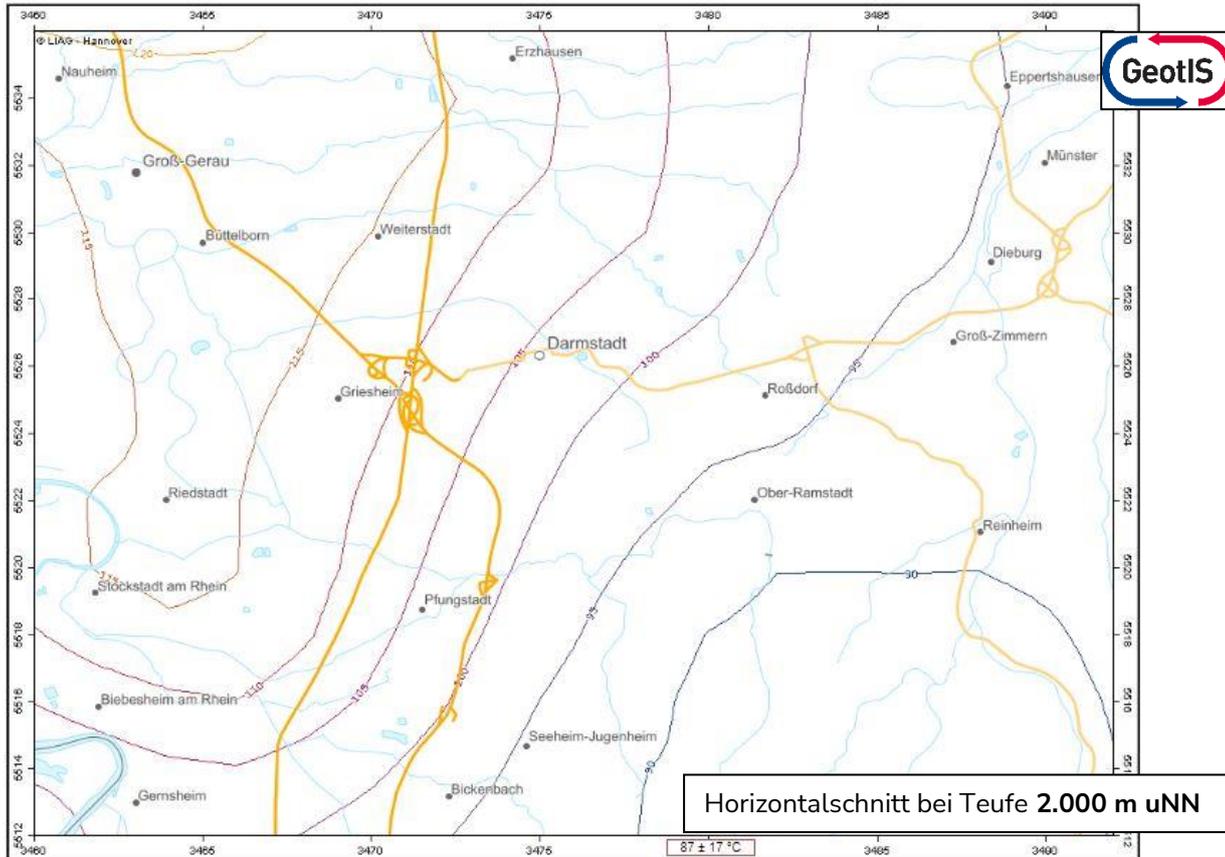


Abbildung 13: Temperaturverteilung im geol. Untergrund im Raum Darmstadt in den Teufenlagen 0, 500, 1.000, 1.500 und 2.000 m u. NN. Schnittexport aus GeotIS [7] (Fortsetzung).

Für den Untersuchungsstandort Darmstadt, Mathildenhügel wurde der lokale geothermische Gradient auf Grundlage von aus dem geothermischen Informationssystem GeotIS [7] entnommenen Modellbetrachtungen auf $\nabla T = 4,5 \text{ K}/100\text{m}$ eingeschätzt. Temperaturdaten der Bohrung Darmstadt Südwest 1 zeigen in einer Teufe von 1.300 m u. GOK eine Temperatur von 73 °C was einem geothermischen Gradienten von $\nabla T = 4,7 \text{ K}/100\text{m}$ entspricht. Der angewandte geothermische Gradient von $\nabla T = 4,5 \text{ K}/100\text{m}$ liegt um 1,5 K oberhalb des deutschlandweiten Durchschnittswertes von 3,0 K/100m und wird entsprechend für eine geothermische Erschließung als günstig angesehen. Bohrlochtemperaturmessungen, welche die tatsächliche Temperaturentwicklung am Untersuchungsstandort mit zunehmender Teufe validieren, existieren nicht. Generell erschließen Bohrungen in der Umgebung des Untersuchungsstandortes den geologischen Untergrund lediglich bis in eine Maximalteufe von 400 m u. GOK. Ausgehend von einer mittleren Jahrestemperatur an der Erdoberfläche von 11,7 °C werden für den untersuchten Teufenbereich die Temperaturwerte $T(z=100 \text{ m u. GOK}) = 16,2 \text{ °C}$, $T(z=200 \text{ m u. GOK}) = 20,7 \text{ °C}$, $T(z=300 \text{ m u. GOK}) = 25,2 \text{ °C}$, $T(z=400 \text{ m u. GOK}) = 29,7 \text{ °C}$ und $T(z=500 \text{ m u. GOK}) = 34,2 \text{ °C}$ auf Grundlage einer linearen Entwicklung berechnet.

7.2. Grundlegende petrophysikalische Eigenschaften

Als für die Eignungsbewertung eines geothermisch zu erschließenden Gesteins zu betrachtende, grundlegende petrophysikalische Eigenschaften werden in den folgenden Kapiteln die Gesteinsdichte ρ [kg / m^3] sowie die Porosität ρ [-] bzw. der Hohlraum n [-] standortspezifisch diskutiert. Hydraulische und thermophysikalische Gesteinsparameter zählen strenggenommen auch zu den petrophysikalischen Eigenschaften werden in dieser Studie der Übersicht halber jedoch separate in den Kapiteln 7.3 und 7.4 bezogen auf die Untersuchungsstandorte erörtert und bewertet.

7.2.1. Gesteinsdichte ρ [kg / m^3]

Die Gesteinsdichte ρ beschreibt das Verhältnis der Masse m [kg] eines Gesteinskörpers bezogen auf dessen Volumen V [m^3]. Wird nur die feste Phase des Gesteins betrachtet, der Porenraum (siehe Kapitel 7.2.2) also nicht berücksichtigt, wird von der Matrixdichte ρ_M gesprochen. Die Dichte eines Gesteins ist auf dessen Bildungs- und erfahrende Überprägungsprozesse zurückzuführen. Die Gesteinsdichte ist von der mineralogischen Zusammensetzung sowie dem Gesteinsgefüge, also der räumlichen Anordnung der das Gestein aufbauenden Kristalle und Gesteinsbruchstücke, abhängig. Auch äußere Faktoren wie die Temperatur und erfahrene Kompression haben Einfluss auf die Dichte eines Gesteins. Porosität und Dichte eines Gesteins stehen in einem antiproportionalen Verhältnis zueinander. Magmatische und metamorphe Gesteine zeigen meist höhere Dichten als Lockersedimente und Sedimentgesteine.

Die Gesteinsdichte ist ein wesentlicher petrophysikalischer Gesteinsparameter, besonders unter dem Gesichtspunkt geothermischer Fragestellungen. Für die geothermische Eignungsbewertung entscheidende thermophysikalische Gesteinseigenschaften werden direkt durch die Dichte des Gesteins beeinflusst. Je dichter ein Gestein ist, umso mehr Wärmeenergie kann es speichern und potenziell bei einer Erschließung auch wieder abgeben.

Am Untersuchungsstandort Darmstadt, Mathildenhügel sind Granite des kristallinen Grundgebirges des Oberrheingrabens oberflächennah anstehend. Für Granite sind Gesteinsdichten in der Größenordnung von 2,50 bis 2,70 t/m^3 bekannt [15]. Die VDI-Richtlinie 4640-1 weist einen Wertebereich für die Dichte von Granit von 2,4 bis 3,0 t/m^3 aus [4]. Regionale Untersuchungen des Grundgebirges im Raum Hessen dokumentieren einen Dichtewert von $2,74 \pm 0,14 \text{ t}/\text{m}^3$ [13].

Für die Gesteinsfolgen des Rotliegend wurden in Regionalstudien Dichtewerte von $2,43 \pm 0,18 \text{ t}/\text{m}^3$ bestimmt [15]. Diese bewegen sich innerhalb des durch den VDI vorgegebenen Wertebereichs für Sandsteine und Konglomerate von 2,2 bis 2,7 t/m^3 . Infolge der am Alternativstandort Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße in einer Teufe größer 2.000 m u. GOK anstehend erwarteten Rotliegendgesteine werden als Folge von auflastbedingter Kompaktion und

diagenetischer Überprägung Dichtewerte innerhalb der oberen Hälfte des genannten Wertebereiches angenommen.

7.2.2. Porosität Φ [-]

Die Porosität Φ bzw. der Gesamthohlraumanteil n eines Gesteins beschreibt das dimensionslose Verhältnis aller in einem definierten Gesteinsvolumen enthaltenen Hohlräume (zusammengefasst als Porenraum) bezogen auf das Gesamtvolumen des Gesteinskörpers. Die Gesamtheit des hydraulischen Porenraums wird als effektive Porosität Φ_{eff} bezeichnet. Die effektive Porosität charakterisiert das potenzielle Speichervermögen eines Grundwasserleiters. Der in Bezug auf eine Grundwasserströmung relevante Porenraum wird als durchflusswirksame Porosität Φ_d bezeichnet. Die Höhe der durchflusswirksamen Porosität sowie die Geometrie des durchströmten Porenraums beeinflussen direkt die hydraulischen Eigenschaften des Gesteins. Die Porosität steht in einem antiproportionalen Verhältnis zur Gesteinsdichte und ist wie diese ein Ergebnis initialer Bildungs- sowie erfahrende Überprägungsprozesse. Durch Trennflächenausbildung oder Lösungsprozesse erzeugter Porenraum wird als sekundäre Porosität bezeichnet. Die Art des durchflusswirksamen Porenraums unterteilt Grundwasserleitertypen in Poren-, Kluft-, und Karstgrundwasserleiter. Auch wird der Wärmetransportmechanismus innerhalb des Gebirges direkt durch die durchflusswirksame Porosität bestimmt. Während bereits bei geringen durchflusswirksamen Porositäten zusätzliche konvektive, also mit der Grundwasserbewegung zusammenhängende, Wärmeübertragungen einstellt werden, ist der Wärmetransport bei geringen Porositäten auf einen konduktiven Energietransport beschränkt.

Aufgrund der Beeinflussung sowohl der Gesteinsdichte als auch der hydraulischen Eigenschaften eines Gesteins stellt die Porosität ebenfalls eine wichtige Kenngröße zur Einschätzung der geothermischen Nutzbarkeit des zu erschließenden Gesteinsintervalls dar. Dichte Gesteine bzw. Gesteine mit geringer durchflusswirksamer Porosität weisen vergleichsweise geringe hydraulische Durchlässigkeiten auf und sind entsprechend hinsichtlich einer hydrothermalen Erschließung unter Nutzung offener Systeme ungeeignet. Gesteine die eine hohe, ggf. sekundär gebildete, durchflusswirksame Porosität aufweisen zeigen sich meist als bzgl. einer hydrothermalen Erschließung als geeignet.

Die am betrachteten Standort Darmstadt, Mathildenhügel anstehenden Granite gelten als größtenteils dicht. Auf Basis von Analogieschlüssen werden Porositätswerte in der Größenordnung kleiner 1 % [13] erwartet. Oberflächennah wird eine infolge von Zersatz- und Verwitterungsprozessen eine leicht erhöhte Porosität angenommen. Die in dem Schichtenverzeichnis der innerhalb des Untersuchungsgebietes abgeteufte Wasserbohrung der Brauerei Fay (Bohrung 0071) beschriebene, intensive Klüftung des Granits wird ebenfalls zu einer Erhöhung der Porosität führen, deren Maß an dieser Stelle nicht sicher quantifiziert werden kann.

Für das im untersuchten Alternativszenario Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße zu erschließende Gesteine des Rotliegend wurden im Zuge von Regionalstudien Porosität im Bereich von $8,9 \pm 5,8 \%$ angegeben [15]. Infolge der am Standort realisierten Teufenlage des Tops des Rotliegend tiefer 2.000 m u. GOK werden infolge von Kompaktion und diagenetischer Überprägung reduzierte Porositäten angenommen. Dem wirkt die unmittelbare Nähe des Standortes zu einer mit dem Randbereich des Oberrheingrabens assoziierten ausgedehnten und versatzstarken Störungszone entgegen, in deren Zusammenhang die Ausbildung ausgeprägter, eine sekundäre Porosität darstellende, Trennflächensysteme im Gestein vermutet wird.

7.3. Hydraulische Gesteins- und Gebirgseigenschaften

Die hydraulischen Gesteins- und Gebirgseigenschaften stellen die bei der Bewertung eines geothermischen Standortpotentials mit maßgeblichen Kenngrößen dar. Hydraulische Eigenschaften charakterisieren das Grundwasserflussverhalten im Gestein / Gebirge, welches als signifikanter Energietransportmechanismus direkt den Energieertrag offener sowie geschlossener geothermischer Erschließungssysteme bestimmt. Die Signifikanz gilt insbesondere, wenn eine Erschließung geothermaler Wärme unter Nutzbarmachung von Grund- bzw. Thermalwässern, also eine hydrothermale Nutzung, angestrebt wird. Im Folgenden werden die Kenngrößen der Permeabilität $K [m^2]$, des Durchlässigkeitsbeiwertes $k_f [m/s]$ sowie der Transmissivität $T [m^2/s]$ individuell für die betrachteten Untersuchungsstandorte erörtert und bewertet.

7.3.1. Permeabilität $K [m^2 \text{ oder } D]$

Die Permeabilität beschreibt die Durchlässigkeit von Böden, Lockersedimenten oder Festgestein gegenüber Flüssigkeiten und Gasen. Der Wert der Permeabilität bezieht sich dabei nur auf die Eigenschaften des durchströmten Gesteins und berücksichtigt, im Gegensatz zum Durchlässigkeitsbeiwert $k_f [m/s]$ Fluideigenschaften wie Dichte $\rho [kg/m^3]$ und Viskosität $\mu [Pa \cdot s]$, nicht. Die Permeabilität wird oftmals auch in der Einheit Darcy D angegeben. Für die Umrechnung der Einheiten gilt die Beziehung $1 D = 9,86923 \cdot 10^{-13} m^2$. Im Bezug der hydrothermalen Erschließung einer Gesteinseinheit wird zwischen der Gesteinspermeabilität K_M und der Gebirgspermeabilität K_G unterschieden. Die Gebirgspermeabilität berücksichtigt zusätzlich zur Gesteinspermeabilität im Fels existierende Fluidwegsamkeiten in Verbindung mit ausgebildeten Trennflächen.

