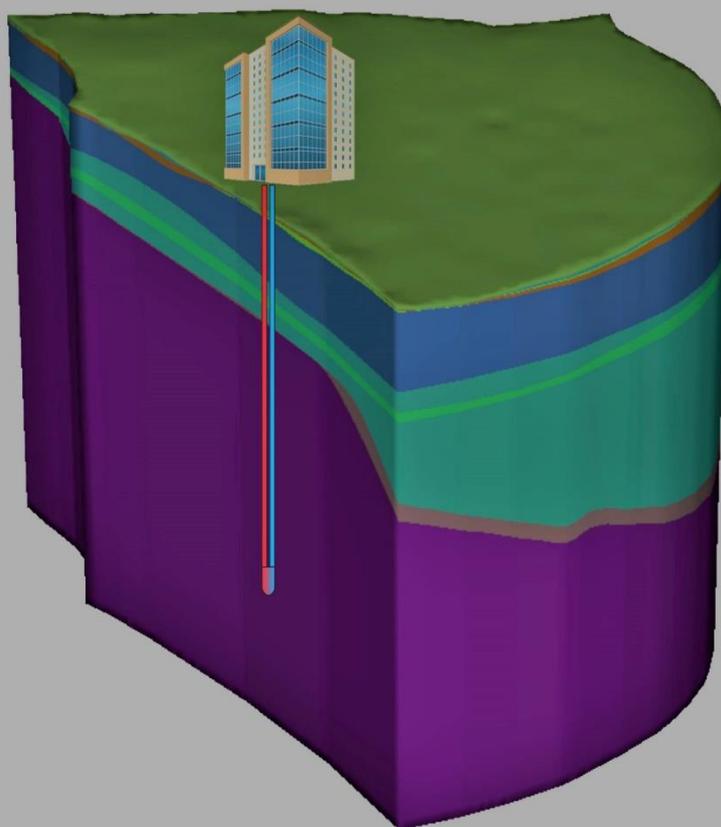


Mitteltiefe geothermische Anlagen in Sachsen

Schriftenreihe, Heft 15/2020



Einsatzpotentiale mitteltiefer geothermischer Anlagen in Sachsen

Katrin Reinhardt, Frank Schmiedel, Diana Hermann

G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH



Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	8
2	Einleitung	10
2.1	Zielstellung	10
2.2	Projektbeschreibung.....	10
3	Auswahl der Modellstandorte	12
3.1	Modellstandort Leipzig	12
3.2	Modellstandort Chemnitz.....	14
3.3	Modellstandort Dresden	17
4	Technische Konzeption	18
4.1	Materialtechnische Konzeption	18
4.1.1	Einführung	18
4.1.2	Erdwärmesonden	18
4.1.3	Verfüllmaterial	20
4.2	Bohrtechnische Konzeption.....	22
4.2.1	Einführung	22
4.2.2	Modellstandort Leipzig	23
4.2.3	Modellstandort Chemnitz.....	24
4.2.4	Modellstandort Dresden	24
4.2.5	Innovative Bohrverfahren	25
4.2.6	Kostenschätzung	26
5	Temperaturmessungen und Ableitung von Temperaturprofilen	27
5.1	Temperaturmessungen	27
5.2	Ableitung von Temperaturprofilen für die Modellstandorte	29
6	Geothermische Modellierung	32
6.1	Modellstandort Leipzig	32
6.1.1	Geologischer Überblick	32
6.1.2	Aufbau geologisch-hydrogeologisches Strukturmodell	32
6.1.3	Supermesh-Design und Finite Elemente Netz	33
6.1.4	3D-Modellaufbau	34
6.1.5	Hydrogeologische Eigenschaften der Modellschichten	35
6.1.6	Hydrogeologische Randbedingungen	37
6.1.7	Geothermische Eigenschaften der Modellschichten	37
6.1.8	Geothermische Randbedingungen	38
6.1.9	Wärmeentzug/ Wärmeeintrag	39
6.1.10	Durchführung der Modellierung.....	39
6.1.11	Modellergebnisse	40
6.2	Modellstandort Chemnitz.....	43
6.2.1	Geologischer Überblick	43
6.2.2	Aufbau geologisch-hydrogeologisches Strukturmodell	44
6.2.3	Datenvorbereitung	44
6.2.4	3D-Konstruktion der geologischen Körper	46
6.2.5	Supermesh-Design und Finite Elemente Netz	48
6.2.6	3D-Modellaufbau	50
6.2.7	Hydrogeologische Eigenschaften der Modellschichten	51
6.2.8	Hydrogeologische Randbedingungen	53
6.2.9	Geothermische Eigenschaften der Modellschichten	53
6.2.10	Geothermische Randbedingungen	55
6.2.11	Wärmeentzug/ Wärmeeintrag	55
6.2.12	Durchführung der Modellierung.....	56
6.2.13	Modellergebnisse	56

6.3	Modellstandort Dresden	59
6.3.1	Geologischer Überblick	59
6.3.2	Aufbau geologisch-hydrogeologisches Strukturmodell	60
6.3.3	Supermesh-Design und Finite Elemente Netz	60
6.3.4	3D-Modellaufbau	62
6.3.5	Hydrogeologische Eigenschaften der Modellschichten	63
6.3.6	Hydrogeologische Randbedingungen	65
6.3.7	Geothermische Eigenschaften der Modellschichten	65
6.3.8	Geothermische Randbedingungen	66
6.3.9	Wärmeentzug/ Wärmeeintrag	67
6.3.10	Durchführung der Modellierung.....	67
6.3.11	Modellergebnisse	68
6.4	Vergleich der Modellergebnisse	71
7	Monitoringkonzept	73
7.1	Geothermisches Anlagenmonitoring	73
7.1.1	Optimierung des Anlagenbetriebes	73
7.1.2	Temperaturmonitoring im Nahumfeld der Sondenanlage	74
7.1.3	Temperaturmessketten	74
7.1.4	Faseroptisches Temperaturmesssystem	74
7.1.5	Temperaturmessmolch.....	75
7.1.6	Schlussfolgerungen.....	75
7.2	Monitoring zu Auswirkungen auf den Untergrund im weiteren Umfeld der Erdwärmearanlage	76
7.3	Empfehlungen zum Monitoringumfang mitteltiefer Erdwärmearanlagen	77
8	Kostenbetrachtungen	78
8.1	Grundlagen.....	78
8.2	Wärmepumpenanlage mit mitteltiefen Erdwärmesonden	80
8.3	Erdgas und Kompressionskälte.....	82
8.4	Fernwärme und Kompressionskälte.....	84
8.5	Vergleich der Modellstandorte.....	85
8.5.1	Modellstandort Leipzig	86
8.5.2	Modellstandort Chemnitz.....	89
8.5.3	Modellstandort Dresden	92
8.5.4	Zusammenfassung.....	94
9	Diskussion	95
9.1	Übertragbarkeit der Ergebnisse	95
9.2	Optimierungsmöglichkeiten	97
10	Handlungsempfehlungen	98
11	Literaturverzeichnis	102

Anlagenband

- Anlage 1: Bohr- und Ausbaukonzepte der einzelnen Modellstandorte**
- Anlage 2: Kostenschätzung für die Bohr- und Ausbaukonzepte**
- Anlage 3: Temperaturprofile und geologische Schichtenprofile der Messstandorte**
- Anlage 4: Hydrogeologische Modellkörper der geothermischen Modellierung**
- Anlage 5: Wärmeentzugs- und Wärmeeintragsfunktionen für die geothermische Modellierung**
- Anlage 6: Temperaturbeeinflussung des Untergrundes, Modellgebiet Leipzig**
- Anlage 7: Hydrogeologischer Modellschnitt Chemnitz**
- Anlage 8: Temperaturbeeinflussung des Untergrundes, Modellgebiet Chemnitz**
- Anlage 9: Temperaturbeeinflussung des Untergrundes, Modellgebiet Dresden**
- Anlage 10: Ablaufschema Planung mitteltiefer Erdwärmesondenanlagen**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modellstandort Leipzig	13
Abbildung 2: Modellgebiet Leipzig	14
Abbildung 3: Modellstandort Chemnitz	15
Abbildung 4: Modellgebiet Chemnitz	16
Abbildung 5: Modellstandort Dresden	17
Abbildung 6: Modellgebiet Dresden	17
Abbildung 7: Temperaturtiefenprofile der Modellstandorte	30
Abbildung 8: Finite-Elemente-Netz Modell Leipzig	33
Abbildung 9: Digitales Geländemodell des Modellgebietes Leipzig	34
Abbildung 10: 3D-Modellaufbau des Modellgebiets Leipzig	35
Abbildung 11: Durchlässigkeit in x-Richtung, Modellgebiet Leipzig	37
Abbildung 12: Lage der Sonden innerhalb des Modellstandorts Leipzig, Maßstab 1:2.500	40
Abbildung 13: Entwicklung der mittleren Sondentemperaturen über 50 Jahre- „wärmste“ Sonde, Leipzig	41
Abbildung 14: Entwicklung der mittleren Sondentemperaturen über 50 Jahre- „kälteste“ Sonde, Leipzig	42
Abbildung 15: Modellgebiete für das geologische Strukturmodell und die geothermische Modellierung	44
Abbildung 16: Verbreitungsflächen unterschiedlicher geologischer Einheiten	46
Abbildung 17: Verwendeter Punktdatenbestand für die Interpolation, Beispiel Zeisigwald-Tuff	47
Abbildung 18: Modellierte Unterkanten verschiedener geologischer Einheiten in SURPAC	48
Abbildung 19: Finite-Elemente-Netz des Modellgebiets Chemnitz	49
Abbildung 20: Digitales Geländemodell des Modellgebietes Chemnitz	50
Abbildung 21: 3D-Modellaufbau des Modellgebiets Chemnitz	51
Abbildung 22: Durchlässigkeit in x-Richtung, Modellgebiet Chemnitz	53
Abbildung 23: Lage der Sonden innerhalb des Modellstandorts Chemnitz, Maßstab 1:1250	56
Abbildung 24: Entwicklung der mittleren Sondentemperaturen über 50 Jahre- „wärmste“ Sonde, Chemnitz	57
Abbildung 25: Entwicklung der mittleren Sondentemperaturen über 50 Jahre- „kälteste“ Sonde, Chemnitz	58
Abbildung 26: Finite-Elemente-Netz des Modellgebiets Dresden	61
Abbildung 27: Digitales Geländemodell des Modellgebietes Dresden	62
Abbildung 28: 3D-Modellaufbau des Modellgebiets Dresden	63
Abbildung 29: Durchlässigkeit in x-Richtung, Modellgebiet Dresden	65
Abbildung 30: Lage der Sonden innerhalb des Modellstandorts Dresden, Maßstab 1:2.500	68
Abbildung 31: Entwicklung der mittleren Sondentemperaturen über 50 Jahre „wärmste“ Sonde, Dresden	69
Abbildung 32: Entwicklung der mittleren Sondentemperaturen über 50 Jahre- „kälteste“ Sonde, Dresden	70
Abbildung 33: Kostenvergleich Heizkosten (€/a) am Modellstandort Leipzig	86
Abbildung 34: Kostenvergleich Kältekosten (€/a) am Modellstandort Leipzig	87
Abbildung 35: Kostenvergleich Gesamtkosten (€/a) am Modellstandort Leipzig	88
Abbildung 36: Kostenvergleich Heizkosten (€/a) am Modellstandort Chemnitz	89
Abbildung 37: Kostenvergleich Kältekosten (€/a) am Modellstandort Chemnitz	90
Abbildung 38: Kostenvergleich Gesamtkosten (€/a) am Modellstandort Chemnitz	91
Abbildung 39: Kostenvergleich Heizkosten (€/a) am Modellstandort Dresden	92
Abbildung 40: Kostenvergleich Kältekosten (€/a) am Modellstandort Dresden	93
Abbildung 41: Kostenvergleich Gesamtkosten (€/a) am Modellstandort Dresden	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Grundlastverteilung Heizen und Kühlen	11
Tabelle 2:	Spitzenlastverteilung Heizen und Kühlen	12
Tabelle 3:	Wesentliche Eigenschaften der recherchierten Sondentypen	19
Tabelle 4:	Wesentliche Eigenschaften der recherchierten Verfüllbaustoffe.....	21
Tabelle 5:	Zusammenfassung Kostenschätzung	26
Tabelle 6:	Übersicht zu den Temperaturmessungen	27
Tabelle 7:	Ermittelte Gradienten zu den Temperaturmessungen	29
Tabelle 8:	Untergrundtemperaturen in unterschiedlichen Tiefenstufen	31
Tabelle 9:	Hydrogeologische Eigenschaften der Modellschichten, Modellgebiet Leipzig.....	36
Tabelle 10:	Geothermische Eigenschaften der Modellschichten, Modellgebiet Leipzig	38
Tabelle 11:	Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche Ende Heizperiode, Modellgebiet Leipzig	43
Tabelle 12:	Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche Ende Kühlperiode, Modellgebiet Leipzig	43
Tabelle 13:	Normalprofil für den Modellstandort Chemnitz	45
Tabelle 14:	Hydrogeologische Eigenschaften der Modellschichten, Modellgebiet Chemnitz.....	52
Tabelle 15:	Geothermische Eigenschaften der Modellschichten, Modellgebiet Chemnitz	54
Tabelle 16:	Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche Ende Heizperiode, Modellgebiet Chemnitz	59
Tabelle 17:	Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche Ende Kühlperiode, Modellgebiet Chemnitz	59
Tabelle 18:	Hydrogeologische Eigenschaften der Modellschichten, Modellgebiet Dresden	64
Tabelle 19:	Geothermische Eigenschaften der Modellschichten, Modellgebiet Dresden	66
Tabelle 20:	Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche Ende Heizperiode, Modellgebiet Dresden	71
Tabelle 21:	Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche Ende Kühlperiode, Modellgebiet Dresden	71
Tabelle 22:	Ansatz für betriebsgebundene Kosten	80
Tabelle 23:	Investitionskosten Erdwärme.....	80
Tabelle 24:	Förderfähige Kosten Erdwärme.....	81
Tabelle 25:	Investitionskosten Erdwärme abzüglich Förderung.....	81
Tabelle 26:	Investitionskosten Erdwärme bezogen auf Nutzungsdauer von 20 Jahren	81
Tabelle 27:	Kapitalgebundene Kosten für Wärmepumpenanlagen mit mitteltiefen Erdwärmesonden	81
Tabelle 28:	Betriebsgebundene Kosten (€/a) für Wärmepumpenanlage mit mitteltiefen Erdwärmesonden	82
Tabelle 29:	Bedarfsgebundene Kosten (€/a) für Wärmepumpenanlage mit mitteltiefen Erdwärmesonden	82
Tabelle 30:	Investitionskosten Gasbrennwertkesselanlage	83
Tabelle 31:	Betriebsgebundene Kosten (€/a) für Gasbrennwertkesselanlage.....	83
Tabelle 32:	Bedarfsgebundene Kosten (€/a) für Gasbrennwertkesselanlage	83
Tabelle 33:	Kapitalgebundene Kosten (€/a) für Kompressionskältemaschine.....	83
Tabelle 34:	Betriebsgebundene Kosten (€/a) für Kompressionskältemaschinen	84
Tabelle 35:	Bedarfsgebundenen Kosten (€/a) für Kompressionskältemaschinen	84
Tabelle 36:	Investitionskosten Fernwärmeanschluss.....	85
Tabelle 37:	Betriebsgebundene Kosten (€/a) für Fernwärmeanschluss	85
Tabelle 38:	Bedarfsgebundene Kosten (€/a) für Fernwärme	85