Die Permeabilität stellt eine zentrale Bezugsgröße für die Bewertung der hydrothermalen Nutzbarkeit einer Gesteinseinheit dar. Für eine mitteltiefe bis tiefe hydrothermale Nutzung ist eine Mindestpermeabilität von $10^{-13} m^2$ (oder mehr als 500 mD) notwendig. Bei einer oberflächennahen Erschließung eines Grundwasserleiters bspw. unter Nutzung von Brunnen oder Grundwasserwärmepumpensystemen sind infolge der meist kürzeren Filterstrecken höhere

Permeabilitäten notwendig. Gesteine die Permeabilitätswerte kleiner als $10^{-14} m^2$ aufweisen gelten als impermeable bzw. undurchlässig.

Für die am Untersuchungsstandort Darmstadt, Mathildenhügel aufgeschlossenen Granite des kristallinen Grundgebirges werden Gesteinspermeabilitäten in der Größenordnung von $10^{-16} m^2$ ausgewiesen [13]. Berechnet aus den durch das HLNUG als gering bis äußerst gering auskartierten oberflächennahen Durchlässigkeitsbeiwerten [5] wird für den Standort Mathildenhügel ein sehr weitläufiger Gebirgspermeabilitätsbereich von 10^{-12} bis $10^{-16} m^2$ angegeben, welcher als gut bis sehr schlecht zu bewerten ist und daher wenig konkrete Rückschlüsse erlaubt. Im oberflächennahen Bereich wird eine, durch Zersetz und Verwitterung, sowie durch die im Gestein ausgebildeten Trennflächen leicht erhöhte Gebirgspermeabilität erwartet. Nichtsdestotrotz wird das am Mathildenhügel anstehende Gestein als undurchlässig eingestuft, wodurch eine hydrothermale Nutzung am Standort ausgeschlossen ist.

Für die Gesteine des Rotliegend, welche ein potenzielles Erschließungsziel einer hydrothermalen Wärmegewinnung am Alternativstandort Darmstadt darstellen, werden in Regionalstudien Gesteinspermeabilitätswerte um $10^{-14,14 \pm 1,43} m^2$ aufgeführt [15]. In hydraulischen Bohrlochversuchen im Bereich innerhalb des Oberrheingrabens wurden als Gebirgspermeabilitäten für das Rotliegend Werte von etwa $5 \cdot 10^{-16}$ bis $1 \cdot 10^{-11} m^2$ dokumentiert [15]. Generell werden im ortskonkreten Vergleich um ca. ein bis vier Größenordnungen gegenüber den Gesteinspermeabilitäten erhöhte Gebirgspermeabilitäten beschrieben und die Gesteinsfolge des Rotliegend als Kluftgrundwasserleiter klassifiziert und mit zunehmender Teufe in Folge von Kompaktions- sowie diagenetischen Prozessen eine Abnahme der Gebirgspermeabilität beobachtet [15]. In der als Tiefengeothermieprojekt der Überlandwerke Groß-Gerau GmbH zwischen Trebur, Neuheim und Gross-Gerau innerhalb des Treburer-Grabens abgeteuften Bohrung TREB GT1 zeigten sich die im Rotliegend realisierten Gebirgspermeabilitäten als für eine hydrothermale Nutzung nicht ausreichend. Die unmittelbare Nähe des Untersuchungsstandortes Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße zu einer mit dem Randbereich des Oberrheingrabens assoziierten ausgedehnten und versatzstarken Störungszone lässt im Zielaquifer die Existenz ausgeprägter Trennflächensysteme vermuten, die die Gebirgspermeabilität lokal stark erhöhen und entsprechend eine hydrothermale Nutzung ermöglichen würden. Die dem Untersuchungsstandort nachgelegene (etwa 8 km) Bohrung 0732, Darmstadt-Südwest 1 erschließt ausschließlich Vulkanitgesteine innerhalb des Tops der Rotliegendfolge. Entsprechend liegen keine zuverlässig nutzbaren Daten für eine Einschätzung der lokal ausgebildeten Gebirgspermeabilitäten vor.

Die vorgenommene abschätzende Bewertung zu einer bzgl. der erwarteten Permeabilitäten moderaten Eignung des Standortes Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße erfolgt demnach nur auf Analogiebetrachtungen und ist zwangsläufig durch konkrete Erkundungsmaßnahmen zu validieren.

7.3.2. Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s]

Der Durchlässigkeitsbeiwert beschreibt die Durchlässigkeit von Böden und Festgestein gegenüber Flüssigkeiten und bezieht, im Gegensatz zur Permeabilität, die Eigenschaften der z.T. hoch mineralisierten (Tiefen-)Wässer (Dichte und Viskosität) zusätzlich mit ein. Der Durchlässigkeitsbeiwert gibt an, welcher Volumenstrom Q [m^3/s] bei einem hydraulischen Gradienten i [-] pro Querschnittsfläche A [m^2] strömt: $k_f = Q / (i \cdot A)$. Ist der durch das Grundwasser durchflossene Gebirgsquerschnitt bzw. die Mächtigkeit des betrachteten Aquifers bekannt, so lässt sich unter Nutzung des Durchlässigkeitsbeiwerts der entsprechende Grundwasserdurchfluss (Volumenstrom) Q [m^3 / s], also die den Gebirgsquerschnitt pro Zeiteinheit durchfließende Wassermenge, bestimmen.

In Analogie zur Permeabilität ist der Durchlässigkeitsbeiwert von zentraler Bedeutung bzgl. der Quantifizierung von Fluidflüssen im betrachteten geologischen Untergrund und entsprechend ein Entscheidender Kennwert zur Bewertung der geothermalen Potentialbewertung an einem Untersuchungsstandort. Bei einer angestrebten Erschließung eines Grundwasserleiters für eine hydrothermale Nutzung sollte der minimale Durchlässigkeitsbeiwert bei Werten von $k_f > 10^{-6} m/s$ liegen. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f steht unter Berücksichtigung der Viskosität μ [$Pa \cdot s$] und Dichte ρ [kg/m^3] des Wassers sowie der Erdbeschleunigung $g \approx 9,81 m / s^2$ gemäß der Formel $k_f = K \cdot (\rho \cdot g / \mu)$ in direkter Beziehung zur Permeabilität K .

Für den Untersuchungsstandort Darmstadt, Mathildenhügel wurden für den oberflächennahen geologischen Untergrund durch das HLNUG geringe bis äußerst geringe Durchlässigkeitsbeiwerte in der Größenordnung von 10^{-5} bis $10^{-9} m/s$ auskartiert [5]. Dieser weite Wertebereich ist in Bezug auf eine hydrothermale Erschließung als gut bis sehr schlecht zu bewerten und ist daher wenig aufschlussreich für eine konkrete Standorteignung. Generell werden die am Untersuchungsstandort Darmstadt, Mathildenhügel anstehenden Granite als hydraulisch undurchlässig eingestuft.

Für den Alternativstandort Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße wurde der Durchlässigkeitsbeiwert aus den in Kapitel 7.3.1 aufgeführten Werteangaben der Gebirgspermeabilität auf Grundlage hydraulischen Bohrlochversuchen im Rotliegend berechnet. Für die Gesteinsfolge des Rotliegend wurden Gebirgspermeabilitäten von etwa $5 \cdot 10^{-16}$ bis $1 \cdot 10^{-11} m^2$ dokumentiert [15] was Durchlässigkeitsbeiwerten von $5 \cdot 10^{-9}$ bis $1 \cdot 10^{-4} m/s$ entspricht. Gleich der Permeabilität wird eine Abnahme des Durchlässigkeitsbeiwert mit zunehmender Teufe beobachtet.

Eine differenzierte Bewertung der Standorteignung auf Grundlage der hydraulischen Durchlässigkeit erfolgte auf Basis der Gebirgspermeabilität und ist dem vorhergehenden Kapitel 7.3.1 zu entnehmen.

7.3.3. Transmissivität T [m^2/s]

Die Transmissivität ist ein Maß für die Fähigkeit eines Grundwasserleiters Wasser zu transportieren (Gebirgsdurchlässigkeit), wobei im Gegensatz zum Durchlässigkeitsbeiwert oder der Permeabilität die Eigenschaften des Gesamtaquifers inkl. dessen Mächtigkeit berücksichtigt werden. Die Transmissivität wird im Zuge von hydraulischen Bohrlochversuchen aus der Gegenüberstellung der realisierbaren Injektions- oder Förderrate und der beobachteten Wasserspiegeländerung bzw. Druckdifferenz abgeleitet. Grundlage dafür stellt das Gesetz von Darcy dar. Ist ein Aquifer isotrop und homogen ausgeprägt und ist die Mächtigkeit als konstant anzunehmen, kann die Transmissivität aus dem Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s] und der Aquifermächtigkeit M [m] entsprechend der Beziehung $T = k_f M$ berechnet werden. Bei geschichtetem, inhomogenen und / oder anisotropem Aufbau des Gebirges (z.B. einer ausgeprägten Schichtung in Sedimenten / Sedimentgesteinen) ist die Transmissivität des Gesamtaquifers die Summe aller Teiltransmissivitäten der einzelnen Schichten.

Für eine hydrothermale Nutzung sollten zu erschließende Grundwasserleiter eine Mindesttransmissivität von $5 \cdot 10^{-5} m^2/s$ aufweisen. Die hydraulisch angebundene, nutzbare Aquifermächtigkeit sollte dabei 20 m nicht unterschreiten.

Für den Untersuchungsstandort Darmstadt, Mathildenhügel ist infolge der als hydraulisch undurchlässig eingestuften Granite eine Ausweisung der Transmissivität nicht zielführend. Eine hydrothermale Nutzung des geologischen Untergrundes ist an diesem Standort ausgeschlossen.

Am Alternativstandort Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße wird aufgrund der weitgefassenen Werteangaben bzgl. der hydraulischen Eigenschaften der als potenzielles Erschließungsziel einer hydrothermalen Nutzung identifizierten Gesteine des Rotliegend sowie bzgl. der Mächtigkeit der hydraulisch nutzbaren Gesteinsfolgen von einer konkretisierenden Werteangabe der Transmissivität abgesehen. Die Bewertung der Standorteignung auf Grundlage lokaler hydraulischer Eigenschaften erfolgte auf Basis der Gebirgspermeabilität und ist in Kapitel 7.3.1 aufgeschlüsselt.

7.4. Thermophysikalische Gesteinseigenschaften

Neben den hydraulischen Gesteinsparametern sind insbesondere bei einer angedachten geothermischen Erschließung des geologischen Untergrundes unter Nutzung geschlossener Systeme (z.B. Erdwärmesonden) die thermophysikalischen Gesteinseigenschaften von besonderer Bedeutung. Im Folgenden werden die Kenngrößen der Wärmeleitfähigkeit λ [$W / (m \cdot K)$], der massenspezifischen Wärmekapazität c_p [$J / (kg \cdot K)$] sowie der Temperaturleitfähigkeit κ [m^2/s] standortindividuell diskutiert und bewertet.

7.4.1. Wärmeleitfähigkeit λ [$W / (m \cdot K)$]

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist ein Maß für die Ausbreitungsgeschwindigkeit thermischer Energie (Wärme) in einem Gesteinskörper. Die spezifische Wärmeleitfähigkeit ist eine temperaturabhängige Materialkonstante. Wertebereiche verschiedener Gesteine können stark variieren. Auch innerhalb eines Gesteins können sich die Angaben sowie Messwerte der spezifischen Wärmeleitfähigkeit in einem breiteren Wertebereich bewegen. Dies ist auf Unterschiede in der mineralogischen Zusammensetzung sowie des Gesteinsgefüges bzw. unterschiedliche Kompaktions- oder Alterationsgrade zurückzuführen. Die Schichtung oder Schieferung eines Gesteins kann eine Anisotropie, also richtungsabhängig unterschiedliche Wertebereiche, der Wärmeleitfähigkeit bedingen.

Der Hohlraumgehalt bzw. die Gesamtporosität eines Gesteins hat einen starken Einfluss auf die Effizienz des Wärmetransport bzw. die Wärmeleitfähigkeit. Generell gilt, je größer die Porosität, desto geringer die Wärmeleitfähigkeit. Entscheidend ist dabei auch Art der Porenraumfüllung. Festgesteine oder Lockersedimente mit einem wassergesättigten Porenraum leiten Wärme deutlich besser als solche, deren Porenraum mit Luft gefüllt sind. Kristalline Gesteine zeigen meist zwei- bis dreimal höhere Wärmeleitfähigkeiten als Lockergesteine.

Am Untersuchungsstandort Darmstadt, Mathildenhügel stehen mit Ausnahme eines oberflächennah bis in eine Teufe von ca. 12 m u. GOK ausgebildeten Zersatzbereiches sowie des darunter bis in eine Teufe von 74 m u. GOK anschließenden Verwitterungsbereiches durchgehend überwiegend intakte Granite des Paläozoischen kristallinen Grundgebirges innerhalb des gesamten betrachteten Teufenbereichs an. Aus der innerhalb des Untersuchungsgebietes abgeteuften Wasserbohrung der Brauerei Fay (Bohrung 0071) wurden bis in eine Teufe von 80 m u. GOK mittlere Wärmeleitfähigkeiten von 2,16 $W / (m \cdot K)$ gemessen. Diese Angaben gelten als für den Untersuchungsstandort repräsentativ für das Teufenintervall des Zersatzbereiches bzw. Verwitterungsbereiches. Mit zunehmender Teufe nimmt der Grad der Zersetzung bzw. der Verwitterung der Gesteine ab, wodurch ein Anstieg der Wärmeleitfähigkeit erfolgt. Analogiebetrachtungen des kristallinen Grundgebirges bei Dieburg (ca. 7 km ENE von Darmstadt) weisen Wärmeleitfähigkeiten für die dort angetroffenen Granite bis Granodiorite in der Größenordnung von

2,68 W / (m·K) bis zu 3,00 W / (m·K) aus [5], [13]. Studien bzgl. der Wärmeleitfähigkeit des Grundgebirges im Zusammenhang mit der Struktur des Oberrheingrabens weisen für untersuchte Granit-Proben Wärmeleitfähigkeit von $2,58 \pm 0,38$ W / (m·K) aus [15]. Die VDI 4640-1 [4] weist für unverwitterte Granite als Richtwert für die Wärmeleitfähigkeiten für Granite einen Wert von 3,20 W / (m·K) aus. Am Untersuchungsstandort wird entsprechend von einer mit der Teufe zunehmenden Wärmeleitfähigkeit auf Werte um bis über 3,00 W / (m·K) ausgegangen, was einer guten Standorteignung entspricht.

Für das betrachtete Alternativszenario wurde eine mögliche Erschließung mitteltiefer Rotliegendequifere am Projektstandort Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße bewertet. Für die Gesteine des Rotliegend im Raum Hessen wurden Wärmeleitfähigkeiten über einen Wertebereich von ca. 1,5 bis 3,7 W / (m·K) ausgewiesen [15]. Für die nächstliegend zum Untersuchungsstandort erbohrten Vulkanite des Rotliegenden kann der Wertebereich auf Wärmeleitfähigkeiten von 1,7 bis 1,9 W / (m·K) eingeschränkt werden. Für die im Zuge einer hydrothermalen Nutzung zu erschließenden Arkosen, Sand- und Siltsteinen sowie Konglomeraten werden auf Basis von Analogiebetrachtungen [15] vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeiten von 1,6 bis 1,8 W / (m·K) angenommen. Es ist darauf hinzuweisen, dass die bei einer hydrothermalen Nutzung der Rotliegendfolge vergleichsweise geringe bzw. schlechte Wärmeleitfähigkeiten weniger stark Einfluss auf die Bewertung des Geothermischen Potentials nehmen.

Richtwerte bzgl. der Wärmeleitfähigkeit entsprechend den Empfehlungen des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) bzgl. der bei einer Erschließung des geothermischen Potenzials an den betrachteten Untersuchungsstandorten im Raum Darmstadt vorkommenden Gesteine sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: VDI-Richtwerte (VDI 4640/1) für Wärmeleitfähigkeiten, volumenspezifischer Wärmekapazitäten sowie Dichten standortspezifisch Ausgewählter Locker- und / oder Festgesteine (modifiziert nach [4]).

Gesteinstyp	Wärmeleitfähigkeit λ	Vol. spez. Wärmekapazität $\rho \cdot c_p$	Dichte ρ
	[W / (m K)]	[MJ / (m ³ ·K)]	[t / m ³]
Sand, trocken	0,4	1,3 - 1,6	1,8 - 2,2
Sand, feucht	1,4	1,6 - 2,2	1,9 - 2,2
Sand, wassergesättigt	2,4	2,2 - 2,8	1,9 - 2,3
Kies/Steine, trocken	0,4	1,3 - 1,6	1,8 - 2,2
Kies/Steine wassergesättigt	1,8	2,2 - 2,6	1,9 - 2,3
Ton/Schluffstein	2,2	2,1 - 2,4	2,4 - 2,6
Sandstein	2,8	1,8 - 2,6	2,2 - 2,7
Konglomerat / Brekzie	2,3	1,8 - 2,6	2,2 - 2,7
Granit	3,2	2,1–3,0	2,4–3,0

7.4.2. Wärmekapazität c_p [$J / (kg \cdot K)$]

Die Wärmekapazität C [J/K] eines Gesteinskörpers beschreibt das Verhältnis der zu- oder abgeführten Wärmeenergie bezogen auf die dadurch hervorgerufene Temperaturänderung. Die massenspezifische Wärmekapazität c_p [$J / (kg \cdot K)$] ist eine temperaturabhängige Stoffeigenschaft, die der Menge an Wärme entspricht, die benötigt wird, um die Temperatur eines Körpers definierte Masse um ein Kelvin zu erhöhen. Entsprechend beschreibt die massenspezifische Wärmekapazität die Fähigkeit eines Gesteins Wärme zu speichern. Die isobare spezifische Wärmekapazität entspricht der spezifischen Wärmekapazität eines Gesteines bei konstantem Druck. Um die spezifische Wärmekapazität auf ein Gesteinsvolumen zu beziehen, also die volumenbezogene spezifische Wärmekapazität c_v [$J / (m^3 \cdot K)$] auszuweisen, ist die spezifische Wärmekapazität mit der Gesteinsdichte ρ zu multiplizieren.

Für das am Untersuchungsstandort Darmstadt, Mathildenhügel oberflächennahe anstehende Grundgebirge werden in Studien bzgl. der geothermischen Bewertung des Oberrheingrabens an 966 Proben Werte für die massenspezifische Wärmekapazität von $755 \pm 75 J / (kg \cdot K)$ ausgewiesen [15]. Für das im geologischen Untergrund am Standort dominierende Gestein Granit wird ein leicht angepasster Wertebereich von $753 \pm 98 J / (kg \cdot K)$ angegeben [15]. Unter Verwendung der VDI-Richtwerte für die volumenbezogene spezifische Wärmekapazität [4] sowie die Gesteinsdichte können für Granit massenspezifische Wärmekapazitätswerte zwischen 700 und $1.250 J / (kg \cdot K)$ berechnet werden. Granit zeigt als magmatisches, kristallines Gestein gegenüber Sedimentgesteinen vergleichsweise hohe spezifische Wärmekapazitäten, kann also bei einer definierten Temperaturreduktion vergleichsweise viel Wärmeenergie an die Umgebung abgeben.

Für die Gesteine am Untersuchungsstandort Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße als potenzielles Erschließungsziel identifizierte Gesteine des Rotliegend wurden im Bezug zum struktureologischen Raum des Oberrheingrabens massenspezifische Wärmekapazität von $758 \pm 160 J / (kg \cdot K)$ dokumentiert [13]. Die VDI 4640-1 [4] erlaubt die Berechnung eines alternativen Wertebereichs von 667 bis $1.182 J / (kg \cdot K)$ für die Sandsteine des Rotliegend. Vergleichsweise hohe Gesteinsdichten bei vollständiger Wassersättigung weisen auch für die Sand- und Siltsteinfolgen des Rotliegend vergleichsweise hohe massenspezifische Wärmekapazitäten aus. Nichtsdestotrotz ist die massenspezifische Wärmekapazität am Standort Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße, infolge eines abzusehenden offenen Systemansatzes, im Zuge der geothermischen Erschließung in der Wichtigkeit rückgestellt.

Die Wärmekapazität wird im Zuge dieser Grundlagenstudie nicht als Bewertungskriterium zur Einschätzung des geothermischen Potentials bzw. der Standorteignung bzgl. der Erschließung von Erdwärme verwendet. Richtwertangaben des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) bzgl. der volumenbezogene spezifische Wärmekapazität sind für an den betrachteten

Untersuchungsstandorten im Raum Darmstadt anzutreffende Gesteine in Tabelle 3 im vorhergehenden Kapitel 7.4.1 zusammengefasst.

7.4.3. Temperaturleitfähigkeit κ [m^2/s]

Die Temperaturleitfähigkeit κ oder auch Wärmediffusivität beschreibt als Materialeigenschaft eines Gesteins die zeitliche Veränderung der räumlichen Verteilung der eingestellten Temperaturen durch konduktive Wärmeleitung als Folge einer existierenden Temperaturdifferenz. Die Temperaturleitfähigkeit kann aus der Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$], der Gesteinsdichte ρ [kg / m^3] und der massenspezifischen Wärmekapazität c_p [$\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$] gemäß der mathematischen Beziehung $\kappa = \lambda / (\rho c_p)$ berechnet werden.

Als Größenordnung der Temperaturleitfähigkeit der am Standort Darmstadt, Mathildenhügel anstehenden Granite des kristallinen Grundgebirges wurden in regionalen Betrachtungen innerhalb des Bundeslandes Hessen ein Durchschnittswert von $1,33 \pm 0,25 \text{ m}^2/\text{s}$ erarbeitet [13]. Ortskonkrete Bestimmungen der Temperaturleitfähigkeiten liegen für den Standort Darmstadt, Mathildenhügel nicht vor.

Für die im Zuge des Alternativszenarios der hydrothermalen Erschließung mitteltiefer Rotliegendaquifere am Standort Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße zu betrachteten Gesteinsfolgen sind aufgrund der vergleichsweise schlechten Aufschlusslage keine konkreten Werte für die Temperaturleitfähigkeit anzugeben. Im Zuge von Regionalstudien wurden innerhalb des Gesteinsintervalls des Rotliegend allerdings Temperaturleitfähigkeiten um $1,29 \pm 0,60$ dokumentiert [13]. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Gesteinsfolge des Rotliegend ihrer vertikalen sowie laterale Ausdehnung aus unterschiedlichen Gesteinen zusammengesetzt ist, welche lokal unterschiedlich ausgeprägte Werte in der Temperaturleitfähigkeit bedingen.

Die Temperaturleitfähigkeit wird im Zuge dieser Grundlagenstudie nicht als Bewertungskriterium zur Einschätzung des geothermischen Potentials bzw. der Standorteignung bzgl. der Erschließung von Erwärme verwendet.

7.5. Leistungscharakterisierende Kennwerte

Im Zuge der Einschätzung des geothermischen Potentials eines Untersuchungsstandortes weisen Regelwerke wie die VDI-Richtlinie VDI 4640-1 [4] Erwartungswerte bezüglich der entsprechend der angetroffenen Lithologie zu erwartenden Entzugsleistungen aus. Auch können bei Erschließung hydrothermaler Potentiale leistungsbewertende Produktionsparameter bestimmt werden. Im Folgenden werden die Leistungscharakterisierende Kennwerte der spezifische Entzugsleistung P_s [W / m] bzw. [W / m^2] sowie des Produktivitätsindex PI [$m^3 / (s \cdot MPa)$] beschrieben.

7.5.1. Thermische Leistung P_{th} [W]

Der ausschlaggebende leistungscharakterisierende Kennwert eines geothermischen Systems ist dessen thermische Leistung oder auch Produktivität P_{th} [W]. Die thermische Entzugsleistung entspricht dabei der Energiemenge, die dem thermisch erschlossenen geologischen Untergrund durch das System pro Sekunde entzogen wird. Für geschlossene Systeme wird die thermische Leistung auf Grundlage der spezifischen Entzugsleistung P_s eines Systems bestimmt, welche im anschließenden Kapitel diskutiert wird. Bei offenen (hydrothermalen) Systemen ist die thermische Leistung mathematisch definiert als Produkt 1.) der Dichte des geförderten Fluides ρ_F [kg / m^3], 2.) der isobaren massenspezifischen Wärmekapazität des Fluides c_F [$J / (kg \cdot K)$], 3.) der im System realisierten Förderrate bzw. des eingestellten Volumenstroms an geförderten Thermalwassers Q [m^3/h] sowie 4.) der Differenz der Fluidtemperatur im Vor- $T_{Vorlauf}$ und Rücklauf $T_{Rücklauf}$ des Systems ($P_{th} = \rho_F \cdot c_F \cdot Q \cdot (T_{Vorlauf} - T_{Rücklauf})$). Die Dichte und Wärmekapazität des Thermalwassers werden bei einer solchen Betrachtung als qualitative Eigenschaften bezeichnet, wohingegen die Förderrate und die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf quantitative Eigenschaften darstellen.

7.5.2. Spezifische Entzugsleistung P_s [W / m] bzw. [W / m²]

Die Entzugsleistung P_{th} [W] entspricht der Energiemenge, die dem erschlossenen geologischen Untergrund durch ein technisches System pro Sekunde entzogen wird. Die spezifische Entzugsleistung P_s beschreibt dabei die Entzugsleistung bezogen auf eine definierte Ausbaudimension wie Sondenlänge [W / m] oder Kollektorenfläche [W / m^2]. In Tabelle 4 sind die in der VDI 4640 [4] aufgeführten Größenangaben bzgl. der spezifische Wärmeentzugsleistung für Erdwärmesonden für am Standort Darmstadt, Mathildenhügel mögliche Lockersedimente ausgeführt. In Tabelle 5 sind VDI-Kennwerte für die Einschätzung spezifische Entzugsleistungen für Erdwärmekollektoren ausgewiesen.

Tabelle 4: Standortspezifisch ausgewählte VDI-Richtwerte für die spezifische Wärmeentzugsleistung einer Erdwärmesonde für verschiedene Lockergesteine (modifiziert nach [4]).

Erschlossenes Lockergestein (Erdwärmesonde)	Spezifische Wärmeentzugsleistung [W/m]	
	Betriebszeit 1.800 h/a	Betriebszeit 2.400 h/a
Kies/Sand, trocken	< 25	< 20
Kies/Sand, wassergesättigt	65 - 80	55 - 65

Tabelle 5: Richtwerte für die spezifische Wärmeentzugsleistung eines Erdwärmekollektors für verschiedene Böden (modifiziert nach [4]).

Boden (mit Erdwärmekollektor)	Spezifische Wärmeentzugsleistung [W/m ²]	
	Betriebszeit 1.800 h/a	Betriebszeit 2.400 h/a
Nichtbindiger Boden, trocken	10	8
Sand/Kies, wassergesättigt	40	32

Infolge der hohen Wärmeleitfähigkeiten der am Standort Darmstadt, Mathildenhügel zu erschließenden Granite und Granodiorite (siehe Kapitel 7.4.1) werden bei einer Erschließung des Standortes durch Erdwärmesonden spezifische Entzugsleistungen bis zu $P_s = 80 \text{ W/m}$ (bei 1.800 h/a Betriebszeit) erwartet. Durch eine in späteren Kapiteln diskutierte, mögliche künstliche Regeneration der Sonden, kann dieser Wert ggf. sogar noch erhöht werden. Für die konzeptionelle Betrachtung der Erschließung mitteltiefer bis tiefer Grundwasserleiter am Alternativstandort Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße ist eine Ausweisung spezifischer Entzugsleistungen an dieser Stelle nicht zielführend.

7.5.3. Produktivitätsindex PI [$\text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{MPa})$]

Der Produktivitätsindex PI beschreibt die Ergiebigkeit einer Bohrung als Quotient der Förderrate Q [m^3] und der Druckabsenkung Δp [Pa] entsprechend der Formel $PI = Q / \Delta p$. Bei dem Produktivitätsindex handelt es sich im eigentlichen Sinne nicht um eine Gesteins- oder Aquifereigenschaft. Im Gegensatz zur Transmissivität berücksichtigt der Produktivitätsindex auch brunnen-spezifische Eigenschaften. Der Produktivitätsindex kann nur bei lang andauernden Fördertests unter Berücksichtigung der realisierten Bohrlochgeometrie ermittelt werden.

Der Produktivitätsindex stellt ebenfalls eine wichtige Kenngröße für die Bewertung der Leistungsfähigkeit eines erschlossenen Grundwasserleiters in Verbindung der technischen realisierten Erschließungsvariante dar. Die Mindestproduktivität für eine hydrothermale Nutzung eines Aquifers sollte $75 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{MPa})$ betragen. Eine standortspezifische Konkretisierung des Produktivitätsindex kann im Zuge der vorliegenden Studie nicht vorgenommen werden.

7.6. Standortspezifische Bewertung des geothermischen Potenzials

Ausgehend von Literatur- und Modelldaten sowie den Schichtenverzeichnissen der lokal abgeteufte Bohrungen ist im Bereich Darmstadt grundsätzlich ein erhöhtes geothermisches Potenzial gegeben. Der lokale geothermische Gradient liegt mit ca. 4,5 K / 100 m deutlich über dem mittleren geothermischen Gradienten (3 K / 100 m) in Deutschland.

Am Untersuchungsstandort Mathildenhügel wirkt sich dieser erhöhte geothermische Gradient in Verbindung mit der hohen Wärmeleitfähigkeit des anstehenden Granits positiv auf das lokale geothermische Potenzial aus. Den guten Wärmeleitfähigkeitseigenschaften des Granits stehen bei Abwesenheit von Kluftsystemen entsprechend schlechten hydraulischen Eigenschaften gegenüber. Ein konvektiver Wärmetransport ist nicht gegeben bzw. als minimal anzunehmen. In der Literatur wird das Kristallin am Untersuchungsstandort als stark geklüftet beschrieben, wodurch die Wasserwegsamkeiten im Festgestein im Untergrund hingegen begünstigt würden. Mögliche Kluftwegsamkeiten konnten in der ca. 150 m östlich vom Untersuchungsstandort Mathildenhügel liegenden Bohrung 0071 (Wasserbohrung Brauerei Fay), welche den Untergrund bis 82 m Teufe erkundet hat nicht nachgewiesen werden. Aussagen bzgl. der standortspezifischen hydrogeologischen Situation sind insbesondere für den potenziell zu erschließenden anstehenden Granit mit Unsicherheiten behaftet, welche es im Vorfeld einer möglichen Projektrealisierung durch das Abteufen einer Erkundungsbohrung aufzulösen gilt. Flächenhafte Angaben des HLNUG [5] bewerten die hydrogeologische Situation am Mathildenhügel als günstig für die Erschließung des oberflächennahen Untergrundes hinsichtlich der Nutzbarmachung von Erdwärme durch Erdwärmesonden. Neben den Unsicherheiten bezüglich des Vorhandenseins und der Häufigkeit von hydraulisch kommunizierenden Klüften kann sich der im Kristallin erhöhte Bohraufwand und die damit verbundenen erhöhten Erschließungskosten negativ auf die Wirtschaftlichkeit des Projektes auswirken. Demgegenüber zeigt sich das kristalline Gestein als besonders standfest und kann möglicherweise auch ohne das Absetzen temporärer Hilfsverrohrung bohrtechnisch erschlossen werden.