Abkürzungsverzeichnis

AG	Auftraggeber
AN	Auftragnehmer
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
CMC	Carboxymethylcellulosen
DA	Außendurchmesser
E1	Elster 1
E1v	Elster 1 Vorschüttssedimente
E2	Elster 2
E2v	Elster 2 Vorschüttssedimente
EED	Earth Energy Designer
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EER	Energy Efficiency Ratio
EIV	Elektroimpulsverfahren
GOK	Geländeoberkante
HH	Hansestadt Hamburg
HHT	Höhere Hochterrasse
HMT	Höhere Mittelterrasse
HNT	Höhere Niederterrasse
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
HYE	Hydrogeologische Einheit
JAZ	Jahresarbeitszahl
MHT	Mittlere Hochterrasse
PCD	Poly Crystalline Diamond
PE	Polyethylen
SAB	Sächsische Aufbaubank
SL	Spitzenlast
SOBA	Sächsisches Oberbergamt
TMT	Tiefere Mittelterrasse
TNT	Tiefere Niederterrasse
TRT	Thermal Response Test
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung

1 Zusammenfassung

Die Beheizung und Kühlung von Wohngebäuden, öffentlichen Gebäuden sowie von Gewerbe- und Industriebauten durch oberflächennahe Geothermie (bis ca. 200 m Bohrtiefe) ist seit mehr als 10 Jahren Stand der Technik und entsprechend weit verbreitet. Dagegen wurden mitteltiefe geothermische Systeme (Erdwärmesonden ab ca. 300 ... 400 m Tiefe) in Deutschland bisher praktisch kaum errichtet, obwohl sie aufgrund des geringen Flächenbedarfs und der Möglichkeit zur Bereitstellung vergleichsweise hoher Heiz- und Kühllasten eine sehr interessante Nutzungsform der Geothermie, unter anderem für Ballungsräume mit entsprechend geringer Flächenverfügbarkeit darstellen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist, die Einsatzpotentiale mitteltiefer geothermischer Systeme im Sinne von mitteltiefen Erdwärmesondenanlagen für die sächsischen Ballungsräume Leipzig, Dresden und Chemnitz detailliert zu untersuchen, Kostenvergleiche durchzuführen und Handlungsempfehlungen für potenzielle Projekte abzuleiten. Dazu wurde unter Berücksichtigung stadtplanerischer und geologischer/geothermischer Aspekte sowie möglicher Nutzungsrestriktionen je ein Musterstandort für vertiefende Untersuchungen in den genannten Großstädten ausgewählt. Für jeden Musterstandort wurde anhand definierter gebäudetechnischer Randbedingungen eine mitteltiefe Erdwärmesondenanlage vollständig geplant. Dies beinhaltete folgende Hauptschwerpunkte:

- Bohr- und bautechnische Ausführung,
- Dimensionierung der Sondenanlage mittels numerischer Modellierung einschließlich Ausweisung der Auswirkungen auf die Umgebung,
- Ausarbeitung eines geeigneten Monitoringkonzeptes,
- überschlägige Kostenbetrachtung.

Im Zuge der Erarbeitung der technischen Konzeption sind kommerziell verfügbare Erdwärmesonden und Verfüllbaustoffe für mitteltiefe Erdwärmesondenanlagen recherchiert und in ihren wesentlichen Eigenschaften verglichen worden. Die Recherchen ergaben, die maximale Ausbautiefe im Forschungsvorhaben auf 350 m unter Gelände zu begrenzen. Als wesentliche gebäudetechnische Anforderung wurde eine Heizarbeit von 480 MWh/a und eine Kühlarbeit von 160 MWh/a angenommen. Die maximale Leistung beträgt dabei für Heizen und Kühlen je 200 kW.

Unter Berücksichtigung der geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse wurden für die einzelnen Modellstandorte **Bohr- und Ausbaukonzepte** entwickelt.

Am Modellstandort Leipzig wird favorisiert, die ca. 80 m mächtigen Lockergesteinsablagerungen und das verwitterte Festgestein mit einer temporär verrohrten Spülbohrung zu durchteufen. Anschließend soll im Festgestein, das in Form proterozoischer Grauwacke angetroffen wird, auf Imlochhammerbohren umgestellt werden.

Am Modellstandort Chemnitz, an dem mächtige Rotliegendablagerungen angetroffen werden, wird davon ausgegangen, die Bohrungen im Spülbohrverfahren nieder zu bringen. Für die geringmächtige Lockergesteinsbedeckung und den Festgesteinszersatz sollte ein Durchteufen im verrohrten Trockenbohrverfahren durchgeführt werden.

Das erarbeitete Konzept für den Modellstandort Dresden besagt, dass zunächst das ca. 12 m mächtige Lockergestein und die entfestigten Bereiche der Kreide im verrohrten Trockenbohrverfahren erbohrt werden sollten. Anschließend können die Bohrungen bis zur Endtiefe im Imlochhammerbohrverfahren niedergebracht werden.

Die Kosten für die Errichtung der Bohrungen belaufen sich nach den durchgeführten Kostenschätzungen auf ca. 1,1 - 1,2 Mio. € netto.

Die **Dimensionierung der mitteltiefen Erdwärmesondenanlagen** an den jeweiligen Modellstandorten erfolgte durch eine geothermische Modellierung mit dem Programm FEFLOW, welches sowohl die Wärmeleitung als auch den Wärmetransport im Grundwasser betrachtet. Der geologisch-hydrogeologische Aufbau wurde in einem

geologischen Modell bis in eine Tiefe von 500 m unter Gelände abgebildet. Die geothermische Modellierung wurde für jeden Musterstandort jeweils über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren durchgeführt. Dabei sind als Randbedingungen für die zulässigen Solemitteltemperaturen in den Erdwärmesonden an allen Modellstandorten - 0,5°C als untere Grenze sowie gebietsspezifische obere Grenzen zwischen 30,7°C und 31,3°C berücksichtigt worden. Als maßgebend erwies sich aufgrund der heizlastigen energetischen Anforderungen an allen Modellstandorten die untere Temperaturgrenze. Weiterhin sind für alle betrachtenden Modellgebiete thermische Beeinflussungsbereiche ($\Delta T \geq 0,1$ K) im Untergrund beschrieben und abgebildet.

Im Ergebnis der geothermischen Modellierung wurden zur nachhaltigen Abdeckung der Heiz- und Kühllasten für die Modellstandorte Leipzig und Dresden jeweils neun Erdwärmesonden à 350 m bzw. 3.150 Gesamtbohrmeter und für den Modellstandort Chemnitz 11 Erdwärmesonden à 350 m bzw. 3.850 Gesamtbohrmeter ermittelt.

Für das **Monitoring mitteltiefer Erdwärmesondenanlagen**, dass im Hinblick auf die Optimierung des Anlagenbetriebes durchgeführt werden sollte, sowie von Behörden zum Nachweis der Einhaltung genehmigungsrechtlicher Vorgaben gefordert werden kann, wurde ein entsprechendes Konzept entwickelt. Darin werden sowohl für das Anlagenmonitoring als auch das Umfeldmonitoring verschiedene Verfahren und Möglichkeiten beschrieben. Abschließend werden Empfehlungen zum Umfang des Anlagenmonitorings einschließlich Kostenschätzung gegeben.

Einen wichtigen Baustein innerhalb des Forschungsvorhabens stellen die durchgeführten **Kostenbetrachtungen** dar. Diese erfolgten in Anlehnung an VDI 2067, Blatt 1 (VDI, 2012). Dabei erfolgte der Kostenvergleich folgender Systeme zur Gebäudeklimatisierung:

- Wärmepumpenanlage mit mitteltiefen Erdwärmesonden,
- Erdgas und Kompressionskälte,
- Fernwärme und Kompressionskälte.

Für alle betrachteten Varianten der Gebäudeklimatisierung wurden spezifisch für die einzelnen Modellstandorte die kapitalgebundenen, bedarfsgebundenen und betriebsgebundenen Kosten ermittelt und miteinander verglichen.

Um die Betrachtungen möglichst realistisch zu gestalten, wurden auch die zu erwartenden Planungskosten in die Berechnungen einbezogen. Insgesamt ist für die Errichtung einer mitteltiefen Erdwärmesondenanlage unter den angesetzten Bedingungen mit Gesamtkosten von 1,4 - 1,5 Mio. € netto zu rechnen. Weiterhin wurden die Kostenbetrachtungen unter Einbeziehung möglicher Fördermöglichkeiten durchgeführt. Gemäß (BAFA, 2020) sind ab 2020 unter den betrachteten Randbedingungen des Forschungsvorhabens 35 % der Gesamtinvestition förderfähig.

Aufbauend auf die ermittelten Kosten wurden auch Gesteungskosten ermittelt, die die anfallenden jährlichen Kosten auf die erbrachte Heiz- und Kühlarbeit beziehen. Dabei zeigte sich, dass bei integrativer Betrachtung von Heizen und Kühlen die mitteltiefen Erdwärmesondenanlagen mit Gesteungskosten zwischen 6,43 ct/kWh bis 6,81 ct/kWh netto an allen drei Standorten das wirtschaftlich günstigste System darstellen.

Die erzielten Ergebnisse geben Hinweise zur Variation der geologischen Verhältnisse innerhalb der Stadtgebiete von Leipzig, Chemnitz und Dresden. Sie können zu einer ersten Grobabschätzung der geothermischen Nutzungsmöglichkeiten für zukünftige Projekte in den sächsischen Ballungsräumen herangezogen werden.

Weiterhin wurden Möglichkeiten für eine Optimierung künftig zu planender Anlagen aufgezeigt. Diese betreffen vor allem die energetischen Anforderungen im Verhältnis von Heiz- und Kühlarbeit. Zudem werden Anregungen zur Kombination mit anderen erneuerbaren Energien sowie zum netzdienlichen Betrieb gegeben.

Ein entwickeltes Ablaufschema enthält zudem wesentliche Eckpunkte und Bearbeitungsschwerpunkte für die zukünftige Realisierung mitteltiefer geothermischer Projekte in Sachsen.

2 Einleitung

2.1 Zielstellung

Mitteltiefe geothermische Systeme (Erdwärmesonden ab ca. 300 ... 400 m Tiefe) dienen ebenso wie oberflächennahe Erdwärmesonden der Bereitstellung von Wärme und ggf. Kälte für die Klimatisierung von Gebäuden.

Ihr Einsatz stellt aufgrund des geringen Flächenbedarfs und der Möglichkeit der Bereitstellung vergleichsweise hoher Heiz- und Kühllasten für urbane Räume eine sehr interessante Nutzungsform regenerativer Energie dar. Da bisher in Sachsen jedoch keine entsprechenden Anlagen existieren und auch außerhalb Sachsens entsprechende Musterprojekte weitgehend fehlen, liegen auch keine Erfahrungen zu Planung, Errichtung und Betrieb vor. Daraus resultieren oft Vorbehalte bei Planern bzw. Bauträgern gegenüber dieser Form der Untergrundnutzung.

Im Rahmen dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhabens sollen die Einsatzpotentiale mitteltiefer geothermischer Systeme für die sächsischen Ballungsräume Leipzig, Dresden und Chemnitz detailliert untersucht und die Ergebnisse im Rahmen eines Forschungsberichts dargestellt werden. Der Forschungsbericht soll als Entscheidungshilfe für Behörden, Investoren und Fachplaner bei künftigen Vorhaben dienen.

2.2 Projektbeschreibung

In den sächsischen Ballungszentren Leipzig, Dresden und Chemnitz ist auch in den kommenden Jahren mit einer intensiven Bautätigkeit (Bebauung von Baulücken bzw. Bestandssanierung) zu rechnen.

Für die genannten Regionen werden die Nutzungsmöglichkeiten mitteltiefer geothermischer Systeme exemplarisch anhand von drei Musterstandorten untersucht. Dabei wird unter Berücksichtigung

- der Stadtentwicklungskonzepte,
- der Komplexität der geologisch/hydrogeologischen sowie geothermischen Verhältnisse und
- möglicher Nutzungseinschränkungen und Beachtung der Erfordernisse des Grundwasserschutzes

je ein Musterstandort in den Städten Leipzig, Dresden und Chemnitz ausgewählt und im Rahmen des Vorhabens vertieft untersucht.

Für jeden Musterstandort wird anhand definierter gebäudetechnischer Randbedingungen eine mitteltiefe Erdwärmesondenanlage vollständig geplant. Dies beinhaltet unter anderem die im Folgenden aufgeführten Punkte:

- bohr- und bautechnische Ausführung,
- Dimensionierung der Anlage mittels numerischer Simulation einschließlich Ausweisung der Auswirkungen auf die Umgebung,
- Ausarbeitung eines geeigneten Monitoringkonzeptes,
- überschlägige Kostenbetrachtung.

Weiterhin erfolgte eine Bewertung zu Einschränkungen bei der Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse auf das jeweilige Stadtgebiet.

Abschließend werden Optimierungsmöglichkeiten für künftige Projekte aufgezeigt und entsprechende Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Für die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens fanden folgende Randbedingungen des AG zu Heiz- und Kühllasten Beachtung:

- Heizleistung der Wärmepumpe: 200 kW,
- Jährliche Vollbenutzungsstunden (Heizung/Warmwasser): 1800 h / 600 h,
- Kühlleistung: 200 kW,
- Jährliche Vollbenutzungsstunden (Kühlung): 800 h.

Dabei wird von der in der folgenden Tabelle angegebenen Heiz- und Kühlarbeit ausgegangen.

Tabelle 1: Grundlastverteilung Heizen und Kühlen

Monat	Heizbetrieb		Warmwasserbereitung		Kühlbetrieb	
	kWh	%	kWh	%	kWh	%
Januar	64.800	18	10.000	8,33	0	0
Februar	61.200	17	10.000	8,33	0	0
März	43.200	12	10.000	8,33	0	0
April	32.400	9	10.000	8,33	0	0
Mai	10.800	3	10.000	8,33	16.000	10
Juni	0	0	10.000	8,33	40.000	25
Juli	0	0	10.000	8,33	48.000	30
August	0	0	10.000	8,33	40.000	25
September	14.400	4	10.000	8,33	16.000	10
Oktober	32.400	9	10.000	8,33	0	0
November	43.200	12	10.000	8,33	0	0
Dezember	57.600	16	10.000	8,33	0	0
Summe	360.000	100	120.000	100	160.000	100

Für die in Tabelle 1 angegebenen Werte wird zur Ermittlung des Entzuges aus dem Untergrund pauschal von folgenden Jahresarbeitszahlen (JAZ) ausgegangen:

- JAZ Heizbetrieb: 4,5
- JAZ Warmwasserbereitung: 3,5
- JAZ Kühlung: passiv bis zur Fluidtemperatur von 18°C, danach aktive Kühlung (EER: 5,0).

Des Weiteren werden die in Tabelle 2 aufgeführten Spitzenlasten berücksichtigt. Darunter ist ein Zeitraum zu verstehen, in dem die Wärmepumpe bei voller Leistung ununterbrochen läuft.

Tabelle 2: Spitzenlastverteilung Heizen und Kühlen

Monat	Heizbetrieb		Kühlbetrieb	
	kW	h	kW	h
Januar	200	6		
Februar	200	6		
März	200	6		
April				
Mai				
Juni			200	8
Juli			200	8
August			200	8
September				
Oktober				
November				
Dezember	200	6		

3 Auswahl der Modellstandorte

Die Auswahl der Modellstandorte in den drei zu betrachtenden sächsischen Ballungsräumen Leipzig, Dresden und Chemnitz erfolgte im Zeitraum Dezember 2017 bis Februar 2018. Vom AG wurde nach der Anlaufberatung zum Projekt, ein Informationsschreiben an die Umwelt-Bürgermeister der drei sächsischen Großstädte versendet. Darin ist über die Ziele des Forschungsvorhabens informiert und um Unterstützung des AN bei der Auswahl der Modellstandorte gebeten worden.

Bezugnehmend auf das Informationsschreiben wurden anschließend die zuständigen Bearbeiter in den Stadtverwaltungen kontaktiert und Gesprächstermine im Januar 2018 vereinbart.

3.1 Modellstandort Leipzig

Der Termin im Amt für Umweltschutz der Stadt Leipzig fand am 09.01.2018 statt. Dabei wurde den anwesenden Behördenmitarbeitern das Forschungsvorhaben kurz vorgestellt und anschließend über die Anforderungen an die auszuweisenden Modellstandorte beraten. Im Ergebnis des Termins konnten von Seiten des Amtes für Umweltschutz vier mögliche Betrachtungsgebiete vorgeschlagen werden, zu denen eine Abstimmung mit der Stadtplanung erfolgte.