Auch für den Standort nördliche Rheinstraße wird auf Grund der Lage im Randbereich des Oberrheingrabens ein erhöhtes geothermisches Potenzial ausgewiesen. Unterhalb mächtiger tertiärer Gesteinsfolgen sind hier im mitteltiefen bis tiefen geologischen Untergrund die von Vulkaniten bedeckten Silt- bis Sandsteine des Rotliegend verortet, welche in tieferen Bereichen des Oberrheingrabens wichtige hydrothermal nutzbare Reservoirs darstellen. Am Standort Quartier nördliche Rheinstraße wird das Top des Rotliegend entsprechend der aus Bohrung 0732 Darmstadt-Südwest 1 gewonnenen Erkenntnisse in einer Teufe von ca. 2.120 m u. GOK erwartet. Unter Nutzung strukturgeologischer Modelle wird eine Mächtigkeit des Rotliegenden von ca. 200 m angenommen. Die bei mittlerer Teufe realisierten Fluidtemperaturen werden auf ungefähr 115 °C beziffert. Für die Sandsteine des Rotliegenden sind im Bereich des Oberrheingrabens in der Literatur

für eine gewinnbringende Erschließung ausreichende Porositäts- und Permeabilitätswerte publiziert. Entsprechende Angaben gelten allerdings nicht flächendeckend und / oder kontinuierlich und weisen einen hohen Grad an räumlicher Heterogenität auf. Für ortskonkrete Aussagen zu den Gesteinsparametern und Schüttungen am Untersuchungsstandort nördliche Rheinstraße sind entsprechend weiterführende Erkundungsmaßnahmen erforderlich.

7.7. Möglichkeiten der Nutzbarmachung von Erdwärme

Im Folgenden werden Möglichkeiten der technischen Erschließung von im oberflächennahen (siehe Kapitel 7.7.1) oder mitteltiefen bis tiefen (siehe Kapitel 7.7.2) geologischen Untergrund vorhandener Erdwärme vorgestellt. Dabei werden sowohl offene (hydrothermale) Systeme beschrieben, welche die thermische Energie vom im Untergrund natürlich vorkommenden Grund- bzw. Thermalwasser nutzbar machen, sowie geschlossene System, welche geothermale Energie durch in den Untergrund eingebachte, abgeschlossene Wärmetauscher erschließen, beschrieben. Petrothermale Systeme, welche die Gesteinswärme unter der künstlichen Schaffung von Fluidwegsamkeiten sowie dem erzwungenen Einbringen eines Wärmeträgerfluides in den Untergrund nutzbar machen, werden infolge der für die Zielstellung des vorliegenden Projektes sowie des bestehenden Forschungscharakters entsprechender Systeme nicht betrachtet. Anschließend an die Vorstellung möglicher Erschließungsformen werden auf Grundlage der in Kapitel 7.6 zusammenfassten geothermischen Potenziale standortspezifische Empfehlungen für eine geeignete Erschließungsvariante ausgewiesen (siehe Kapitel 7.7.3.).

7.7.1. Technische Erschließungsformen oberflächennaher Erdwärme

Die oberflächennahe Geothermie beschreibt die Nutzung der im Untergrund vorhandener Erdwärme bis zu einer Teufe von 400 m. In diesem oberflächennahen Bereich kann die geothermische Energie durch den Einsatz von Erdwärmesonden, Grundwasserwärmepumpen bzw. Brunnen systemen sowie Erdwärmekollektoren erschlossen werden. Da in diesem Teufenbereich üblicherweise eine Temperatur von maximal 25°C nicht überschritten wird, ist die Entzugsleistung bzw. die entnommene Wärmemenge pro Förderbohrung / Wärmesonde / Erdwärmekollektor beschränkt. Für Anlagen mit hohem Energiebedarf kann dies nur über die Zahl der Bohrungen / Sonden / Kollektoren kompensiert werden, was einen erhöhten Flächenverbrauch sowie ggf. eine erhöhte Komplexität der Anlage (gegenseitige Einflussnahme von Sonden) mit sich bringt. Im Folgenden werden verschiedene gängige Verfahren zur Erschließung oberflächennaher Geothermie beschrieben.

Erdwärmekollektoren / Erdwärmekörbe

Erdwärmekollektoren bestehen aus oberflächennah in einem Teufenbereich bis max. 5 m horizontal verlegten Schlauchgittern oder Kapillarmatten durch welche ein Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel (meist Glykol) gepumpt und anschließend einer Wärmepumpe zugeführt wird. An der Wärmepumpe wird dem Wärmeträgerfluid Energie entzogen, wodurch das Fluid abgekühlt wird. Das abgekühlte Fluid wird in dem installierten Kreisprozess anschließend wieder in den Kollektor gepumpt, wobei es sich durch den Entzug von Wärme aus dem erschlossenen Untergrund erneut erwärmt. Infolge der niedrigen Teufe wird die Effizienz des Erdwärmekollektors durch die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen beeinflusst. Eine Besonderheit unter den Kollektoren stellen Erdwärmekörbe da. Sie kommen dort zum Einsatz wo eine kompaktere platzsparende Bauweise als bei horizontalen Kollektoren notwendig ist.

System:	geschlossen
Tiefe:	max. 5 m
Temperatur:	8 bis 15 °C
Anwendung:	Heizen und Kühlen durch Einsatz einer Wärmepumpe

Brunnensysteme / Grundwasserwärmepumpen

Unter Nutzung von Brunnensystemen bzw. Grundwasserwärmepumpen können oberflächennahe Grundwasserkörper für das Heizen oder Kühlen von Gebäuden erschlossen werden. Für die Beheizung kleinerer Gebäude mit vergleichsweise geringer Heizlast besteht dieses System aus einem Förder- und einem Injektionsbrunnen. Bei größeren Gebäudekomplexen bzw. Energiebedarfen werden mehrere Förder- und Injektionsbrunnen verwendet. Wenn das Brunnensystem zur Bereitstellung von Heizwärme genutzt wird, wird dem geförderten Wasser Wärme über den Wärmetauscher einer Wärmepumpe entzogen. Das dabei abgekühlte Wasser wird anschließend über einen im Abstrom der Anlage installierten Injektionsbrunnen in den Grundwasserleiter zurückgeführt. Bei der Verwendung des Brunnensystems zur Gebäudekühlung erfolgt der Prozess in umgekehrter Richtung, d.h. dem geförderten Grundwasser wird Wärme zugeführt, bevor es mit erhöhter Temperatur in den Grundwasserleiter reinjiziert wird. In Abhängigkeit des lokal eingestellten Grundwasserflusses bilden sich im erschlossenen Grundwasserleiter Temperaturfahnen, welche entsprechend der Betriebsform des Brunnensystems Bereiche mit herabgesetzter (Heizen) oder erhöhter (Kühlen) Grundwassertemperatur darstellen. Es ist wichtig zu beachten, dass eine gegenseitige Beeinflussung der installierten Brunnen ausgeschlossen ist.

System:	offen
Tiefe:	Ø 15 m
Temperatur:	8 bis 15 °C
Anwendung:	Heizen und Kühlen (Einsatz von Wärmepumpen)

Oberflächennahe (flache) Erdwärmesonde, Erdwärmesondenfelder

Die flache Erdwärmesonde (EWS) ist der in Mittel- und Nordeuropa am häufigsten gebaute Anlagentyp für die Erschließung oberflächennaher Erdwärme. Erdwärmesonden sind vertikale Bohrungen, in welche üblicherweise Polyethylen-Rohre in Koaxial-, U- oder Doppel-U-Konstellation eingelassen sind. Eine optimale thermische Ankopplung an den Untergrund gelingt durch das Verpressen besonders wärmeleitfähiger Spezialzemente. Als Wärmeträgermedium dient ein frostunempfindliches Wasser-Glykol-Gemisch, das aufgrund seiner vergleichsweise hohen Wärmekapazität besonders gut für einen ergiebigen Wärmetransport aus der Tiefe geeignet ist. Die nutzbare Entzugsleistung hängt neben der im erschlossenen Untergrund verfügbaren Wärmemenge von den Betriebsstunden der Sonde sowie einer ggf. eingestellten künstlichen Sondenregeneration, also der Rückführung von Wärme in den Untergrund, ab. Einzelne Erdwärmesonden können sich oftmals zur Deckung des Wärmebedarfs von ein oder kleineren Mehrfamilienhäusern eignen.

Größere Anlagen der oberflächennahen Geothermie erfordern oft eine Vielzahl von Erdwärmesonden, die häufig als Sondenfeld bezeichnet werden. Die Anordnung der Sonden und der zugehörigen Bohrungen erfolgt dabei in der Regel, aber nicht zwangsläufig, in einem regelmäßigen Raster. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die einzelnen Sonden an ein zentrales System anzuschließen, wobei eine Teilmenge der Sonden zunächst zu einem Unterzentrum zusammengeführt werden kann. Das Sondenfeld kann entweder an eine (oder mehrere) zentrale Wärmepumpe(n) oder an ein kaltes Wärmenetz angeschlossen werden. Bei der Dimensionierung eines Erdwärmesondenfeldes ist zu beachten, dass sich die einzelnen Erdwärmesonden durch die Auskühlung des sie umgebenden Untergrundes gegenseitig beeinflussen können, weshalb ein Mindestabstand (häufig 5 – 15 m) zwischen den Sonden eingehalten werden sollte.

System:	geschlossen
Tiefe:	variabel Ø 100 m, max. 400 m
Temperatur:	0 bis 20 °C
Anwendung:	Heizen und Kühlen (Einsatz von Wärmepumpen)

Energiepfähle

Energiepfähle operieren in ähnlicher Art wie die zuvor beschriebenen Erdwärmesonden, mit dem Unterschied, dass die das Wärmeträgerfluid führenden Rohrleitungen in die Beton Gründungen von Bauwerken eingegossen sind. Abhängig von den lokalen Baugrundbedingungen sowie der Belastung eines Gebäudes ist eine Tiefgründung in Form einer Pfahlgründung auszuführen. In diesem Zusammenhang werden Pfähle entweder durch Bohren (Bohrpfähle) oder Rammen (Rammpfähle) so tief in den Boden eingebracht, bis eine Tragfähigkeit sichergestellt ist. Durch das Einbinden von Wärmetauschern in die Gründungspfähle lassen sich diese gleichzeitig als strukturelle Bauelemente sowie als Heiz- und Kühlelemente nutzen.

System:	geschlossen
Tiefe:	variabel, Ø 20 m
Temperatur:	0 bis 20 °C
Anwendung:	Heizen und Kühlen (Einsatz von Wärmepumpen)

7.7.2. Technische Erschließungsformen mitteltiefer bis tiefer Erdwärme

Hydrothermale Systeme

Bei der thermischen Erschließung des mitteltiefen bis tiefen Untergrundes unter Nutzung hydrothermaler Systeme wird das in einem entsprechend tiefen Grundwasserleiter natürlich vorkommende, warme Grund- bzw. Thermalwasser durch das Abteufen mehrerer Bohrungen / Brunnen technisch erschlossen. Über einen Förderbrunnen wird das Grundwasser dabei, unter Nutzung innerhalb der Produktionsverrohrung installierter Tauchpumpen, aus dem Grundwasserleiter zutage gefördert. In den übertägigen Anlagen wird dem Fluid unter Nutzung von Wärmetauschern und / oder Wärmepumpen Wärme entzogen. Abhängig von der Untergrundtemperatur, kann das geförderte Thermalwasser zur Erzeugung von Energie in Form von Wärme oder elektrischem Strom genutzt werden. Das bei diesem Prozess abgekühlte Wasser wird anschließend über eine separate Bohrung (Injektionsbohrung) in den erschlossenen Grundwasserleiter zurückgeführt. Um einen thermischen Kurzschluss, also das direkte Anströmen der Förderbohrung durch das reinjizierte, kalte Wasser, zu vermeiden, ist innerhalb des erschlossenen Reservoirs eine Distanz von mindestens 500 m zwischen Förder- und Injektionsbohrung zu realisieren. Förder- und Injektionsbohrung können dabei allerdings von demselben Bohrplatz abgeteuft werden, indem die Bohrungen im Untergrund abgelenkt werden. Besteht ein hydrothermales System ausschließlich aus einem Förder- und einem Injektionsbrunnen, so bezeichnet man diese Konfiguration als hydrothermale Dublette.

Wichtig für den Betrieb eines hydrothermalen Systems ist neben der Untergrundtemperatur die hydraulische Leitfähigkeit bzw. Permeabilität des erschlossenen mitteltiefen bis tiefen Grundwasserleiters. Letztere definiert mögliche Thermalwasserschüttungen bzw. im Betrieb realisierbare Förderraten und damit die geothermische Ergiebigkeit des Systems. Die hydraulische Leitfähigkeit bzw. Permeabilität der den erschlossenen Grundwasserleiter darstellenden Gesteine ist das Ergebnis des durchflusswirksamen Porenraums. Für Festgesteins-Aquifere sind dafür oftmals offene Klüfte oder Kavernen (Kluft- und Karstgrundwasserleiter) verantwortlich. In porösen Sedimentgesteinen sowie Lockergesteinen ist die Form, Größe und Verbindung der Poren entscheidend für die hydraulische Durchlässigkeit bzw. Leitfähigkeit des Gesteins (Porengrundwasserleiter). Grundsätzlich kann zur geologischen Eignung eines Aquifers gesagt werden, dass ein beispielhafter Sandsteinaquifer eine Mindestdurchlässigkeit von 250 bis 500 mD, eine nutzbare Porosität von 20 – 25 % und eine Mächtigkeit von mindestens 20 m aufweisen sollte, was einer Transmissivität von ca. 10^{-3} bis 10^{-5} m²/s entspricht. Die Mindesttemperaturen für eine wirtschaftliche geothermische Wärmeerzeugung liegen bei > 60°C und für eine Stromerzeugung bei > 100 °C.

System:	offen
Tiefe:	variabel, > 100 bis > 4.000 m
Temperatur:	variabel, ca. 20 bis > 150 °C
Anwendung:	Heizen und Kühlen von Gewerbegebäuden, Wohnquartieren und Siedlungen; Fernwärmeerzeugung; Stromproduktion

Mitteltiefe bis -tiefe Erdwärmesonden

Die tiefe Erdwärmesonde stellt das bis zu 3.000 m lange Äquivalent zu einer oberflächennahen Erdwärmesonde dar. Häufig erschließen mitteltiefe Erdwärmesonden den geologischen Untergrund bis in einen Teufenbereich bis maximal 1.000 m u. GOK. Im Gegensatz zu oberflächennahen Erdwärmesonden haben mitteltiefe bis tiefe Erdwärmesonden einen koaxialen Aufbau. Die Sonden bestehen entsprechend aus einem Außen- und darin liegenden Innenrohr. Über das Außenrohr wird ein Wärmeträgerfluid von der Oberfläche in die Tiefe gepumpt, welches sich auf dem Weg durch das mit zunehmender Teufe wärmer werdende Gestein aufheizt und dabei dem Untergrund dabei Energie entzieht. Am Fuß, dem tiefsten Punkt der Erdwärmesonde, tritt das erwärmte Wärmeträgerfluid in das Innenrohr der Sonde ein und steigt zur Erdoberfläche auf, wo die aufgenommene Wärme unter Nutzung von Wärmetauschern und Wärmepumpen abgeführt, und so nutzbar gemacht werden kann. Das bei diesem Prozess wieder abgekühlte Fluid tritt anschließend wieder in die Erdwärmesonde ein.