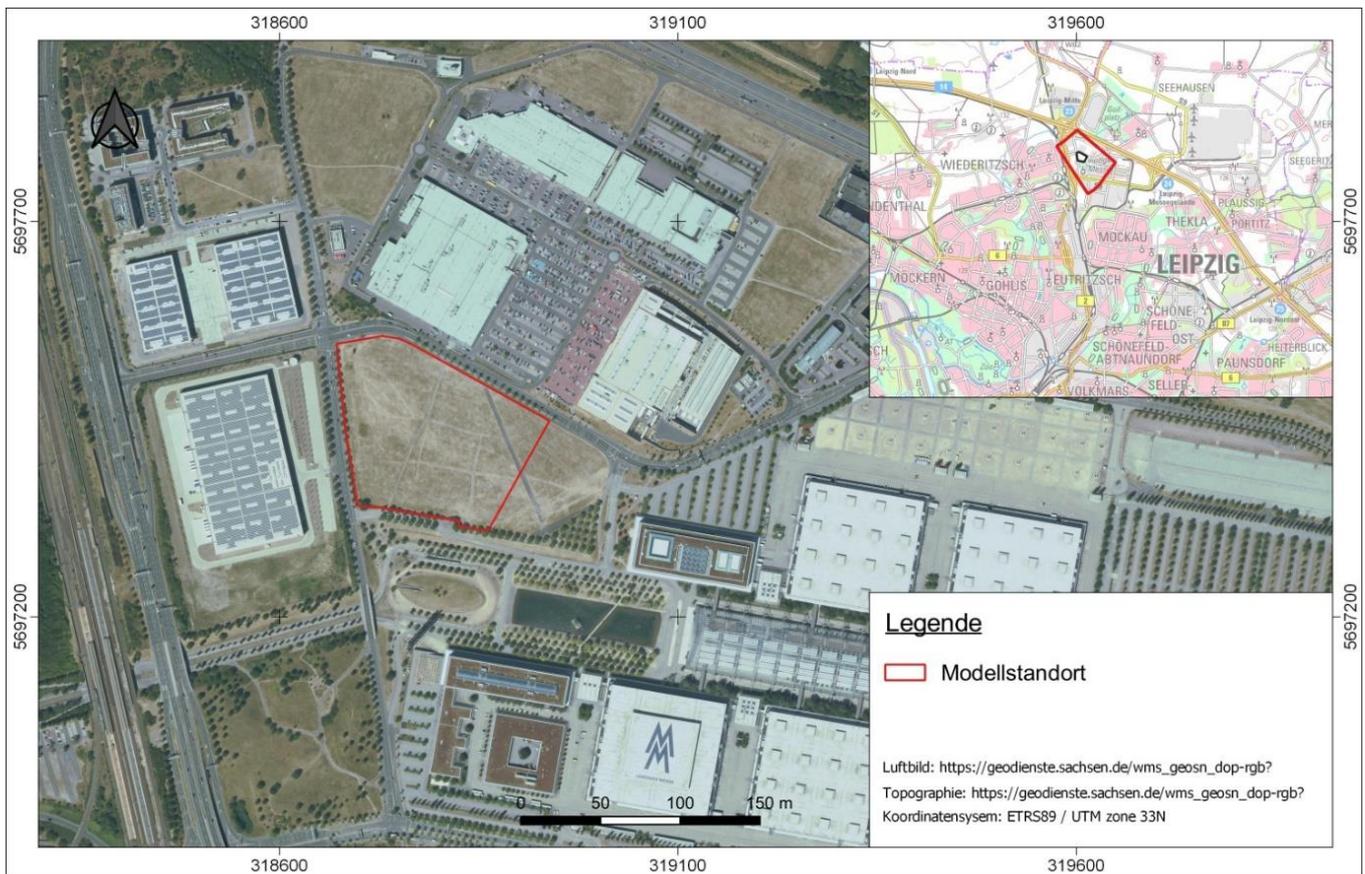


Abbildung 1: Modellstandort Leipzig

Die Übergabe der abgestimmten Modellstandorte erfolgte am 24.01.2018. Die im Folgenden aufgeführten Standorte wurden von der Stadt Leipzig als mögliche Modellstandorte vorgeschlagen. Zu jedem Standort wurden die darunter aufgeführten Hinweise gegeben.

■ Gewerbegebiet Mockauer Straße

Das Gewerbegebiet erstreckt sich im Leipziger Norden, entlang der B2. Es befindet sich östlich der Bahnlinie und wird im Norden von Kleingärten, im Osten durch Wohnbebauung und im Südosten durch ein Mischgebiet begrenzt.

■ Bereich Neue Messe

In diesem Bereich wäre die Realisierung einer mitteltiefen Erdwärmesondenanlage durch einen Investor prinzipiell denkbar.

■ Bayrischer Bahnhof

Für den Bereich am Bayrischen Bahnhof stehen die Planungen zur Energieversorgung noch sehr am Anfang. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens könnten hier eventuell in die Planungen mit einfließen.

Die Stadt Leipzig gab keine Priorisierung hinsichtlich der übergebenen Modellstandorte vor. Die Abstimmung mit dem AG ergab, dass als Modellstandort den Bereich der Neuen Messe auszuwählen ist. Im Zuge der Abstimmung wurde zudem die Lage des Standortes der zu betrachtenden Modellanlage auf das Flurstück 400/3, Gemarkung Seehausen im Bereich der Neuen Messe konkretisiert.

Für den festgelegten Modellstandort erfolgte anhand der sächsischen Landesgrundwasserdynamik, Stand 2016 (LfULG, 2019) die Abgrenzung des zu modellierenden Untersuchungsgebietes. Dieses wird im Weiteren als Modellgebiet bezeichnet und ist in Abbildung 2 dargestellt.

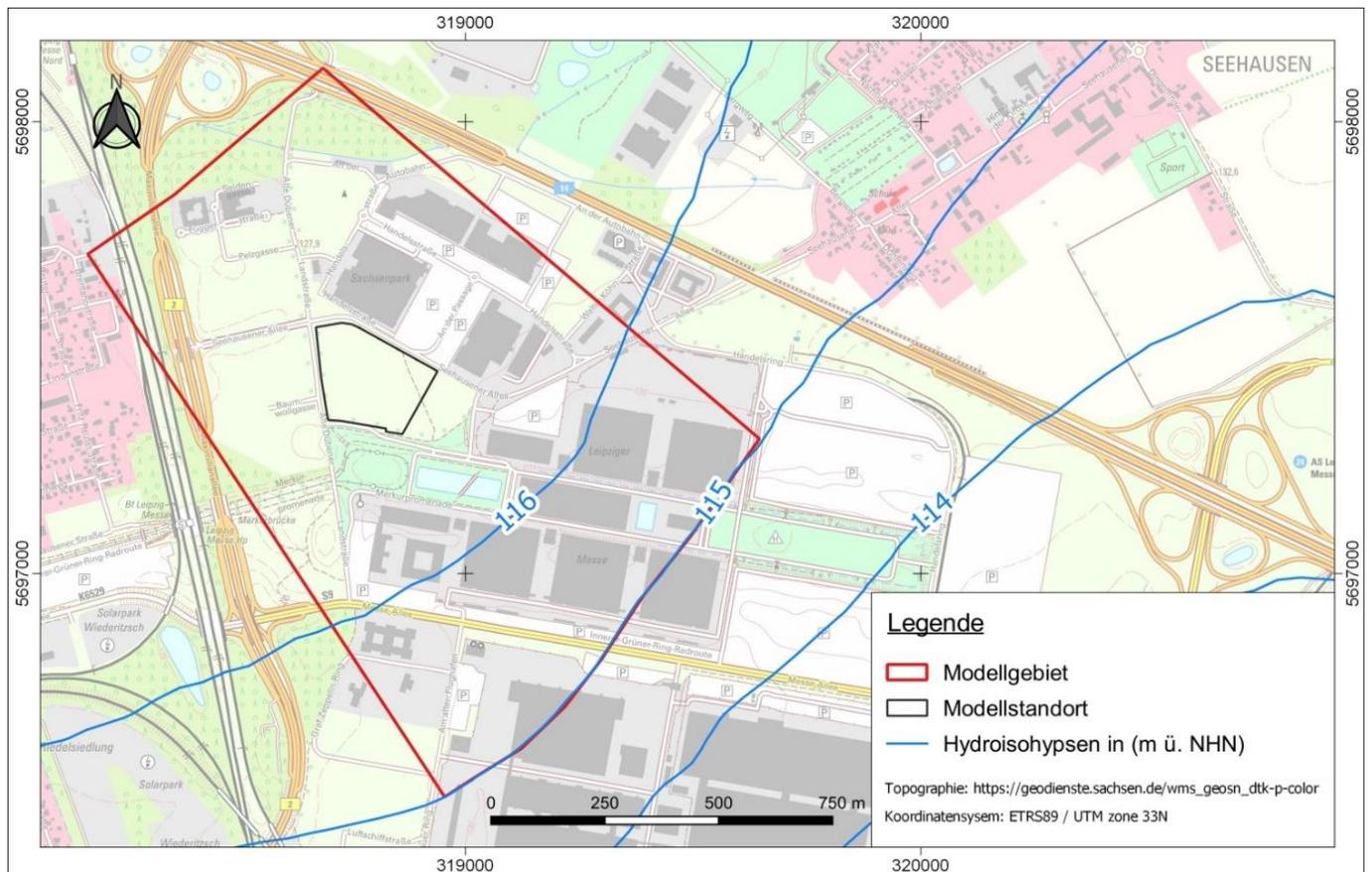


Abbildung 2: Modellgebiet Leipzig

Der anstromige Rand des Modellgebiets befindet sich im Bereich einer Wasserscheide bei ca. 116,5 m NHN. Der abstromige Rand des Modellgebiets wird durch die Grundwasserisohypse 115 m NHN festgelegt.

3.2 Modellstandort Chemnitz

Der Termin im Umweltamt der Stadt Chemnitz fand am 14.01.2018 statt. Nach einer kurzen Vorstellung des Forschungsvorhabens wurden von den Teilnehmern mögliche Modellstandorte im Stadtgebiet Chemnitz diskutiert. Im Ergebnis der Beratung wurden 4 mögliche Standorte vorausgewählt, für die eine weitergehende Überprüfung und Abstimmung mit den beteiligten Behörden der Stadtverwaltung und externen Institutionen erfolgen sollte.

Die Übergabe der abgestimmten Modellstandorte erfolgte am 05.02.2018. Dabei konnten die nachfolgend aufgeführten Standorte benannt werden.

- 1. Theaterstandort - Geplanter Standort für einen Theaterneubau durch die Stadt Chemnitz
- 2. Neubau eins energie - Standort für den Neubau des Firmensitzes der eins energie in sachsen GmbH & Co. KG
- 3. TU Chemnitz –Technocampus Süd
- 4. VW-Gelände - Standort des Motorenwerkes Chemnitz der Volkswagen Sachsen GmbH

Von Seiten der Stadt Chemnitz erfolgte die Angabe der Modellstandorte nach ihrer eingeschätzten Priorität. Dabei wurde erklärt, dass für die Bearbeitung im Rahmen des Forschungsvorhabens der Theaterstandort favorisiert wird und gleichzeitig um Rücksprache gebeten, falls die Auswahl auf einen anderen der benannten Standorte fallen sollte. Die Begründung hierfür liegt hauptsächlich darin, dass die Stadt Chemnitz am geplanten Standort selbst als Bauherr auftritt, und bei einer positiven Wirtschaftlichkeit der untersuchten Modellanlage eine Realisierung einer mitteltiefen Erdwärmesondenanlage durchaus möglich ist. Nach Abstimmung mit dem AG wurde beschlossen, dem Wunsch der

Stadt Chemnitz zu entsprechen und der geplante Standort des Theaterneubaus im Stadtzentrum als Modellstandort im Ballungsraum Chemnitz ausgewählt. Die Lage des Standortes ist aus Abbildung 3 ersichtlich.

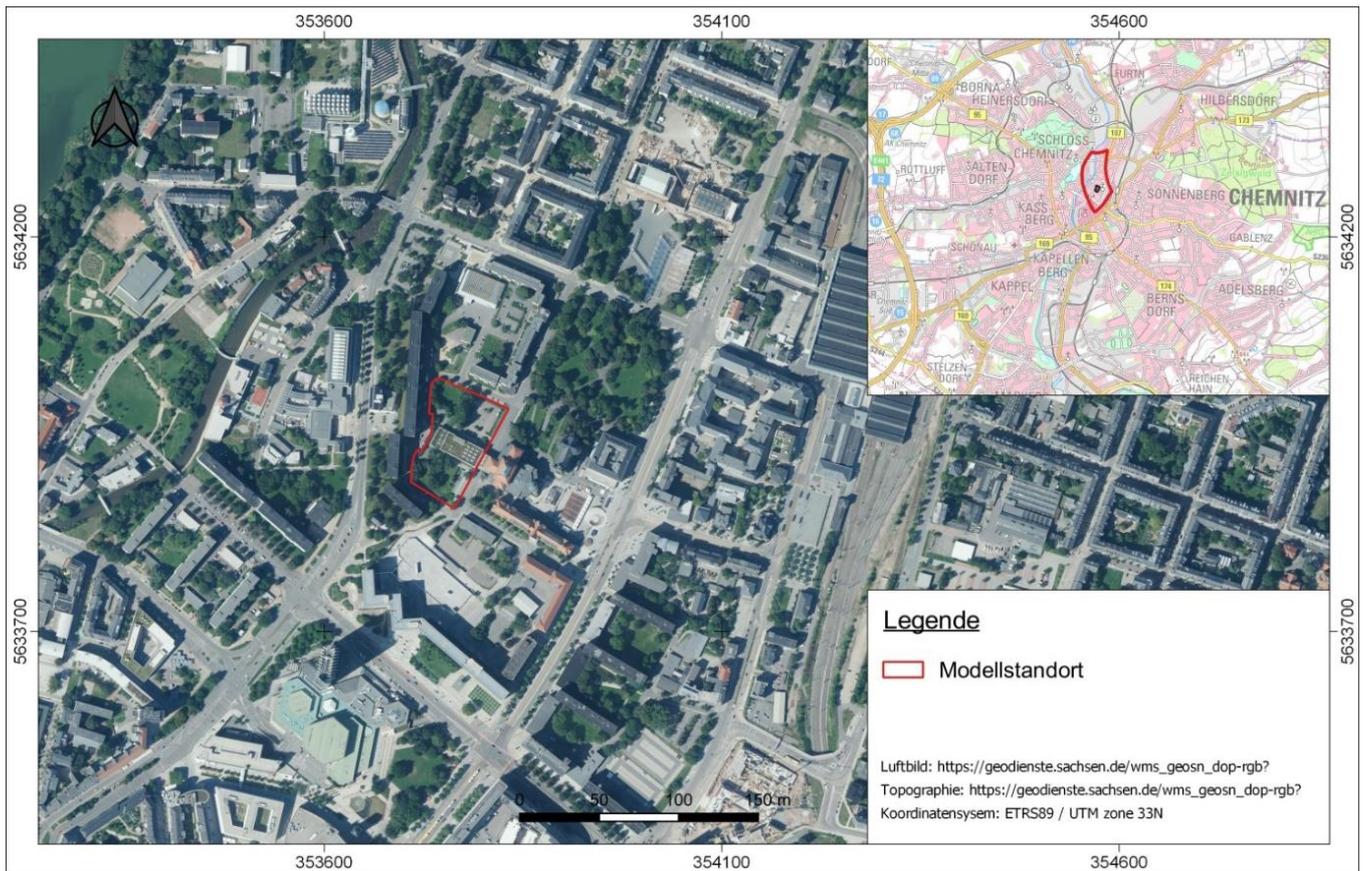


Abbildung 3: Modellstandort Chemnitz

Das Modellgebiet wurde anhand der Grundwasserisohypsen der sächsischen Landesdynamik (LfULG, 2019) festgelegt. Das abgegrenzte Modellgebiet ist in Abbildung 4 dargestellt.