Für die Installation einer mitteltiefen bis tiefen Erdwärmesonde kann eine bereits bestehende, bspw. zur geothermisch/geologischen Erkundung niedergebrachte Bohrung genutzt werden, indem bereits bei der Planung der Erkundungsbohrung für eine Nachnutzung geeignete Bohr- und

Rohrtourdurchmesser angesetzt werden. Weiterhin können, analog zur flachen Erdwärmesonde, mehrere mitteltiefe oder tiefe Erdwärmesonden für die energetische Nutzung installiert werden. Die zu verwendenden Mindestabstände zwischen den einzelnen Sonden sind dabei durch Modellrechnungen individuell zu bestimmen.

System:	geschlossen
Tiefe:	variabel, min. 400 m, max. 3.000 m
Temperatur:	variabel, ca. 20 – 100 °C
Anwendung:	Heizen und Kühlen (Einsatz von Wärmepumpen)

7.7.3. Standortspezifisch empfohlene Erschließungsmethode

In Abbildung 14 ist entsprechend der strukturgeologischen Verhältnisse eine Dreigliederung des Stadtgebietes Darmstadt in 1.) den im östlichen bis südöstlichen Stadtgebiet verorteten Bereich der Grabenschulter, 2.) das im nördlichen Stadtgebiet vorkommende Strukturelement der Hochscholle Nord sowie 3.) die räumlich innerhalb des Oberrheingrabens bzw. der Tiefscholle West verorteten Bereiche Darmstadts dargestellt. Die Übergangsbereiche zwischen Grabenschulter und Hochscholle Nord sowie zwischen Grabenschulter und Tiefscholle west sind durch der Grabenrandstörung des Oberrheingrabens zuzuordnenden Übergangsbereiche verbunden. In diesen durch intensive und versatzstarke Störungssysteme dominierten Bereiche senkt sich das Grundgebirge terrassenartig in Richtung West ab. Eine Einschätzung bzgl. der Möglichkeiten zur Nutzbarmachung geothermischer bzw. hydrothermalen Potenziale wird im Folgenden erst differenziert für die definierten Strukturräume und danach bezogen auf die ausgewiesenen Projektstandorte Darmstadt, Mathildenhügel und Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße vorgenommen.

Grabenschulter

Die im Bereich der östlichen Schulter des Oberrheingrabens aufgeschlossenen oder oberflächennah anstehenden Gesteine des kristallinen Grundgebirges zeigen durch ihre vergleichsweise geringen hydraulischen Leitfähigkeiten generell keine wirtschaftlich nutzbaren hydrothermalen Potenziale. Zwar sind durch oberflächennahe Bohrungen teilweise hydraulisch kommunizierende Kluftsysteme bekannt, die auch in diesem Bereich eine Grundwassergewinnung möglich machen, jedoch sind die entsprechenden Kluftsysteme nicht durchgängig dokumentiert und demnach in ihrem Auftreten sowie in ihrer Ausbildung sehr heterogen ausgebildet. Die Entstehung entsprechender Kluftsysteme wird auf die tektonische Beanspruchung des Gesteins im Zusammenhang mit den andauernden Riftprozessen zurückgeführt. Das Auftreten offener Kluftsysteme bzw. hydraulisch leitender Kluftsysteme wird dabei vor allem in Verbindung mit oberflächennah auftretenden Zersatz- bzw. Verwitterungsbereichen gesehen. Die oberflächennah vergleichsweise geringen Gebirgs- und damit auch Grundwassertemperaturen sowie die im Brunnenausbau erwarteten geringen Grundwasserschüttungen schließen die Nutzung hydrothermalen Systeme im Bereich der Grabenschulter größtenteils aus.

Als eine geeignete Form der Erschließung von Erdwärme bieten sich oberflächennahe bis mitteltiefe Erdwärmesonden an um Einzelgebäude, Wohnquartiere und kleinere Gewerbe- oder Industrieanlagen mit Wärmeenergie zu versorgen. Insbesondere die im zentralen sowie südlichen Teil des in Abbildung 14 dargestellten Teils der Grabenschulter aufgeschlossenen Granite und Granodiorite zeigen erhöhte Wärmeleitfähigkeiten, welche in Kombination mit dem vergleichsweise hohen geothermischen Gradienten von 4,5 K / 100 m erhöhte spezifische Entzugsleistungen erlauben. Bzgl. der Wirtschaftlichkeit ist der im kristallinen Gestein erhöhte Bohraufwand zu berücksichtigen. Die im nördlichen Teil der Grabenschulter anstehenden Sedimentgesteine des

Rotliegend weisen geringere Wärmeleitfähigkeitswerte aus. Bereits in oberflächennahen Teufbereichen werden im Zuge einer bohrtechnischen Erschließung ebenfalls die Gesteine des kristallinen Grundgebirges erbohrt. Bei einer Nutzbarmachung von Erdwärme durch Erdwärmesonden kann also entweder eine Teufenlimitierung durch den Basiskontakt des Rotliegend Anwendung finden oder es wird eine kombinierte thermische Erschließung des Untergrundes inklusive der Gesteine des kristallinen Grundgebirges angestrebt. Durch den Wechsel der Lithologie bei letzterem Ansatz kann es ggf. zu besonderen Anforderungen an den Ausbau der Bohrungen / Sonden kommen, was mit erhöhten Kosten verbunden sein kann.

Hochscholle Nord

Im Bereich der Hochscholle Nord wird der Kontakt zum Grundgebirge im Stadtzentrum in einer Teufe von etwa 750 m u. GOK angenommen. Im Allgemeinen fällt die Hochscholle Nord in westliche Richtung, also in Richtung des zentralen Oberrheingrabens ein. Über dem Grundgebirge sind um die 200 m mächtige Gesteinsfolgen des Rotliegend dokumentiert, welche von Tertiären und Quartären Sedimenten bedeckt sind. Zeigen die Rotliegensedimente ausreichende Permeabilitäten bzw. sind bei einer bohrtechnischen Erschließung ausreichende Grundwasserschüttungen realisierbar, so können im Bereich der Hochscholle Nord mitteltiefe hydrothermale Systeme zur Wärmeversorgung von Wohnquartieren, Gewerbe- oder Industrieanlagen realisiert werden. Infolge der zwar gegenüber dem deutschen Durchschnitt erhöhten, für eine Wärmegestellung dennoch moderat erwarteten Temperaturen in der Größenordnung von über 40 °C ist eine Erschließung des Rotliegend zur Wärmebereitstellung höherentemperierter Netze oder Systeme im Bereich der Hochscholle Nord wahrscheinlich nicht wirtschaftlich.

Die das Rotliegend bedeckenden Tertiären Sedimentfolgen, aber auch die darüberliegenden Quartären Sedimente können unter Nutzung von flachen bis mitteltiefen Erdwärmesonden für eine dezentrale Wärmeversorgung von Einzelgebäuden, Wohnquartieren oder kleineren Gewerbe- und Industrieanlagen thermisch erschlossen werden. Zu berücksichtigen ist dabei die aufgeprägte Grundwasserstockwerksgliederung, die besondere Anforderungen an das bohrtechnische Erschließen des Untergrundes im Zuge der Sonden / Sondenfeldinstallation stellt. Die Nutzung von Erdwärmekollektoren im Stadtgebiet wird infolge des vergleichsweise hohen Flächenbedarfs als höchstens für kleinere Einzelgebäude mit niedrigen Heizsystemtemperaturen realisierbar angesehen.

Tiefscholle West

Die Tiefscholle West stellt den Bereich des Darmstädter Stadtgebietes dar, welcher sich räumlich innerhalb der Struktur des Oberrheingrabens befindet. Das Grundgebirge fällt in Richtung des Grabeninneren immer weiter ab. Der östliche Randbereich bzw. der Übergang sowohl zur Grabenschulter als auch zur Hochscholle Nord ist durch gestaffelte Störungszonen charakterisiert,

über welche ein räumlich kleinskaliger terrassenförmiger Anstieg des Grundgebirges aus der Grabenstruktur in Richtung östlicher Grabenrand erfolgt. Im Bereich der Tiefscholle West wird das kristalline Grundgebirge von Gesteinsfolgen des Rotliegend überlagert, welche selbst von mächtigen (> 1.500 m) Tertiären Sedimentgesteinen bedeckt sind. An der Erdoberfläche bilden bis zu 100 m mächtige Quartäre Sedimente den Abschluss der lokal realisierten stratigraphischen Abfolge. Sind in den Gesteinen des Rotliegend hydraulisch leitfähige Kluftsysteme in einem Maß vorhanden, welches die Realisierung ausreichender Förderraten erlaubt, so stellen diese interessante Erschließungsziele dar, welche unter Nutzung hydrothermalen Systeme wie etwa hydrothermalen Dubletten nutzbar gemacht werden können. Die Tiefenlage und damit die Gebirgs- und Fluidtemperatur der Rotliegendfolge nimmt dabei, ebenfalls wie die Mächtigkeit der Gesteinsfolge in Richtung des Grabeninneren, also nach West, zu. Bereits am Standort Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße, welcher sich am östlichen Randbereich der Tiefscholle West befindet, werden im Rotliegend Reservoirtemperaturen von ca. 110 °C erwartet. Bei einer entsprechenden Erschließung ist auch eine Wärmeeinspeisung in Fernwärmenetze oder eine Bereitstellung von Prozesswärme für energieintensive Gewerbe- oder Industrien denkbar. Die Wirtschaftlichkeit entsprechender hydrothermalen Systeme ist dabei in erster Linie von den tatsächlich Grundwasserschüttungen bzw. im Anlagenbetrieb dauerhaft realisierbaren Förderraten abhängig.

Die geothermische Erschließung der im Bereich der Tiefscholle West vorkommenden Tertiären sowie der diese bedeckenden Quartären Sedimentgesteine / Sedimente ist unter Nutzung flacher, mitteltiefer, aber auch tiefer Erdwärmesonden möglich. Auch hier stellt die im oberflächennahen Untergrund realisierte Grundwasserstockwerksgliederung besondere Anforderungen an das bohrtechnische Erschließen des Untergrundes im Zusammenhang mit der Installation einer Erdwärmesonde, eines Erdwärmesondenfeldes aber auch allen sonstigen die Grundwasserleiter durchteufenden Bohrungen.

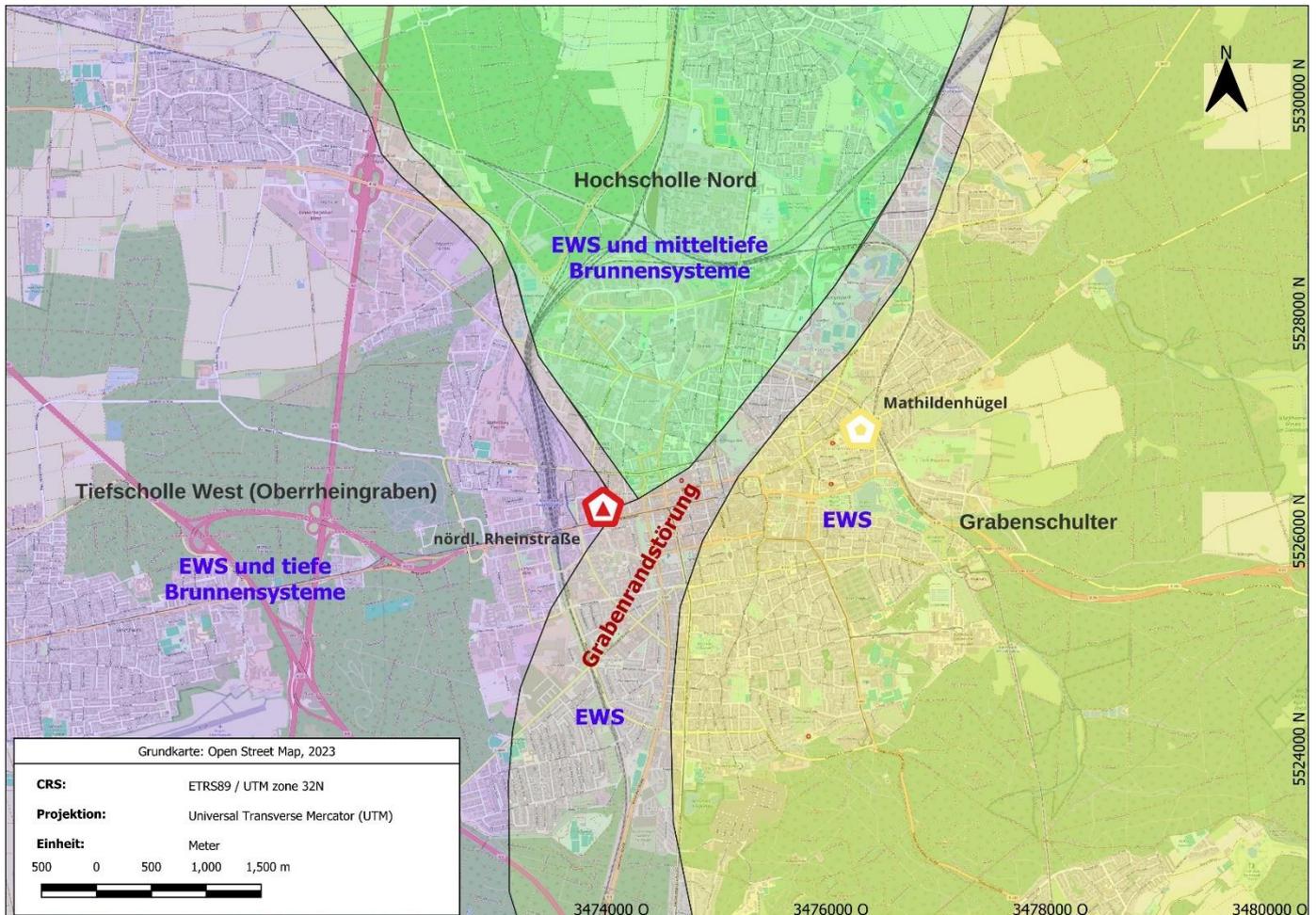


Abbildung 14: Konzeptionelle strukturegeologische Gliederung des Stadtgebietes Darmstadt unter Ausweisung möglicher Erschließungsformen zur Nutzbarmachung von Erdwärme.