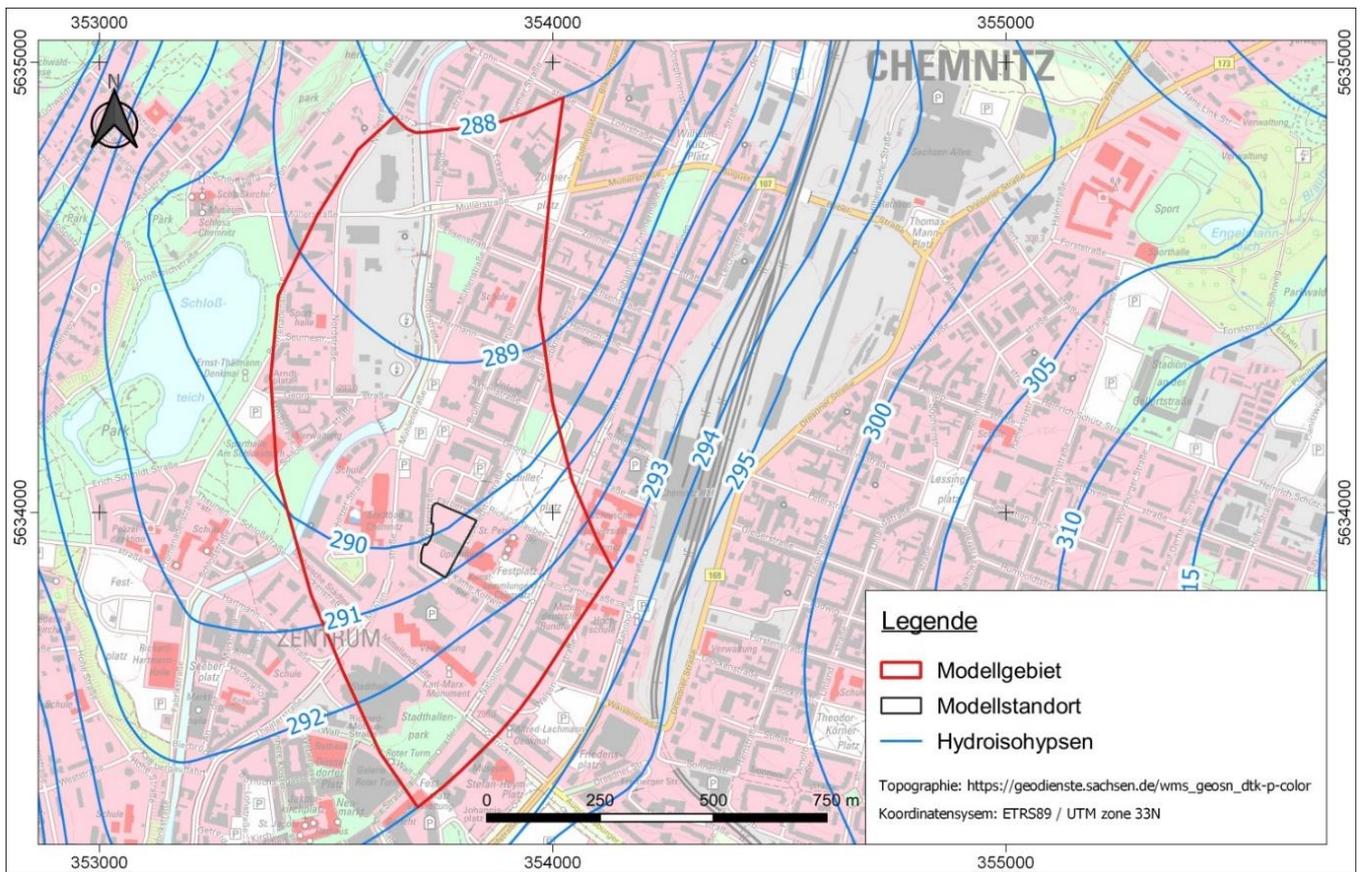


Abbildung 4: Modellgebiet Chemnitz

Der oberstromige Modellrand wird durch die Grundwasserisohypse 293 m NHN und der unterstromige Modellrand durch die Grundwasserisohypse 288 m NHN gebildet.

3.3 Modellstandort Dresden

Die Auswahl des Modellstandortes für das Stadtgebiet Dresden wurde vom AG vorgenommen. Der Standort befindet sich im Bereich der Nossener Brücke in der Dresdener Südvorstadt.



Abbildung 5: Modellstandort Dresden

Das Modellgebiet wurde anhand der Grundwasserisohypsen der sächsischen Landesdynamik (LfULG, 2019) festgelegt. Das abgegrenzte Modellgebiet ist in Abbildung 6 dargestellt.

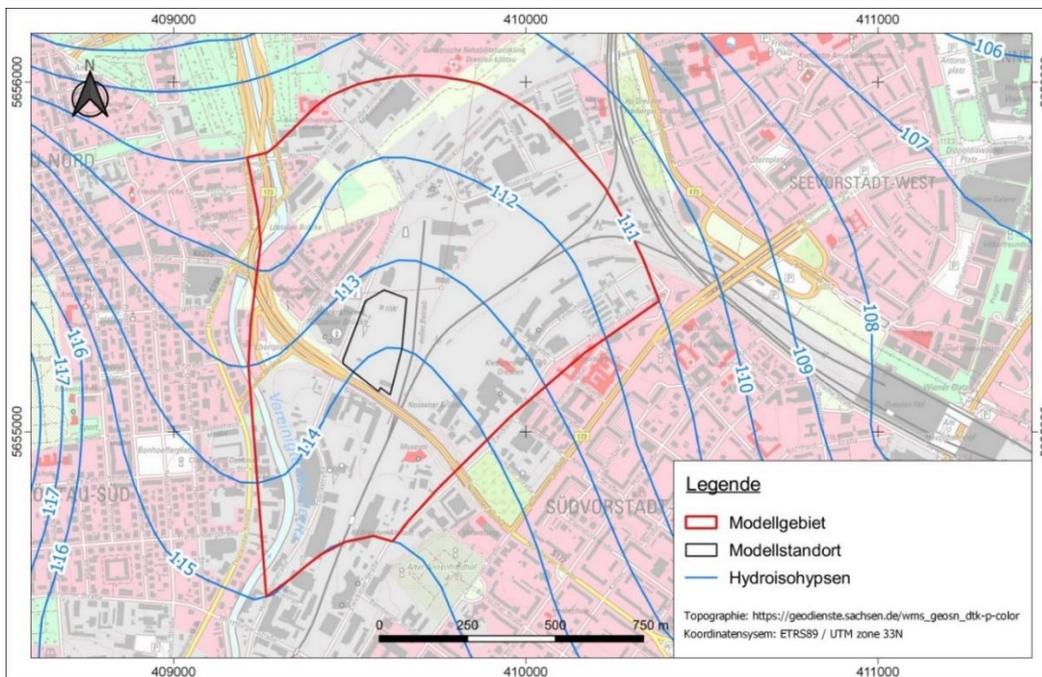


Abbildung 6: Modellgebiet Dresden

Der anstromige Rand des Modellgebiets wird durch die Grundwasserisohypse 115 m NHN und der abstromige Rand durch die Grundwasserisohypse 111 m NHN definiert.

4 Technische Konzeption

4.1 Materialtechnische Konzeption

4.1.1 Einführung

Im Rahmen der Planung einer mitteltiefen Erdwärmesondenanlage kommt der möglichst frühzeitigen Konzeption der technischen Umsetzung eine entscheidende Rolle zu und erfolgt zumeist im Rahmen einer Machbarkeitsstudie. Bedingt durch die im Vergleich zu oberflächennahen geothermischen Systemen deutlich höheren Bohrteufen und entsprechend höheren auftretenden Drücken sind insbesondere bei Material/Bauart höhere Ansprüche zu stellen. So kann die konzipierte Bohrteufe / Sondenlänge durchaus durch die am Markt verfügbaren Fabrikate beeinflusst und ggf. sogar limitiert werden. Eine rechtzeitige, an den Einzelfall angepasste Materialwahl trägt folglich dazu bei, diesbezügliche Umplanungen während fortgeschrittener Planungsphasen weitgehend zu vermeiden.

Auch im Hinblick auf die nachgelagerte, fachgerechte Dimensionierung der Erdwärmesondenanlage (siehe Kapitel 6) ist die frühzeitige Festlegung der material- und bohrtechnische Konzeption von Bedeutung, da sie in den entsprechenden Modellierungen als Randbedingungen beachtet werden müssen.

Im Vergleich zu den für oberflächennahe Erdwärmesondenanlagen üblichen Systemkomponenten (Sondentypen, Verfüllbaustoffe) sind für den mitteltiefen Einsatzbereich größere Unterschiede hinsichtlich der am Markt verfügbaren Fabrikate vorhanden, welche nachfolgend erläutert werden.

Die materialtechnische Konzeption enthält eine Recherche zu gegenwärtig am Markt verfügbaren Ausbaumaterialien für geschlossene geothermische Entzugssysteme, die in einem Variantenvergleich betrachtet werden. Im Ergebnis wird ein im Forschungsvorhaben weiter zu betrachtendes System erarbeitet und ein detailliertes Ausbaukonzept erstellt.

4.1.2 Erdwärmesonden

Für die Nutzung von Geothermie über mitteltiefe geschlossene Entzugssysteme bieten sich prinzipiell Einfach- und Doppel-U-Sonden sowie Koaxialsonden an.

Zu den gegenwärtig am Markt verfügbaren Sondenfabrikaten wurde eine entsprechende Recherche durchgeführt. Gemäß Vorgabe des AG sollten dabei nur Standardfabrikate berücksichtigt werden und keine Sonderanfertigungen. Im Ergebnis konnten vier unterschiedliche Doppel-U-Sonden ermittelt werden, die für den Einbau in mitteltiefe Bohrungen bis 350 m potenziell geeignet sind. Fertig konfektionierte Koaxialsonden sind für die vorgesehene Ausbautiefe derzeit nicht auf dem Markt verfügbar. Es wird darauf hingewiesen, dass hinsichtlich der aufgeführten Sondentypen keine Gewähr bezüglich der Vollständigkeit verfügbarer Produkte übernommen wird.

In der Zwischenberatung mit dem AG am 28.06.2018 wurde aufgrund der Ergebnisse der Recherche abgestimmt, dass für das Forschungsvorhaben von einer maximalen Ausbautiefe von 350 m auszugehen ist.

Einen Vergleich der wichtigsten Eigenschaften der recherchierten Sonden enthält Tabelle 3.

Tabelle 3: Wesentliche Eigenschaften der recherchierten Sondentypen

Eigenschaft	Sonde A	Sonde B	Sonde C	Sonde D
Bezeichnung	Jansen hipress	Jansen shark	Gerothem flux	Gerothem PN 20
Durchmesser (mm)	DA 42	DA 50	DA 43	DA 50
Sondentyp	Doppel-U	Doppel-U	Doppel-U	Doppel-U
Wanddicke (mm)	3,5	7,9	Variabel (3,5 bis 6,5)	5,6
Länge laut Anbieter (m)	bis 500	bis 500	bis 410	bis 550
Material / Aufbau	Mehrschicht PE-Metall	PE 100 - RC	PE 100 - RC	PE 100 - RC
Druckfestigkeit (bar)	35	30	32	20
Betriebstemperatur (°C)	-20 bis +40	-20 bis +40	-20 bis +40	-20 bis +40
Sondenfußdurchmesser (mm)	128	k.A.	121	150
Masse Sondenfuß (kg)	40,0	40,0	k.A.	24,0
Druckverlust (bar) ¹	0,86 - 1,19	0,96 - 1,33	0,97 - 1,36	0,53 - 0,73
Bohrlochwiderstand (m ³ K/W) ²	0,0766	0,0994	0,0828	0,0867

¹ bei Anlagendurchsatz 36 m³/h und 0 °C, Einbautiefe 350 m, Angaben für 9 - 11 Sonden

² exemplarisch für den Standort Dresden

Die in Tabelle 3 aufgeführten Erdwärmesonden sind Doppel-U-Sonden, die sich hinsichtlich des Durchmessers, des Materialaufbaues und der Druckfestigkeit unterscheiden.

Sonde A, mit einem Außendurchmesser des Sondenrohres von 42 mm weist einen Metallmehrschichtaufbau auf, der sich durch eine in der Wandung befindliche Metallschicht auszeichnet. Diese führt bei einer Wandstärke von 3,5 mm zu einer höheren Druckbeständigkeit des Materials gegenüber einem klassischen PE-Rohr. Die Druckfestigkeit des Rohres beträgt nach Herstellerangaben 35 bar. Des Weiteren verfügt Sonde A über einen metallarmierten Sondenfuß.

Sonde B besitzt einen Außendurchmesser von 50 mm und ist aus PE-100 aufgebaut. Die Druckfestigkeit von 30 bar resultiert aus der Wandstärke von 7,9 mm.

Sonde C besteht ebenfalls komplett aus PE-100. Sie weist bei einem konstanten Außendurchmesser von 43 mm eine mit der Tiefe zunehmende Rohrstärke auf. Damit wird den in höheren Tiefen zunehmenden Druckbedingungen Rechnung getragen. Die Sonde weist nach Herstellerangaben eine Druckbeständigkeit von 32 bar auf.

Sonde D mit einem Außendurchmesser von 50 mm wird aus PE-100 gefertigt. Aufgrund der geringeren Wandstärke von 5,6 mm verfügt die Sonde über eine Druckfestigkeit von 20 bar.

Während die Sonden A bis C aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften nur von einem Hersteller angefertigt werden, ist Sonde D prinzipiell bei mehreren Herstellern baugleich im Angebot.

Der durch das Material vorgegebene Temperaturbereich für den Einsatz der Sonden liegt aufgrund der Verarbeitung von klassischem PE-Rohr einheitlich bei -20 bis +40 °C.

Wie aus Tabelle 3 hervorgeht, liegen die vom Hersteller empfohlenen Einsatziefen der Sonden bei 410 bis 500 m. Sonde C mit einer Einsatziefe von 410 m, wurde bis vor kurzem nur bis 320 m Länge produziert, aufgrund einer kundenspezifischen Anfrage jedoch nun auch bis 410 m. Bei der Angabe der Einsatziefen durch die Hersteller wird allgemein davon ausgegangen, dass die in ein Bohrloch eingebaute Sonde mit der Verfüllung eine Einheit bildet, so dass das Sondenmaterial nicht dem gesamten in der Tiefe herrschendem Druck standhalten muss. Obwohl dieser Argumentation prinzipiell gefolgt werden kann, sollte auch in Betracht gezogen werden, dass während der Installation oder des Betriebes der Erdwärmesonden das Auftreten höhere Drücke nicht generell ausgeschlossen werden kann. Daher

liegt bei geringerer eigener Druckfestigkeit der Sonden (im Vergleich zur Einbautiefe) eine kurz- oder langfristige Überschreitung der herstellerseitig benannten Druckfestigkeit im Bereich des Möglichen.

In Tabelle 3 wird ebenfalls der zu erwartende Druckverlust für die Sonde unter den Einsatzbedingungen des Forschungsprojektes ausgewiesen. Die Druckverluste sind dabei vor allem abgänglich vom zur Verfügung stehenden Durchflussquerschnitt, so dass bei Sonde D mit dem größten Innendurchmesser die geringsten Druckverluste ermittelt werden (bei sonst gleichen Randbedingungen wie Durchfluss und Viskosität des durchströmenden Mediums).

Zudem enthält Tabelle 3 Angaben zum Bohrlochwiderstand, der exemplarisch für die Anlage am Standort Dresden berechnet wurde. Da der Bohrlochwiderstand sich umgekehrt proportional zur Wanddicke verhält, weist Sonde A mit 0,0766 ($m \cdot K/W$) den geringsten Wert auf. Der höchste Wert wurde für Sonde B mit 0,0994 ($m \cdot K/W$) ermittelt.

Für die weitere Betrachtung innerhalb des Forschungsprojekts wird unter Beachtung der durchgeführten Recherchen für alle Modellstandorte einheitlich die Sonde A ausgewählt, da sie über die höchste Druckfestigkeit verfügt. Zudem zeichnet sie sich durch den geringsten Bohrlochwiderstand aus, was in den durchgeführten Vergleichsrechnungen zu ca. 1 K höheren Solemitteltemperaturen für den Heizfall und ca. 1,5 K geringeren Solemitteltemperaturen für den Kühlfall im Vergleich zu Sonde B führt.

Der Einbau der Sonde in das errichtete Bohrloch ist generell über eine Haspel vorzunehmen. Zwischen den Sondenschenkeln wird dabei mittig mindestens ein Verfüllschlauch DA 32 mitgeführt. Aufgrund der hohen Bohrtiefe sind in der Regel mehrere Verfüllschläuche notwendig.

Eine Kostenschätzung ist in Anlage 2in enthalten. Zwischen den einzelnen Sondentypen bestehen dabei keine wesentlichen Unterschiede.

4.1.3 Verfüllmaterial

Die Abdichtung des Bohrloches mit einem Verfüllbaustoff dient dem thermischen Anschluss der Erdwärmesonde an den Untergrund und schützt die Sonde gleichzeitig vor mechanischen Beanspruchungen. Zudem ist die vollständige und fachgerechte Verfüllung des Bohrloches vor dem Hintergrund der Vermeidung hydraulischer Kurzschlüsse zwischen natürlich getrennten Grundwasserleitern von fundamentaler Bedeutung. Daher ist die Auswahl eines geeigneten Verfüllmaterials der zweite wesentliche Baustein eines geothermischen Ausbaukonzeptes.

Auf dem Markt sind prinzipiell verschiedene Verfüllbaustoffe unterschiedlicher Anbieter verfügbar. Da eine möglichst optimale Nutzung der Erdwärme bei mitteltiefen Bohrungen eine entscheidende Rolle spielt, ist die Recherche auf Verfüllbaustoffe mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit $\geq 2,0 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ begrenzt worden. Des Weiteren wurde berücksichtigt, ob Angaben/Nachweise zur Frost-Tau-Wechsel-Beständigkeit vorliegen.

Einen Überblick zu den wesentlichen Eigenschaften der recherchierten Baustoffe gibt Tabelle 2. Prinzipiell handelt es sich bei allen Produkten um vorgemischte Trockenmörtel, die aus Hochofenzement und verschiedenen Zuschlagsstoffen bestehen. Auf der Baustelle erfolgt das Anmischen durch Zugabe von Wasser.

Alle in Tabelle 4 aufgeführten Produkte sind nach den jeweiligen Herstellerangaben sulfatbeständig und weisen eine Frost-Tau-Wechsel-Beständigkeit auf. Eine Überprüfung/Bewertung der diesen Angaben zugrundeliegenden Prüfverfahren/-normen erfolgte im Rahmen der erfolgten Recherchen nicht. Analog zu den betrachteten Erdwärmesonden wird keine Gewähr auf die Vollständigkeit hinsichtlich der am Markt verfügbaren Produkte übernommen.

Tabelle 4: Wesentliche Eigenschaften der recherchierten Verfüllbaustoffe

Eigenschaft	Hersteller A	Hersteller B	Hersteller C	Hersteller D
Bezeichnung	ThermoCem	Füllbinder	Fischer	Calidutherm
Varianten	Plus / Plus 3.0 TC02 / TC04	EWM EWMplus	Geosolid 240 Geosecure	-
Wärmeleitfähigkeit (W/m·K)	2,0 / 3,0 2,0 / 4,0	≥2,0	≥2,4	2,0
Suspensionsdichte (kg/m ³)	1460 / 1500 1535 / 1683	1940	1900	1650
Marshzeit (s)	≥60 / ≥120 ≥60 / k.A.	>70	69	k.A.
Verarbeitungszeit (h)	5 / 5 2 / 4	k.A.	k.A.	k.A.
Wasserdurchlässigkeit (m/s)	≤1x10 ⁻¹⁰	<5x10 ⁻¹¹	<10 ⁻⁹	<5x10 ⁻⁹
Druckfestigkeit (N/mm ²)	6,0 / 11,2 11,7 / 19,1	12,0	>10,0	k.A.
magnetisch dotiert	nein	ja (EWMplus)	ja (Geosecure)	nein
Sulfatbeständigkeit	ja	ja	ja	ja
Frost – Tau – Wechsel - Beständigkeit	ja / ja k.A.	ja	ja	ja

Hersteller A bietet insgesamt vier unterschiedliche Verfüllbaustoffe mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit an, wobei die mit „TC“ gekennzeichneten Produkte speziell für den Einsatz bei mitteltiefen bis tiefen geothermischen Bohrungen konzipiert wurden. Sie zeichnen sich gegenüber den anderen aufgeführten Produkten des Herstellers durch eine etwas höhere Suspensionsdichte und eine höhere Druckfestigkeit aus. Die angegebene Wasserdurchlässigkeit bezieht sich auf die „Plus“-Produkte des Herstellers und wird gemäß technischem Datenblatt auch nach Durchfrostungsversuch gemäß Hamburger Liste eingehalten (HH Umwelt 2017).

Die magnetische Dotierung der Verfüllbaustoffe dient der Kontrolle der Vollständigkeit des Verfüllvorganges und kann prinzipiell auch während des Betriebes einer Erdwärmesonde zur Zustandskontrolle der Verfüllung herangezogen werden. Die aufgeführten Produkte des Herstellers A sind nicht magnetisch dotiert. Der Hersteller gibt jedoch an, dass eine magnetische Dotierung ebenfalls verfügbar ist.

Die Hersteller B und C bieten jeweils zwei Verfüllbaustoffe an, die sich lediglich hinsichtlich ihrer magnetischen Dotierbarkeit unterscheiden. Die Produkteigenschaften der Verfüllbaustoffe sind prinzipiell mit denen von Hersteller A gleichzusetzen. Lediglich die Suspensionsdichte liegt deutlich über den Werten des Herstellers A. Sie ist durch die Verwendung von Quarzsand zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit in den aufgeführten Produkten bedingt.

Hersteller D produziert ebenfalls ein prinzipiell qualitativ gleichwertiges Produkt, wenn gleich im technischen Datenblatt weniger Angaben zu ermittelten laborativen Eigenschaften des Verfüllbaustoffes gemacht werden.

Insgesamt kann im Rahmen der durchgeführten Recherche festgestellt werden, dass alle recherchierten Verfüllbaustoffe für die Verfüllung des Ringraumes geeignet sind. Da im Rahmen der modellhaften Untersuchungen des Forschungsvorhabens ohnehin nur die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllbaustoffes von Relevanz ist, erscheint eine konkrete Auswahl eines bestimmten Verfüllbaustoffes an dieser Stelle nicht erforderlich.

Für die geothermische Modellierung im Rahmen des Projektes wird die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllbaustoffes mit 2,0 W/m·K angesetzt.

Eine Kostenschätzung ist in Anlage 2 enthalten. Zwischen den einzelnen Verfüllbaustoffen bestehen dabei keine wesentlichen Unterschiede.

4.2 Bohrtechnische Konzeption

4.2.1 Einführung

Unter Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse am Standort (vgl. dazu die jeweiligen standortspezifischen Beschreibungen in Kapitel 6) wurde aufbauend auf das Ausbaukonzept für jeden Modellstandort eine bohrtechnische Konzeption entwickelt. Analog den Ausführungen zum materialtechnischen Konzept (Kapitel 4.1.1) ist auch die bohrtechnische Konzeption im Rahmen früher Planungsphasen anzustreben. Da die Bohrkosten einen erheblichen Anteil an den Investitionskosten einer mitteltiefen Erdwärmesondenanlage haben, ist die Erarbeitung einer entsprechend standort- bzw. maßnahmenbezogenen Planung zur Ausführung der Bohrarbeiten nicht nur vor dem Hintergrund eines ungestörten Bauablaufs von Bedeutung. Ein fachlich durchdachtes Bohrkonzept (einschl. der Diskussion verschiedener technischer Umsetzungsoptionen) trägt nicht zuletzt auch wesentlich zur wirtschaftlichen Optimierung der Erschließungsarbeiten bei.

Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die bohrtechnische Planung eine diesbezüglich hohe fachliche Kompetenz erfordert und folglich einem entsprechend erfahrenen Fachplaner übertragen werden sollte. Im Idealfall ist anzustreben, die technische Konzeption und die Dimensionierung der Wärmequellenanlage (Erdwärmesonden einschl. Bohr- und Ausbauarbeiten) aus einer Hand durch einen versierten Fachplaner erbringen zu lassen. Eine Übertragung dieser Aufgaben auf fachfremde Planer (z.B. den Fachplaner der Gebäudetechnik) wird aufgrund der oben beschriebenen Komplexität der technischen Anforderungen nicht empfohlen. Vielmehr ist eine enge Kommunikation der verschiedenen Fachplaner des Heiz-/Kühlsystems von grundlegender Bedeutung.

Prinzipiell wurde bei der Erarbeitung der Bohrkonzeption darauf geachtet, den Bohrdurchmesser im Spannungsfeld zwischen einzuhaltenden Rahmenbedingungen und Kosten möglichst optimal zu gestalten.

Wie bereits im Ausbaukonzept beschrieben, soll mit der jeweiligen Sonde ein Verfüllschlauch mittig ins Bohrloch eingebaut werden. Der Verfüllschlauch dient in erster Linie der Verfüllung des Bohrloches, er wirkt jedoch gleichzeitig als Abstandshalter zwischen den Sondenschenkeln. Für diese Ausbauvariante ergibt sich ein Ausbaudurchmesser im Bereich der Sondenbündel von 116 mm.

Ein einziger Verfüllschlauch wird bei einer Bohrtiefe von 350 m nicht ausreichend sein, da der benötigte Druck von der eingesetzten Verfülltechnik in der Regel nicht über die gesamte Bohrlochtiefe bereitgestellt werden kann. Zudem ist im Hinblick auf die Dichte der Verfüllsuspension und die Druckfestigkeit der Erdwärmesonde vielfach eine Bohrlochverfüllung in zwei oder mehr Stufen von Vorteil. Als realistisch werden unter Berücksichtigung der Einbautiefe der Sonden und der Dichte sowie Viskosität der Verfüllsuspension ca. 150 m Verfülltiefe pro Schlauch angesehen. Für die Verfüllung des restlichen Bohrlochs kann entweder ein Verpressgestänge eingesetzt werden oder es werden zwei weitere Verfüllschläuche vorgesehen. Bei Verfüllung mit insgesamt drei Schläuchen ergibt sich bei DA 25 der beiden zusätzlichen Verfüllschläuche ein Ausbaudurchmesser von 154 mm. Daraus resultiert bei mittig eingebauter Sonde und 3 cm Ringraum ein Mindestbohrdurchmesser von 214 mm.

Als günstiger wird die Verfüllung mit Verpressgestänge erachtet, da dieses mit Sicherheit gezogen werden kann und nicht bei der Ermittlung des Ausbaudurchmessers berücksichtigt werden muss. Hier ist für die Ermittlung des Mindestbohrdurchmessers der Durchmesser des Sondenfußes entscheidend, der mit 128 mm über dem Minstdurchmesser des Sondenbündels von 116 mm liegt. Für die gewählte Sonde ergibt sich damit an allen Modellstandorten ein Mindestbohrdurchmesser von 188 mm.

Bei der Auswahl und Dimensionierung der Verfüllschläuche bei mitteltiefen Sondenanlagen muss darauf geachtet werden, dass die einzusetzende Verfülltechnik in der Lage ist, die notwendigen Drücke bereitzustellen. Dabei sind u.a. die jeweilige Einbautiefe, sowie die Dichte/Viskosität der Verfüllsuspension zu beachten. Auch die Auflast im Bohrloch (z.B. Bohrspülung mit definierter Dichte) ist zu beachten. Es ist prinzipiell der Einsatz entsprechend

leistungsfähiger Kolloidalmischer zu empfehlen, da diese auch eine gleichmäßige und vollständige Anmischung der Baustoffe gewährleisten

Im Folgenden werden die auf die geologischen Verhältnisse abgestimmten Bohrkonzepete für die einzelnen Standorte näher beschrieben.

4.2.2 Modellstandort Leipzig

Am Modellstandort Leipzig werden bis ca. 80 m unter Gelände unterschiedliche Lockergesteine angetroffen. Der Übergangshorizont zur unterlagernden Grauwacke, die bis zur Endtiefe ansteht, kann kaolinitisch ausgebildet sein. Das zu erwartende Vorprofil für den Standort ist in Anlage 3 dargestellt.

Aufgrund der anspruchsvollen geologischen Verhältnisse am Standort (Festgestein mit mächtiger Lockergesteinsüberdeckung) ist vorgesehen, die Bohrungen zwingend mit einer Doppelkopfanlage abzuteufen.

Dabei soll bis in den entfestigten Bereich des Festgesteines eine temporär verrohrte Spülbohrung mit einem Bohrdurchmesser von 219 mm niedergebracht werden. Die Verrohrung wird als notwendig erachtet, da durch den Zutritt der Bohrspülung bzw. von Grundwasser zum tonigen/kaolinitischen Verwitterungshorizont des Festgesteins eine Volumenzunahme des Tons/Kaolins erfolgen kann, die zu einem Zuquellen des Bohrlochs führen könnte. Als Bohrspülung ist ein Wasser-Bentonit-CMC-Gemisch vorgesehen. Nach Erreichen des standfesten Festgesteines wird die Verrohrung abgesetzt.

Das Bohrgerät wird auf Imlochhammerbohren umgerüstet. Das Imlochhammerverfahren wird bevorzugt, da mit ihm in hartem Festgestein der schnellste Bohrfortschritt erzielt werden kann. Zudem wird in der Grauwacke prinzipiell nur eine geringe Wasserführung erwartet. Ausnahmen davon wären nur in hydraulisch wirksamen Kluft- und Störungszonen zu erwarten.

Das Abteufen der Bohrung im Hammerbohrverfahren erfolgt mit einem Bohrdurchmesser von 198 mm bis zur Endtiefe. Als Standard beim Hammerbohrverfahren ist der Einsatz von pneumatischen Hämmern etabliert. Diese arbeiten mit einem Arbeitsdruck von 12 – 20 bar, einer Schlagfrequenz von ca. 30 Hertz und einer Rotation von 40 – 80 U/min. Der Austrag des Bohrkleins erfolgt mit dem Luftspülstrom innerhalb des Ringraumes. Die Spülungsgeschwindigkeit beträgt 20 – 30 m/s. Bedingt durch die Kompression des Spülmediums werden ca. 50 % der aufgewendeten Energie in Wärme umgewandelt und gehen für den Bohrantrieb verloren. Mit zunehmender Tiefe und bei deutlichem (hier nicht erwartetem) Grundwasserandrang sind daher sehr leistungsstarke Kompressoren erforderlich. Unabhängig davon wird der Bohrfortschritt / die Bohrgeschwindigkeit beim Einsatz pneumatischer Hämmer mit der Tiefe abnehmen. Eine Alternative können daher unter Umständen hydraulische Hämmer sein, die unter Punkt 4.2.5 näher beschrieben werden.

Als weitere Option kann im konkreten Einzelfall auch das Abteufen der Festgesteinsbohrung als Spülbohrung (Rotarybohrung) geprüft werden. Dabei ist von einem geringeren Bohrfortschritt gegenüber dem Hammerbohren auszugehen. Vorteile wären jedoch die größere Maßhaltigkeit der Bohrung sowie der Verzicht auf einen Kompressoreinsatz.

Unabhängig vom gewählten Bohrverfahren ist beim Antreffen entfestigter Bereiche das Nachziehen der Verrohrung bzw. eine Zementation der betreffenden Abschnitte in Betracht zu ziehen. Die genauen, jeweils geeigneten und angemessenen Maßnahmen sind jedoch grundsätzlich (wie bei allen Bohrarbeiten) im Hinblick auf die konkreten Standortverhältnisse einzelfallbezogen zu planen und umzusetzen.