Darmstadt, Mathildenhügel

Auf Grund der vorliegenden geologischen, geothermischen und geographischen Informationen und Rahmenbedingungen am Untersuchungsstandort sowie der geringen Informationsdichte hinsichtlich der Existenz und Ausprägung von Störungs- oder Kluftsystemen im anstehenden kristallinen Granit, wird als bevorzugte Erschließungsmethode die Umsetzung eines oberflächennahen Erdwärmesondenfeldes bestehend aus 30 Sonden (Ergebnis der konzeptionellen Sondenfeldsimulation) mit einer jeweiligen Länge von 400 m empfohlen und im Weiteren berechnet. Ein EWS-Feld stellt bei der abzudeckenden Gesamtheizlast von 2,291 GWh die einzige, auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvolle Erdwärme-gespeiste Energieversorgungsmöglichkeit für Bestandsbauten am Untersuchungsstandort Mathildenhügel dar. Gegenüber anderen oberflächennahen Erschließungsmethoden hebt sich das Erdwärmesondenfeld durch einen vergleichsweise geringeren Flächenverbrauch bei zielgerichtet punktuellen Eingriffen in den Baugrund gegenüber flächenintensiven Methoden, wie bspw. Erdwärmekollektoren hervor. Ebenfalls ermöglichen Erdwärmesonden die Erschließung des geologischen Untergrundes in größere

Tiefen, sodass bei überschaubarer Sondenzahl und Flächenbelastung der am Standort geforderte Bedarf an Heizlast abgedeckt werden kann. Der Einsatz von Grundwasserwärmepumpen inmitten eines dicht bebauten Wohngebietes, bei ungeklärter Kontinuität sowie geringe bis äußerst geringe hydraulische Leitfähigkeit der Quartären Sedimentfüllung, und unter Bereitstellung der geforderten Heizlast wird als nicht realisierbar eingeschätzt. Auch der Einsatz mitteltiefer bis tiefer hydrothermalen Systeme wird infolge der in den zu erbohrenden Gesteinen des kristallinen Grundgebirges fehlenden hydraulischen Leitfähigkeit ausgeschlossen. Eine petrothermale Nutzung des Grundgebirges birgt zwar ein erhöhtes Potenzial, jedoch stellt sich dieses im reinen Projektbezug Darmstadt Mathildenhügel durch immense Primärinvestitionen als nicht betrachtenswert dar.

Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße

Zusätzlich zur geothermischen Potenzialanalyse am Standort Mathildenhügel wurde eine konzeptionelle Betrachtung hinsichtlich der geothermalen Erschließung des mitteltiefen bis tiefen Untergrundes für den Alternativstandort Darmstadt, Quartier nördliche Rheinstraße durchgeführt. Am Standort nördliche Rheinstraße wurde durch die ca. 6 km südwestlich des Untersuchungsstandortes gelegene Bohrung 0732 Darmstadt-Südwest 1 die hydrothermal interessante Gesteinsfolge des Rotliegend nachgewiesen, welche in der konzeptionellen Betrachtung als Erschließungsziel festgelegt wurden. Das Top des Rotliegend wird am Untersuchungsstandort Quartier nördliche Rheinstraße in einer Teufe von ca. 2.120 m u. GOK erwartet. Da das Rotliegend durch Bohrungen im Raum Darmstadt nicht durchgängig durchteuft wurde, wird dessen Mächtigkeit auf Grundlage existierender überregionaler Strukturmodelle auf etwa 200 m geschätzt. Sind, wie aus Analogieschlüssen aus zentraleren Bereichen des Oberrheingrabens bekannt, ausreichende Gebirgespermeabilitäten bzw. Transmissivitäten in den lokal erwarteten Rotliegendesteinen vorhanden, ist bei einem entsprechenden Bohrlochausbau von für den Betrieb hydrothermalen Systeme ausreichenden Grundwasserschüttung auszugehen. Hydrothermale Systeme liefern gegenüber vergleichsweise tiefen koaxialen Erdwärmesonden bei gleichzeitig höheren Vorlauftemperaturen signifikant höhere nutzbare Energiemengen. Im Gegensatz zu koaxialen Erdwärmesonden ist für die Nutzbarmachung von Erdwärme durch hydrothermale Systeme allerdings das Abteufen von mindestens zwei Bohrungen (z.B. hydrothermale Dublette) sowie die Ausführung geophysikalischer Erkundungen zur flächenhaften Identifikation des Reservoirverlaufes im Untergrund sowie ggf. vorhandener Störungssysteme erforderlich, welche mit höheren Primärinvestitionen verbunden sind. Für die Entscheidungsfindung, ob ein hydrothermales System am Untersuchungsstandort realisierbar ist, ist zwangsläufig das Abteufen einer Erkundungsbohrung notwendig um die in-situ Gesteinsbeschaffenheit inklusive hydraulischer und petrophysikalischer Parameter bewerten zu können. Eine entsprechende Erkundungsbohrung kann bereits in der Phase der Entwurfsplanung so konzeptioniert werden, dass eine Nachnutzung als Produktions- oder Injektionsbrunnen eines hydrothermalen Systems möglich ist, oder durch einen

nachträglichen Workover möglich gemacht wird. Für den Fall, dass die Erkenntnisse aus der Erkundungsbohrung gegen eine Realisierung einer hydrothermalen Dublette sprechen, kann eine solche Bohrung als Fall-Back-Option ggf. auch zu einer mitteltiefen / tiefen coaxialen Erdwärmesonde ausgebaut werden.

8. Erkundungsempfehlung

Für die Errichtung einer zuverlässigen, effizienten und wirtschaftlichen geothermischen Anlage ist eine möglichst präzise Vorhersage der geologischen, hydrogeologischen und geothermischen Gegebenheiten am Untersuchungsstandort Mathildenhügel erforderlich. Dies erfordert eine Erhebung ortskonkreter Daten auf Basis etablierter Erkundungsmethoden. Die Bewertung zur Eignung des Untergrundes für eine langfristige geothermische Nutzung umfasst die Verwendung geeigneter thermischer Leistungstests wie beispielsweise dem Thermal Response Test (TRT), sowie die Berücksichtigung ggf. existierender benachbarter Geothermiestandorte / Erdwärmesonden sowie deren Leistungscharakteristika.

Generell soll durch die Erhebung und Auswertung am Untersuchungsstandort erhobener Daten sichergestellt werden, dass die geforderte Leistung und bauliche Integrität der geothermischen Anlage gewährleistet werden und es zu keiner Berührung schützenswerter Güter über das genehmigte Maß kommen kann.

Bei einer Projektumsetzung zur Erschließung des lokalen geothermischen Potentials am Standort Darmstadt, Mathildenhügel unter Nutzung eines Erdwärmesondenfeldes sind vorbereitende Erkundungsmaßnahmen auszuführen, um die geologischen Untergrundverhältnisse, die lokale hydrogeologische Situation, die thermophysikalischen und hydraulischen Gesteinseigenschaften sowie die Temperaturentwicklung im Untergrund zu validieren und final zu bewerten. In diesem Zusammenhang wird das Abteufen von Erkundungsbohrungen inkl. der Ansprache und Analyse gewonnenen Bohrguts, der thermischen- und hydraulischen Test sowie ergänzender Bohrlochgeophysikalischer Befahrung empfohlen. Die einzelnen Erkundungsmethoden werden im Folgenden genauer beschrieben.

8.1. Erkundungsbohrung

Zur Bestätigung der in Kapitel 5, 6 und 7 beschriebenen lokalen geologischen und hydrogeologischen Situation am Standort Darmstadt, Mathildenhügel wird das Abteufen von mindestens einer, besser mehrerer, kleinkalibriger Erkundungsbohrungen empfohlen. Werden mehrere Erkundungsbohrungen ausgeführt sollten diese räumlich bestmöglich über die durch ein Sondenfeld zu erschließenden Flächen verteilt ausgeführt sowie eine mögliche Nachnutzung der Bohrungen geplant werden. Die Zielteufe der Erkundungsbohrungen entspricht dabei mindestens der maximalen Sondenlänge einer Vorplanung.

Generell dienen Erkundungsbohrungen zur Erhebung ortskonkreter Daten sowie entsprechend zur Bestätigung von in der Konzeptionierung getroffenen Annahmen. Erkundungsbohrungen geben Aufschluss bzgl. der an einem Untersuchungsstandort realisierten Schichtenfolge, erlauben die Ausweisung entsprechend erbohrter Lithologien und ermöglichen Aussagen bzgl. der durchteuften Schichtmächtigkeiten sowie Teufenlagen lithologisch differenzierbare Einheiten (dabei insbesondere des Erschließungsziels, potenziell alternativer Erschließungsziele). Weiter ermöglicht das Abteufen einer Erkundungsbohrung Erkenntnisse bzgl. der Gliederung der durchteuften Grundwasserkörper sowie Grundwasserverhältnisse und erlaubt eine Identifikation potenzieller Hindernisse und / oder Risiken.

Im Idealfall werden am Untersuchungsstandort Darmstadt, Mathildenhügel mehrere Erkundungsbohrungen mit Kerngewinn und anschließender, an den geborgenen Bohrkernen ausgeführten, thermophysikalischen sowie hydraulischen Labortests abgeteuft. Erkundungsbohrungen mit Kerngewinn liefern Gesteinsproben, deren Eigenschaften repräsentativ für die am Untersuchungsstandort im geologischen Untergrund anstehenden Gesteine sind. So können detaillierte Aussagen zur stratigraphischen und / oder lithologischen Gliederung des Untergrundes, zu mineralogischen Zusammensetzungen, Strukturen und Texturen der Gesteine, sowie zu deren petrophysikalischen Gesteinseigenschaften erhoben werden. Unter dem Gesichtspunkt einer angestrebten geothermalen Erschließung sind insbesondere am Bohrkern ausgeführte Wärmeleitfähigkeitsmessungen sowie Test zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit auszuführen. Auch geotechnische Test am Bohrkern können wichtige Informationen bzgl. der Standfestigkeit des offenen Bohrloches liefern. Geophysikalische Befahrungen des abgeteuften Bohrlochs ermöglichen Erkenntnisse zu Materialeigenschaften sowie den im durchteuften Untergrund eingestellten Umweltbedingungen (dabei insbesondere der Temperatur). Insgesamt bieten Kernbohrungen aufgrund ihrer Fähigkeit, hochwertige Proben zu liefern und detaillierte geologische Informationen zu gewinnen, einen maßgeblichen Beitrag zur präzisen Charakterisierung des Untergrundes und damit zur zielgerichteten Validierung geplanter geothermischer Erschließungskonzepte.

Alternativ zu einer Bohrung mit Kerngewinn kann eine kostengünstigere Bohrung mit Bohrkleinansprache durchgeführt werden. Bei dieser Bohrmethode wird das durchteufte Gestein unter Einsatz bspw. eines Rollmeißels oder eines Imlochhammers gebrochen und über die Bohrspülung zu Tage gefördert. Die kontinuierliche Ansprache des gewonnenen Bohrkleins ermöglichte die Konstruktion der stratigraphischen Gliederung sowie eine lithologische Ansprache der erbohrten Gesteine. Laborversuche zur Feststellung hydraulischer und thermischer Leitfähigkeiten sowie bzgl. geotechnischer Parameter sind am Bohrklein allerdings nicht möglich. Die Möglichkeit zur geophysikalischen Befahrung des Bohrlochs sowie zur Ausführung hydraulischer Tests im Bohrloch sind auch bei Bohrungen ohne Kerngewinn gegeben.

Eine Weiternutzung zu Erkundungszwecken abgeteufter oberflächennaher Bohrungen ist gegeben, so können diese bspw. zu Grundwasser-, bzw. Temperaturmessstellen ausgebaut werden. Auch die nachträgliche Installation einer Erdwärmesonde kann unter Umständen möglich sein. Bei mitteltiefen bis tiefen Erkundungsbohrungen auf hydrothermale Systeme kann bereits in der Phase der Entwurfsplanung eine mögliche Weiter- bzw. Alternativnutzung berücksichtigt werden. So kann der finale Enddurchmesser der Bohrung bzw. entsprechenden Verrohrung bspw. initial bereits so gewählt oder bei einem nachträglichen Workover erweitert werden, dass eine Nachnutzung bspw. in Form einer Produktions- oder Injektionsbohrung als Teil einer hydrothermalen Dublette gegeben ist. Oftmals stellt die Nachnutzung einer mitteltiefen bis tiefen Erkundungsbohrung als koaxiale Erdwärmesonde dabei eine Fall-Back-Option dar, sollten die für einen wirtschaftlichen Betrieb einer hydrothermalen Dublette notwendigen Gesteins- und Grundwasserparameter im Zuge der Erkundung nicht angetroffen worden sein.

8.2. Thermal Response Test

Der Thermal Response Test (TRT) ist ein wichtiges technisches Messverfahren zur Charakterisierung der thermischen Leistungsfähigkeit von Erdwärmesonden als Wärmequelle, Wärmesenke oder als Wärmespeicher. Bei der Durchführung eines TRTs wird eine festgelegte Leistung P über die zu prüfende Sonde in den thermisch erschlossenen Untergrund eingebracht. Über einen definierten Zeitraum wird dabei die Temperaturänderung des Wärmeträgermediums am Sonderein- sowie -austritt dokumentiert. Mithilfe mathematischer Modelle können aus der Temperaturentwicklung wichtige thermische Parameter der Sonde sowie des umgebenden Untergrundes, insbesondere die Wärmeleitfähigkeit, abgeleitet werden. Die Quantifizierung der Wärmeleitfähigkeit λ erlaubt dabei eine Skalierung der im Sondenbetrieb realisierbaren spezifischen Entzugsleistung P_s . In Gebieten mit starkem Grundwasserfluss kann die Standardauswertung des TRT aufgrund der Überlagerung von konduktivem und konvektivem Wärmetransport jedoch eingeschränkt sein. In solchen Fällen sind weiterführende Analysen erforderlich, um die Aussagekraft der Ergebnisse zu bewerten. Der TRT wird üblicherweise mit mobilen Messgeräten direkt am Bohrloch durchgeführt.

8.3. Nullfeldmessung

Es wird empfohlen mindestens ein Jahr vor Inbetriebnahme eines Erdwärmesondenfeldes eine Nullfeldmessung durchzuführen. Die Nullfeldmessung wird durchgeführt, um die natürliche Temperaturverteilung und -entwicklung im Untergrund zu erfassen, bevor ein Sondenfeld in Betrieb genommen wird. Die gewonnenen Daten dienen als Referenzwerte für die Beobachtung der Temperatur während des Betriebs des geothermischen Systems. Diese Referenz ist notwendig, um den thermischen Zustand des Bodens bzw. Gesteins an einem geothermisch zu erschließenden Standort final zu bewerten sowie die Beeinflussung der Temperaturverhältnisse während

des Betriebs eines Sondenfeldes qualifizieren zu können. Aus diesen Beobachtungen lassen sich die Energiebedarfe für eine ggf. notwendige künstliche Regeneration des Untergrundes initial validieren sowie während des Anlagenbetriebs bedarfsabhängig anpassen.

9. Mögliche Risiken beim bohrtechnischen Erschließen des Untergrunds

Jede tiefere Bohrung birgt, auch bei guter Kenntnis der Untergrundverhältnisse, gewisse Risiken. Diese sind im Rahmen einer Entwurfsplanung zu definieren, um bereits in der Planungsphase geeignete Sicherungsmaßnahmen für die Ausführung der Bohrung(en) einkalkulieren zu können. Im Folgenden werden für den Standort Mathildenhügel exemplarisch mögliche Bohrrisiken aufgeführt, die für die Errichtung eines Sondenfeldes mit Bohrtiefen von bis zu 400 m u. GOK berücksichtigt werden sollten. Eine nähere teufenbezogene Abschätzung von Bohrrisiken und die Benennung von Mitigationsmaßnahmen ist Gegenstand einer standortspezifischen Ausführungsplanung.