Nach Erreichen der Endtiefe und Überprüfung durch Lotung erfolgt der Ausbau der Bohrung mit der Erdwärmesonde. Die Sonde wird dazu im Vorfeld mit Wasser gefüllt und druckdicht verschlossen. Anschließend wird sie mit Hilfe einer Haspel gemeinsam mit dem mittigen Verfüllschlauch ins Bohrloch eingebaut. Zur Führung kann am Sondenfuß ein Gewicht angebracht werden.

Die Verfüllung der Bohrung mit einem thermisch verbesserten Verfüllbaustoff erfolgt im Kontraktorverfahren von unten nach oben. Für die Verfüllung wird zunächst der mittig eingebaute Verfüllschlauch genutzt, der dauerhaft im Bohrloch verbleibt. Es ist davon auszugehen, dass die Abdichtung des Bohrlochs mit Hilfe dieses Verfüllschlauches bis zu einer Tiefe von ca. 200 bis max. 150 m u. GOK möglich ist. Das restliche Bohrloch bis zur Geländeoberkante wird mittels seitlich eingebautem Verpressgestänge abgedichtet. Dieses darf erst wieder gezogen werden, wenn die Verfüllsuspension bis zur Geländeoberfläche angestiegen ist und die Dichte der austretenden Suspension sich nicht von der eingepumpten Suspension unterscheidet.

Die Druckprüfung der Sonde gemäß den geltenden Vorgaben nach VDI 4640 (VDI 2019) erfolgt unmittelbar nach Abschluss der Verfüllarbeiten.

Das Ziehen der Schutzverrohrung ist ebenfalls in der VDI 4640 (VDI 2019) geregelt.

Das Bohr- und Ausbaukonzept für den Modellstandort Leipzig ist in Anlage 1 grafisch dargestellt.

4.2.3 Modellstandort Chemnitz

Am Modellstandort Chemnitz sind bis ca. 2 m unter Gelände holozäne Lockergesteinsablagerungen zu erwarten, die bis zur Endtiefe von den Sedimentgesteinen des Rotliegenden unterlagert werden. Das voraussichtliche Bohrprofil des Standortes ist in Anlage 3 dargestellt.

Es ist vorgesehen, die geringmächtigen Lockergesteine sowie die obersten entfestigten Bereiche des Rotliegenden im Trockenbohrverfahren mit temporärer Verrohrung zu durchbohren. Der Bohrdurchmesser wird mit 219 bzw. 222 mm gewählt.

Anschließend erfolgt der Wechsel auf Spülbohrverfahren (Rotarybohren) mit Rollen- oder PCD-Meißel. Mit diesem Verfahren wird bei den relativ weichen Sedimenten des Rotliegenden im Chemnitzer Becken ein größerer Bohrfortschritt als beim Hammerbohren erzielt. Ein weiterer Vorteil des Spülbohrens besteht in der Stabilisierung der Bohrlochwand durch die Auflast der Bohrspülung. Da die Bohrspülung im geschlossenen Kreislauf gefahren wird, muss nur das ausgetragene Bohrgut und am Ende der Bohrarbeiten (ggf. zusätzlich auch zwischenzeitlich) die Spülung entsorgt werden. Weiterhin wird beim Spülbohrverfahren kein Kompressor benötigt. Dies führt zu geringeren Energiekosten.

Die Bohrung wird bis zur Endtiefe in einem Durchmesser von 198 mm niedergebracht. Als Bohrspülung wird ein Wasser-Bentonit-CMC-Gemisch eingesetzt. Der CMC-Zusatz wird vor allem aufgrund der Toninhibierungswirkung als sinnvoll erachtet. Darüber hinaus ergänzen sich CMC und Bentonit in ihren Wirkungen bei der Stabilisierung des Bohrlochs.

Nach Erreichen der Endtiefe und Überprüfung durch Lotung erfolgen der Ausbau und die Verfüllung der Bohrung. Der Ablauf entspricht der bereits für den Modellstandort Leipzig geschilderten Verfahrensweise.

Das Bohr- und Ausbaukonzept für den Modellstandort Chemnitz ist in Anlage 1 grafisch dargestellt.

4.2.4 Modellstandort Dresden

Bis ca. 12 m unter Gelände werden am Modellstandort Dresden überwiegend sandig-kiesige Lockergesteinsablagerungen angetroffen, die bis ca. 85 m von kreidezeitlichen Festgesteinen und anschließend bis zur Endtiefe von den Monzoniten des Meissner Massivs unterlagert werden. Das zu erwartende Vorprofil für den Modellstandort ist in Anlage 1 enthalten.

Es ist vorgesehen, die Lockergesteine sowie den entfestigten Bereich der Kreide verrohrt im Trockenbohrverfahren, z.B. mit Schnecke zu durchteufen. Der Bohrdurchmesser wird unter Berücksichtigung der Verrohrung mit 219 mm bzw. 222 mm gewählt. Das Trockenbohrverfahren stellt für diesen Bereich das effizienteste Bohrverfahren dar. Zudem werden keine Spülung und kein Kompressor benötigt.

Anschließend wird zum Imlochhammerbohren gewechselt. Das Bohrverfahren wird gewählt, da von den ca. 340 Bohrmeter im Festgestein ca. 265 Bohrmeter durch die Meissner Monzonite verlaufen. In diesen ist beim Hammerbohren mit dem größten Bohrfortschritt zu rechnen. Die Bohrung wird bis zur Endtiefe in einem Bohrdurchmesser von 198 mm niedergebracht. Generell wird in den Monzoniten keine wesentliche Wasserführung erwartet. Ausnahmen können auch hier hydraulisch wirksame Kluft- und Störungszonen darstellen. In der vorliegenden Modellbetrachtung wird diesbezüglich von keiner wesentlichen Klüftung / Störung des Gebirgsverbandes und entsprechend standfesten Bohrlöchern ausgegangen. Bei Auftreten von Nachfall / nicht standfestem Gebirge ist einzelfallspezifisch über das Nachziehen der Verrohrung bzw. die Zementation der betroffenen Bereiche zu entscheiden (siehe entsprechende Ausführungen zum Modellstandort Leipzig).

Nach Erreichen der Endtiefe und Überprüfung durch Lotung erfolgt der Ausbau und die Verfüllung der Bohrung. Der Ablauf entspricht der bereits für den Modellstandort Leipzig geschilderten Verfahrensweise.

Das Bohr- und Ausbaukonzept für den Modellstandort Dresden ist in Anlage 1 grafisch dargestellt.

4.2.5 Innovative Bohrverfahren

Im Zuge der Erarbeitung der Bohrkonzepte wurde auch zu innovativen Bohrverfahren recherchiert.

Hydraulische Hämmer bzw. Druckwasserhämmer bei denen als Spülmedium Wasser eingesetzt wird, sind bereits auf dem Markt verfügbar. Sie arbeiten mit einem Arbeitsdruck von 120 – 180 bar, einer Schlagfrequenz von ca. 70 Hertz und einer Rotation von 80 -150 U/min. Im Unterschied zu pneumatischen Hämmern wird mit einem inkompressiblen Spülungsmedium gearbeitet. Die Aufstiegs geschwindigkeit der Bohrspülung beträgt ca. 1 m/s. Da der hydrostatische Druck der Spülung im Gestänge den Gebirgsdruck weitgehend kompensiert, ist auch mit zunehmender Tiefe und bei hohem Grundwasserandrang kaum mit einer Abnahme der Bohrgeschwindigkeit zu rechnen.

Weitere Vorteile beim Einsatz eines hydraulischen Hammers liegen in einer höheren Maßhaltigkeit der Bohrung und einem geringeren Verbrauch an Betriebs- und Hilfsstoffen.

Ein Nachteil der hydraulischen Hämmer besteht darin, dass sie anfällig gegenüber abrasiven Stoffen in der Spülflüssigkeit sind. Daraus folgt, dass entweder eine sehr aufwändige Aufbereitung der Bohrspülung auf Klarwasserniveau oder eine permanente Frischwasserzufuhr und Entsorgung der austretenden Spülung erforderlich ist.

Hierin wird der Hauptgrund für die bisher vergleichsweise geringe Verbreitung dieser Hämmer gesehen. Ein weiterer Grund könnten die deutlich höheren Anschaffungskosten sein, die das 3-4-fache eines pneumatischen Hammers betragen. Aufgrund dieser Faktoren ist hinsichtlich der hier durchgeführten Betrachtungen nicht zu erwarten, dass der alternative Einsatz hydraulischer Hämmer eine effizientere bzw. wirtschaftlichere Alternative zu den erfolgten bohrtechnischen Planungen darstellt.

Das Elektroimpulsverfahren (EIV), welches an der TU Dresden entwickelt wurde, benutzt zur Zerkleinerung von festem Gestein Hochspannungsimpulse, die an der Bohrlochsole austreten. Es wurde entwickelt, um beim Tiefbohren nach Erdöl und Erdgas, eine kostengünstigere Alternative zum Rotarybohren mit Rollen- oder PDC-Meißel zu finden, welches in festen Gesteinen zu einem hohen Verschleiß an Bohrwerkzeugen führt. Im Ergebnis der Entwicklungsarbeit soll ein komplettes Bohrsystem zur Verfügung stehen, das als modulare Einheit auf eine konventionelle Bohranlage aufgesetzt wird. Der Bohrdurchmesser des derzeit vorhandenen Bohrsystems beträgt 311 mm. Das Bohrverfahren befindet sich derzeit in einer praktischen Erprobungsphase und steht noch nicht kommerziell zur Verfügung.

4.2.6 Kostenschätzung

Das für jeden Modellstandort aufgestellte Bohrkonzept wurde kostenmäßig untersetzt. Gemäß den Ergebnissen der geothermischen Modellierung (vgl. Punkt 6), ist an den Standorten Leipzig und Dresden von insgesamt neun zu errichtenden Erdwärmesonden bzw. am Standort Chemnitz von elf zu errichtenden Erdwärmesonden auszugehen.

Die auf dieser Basis erarbeiteten Kostenschätzungen sind in Anlage 2 enthalten. Nicht enthalten in der Kostenschätzung sind Planungsleistungen. Es wird darauf hingewiesen, dass die Kostenschätzung nur eine Orientierung für konkrete Bauvorhaben darstellen kann. Alle angegebenen Kosten sind Nettokosten.

Tabelle 5: Zusammenfassung Kostenschätzung

Modellstandort	Gesamtkosten	Preis pro Bohrmeter
Leipzig	1 094 650 €	348 €
Chemnitz	1 166 600 €	303 €
Dresden	1 132 900 €	360 €

Wie aus Tabelle 5 ersichtlich ist, liegen die Errichtungskosten für die konzipierten mitteltiefen Erdwärmesonden an den Modellstandorten bei ca. 1,1 Mio. €. Dabei sind die Kosten am Modellstandort Chemnitz, an dem im Vergleich zu den beiden anderen Standorten 2 Erdwärmesonden zusätzlich errichtet werden müssen, nur unwesentlich höher. Der Grund hierfür ist im vorgesehenen Einsatz des Spülbohrens zu sehen, dass gegenüber dem Hammerbohren Kostenvorteile aufweist. Dementsprechend sind die Kosten pro Bohrmeter am Standort Chemnitz mit 303 €/m am geringsten, gefolgt von Leipzig mit 348 €/m und Dresden mit 360 €/m.

5 Temperaturmessungen und Ableitung von Temperaturprofilen

5.1 Temperaturmessungen

Die möglichst genaue Kenntnis der standortspezifischen Temperaturverhältnisse des Untergrundes stellt eine wichtige Voraussetzung für die nachhaltige Dimensionierung geothermischer Wärmequellsysteme dar. Die ungestörte Untergrundtemperatur am jeweiligen Anlagenstandort beschreibt dabei die Ausgangsverhältnisse, die durch den Wärmeentzug bzw. auch die Wärmeeinspeisung entsprechend verändert werden.

Gemäß Leistungsbeschreibung des Forschungsvorhabens waren zur Ableitung belastbarer Werte für Untergrundtemperaturen und geothermische Gradienten zur Komplettierung bereits vorliegender Daten ergänzende Messungen von Temperaturprofilen an je zwei errichteten, noch nicht angeschlossenen Erdwärmesonden in den Stadtgebieten der Modellstandorte durchzuführen.

Die Messungen wurden im Zeitraum Januar bis November 2018 durchgeführt. Dabei sind die Standorte der Temperaturmessungen vom AG mitgeteilt bzw. mit ihm abgestimmt worden. Einen Überblick über die durchgeführten Messungen gibt folgende Tabelle.

Tabelle 6: Übersicht zu den Temperaturmessungen

Messstandort	Sondenlänge	Entfernung zum Modellstandort	Messdatum	mittlere Untergrundtemperatur
Leipzig, Amselweg	69 m	1,7 km	29.10.2018	11,9 °C
Leipzig, Seehausener Allee	99 m	1,8 km	13.11.2018	11,7 °C-
Chemnitz, Max-Müller Straße	60 m	5,6 km	02.07.2018	10,5 °C
Grüna, Chemnitzer Straße	68 m	10,6 km	27.09.2018	9,6 °C
Dresden, Am Pfarrlehn	99 m	8,5 km	05.01.2018	10,4 °C
Dresden, Söbrigener Straße	120 m	13,0 km	17.08.2018	12,1 °C

Die an den Standorten gemessenen Temperaturprofile sind in Anlage 3 enthalten. Weiterhin enthält Anlage 3 das zugehörige geologische Profil. Da die Bohrerergebnisse noch nicht in die Datenbank des AG eingepflegt sind, entsprechen die Darstellungen bis auf den Standort Dresden, Am Pfarrlehn dem Erkenntnisstand eines Vorprofils. Vor dem Hintergrund der vorliegenden Bearbeitung ist dies jedoch ausreichend.

Die Temperaturmessungen in Leipzig wurden mit ca. 1,7/1,8 km Entfernung relativ nahe am Modellstandort durchgeführt. Sowohl der geologische Aufbau als auch die Bebauungsdichte sowie die Landschaftsverhältnisse entsprechen prinzipiell dem Modellstandort.

Die gemessenen Profile am Standort Leipzig zeigen bis ca. 10 m Tiefe eine deutliche jahreszeitliche Beeinflussung. Es folgt eine Übergangszone, die bis ca. 15 - 20 m u. GOK reicht. Anschließend werden bis ca. 50 m u. GOK weitgehend gleichbleibende Temperaturen gemessen. Dies lässt auf eine Beeinflussung durch Grundwasser schließen. Bis ca. 60 m u. GOK zeigt sich dann eine Temperaturzunahme, die mit bindigen Schichten korreliert. Im Profil Seehausener Allee ergibt sich ab ca. 62 m u. GOK bis zur Endtiefe von 99 m u. GOK ein leichter geothermischer Gradient von 0,5 K auf 37 m. Dagegen kann im Profil Amselweg bis zur Endtiefe von 69 m u. GOK kein geothermischer Gradient abgeleitet werden.

Die Temperaturprofile in Chemnitz wurden in Entfernungen von 5,6 km bzw. 10,6 km vom Modellstandort aufgenommen. Die Messung erfolgten an relativ weit entfernten Standorten, da im Messzeitraum keine näheren, geeigneten bzw. nutzbaren Standorte vorhanden waren.

Beide Messstandorte sind repräsentiert durch eine aufgelockerte Bebauung und einen höheren Grünflächenanteil. Nach den geologischen Vorprofilen befinden sich beide Standorte im Chemnitzer Becken und weisen damit eine vergleichbare Geologie zum Modellstandort auf. Die ermittelten Temperaturverhältnisse können somit näherungsweise auch auf den Modellstandort übertragen werden. Aufgrund ihrer geringeren Tiefe enden sie allerdings in den Ablagerungen der Leukersdorf-Formation oberhalb der Pyroklastite der Planitzformation.

Beide Temperaturprofile (vgl. Anlage 3) sind bis ca. 15 m durch den Gang der Oberflächentemperatur und die sich anschließende Übergangszone beeinflusst. Anschließend sind bis ca. 35 m u. GOK gleichbleibende Temperaturen zu verzeichnen. Ab 35 m u. GOK bis zur Endtiefe von 60 m bzw. 68 m u. GOK sind geothermische Gradienten ableitbar. Dabei verläuft der Abstieg am Standort Grüna bei insgesamt geringerer Untergrundtemperatur mit 0,6 K auf 33 m steiler als am Standort Max-Müller-Straße, wo der Gradient ca. 0,3 K auf 25 m beträgt.

Die Temperaturprofile in Dresden wurden in 8,5 km bzw. 13 km Entfernung vom Modellstandort an der Nossener Brücke aufgenommen. Dabei befindet sich der Standort Am Pfarrlehn in einem Bereich mit komplett unterschiedlicher Geologie im Vergleich zum Modellstandort, da er nördlich der Lausitzer Überschiebung liegt. Daher wird am Standort unter anthropogenen Auffüllungen bis zur Endtiefe durchgängig Granodiorit angetroffen. Das Temperaturprofil dieses Standortes erlaubt dadurch jedoch Rückschlüsse auf den geothermischen Gradienten im kristallinen Grundgebirge.

Dagegen weist der Standort in der Söbrigener Straße eine mit dem Modellstandort vergleichbare Geologie auf. Die Bebauungsdichte ist an beiden Messorten im Vergleich zum Modellstandort deutlich geringer und durch einen höheren Anteil an Grünflächen geprägt. Dadurch sind in den oberflächennahen Bereichen, die einen jahreszeitlichen Gang aufweisen, im Vergleich zum innerstädtischen Modellstandort prinzipiell etwas geringere Temperaturen zu erwarten.

Beide Temperaturprofile sind bis ca. 10 m u. GOK durch den jahreszeitlichen Einfluss geprägt. Anschließend folgen an beiden Standorten Zonen, in denen kaum ein Temperaturanstieg erfolgt (neutrale Zone). Diese Zone reicht am Standort Söbrigener Straße bis ca. 45 m u. GOK, am Standort in Hellerau bis ca. 66 m u. GOK. In der Regel ist ein geringer Temperaturanstieg bis in die beschriebenen Tiefen an das Vorhandensein von Grundwasser geknüpft. Da dies aufgrund der angetroffenen geologischen Verhältnisse jedoch ausgeschlossen werden kann, ist an beiden Standorten von einer tief reichenden neutralen Zone auszugehen.

Anschließend ist bis zur Endtiefe an beiden Standorten ein geothermischer Gradient ableitbar. Dieser beträgt am Standort Söbrigener Straße 2,5 K auf 75 m. Am Standort Hellerau ergibt sich ein Gradient von 1,0 K auf 34 m.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass an fast allen Standorten trotz der relativ geringen Bohrtiefen zwischen 60 m und 120 m geothermische Gradienten abgeleitet werden konnten. Sie sind in Tabelle 7 zusammengefasst und zur besseren Vergleichbarkeit auf eine Tiefe von 100 m bezogen.

Tabelle 7: Ermittelte Gradienten zu den Temperaturmessungen

Messstandort	Sondenlänge	T-Gradient (K/100 m)
Leipzig, Amselweg	69 m	-
Leipzig, Seehausener Allee	99 m	1,35
Chemnitz, Max-Müller -Straße	60 m	1,2
Grüna, Chemnitzer Straße	68 m	1,82
Dresden, Am Pfarrlehn	99 m.	2,94
Dresden, Söbrigener Straße	120 m	3,33

Mit den Temperaturmessungen konnte der diesbezügliche Kenntnisstand in den Bearbeitungsgebieten deutlich verbessert und die für die Güte der nachfolgenden Modellrechnungen (vgl. Kapitel 6) essentielle Kenntnis der ungestörten Untergrundtemperaturen/geothermischen Gradienten auf eine belastbarere Grundlage gestellt werden.

5.2 Ableitung von Temperaturprofilen für die Modellstandorte

Die Ergebnisse der durchgeführten Temperaturmessungen wurden zusammen mit weiteren beim AG vorliegenden Temperaturprofilen zur Ableitung und Modifizierung generalisierter Temperaturprofile an den einzelnen Modellstandorten verwendet. Dabei wurden insbesondere auch die im Rahmen des Forschungsvorhabens zu den sächsischen Gärtnereien aufgestellten Temperaturprofile berücksichtigt (LfULG, 2015).

Die abgeleiteten Temperaturtiefenprofile für die einzelnen Modellstandorte sind in Abbildung 7 grafisch dargestellt.

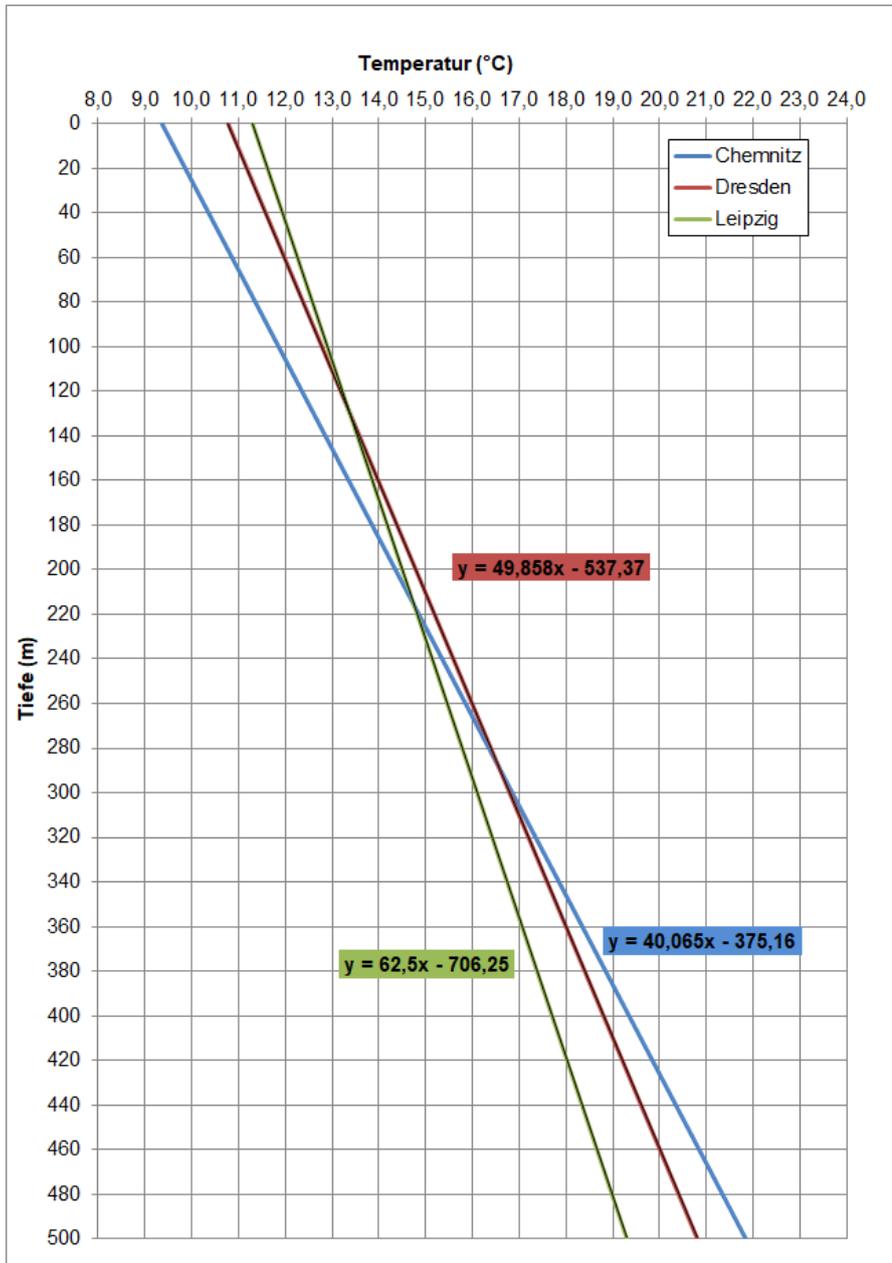


Abbildung 7: Temperaturtiefenprofile der Modellstandorte

Tabelle 8 enthält für die einzelnen Modellstandorte diskrete Untergrundtemperaturen für verschiedene Tiefenstufen, die den in Abbildung 7 dargestellten Temperaturprofilen entsprechen.

Tabelle 8: Untergrundtemperaturen in unterschiedlichen Tiefenstufen

Tiefe (m u. GOK)	Modellstandort	Modellstandort	Modellstandort
	Leipzig	Chemnitz	Dresden
0,1	11,3	9,4	10,8
25	11,7	10,0	11,3
50	12,1	10,6	11,8
75	12,5	11,2	12,3
100	12,9	11,9	12,8
125	13,3	12,5	13,3
150	13,7	13,1	13,8
175	14,1	13,7	14,3
200	14,5	14,4	14,8
225	14,9	15,0	15,3
250	15,3	15,6	15,8
275	15,7	16,2	16,3
300	16,1	16,9	16,8
325	16,5	17,5	17,3
350	16,9	18,1	17,8
375	17,3	18,7	18,3
400	17,7	19,3	18,8
425	18,1	20,0	19,3
450	18,5	20,6	19,8
500	19,3	21,8	20,8
Mittelwert	15,3	15,6	15,8
Mittelwert (0-350 m)	14,1	13,7	14,3

Wie aus Abbildung 7 ersichtlich ist, weisen die Temperaturtiefenprofile unterschiedliche geothermische Gradienten auf. Das Modellgebiet Leipzig ist dabei durch den geringsten Anstieg gekennzeichnet. Er beträgt 1,6 K pro 100 m. Damit ergeben sich in 500 m Tiefe folgende Untergrundtemperaturen:

- Leipzig: 19,3 °C,
- Chemnitz: 21,8 °C,
- Dresden: 20,8 °C.

Diese Temperaturen werden bei der geothermischen Modellierung (vgl. Kapitel 6) am unteren Modellrand der jeweiligen Modellgebiete als Randbedingungen berücksichtigt. Für den oberen Modellrand werden die jeweiligen Temperaturen der Tiefenstufe 0,1 m aus Tabelle 8 als Randbedingung angesetzt. Die Temperaturen an den betrachteten Modellstandorten verhalten sich dabei umgekehrt proportional zur Tiefenstufe 500 m. Für die einzelnen Modellstandorte ergeben sich folgende Werte:

- Leipzig: 11,3 °C,
- Chemnitz: 9,4 °C,
- Dresden: 10,8 °C.

6 Geothermische Modellierung

Die geothermische Modellierung dient der genehmigungskonformen und nachhaltigen Dimensionierung von mitteltiefen Erdwärmesondenanlagen an den einzelnen Modellstandorten. Gleichzeitig können anhand der Ergebnisse die Auswirkungen auf den Untergrund beschrieben werden.

Zur Durchführung der geothermischen Modellierung wurde die Software FEFLOW, Version 7.1 verwendet. Sie dient der Simulation von Strömung und Wärmetransportprozessen in porösen und zerrütteten Medien auf Basis der Finiten-Elemente-Methode. Mit ihr können auch die Prozesse innerhalb der Erdwärmesonden detailliert betrachtet werden. Weiterhin erfolgt die Modellierung unter genauer Berücksichtigung des geologisch/ hydrogeologischen Aufbaus am Standort. Hinsichtlich des Wärmetransportes können sowohl Wärmeleitung als auch Wärmetransport mit dem Grundwasser berücksichtigt werden. Zudem erlaubt das Programm eine detaillierte Prognose der räumlichen und zeitlichen Temperaturentwicklung innerhalb des Modellgebiets.

Die Modelle für die geothermische Modellierung der mitteltiefen Geothermieanlagen an den einzelnen Modellstandorten wurden von der Geländeoberkante bis in 500 m Teufe aufgebaut. Dadurch wurde sichergestellt, dass ein ausreichend großer Abstand zwischen der Unterkante der Erdwärmesonden und der Modellunterkante besteht.

Zur ersten Abschätzung der im Modell zu berücksichtigenden Anzahl der Erdwärmesonden erfolgte für alle Standorte eine Vordimensionierung mit dem analytischen Programm EED.

6.1 Modellstandort Leipzig

6.1.1 Geologischer Überblick

Am Modellstandort Leipzig werden bis ca. 80 m unter Gelände unterschiedliche Lockergesteine aus quartären und tertiären Folgen angetroffen. Die Sedimente bestehen aus Sanden, Kiesen, Tonen und Schluffen. In den tertiären Ablagerungen wird darüber hinaus auch Braunkohle angetroffen.

Im Lockergesteinskomplex sind zwischen ca. 20 – 40 m u. GOK ein quartärer Grundwasserleiter und zwischen ca. 50-75 m ein tertiärer Grundwasserleiter ausgebildet. Beide Grundwasserleiter weisen gespannte Druckverhältnisse auf. Unter dem Lockergestein folgt ab einer Tiefe von ca. 80 m u. GOK bis zur betrachteten Endtiefe von 500 m u. GOK Grauwacke. Bedingt durch die große Mächtigkeit stellt diese geologische älteste Schicht gleichzeitig auch das bedeutendste Element im Hinblick auf die geothermische Nutzung innerhalb des geologischen Modells dar.

Die beschriebenen geologischen Verhältnisse sind in als Schichtenverzeichnis dargestellt.

6.1.2 Aufbau geologisch-hydrogeologisches Strukturmodell

Die Schichtdaten für den hydrogeologischen Modellaufbau im gesamten Modellgebiet Leipzig, die als hydrogeologische Körper aus der Hydrogeologischen Kartierung 1:50.000 vorliegen, wurden Ende Juli 2018 durch den AG übergeben. Dabei handelt es sich um x,y-Werte in einem 50 x 50 m-Raster mit angehängter Tiefeninformation. Diese 3D-Daten wurden aufbereitet und in die firmeninterne Datenbankstruktur importiert. Aus den vorhandenen Punktdaten konnte die Geländeoberkante für das Modellgebiet rekonstruiert werden. Weiterhin wurden die übermittelten Punktdaten in die jeweiligen hydrogeologischen 3D-Modellkörper des Modellgebiets überführt. Dafür ist für jede geologische Einheit die Verbreitungsfläche erzeugt und die Beziehung der Körper untereinander hergestellt worden. Dies stellt eine Voraussetzung für die Erzeugung von 3D-Körpern und Profilschnitten dar. Anlage 2 enthält eine Übersicht über alle im Strukturmodell berücksichtigten hydrogeologischen

Körper. Im folgenden Bearbeitungsschritt wurde das Strukturmodell in ein hydrogeologisches Modell überführt. Dazu ist ein Konzept für die geeignete Datenübernahme in FEFLOW entwickelt worden.

6.1.3 Supermesh-Design und Finite Elemente Netz

Das sogenannte Supermesh in FEFLOW bildet den Rahmen für die Erzeugung eines Finite-Elemente-Netzes und die Grundlage für den weiteren Modellaufbau. Es enthält die entscheidenden geometrischen Informationen des Modellgebiets, wie Gewässer, geologische Verbreitungsgrenzen, Brunnen oder Erdwärmesonden. Diese Elemente üben einen verstärkten Einfluss auf die Grundwasser- und/oder Transportverhältnisse aus und werden später durch Setzen von Randbedingungen und Parameterzuweisungen genauer definiert. Der Algorithmus zur Netzbildung berücksichtigt diese Supermesh-Elemente und verfeinert das Netz in diesen Bereichen. Ein Supermesh kann aus einer beliebigen Anzahl von Polygonen, Linien und Punkten bestehen. Als Polygonelement dient bei der Generierung des Supermeshs der Umriss des Modellgebietes. Weiterhin werden die Verbreitungslinien aller Modellkörper berücksichtigt, um einen lückenlosen Anschluss und eine genaue Diskretisierung entlang der Grenzen zwischen einzelnen Körpern zu gewährleisten. Die Standorte der Erdwärmesonden sind durch Punkte im Supermesh repräsentiert. Durch die Berücksichtigung im Supermesh werden bei der anschließenden Netzbildung die Knoten des Finite-Elemente-Netzes genau auf die Standorte der Erdwärmesonde gelegt. Dadurch kann eine exakte Berücksichtigung der Erdwärmesonden am gewünschten Standort erfolgen. Unter Berücksichtigung der beim Supermesh-Design festgelegten Punkt- und Flächenelemente, der Anzahl zu erzeugender finiter Elemente sowie der Festlegung des Algorithmus der Netzbildung (Dreiecksvermaschung) wurde anschließend ein Finite-Elemente-Netz erzeugt. Im Bereich der Erdwärmesonden ist das Netz feiner diskretisiert worden. Weitere Netzverfeinerungen ergaben sich an den Grenzen von Modellkörpern. Dies wird aus Abbildung 8 deutlich, die das Netz für das Modellgebiet Leipzig zeigt.