Seismizität

Entsprechend der DIN 4149 [32] befindet sich die Stadt Darmstadt und somit der Projektstandort Mathildenhügel innerhalb der Erdbebenzonen 1 [5]. Am Untersuchungsstandort besteht daher ein erhöhtes Risiko infolge natürlicher seismischer Aktivität.

Überschwemmungsgebiet

Der Untersuchungsstandort Mathildenhügel in Darmstadt befindet sich außerhalb von ausgewiesenen Überschwemmungsgebieten und Risikoflächen für extreme Hochwasserereignisse HQ10 und HQ100 [33]. HQ10 und HQ100 steht für 10- bzw. 100-jährige extreme Hochwasserereignisse [34]. Ein 100-jähriges Hochwasser kommt statistisch gesehen mindestens einmal in 100 Jahren vor.

Artesisch gespannte bzw. gespannte Grundwasserleiter

Am Standort Darmstadt, Mathildenhügel sind keine artesisch gespannten oder gespannten Grundwasserverhältnisse dokumentiert. Das HLNUG weist den Untersuchungsstandort Mathildenhügel als hydrogeologisch günstig aus [5]. In der Bohrung 0017 Wasserbohrung Brauerei Fay wurde ein Ruhewasserspiegel des angetroffenen Grundwassers bei 19,0 m u. GOK dokumentiert [31].

Karsthohlräume

Wasserlösliche Gesteinseinheiten wie bspw. Kalksteine, Dolomite oder Evaporite bilden bei Eindringen von Wasser infolge chemischer Lösungsprozesse häufig Hohlräume (Verkarstungen) aus. Durch das Ausbilden von Verkarstungen entstehen sekundäre Fluidwegsamkeiten im Gebirge, welche beim Bohrvorgang zu Spülungsverlusten führen können. Da im geologischen Untergrund am Standort Darmstadt, Mathildenhügel nur kristalline Gesteine in Form von Graniten und Granodioriten dokumentiert sind bzw. erwartet werden, ist eine Verkarstungsgefahr am Standort nicht gegeben.

Störungszonen/Klüfte

Durch Störungen oder Klüfte kann es bei Bohrungen zu unerwarteten Spülungsverlusten während des Bohrprozesses kommen. Darüber hinaus stellt das Antreffen größerer, offener Klüfte erhöhte Anforderungen an die beim Verpressen einer Erdwärmesonde oder der Zementation einer Bohrung einzusetzenden Volumen an Zementsuspension, welche bereits bei der Planung zu berücksichtigen sind. Eine Nichtberücksichtigung potenzieller Klüfte (aber auch sonstiger größerer Hohlräume) kann entsprechend dazu führen, dass der Ringraum einer Erdwärmesonde oder Bohrung nicht ordnungsgemäß bzw. vollständig und dauerhaft hydraulisch verschlossen ist. Für den Untersuchungsstandort Mathildenhügel sind ortskonkret keine Daten zu offenen Störungen vorhanden. Vollständig ausgeschlossen werden kann deren vereinzelt Vorkommen, allerdings nicht, da sich das Gebiet im tektonischen beanspruchten Randbereich des Oberrheingraben befindet und für das am Standort zu erbohrende Gestein teilweise ausgeprägte (jedoch nicht explizit offene) Klüftungen ausgewiesen werden.

Setzungsempfindliche Schichten

Bei der Durchsicht der für den Untersuchungsstandort Mathildenhügel verfügbaren Bohrlochdokumentationen bzw. Schichtenverzeichnisse wurden keine setzungsempfindliche Schichten identifiziert. Diese Aussage wird durch Angaben des HLNUG bestätigt [5].

Rutschungen

Gravitativen Massenbewegungen wie Rutschungen oder Steinschlägen werden für den Projektstandort Mathildenhügel auf Grundlage der lokal anzutreffenden Kombination aus Morphologie und Geologie nicht erwartet. Das HLNUG weist für den Projektstandort Mathildenhügel ebenfalls keine Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen aus [5].

Altlasten

Altlasten können die Durchführung des Projekts erschweren oder ggf. sogar ausschließen. Entsprechend wird bei einer Projektfortführung ausdrücklich empfohlen Informationen bzgl. nachgewiesener belasteter Flächen oder Altlasten-Verdachtsflächen am Projektstandort aus dem Altlastenkataster des Regierungspräsidium Darmstadt - Dezernat IV / Da 41.5 -

Bodenschutzeinzuholen. Anfragen des Altlastenkatasters sind im Zuge dieser Studie nicht erfolgt und sollten als Teil der Vorplanung im Zuge der fortschreitenden Projektentwicklung durchgeführt werden.

Kampfmittelfreiheit

Bei Projektumsetzung ist vor Baubeginn außerdem eine Kampfmittelfreiheit festzustellen. Eine Kampfmittelauskunft nach §7 des Gesetzes über explosionsgefährliche Stoffe [35] (SprenG) ist beim Kampfmittelräumdienst des Landes Hessen (KMRD) einzuholen [36]. Bei Verdachtsflächen oder nicht bestehen der Kampfmittelfreiheit sind entsprechende Erkundungen beim KMRD anzufragen. Da es sich bei dem untersuchten Standort Mathildenhügel um eine bereits bebaute Fläche handelt, wird vom Bestehen einer Kampfmittelfreiheit ausgegangen. Eine Anfrage bzgl. der Kampfmittelfreiheit ist im Zuge dieser Studie nicht erfolgt und ist Teil der Vorplanung im Zuge der fortschreitenden Projektentwicklung.

Leitungsfreiheit

Vor Beginn von Bohr- bzw. Tiefbauarbeiten ist das Einholen einer Leitungsauskunft über etwaige im Untergrund vorhandene Leitungen über entsprechende Auskunftsportale bzw. durch Anfrage bei den entsprechenden Strom-, Gas- und Wasserver- und entsorger sowie Telekommunikationsunternehmen erforderlich. Besonders im Bereich bestehender, unter Umständen älterer Bebauung, besteht gebäudenah sowie auf Freiflächen zwischen Gebäuden die Gefahr nicht ausgewiesene Leitungen anzutreffen. Bei unzureichender oder zweifelhafter Leitungsdokumentation sind vor Abteufen etwaiger Bohrungen ggf. Vorschachtungen auszuführen. Leitungsauskünfte wurden im Zuge dieser Studie nicht angefragt und ist Teil der Vorplanung im Zuge der fortschreitenden Projektentwicklung.

10. Genehmigungsverfahren bei Projektfortführung

Ist eine Umsetzung der Erschließung von Erdwärme am diskutierten Untersuchungsstandort Darmstadt angedacht, sind im Zuge der Projektfortführung folgende genehmigungsrechtliche Schritte zu beachten.

Grundsätzlich sind Erdwärme und Solen in der Bundesrepublik Deutschland gemäß § 3 Abs. 3 Nr. 2b des Bundesberggesetzes (BBergG) [37] bergfreie Bodenschätze und unterliegen demzufolge den Bestimmungen des BBergG. Somit gelten für die Erkundung sowie die Erschließung von Erdwärme die Bestimmungen des Bergrechtes.

Für die Erkundung bzw. das Aufsuchen eines bergfreien Bodenschatzes wird eine bergrechtliche Erlaubnis gemäß § 7 BBerG benötigt. Gemäß § 51 BBerG dürfen Aufsuchungsbetriebe nur auf Grund von Plänen (Betriebsplänen) errichtet werden. Ein Hauptbetriebsplan ist gemäß § 52 BBerG für einen in der Regel zwei Jahre nicht überschreitenden Zeitraum aufzustellen. Für die Abwicklung des bergrechtlichen Genehmigungsverfahrens (Betriebsplanverfahren) sowie für Auskünfte zur Bohrtechnik und zur Hessischen Bergverordnung sind die drei Bergaufsichtsdezernate der Regierungspräsidien in Gießen, Bad Hersfeld und Wiesbaden zuständig [38]. Gemäß § 52 Nr. 3 BBerG kann die Zuständige Behörde (Regierungspräsidien in Gießen, Bad Hersfeld und Wiesbaden) Betriebe ganz oder teilweise oder für einen bestimmten Zeitraum von der Betriebsplanpflicht befreien, wenn der Schutz Beschäftigter und Dritter sowie die Wiedernutzbarmachung der Oberfläche sichergestellt werden kann.

Für eine anschließende Gewinnung eines bergfreien Bodenschatzes ist nach § 8 BBergG zusätzlich eine bergrechtliche Bewilligung notwendig. In Hessen ist dafür das Regierungspräsidium Darmstadt – Dezernat IV / Wi44 – Bergaufsicht zuständig. Ausgenommen ist nach § 4 Abs. 2, zweiter Halbsatz Nr1. BBerG die Erdwärmegewinnung in einem Grundstück (Katasterplan) aus Anlass oder im Zusammenhang mit dessen baulicher oder sonstiger städtebaulicher Nutzung. Ferner sind für Bohrungen, die mehr als 100 m in den Boden eindringen, die Regelungen in § 127 BBerG zu beachten. Bohrungen sind nach § 8 in Verbindung mit § 14 des Geologiedatengesetzes (GeolDG) [40] zudem zwei Wochen vor Beginn der Arbeiten dem Hessischen Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (HLNUG) anzuzeigen. Nach Abschluss der Bohrung ist dem HLNUG das Bohrergebnis mitzuteilen [38]. Nach § 9 des (GeolDG) sind für abgeteufte Bohrungen aufgenommene Schichtenverzeichnisse dem HLNUG innerhalb eines Zeitraumes von maximal drei Monaten nach Fertigstellung unaufgefordert zur Verfügung zu stellen.

§ 9 Abs. 1 Satz 1 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) begründet für grundwassererhebliche Erdarbeiten eine Anzeigepflicht, die einen Monat vor Beginn der Arbeiten gegenüber der

zuständigen Behörde erfolgen muss. Für kommunale Bauherren sind das die oberen Wasserbehörden in den drei Regierungspräsidien Darmstadt, Gießen und Kassel. Werden bei diesen Erdarbeiten Stoffe in das Grundwasser eingebracht erfüllt dies zusätzlich den Tatbestand einer erlaubnispflichtigen Benutzung nach §§ 8 Abs. 1, 9 Abs. 1 Nr. 4. Anstelle der Anzeige ist eine Erlaubnis nur erforderlich, wenn sich das Einbringen nachteilig auf die Grundwasserbeschaffenheit auswirken kann (§ 49 Abs. 1 Satz 2 WHG), wovon bei Erdwärmesonden grundsätzlich ausgegangen wird [43]. Die Anforderungen des Gewässerschutzes an Erdwärmesonden gelten für Erdwärmesonden bis zu einer Leistung von 30 kW [42].

Wird die Erdwärmesonde mit einer wassergefährdenden Wärmeträgerflüssigkeit im Bereich der gewerblichen Wirtschaft und im Bereich öffentlicher Einrichtungen betrieben, ist zusätzlich die Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV)[41] zu beachten. Für die üblichen einwandigen Bauweisen von Erdwärmesonden sind in § 35 Abs. 2 AwSV besondere Tatbestände formuliert, unter denen eine einwandige Ausführung zulässig ist. Gemäß § 45 Abs. 1 Nr. 1 AwSV dürfen unterirdische Anlagen nur von Fachbetrieben nach § 62 AwSV errichtet werden.

Zu beachten sind auch die in § 49 AwSV formulierten Anforderungen an Erdwärmesonden in Schutzgebieten. Dort wird über das generelle Verbot der Errichtung und des Betriebs im Fassungsbereich und in der engeren Schutzzone (§ 49 Abs. 1 AwSV) hinaus die Errichtung und die Erweiterung bestehender Erdwärmesonden in der Schutzzone III/IIIA verboten (§ 49 Abs. 2 AwSV). Von den Vorgaben der Absätze 1 und 2 kann die zuständige Wasserbehörde im Einzelfall abweichen (§ 49 Abs. 4 AwSV). Absatz 2 gilt nicht, soweit Wasserschutzgebietsverordnungen weitergehende Regelungen treffen (§ 49 Abs. 5 AwSV). Gemäß der jeweiligen Schutzgebietsverordnung sind in ausgewiesenen und geplanten Schutzgebieten staatlich anerkannter Heilquellen Erdwärmennutzungen in den Zonen I und II sowie A in der Regel nicht zulässig. Restriktionen innerhalb der übrigen Schutzzone sind in den jeweiligen Heilquellenschutzverordnungen festgelegt. Sind dort keine entsprechenden Regelungen zur Erdwärmennutzung enthalten, kann die zuständige Wasserbehörde Entscheidungen hinsichtlich der Erlaubnisfähigkeit geothermischer Anlagen auf der Grundlage von § 53 Abs. 5 WHG in Verbindung mit § 52 Abs. 1 WHG treffen.

Gemäß § 4 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes [39] (BImSchG) bedürfen Anlagen des Bergwesens nur dann einer Genehmigung, soweit sie über Tage errichtet und betrieben werden.

Für die weiterführende Beurteilung des Projektstandortes Darmstadt, Mathildenhügel im Zuge der Vorhabenentwicklung und konkretisierten Einschätzung der Machbarkeit der Erdwärmenutzung durch das bohrtechnische Erschließen des Untergrundes ist bzgl. des Genehmigungsprozesses das folgende Vorgehen anzuwenden:

1. Vorstellen des Vorhabens bei den Regierungspräsidien Gießen, Bad Hersfeld oder Wiesbaden und evtl. Beantragung zur Befreiung der Betriebsplanpflicht gemäß § 51 Nr. 3 BBerG.
2. Einholen einer bergrechtlichen Erlaubnis zur Aufsuchung eines bergfreien Bodenschatzes gemäß § 7 BBergG bei dem zuständigen Bergaufsichtsdezernat Regierungspräsidium Darmstadt – Dezernat IV / Wi44 – Bergaufsicht.
3. Einholen einer bergrechtlichen Bewilligung zur Aufsuchung und Gewinnung eines bergfreien Bodenschatzes gemäß § 8 BBergG bei dem zuständigen Bergaufsichtsdezernat Regierungspräsidium Darmstadt – Dezernat IV / Wi44 – Bergaufsicht.
4. Erarbeitung und Einreichung eines Hauptbetriebsplanes gemäß § 52 BBerG bei den Bergaufsichtsdezernaten der Regierungspräsidien Gießen, Bad Hersfeld oder Wiesbaden.
5. Anzeigen der auszuführenden Bohrungen beim Hessischen Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (HLNUG) mindestens zwei Wochen vor Beginn der Arbeiten entsprechend § 8 in Verbindung mit § 14 des Geologiedatengesetzes (GeolDG).
6. Anzeige der grundwassererheblichen Erdarbeiten bei der zuständigen oberen Wasserbehörde (Darmstadt, Gießen, Kassel).
7. Mitteilung des Bohrergebnisses an das Hessische Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (HLNUG).
8. Bereitstellung der bei ausgeführten Bohrarbeiten aufgenommenen Dokumentationen (insbesondere Schichtenverzeichnisse) gegenüber dem Hessischen Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (HLNUG) innerhalb eines Zeitraumes von bis maximal drei Monaten nach Fertigstellung der Arbeiten gemäß § 9 des Geologiedatengesetzes (GeolDG).

11. Schlussbemerkung

Am betrachteten Standort Darmstadt wurde in Folge eines erhöhten geothermischen Gradienten und günstigen geologischen Bedingungen ein erhöhtes geothermisches Potenzial identifiziert. Die struktureologische Dreigliederung des Stadtgebietes bedingt dabei eine Differenzierung vorhandener geothermischer Potenziale und entsprechender technischer Erschließungsformen. Hydrothermale Potenziale wurden dabei im Bereich der Tiefscholle West sowie untergeordnet in der Hochscholle Nord identifiziert. Das Erschließungsziel stellen dabei in beiden Fällen die Grundwasserleiter des Rotliegend dar. Als technische Form der Erschließung der identifizierten hydrothermalen Potenziale eignen sich mitteltiefe (Hochscholle Nord) oder tiefe (Tiefscholle West) Brunnenysteme wie bspw. hydrothermale Dubletten. Voraussetzung für eine wirtschaftliche Nutzung ist dabei jedoch der Nachweis einer ausreichend hohen Grundwasserschüttung als Folge ausgeprägter, hydraulisch leitender Kluftsysteme, sodass im Anlagenbetrieb notwendige Förderraten dauerhaft realisiert werden können. Durch die in Rotliegend-Aquiferen infolge des lokal realisierten geothermischen Gradienten erwarteten Reservoirtemperaturen von über 100°C können im Bereich der Tiefscholle West Fernwärmenetze oder Energieintensive Gewerbe- oder Industrien mögliche Abnehmer hydrothermal bereitgestellter Wärme darstellen. Bei einer erwarteten Reservoirtemperatur um die 40 °C in den Rotliegend-Aquiferen im Bereich der Hochscholle Nord kann ebenfalls eine Beheizung von Wohnquartieren oder Gewerben erfolgen. Sowohl im Bereich der Tiefscholle West als auch im Bereich der Hochscholle Nord können Einzelgebäude, Wohnquartiere und kleinere Gewerbe- oder Industrieanlagen dezentral über die Erschließung oberflächennaher Quartärer und Tertiärer Sedimente / Sedimentgesteine unter Nutzung von Erdwärmesonden mit Heizwärme versorgt werden. Dies gilt außerdem für den Bereich der Grabenschulter, in welchem mit den oberflächennah anstehenden Gesteinen des kristallinen Grundgebirges vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeiten dokumentiert sind, sodass im Sondenbetrieb ggf. erhöhte spezifische Entzugsleistungen realisiert werden können.

12. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Geographische Lage der Untersuchungsstandorte im Stadtgebiet Darmstadt.	10
Abbildung 2	Landschaftsschutzgebiete in der Umgebung der Untersuchungsstandorte in Darmstadt.	11
Abbildung 3	Flora-Fauna-Habitate, Naturschutzgebiete, Vogelschutzgebiete und Naturparke in der Umgebung der Untersuchungsstandorte in Darmstadt.	13
Abbildung 4	Heilquellenschutzgebiete und Trinkwasserschutzgebiete in der Umgebung der Untersuchungsstandorte in Darmstadt.	14
Abbildung 5	Geologische Strukturräume Hessens nach Heggemann (2021) [17].	25
Abbildung 6	Links: variszische Einheiten im weiteren Umfeld des Untersuchungsgebietes (verändert aus [22], Standort gelb markiert); rechts: Paläogeographie des permokarbonischen Sedimentationsraumes im weiteren Umfeld des Untersuchungsgebietes (verändert aus [22]).	27
Abbildung 7	Permokarbone Ablagerungsräume im weiteren Umfeld des Untersuchungsgebietes in vier Zeitschnitten (a: Westphal bis Stephan, b: Ablagerungszeitraum Glan-Subgruppe, c: Ablagerungszeitraum untere Nahe-Subgruppe, d: Ablagerungszeitraum obere Nahe-Subgruppe; aus [24]).	29
Abbildung 8	Geologische Karte [26] und verfügbare Bohraufschlüsse [27] im Stadtgebiet von Darmstadt. (Grundkarte: OpenStreetMap)	30
Abbildung 9	Geologische Vorprofile für den Untersuchungsstandort Mathildenhügel (links, nach Bohrung 0071 Wasserbohrung Brauerei Fay [31]) und nördliche Rheinstraße (rechts, nach Bohrung 0732 Darmstadt – Südwest 1 und 0701 Bohrung 1 Rummelbräu Darmstadt [31])	35
Abbildung 10	Hydrogeologische Profilschnitte im Untersuchungsgebiet Darmstadt.	36
Abbildung 11	Oberflächennahe Durchlässigkeitsbeiwerte im Stadtgebiet Darmstadt nach [5].	38
Abbildung 12	Temperatur im Untergrund Deutschlands für eine Teufenlage von 1 km (links) und 3 km (rechts). Regionen mit erhöhtem geothermischem Potenzial sind der Legende zu entnehmen. Entnommen von [7].	44

Abbildung 13	Temperaturverteilung im geol. Untergrund im Raum Darmstadt in den Teufenlagen 0, 500, 1.000, 1.500 und 2.000 m u. NN. Schnittexport aus GeotIS [7].	45
Abbildung 14	Konzeptionelle strukturgeologische Gliederung des Stadtgebietes Darmstadt unter Ausweisung möglicher Erschließungsformen zur Nutzbarmachung von Erdwärme.	70

13. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Bohrungen mit Endteufen tiefer 200 m u. GOK im Umkreis der ausgewiesenen Untersuchungsstandorte im Stadtgebiet Darmstadt.	18
Tabelle 2	Geologisches Vorprofil für die Untersuchungsstandorte Mathildenhügel und Quartier nördliche Rheinstraße mit Angabe der zu erwartenden Lithologien.	34
Tabelle 3	VDI-Richtwerte (VDI 4640/1) für Wärmeleitfähigkeiten, volumenspezifischer Wärmekapazitäten sowie Dichten standortspezifisch Ausgewählter Locker- und / oder Festgesteine (modifiziert nach [4]).	55
Tabelle 4	Standortspezifisch ausgewählte VDI-Richtwerte für die spezifische Wärmeentzugsleistung einer Erdwärmesonde für verschiedene Lockergesteine (modifiziert nach [4]).	59
Tabelle 5	Richtwerte für die spezifische Wärmeentzugsleistung eines Erdwärmekollektors für verschiedene Böden (modifiziert nach [4]).	59

14. Literaturverzeichnis

- [1] HESSISCHES STATISTISCHES LANDESAMT: Hessenatlas. Weblink: <https://gis-hsl.hessen.de/portal/apps/experiencebuilder/experience/?id=1dc5e592629b41e9b8a7e6b9941bdc14&page=Hessenatlas>
- [2] GESETZ ÜBER NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSPFLEGE (Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG)
- [3] GESETZ ZUR ORDNUNG DES WASSERHAUSHALTS (Wasserhaushaltsgesetz - WHG)
- [4] VDI 4640 BLATT 1: Thermische Nutzung des Untergrunds – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, Düsseldorf 2010
- [5] HESSISCHES LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE: Geoportal. Weblink: <https://geologie.hessen.de/mapapps/resources/apps/index.html?lang=de>
- [6] BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR): Bohrpunktkarte Deutschland (2023). Weblink: <https://boreholemap.bgr.de>
- [7] LEIBNITZ-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOPHYSIK: Geothermisches Informationssystem (GeotIS). Weblink: <https://www.geotis.de>
- [8] 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
- [9] AGEMAR, T., WEBER, J. & SCHULZ, R. (2014): Deep Geothermal Energy Production in Germany. *Energies* 2014, 7: 4397–4416
- [10] LEIBNITZ-INSTITUTS FÜR ANGEWANDTE GEOPHYSIK: Fachinformationssystem Geophysik. Weblink: <https://www.fis-geophysik.de>
- [11] KÜHNE, K. (2006): Das Fachinformationssystem Geophysik und seine Nutzung über das Internet. - In: MERKEL, B., SCHEABEN, H., WOLKERSDORFER, C. & HASCHE-BERGER, A. (Hrsg.): GIS - Geowissenschaftliche Anwendungen und Entwicklungen, 57. Berg- und Hüttenmännischer Tag, 23.06.2006, *Wiss. Mitteilungen des Instituts für Geologie* 31: 227-231
- [12] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT, INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, FACHBEREICH ANGEWANDTE GEOTHERMIE: 3D Modell der petrothermalen und mitteltiefen Potenziale zur Stromerzeugung, Wärmenutzung und –speicherung von Hessen. Weblink: https://www.geo.tu-darmstadt.de/geothermie/forschungsprojekte_ag/abgeschlossene_projekte_ag/hessen_3d_2_ag.de.jsp
- [13] HESSISCHES LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE: Geothermisches Potenzial: Projekt Hessen 3D. Weblink: <https://www.hlnug.de/themen/geologie/erdwaerme-geothermie/tiefe-geothermie/geothermisches-potenzial-projekt-hessen-3d>
- [14] BECKER, R. & REISCHMANN, T. (2012): *Geologie von Hessen*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- [15] BÄR, K. (2012): *Untersuchung der tiefengeothermischen Potenziale von Hessen*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt
- [16] PETERS, G., & VAN BALEN, R. T. (2007). Tectonic geomorphology of the northern Upper Rhine graben, Germany. *Global and planetary change*, 58 (1-4): 310-334

- [17] HEGGEMANN, H. (2021): Geologische Strukturräume. – In: BECKER, R. & REISCHMANN, T.: Geologie von Hessen: 10-16, Stuttgart (Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung)
- [18] GRIMMER, J.C., RITTER, J.R.R., EISBACHER, G.H., FIELITZ, W. (2016): The Late Variscian control on the location and asymmetry of the Upper Rhine Graben. International Journal of Earth Sciences, GR Geologische Rundschau 106: 827-853, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [19] SCHUMACHER, M.E. (2002): Upper Rhine Graben: Role of pre-existing structures during rift evolution. Tectonics, Vol. 21, NO 1
- [20] HENNINGSSEN, D. & KATZUNG, G. (1992): Einführung in die Geologie Deutschlands. 4. Neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart
- [21] ILLIES, H. (1965): Bauplan und Baugeschichte des Oberrheingrabens. Oberrhein. geol. Abh. 14: 1-54, Karlsruhe
- [22] KÜMMERLE, E. & SEIDENSCHWANN, G. (2009): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000, Blatt Nr. 5817 Frankfurt a.M. West, Landesamt für Umwelt und Geologie, 3. bearbeitete Auflage, Wiesbaden
- [23] NESBOR, H.-D. (2021): Odenwald-Kristallinkomplex. – In: BECKER, R. & REISCHMANN, T.: Geologie von Hessen: 114-133, Stuttgart (Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung)
- [24] ARETZ, A. (2016): Aufschlussanalogstudie zur geothermischen Reservoircharakterisierung des Permokarbons im nördlichen Oberrheingraben. Dissertation, Technische Universität Darmstadt
- [25] GREIFENHAGEN, G. (2000): Untersuchungen zur Hydrogeologie des Stadtgebietes Darmstadt mit Hilfe eines Grundwasserinformationssystems unter Verwendung von einer Datenbank, Datenmodellierung und ausgewählten statistischen Methoden. Dissertation, Technische Universität Darmstadt
- [26] HESSISCHES LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE: Geologische Übersichtskarte 1:300 000 (GÜK300)
- [27] HESSISCHES LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE: Geologie Viewer. Weblink: <https://geologie.hessen.de/mapapps/resources/apps/geologie>
- [28] KOWALCZYK, G. (2021): Rotliegend. In: BECKER, R. & REISCHMANN, T.: Geologie von Hessen: 139-176; Stuttgart (Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung)
- [29] HESSISCHES LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE WIESBADEN. Schichtenverzeichnis Darmstadt. Archivkennzeichen: 6017/63
- [30] HESSISCHES LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE WIESBADEN. Schichtenverzeichnis Darmstadt. Archivkennzeichen: 6117/732
- [31] HESSISCHES LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE WIESBADEN. Schichtenverzeichnis Darmstadt. Archivkennzeichen: 6118/71
- [32] DIN 4149 Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten
- [33] GEOPORTAL DES HESSISCHEN LANDESAMTS FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE HLNUG; Hochwasserrisikomanagement (HWRM)-Viewer; Weblink: <https://hwrn.hessen.de/mapapps/resources/apps/hwrn/index.html?lang=de>

- [34] HOCHWASSERGEFAHRENKARTEN UND HOCHWASSERRISIKOKARTEN - LfU Bayern
- [35] GESETZ ÜBER EXPLOSIONSGEFÄHRLICHE STOFFE (Sprengstoffgesetz - SprengG)
- [36] KAMPFMITTELRÄUMDIENST (KMRD) des Landes Hessen
- [37] BUNDESBERGGESETZ (BBergG)
- [38] ERDWÄRMENUTZUNG IN HESSEN - Leitfaden für Erdwärmesondenanlagen zum Heizen und Kühlen, 6., überarbeitete Auflage, Herausgegeben vom HLNUG, Wiesbaden 2019
- [39] GESETZ ZUM SCHUTZ VOR SCHÄDLICHEN UMWELTEINWIRKUNGEN DURCH LUFTVERUNREINIGUNGEN, GERÄUSCHE, ERSCHÜTTERUNGEN UND ÄHNLICHE VORGÄNGE (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG)
- [40] GESETZ ZUR STAATLICHEN GEOLOGISCHEN LANDESAUFNAHME SOWIE ZUR ÜBERMITTLUNG, SICHERUNG UND ÖFFENTLICHEN BEREITSTELLUNG GEOLOGISCHER DATEN UND ZUR ZURVERFÜGUNGSTELLUNG GEOLOGISCHER DATEN ZUR ERFÜLLUNG ÖFFENTLICHER AUFGABEN (Geologiedatengesetz - GeolDG)
- [41] VERORDNUNG ÜBER ANLAGEN ZUM UMGANG MIT WASSERGEFÄHRDENDEN STOFFEN 1, 2 (AwSV)
- [42] ANFORDERUNGEN DES GEWÄSSERSCHUTZES AN ERDWÄRMESONDEN – Staatsanzeiger für das Land Hessen – 21. April 2014 (S. 383)
- [43] EMPFEHLUNGEN DER LAWA FÜR WASSERWIRTSCHAFTLICHE ANFORDERUNGEN AN ERDWÄRMESONDEN UND -KOLLEKTOREN (2019)
- [44] PROJEKT SKEWS DER TU DARMSTADT; Bohrungen EWS 2, EWS 3, EWS 4 (2023)
- [45] STATISTISCHES BUNDESAMT, WIESBADEN; Weblink: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/09/PD23_388_61243.html
- [46] HESSISCHES LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE: WRRRL-Viewer; Weblink: <https://wrrl.hessen.de/mapapps/resources/apps/wrrrl/index.html?lang=de>

Impressum

Ausschluss Wahlwerbung

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlbewerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlkampfveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Die genannten Beschränkungen gelten unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl die Druckschrift dem Empfänger zugegangen ist. Den Parteien ist es jedoch gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Herausgeber

LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH
Mainzer Straße 118 · 65189 Wiesbaden
www.lea-hessen.de

Kontakt

LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH
Geothermie@lea-hessen.de

In Zusammenarbeit mit

Geologische Landesuntersuchung GmbH Freiberg
www.glu-freiberg.de
info@glu-freiberg.de

Stand: 11/2024