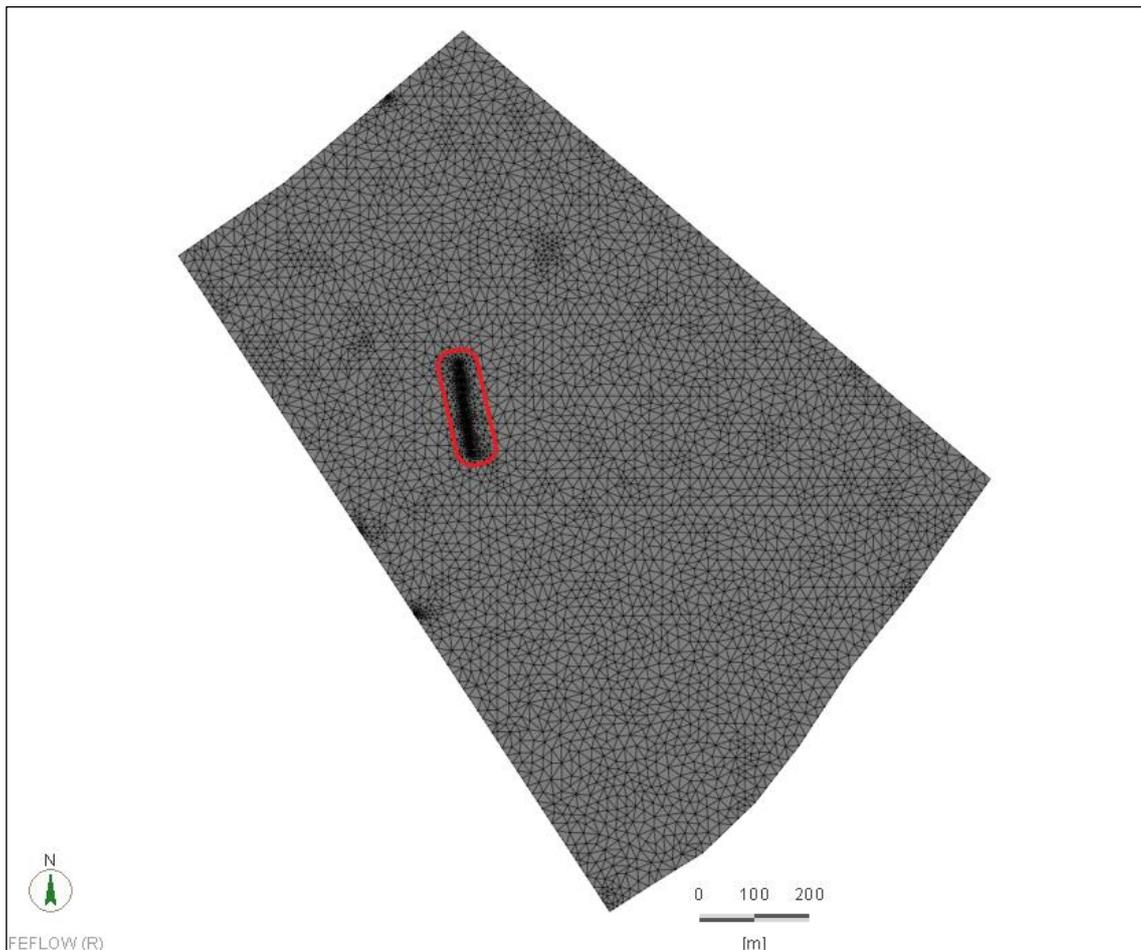


Abbildung 8: Finite-Elemente-Netz Modell Leipzig mit Verdichtung entlang von Supermesh-Elementen

Der Bereich des Sondenfeldes zeichnet sich durch eine besonders hohe Netzdichte aus. Er ist durch die rote Markierung in Abbildung 8 hervorgehoben.

6.1.4 3D-Modellaufbau

Der 3D-Modellaufbau beginnt mit der Konstruktion der Geländeoberkante aus dem zur Verfügung gestellten digitalen Geländemodell. Abbildung 9 enthält die entsprechende Darstellung für das Modellgebiet Leipzig.

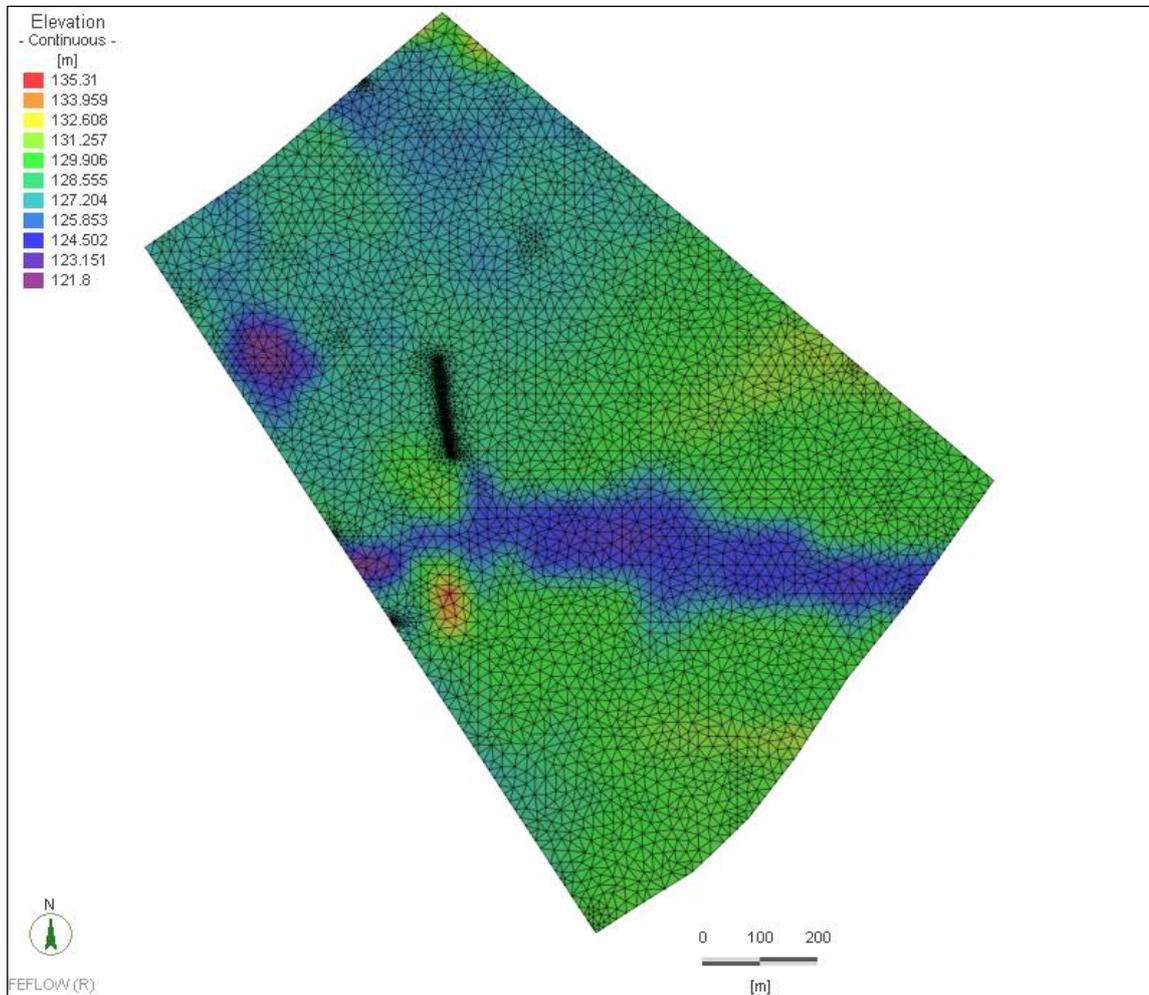


Abbildung 9: Digitales Geländemodell des Modellgebietes Leipzig (Legendenangaben in m NHN)

Ausgehend von den vorliegenden geologischen Daten und dem daraus entwickelten hydrogeologischen Strukturmodell wurde im nächsten Schritt der 3D-Modellaufbau/Schichtaufbau in FEFLOW durchgeführt. Das hydrogeologische Modell setzt sich aus den geologischen Einheiten des Modellgebietes zusammen.

Für die Bildung der Layerober- bzw. -unterkanten wurden die aufbereiteten Modelldaten aus der firmeninternen Datenbank verwendet. Dafür ist für das Modellgebiet die Modelloberkante sowie die Unterkanten jedes hydrogeologischen Körpers exportiert und als Excel-File (x,y,z-Werte) gespeichert worden. Die Excel-Files konnten im folgenden Schritt in FEFLOW eingelesen werden. Über diese Verknüpfung kann den Modellschichten die exakte Modellgeometrie aus dem hydrogeologischen Strukturmodell zugewiesen werden.

Für den beschriebenen Modellaufbau ist zu beachten, dass bei der realisierten Herangehensweise jede Modellschicht über das gesamte Modellgebiet ausgehalten werden muss. Wenn eine geologische Einheit in der Realität auskeilt und nicht überall im Modellgebiet verbreitet ist, wird der entsprechende Bereich, in dem diese Einheit

in der Realität nicht auftritt, im Modell mit einer Mindestmächtigkeit von 0,1 m und den Eigenschaften der dort verbreiteten hydrogeologischen Einheit belegt.

Im Anschluss wurden im Bereich mächtiger hydrogeologischer Einheiten, wie z.B. dem Festgestein Hilfsschichten eingezogen. Diese dienen der Erhöhung des Detaillierungsgrades und führen zu einer verbesserten Modellgenauigkeit. Das im FEFLOW aufgebaute 3D-Modell ist in Abbildung 10 visualisiert. Es verfügt über insgesamt 52 Schichten.

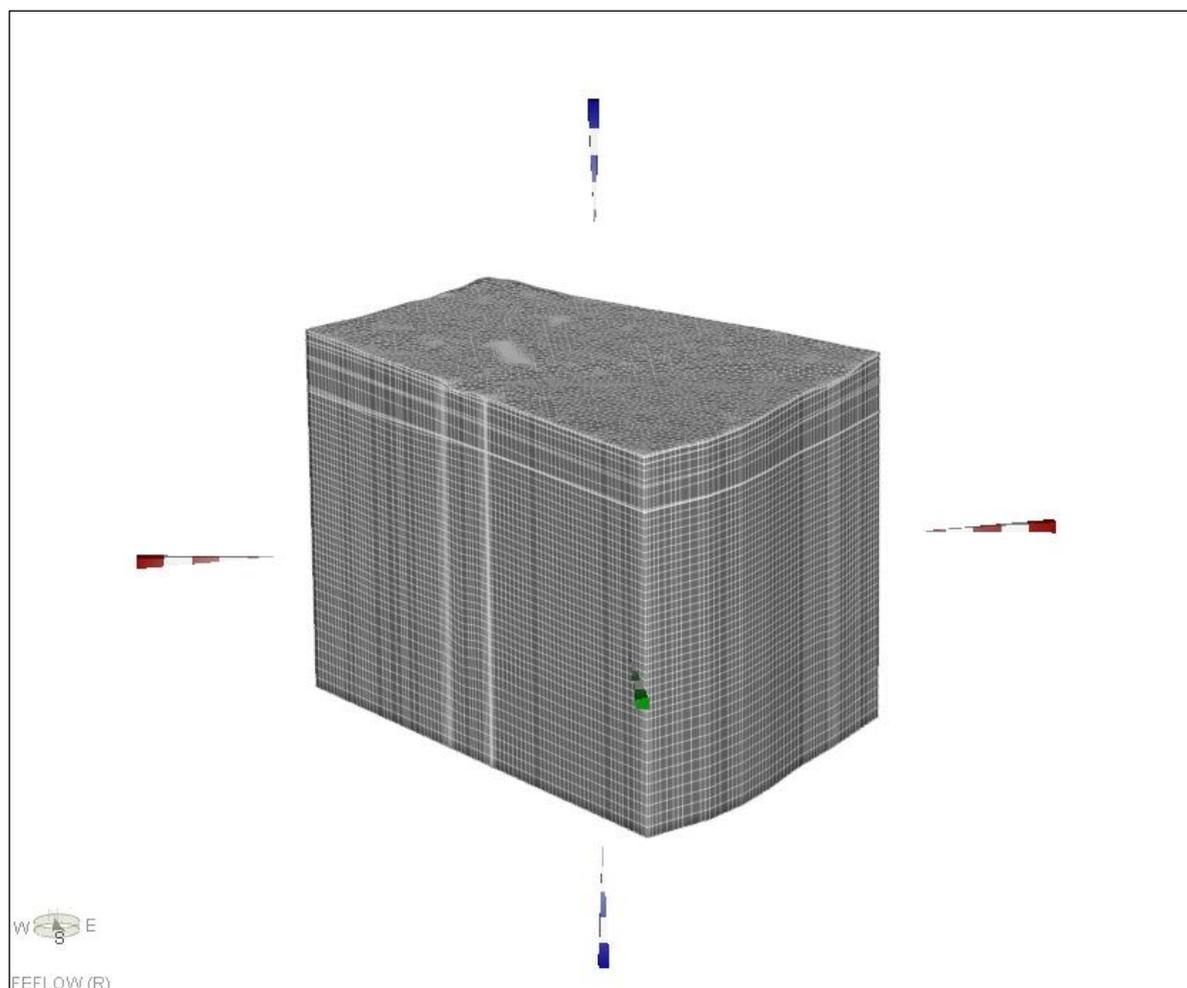


Abbildung 10: 3D-Modellaufbau des Modellgebiets Leipzig

6.1.5 Hydrogeologische Eigenschaften der Modellschichten

Zur Zuweisung der hydrogeologischen Parameter wurden zunächst alle im Modellgebiet vorhandenen hydrogeologischen Einheiten in einer Tabelle erfasst.

Anschließend erfolgte die Parametrisierung. Für die hydrogeologischen Eigenschaften Durchlässigkeit und Porosität wurde zunächst auf die in den Datenbanken des AG gespeicherten Angaben zurückgegriffen. Hier liegen v.a. Werte für die Durchlässigkeit vor. Die Parametrisierung für die Porosität erfolgte anhand der vorliegenden lithologischen Beschreibungen auf Basis von Erfahrungswerten. Berücksichtigung fanden weiterhin die Daten des Forschungsprojektes zum Einsatz von Geothermie in sächsischen Gärtnereibetrieben (LfULG, 2015). Für den Modellstandort Leipzig konnten weiterhin auch die Ergebnisse der geothermischen 3D-Modellierung für das Bauvorhaben der SAB berücksichtigt werden (HGC, 2017).

In

Tabelle 9 sind die bei der Modellierung verwendeten Parameter für das Modellgebiet Leipzig aufgeführt.

Tabelle 9: Hydrogeologische Eigenschaften der Modellschichten, Modellgebiet Leipzig

HGK	Layer	Lithologische Beschreibung	kf-Wert (m/s)	Nutzbare Porosität
0	Anthropogene Bildungen	Aufschüttung	1,0E-06	0,20
1	Nach- bis Vorschüttbildungen	Sand, Kies	5,0E-03	0,22
2	Grundmoräne S2 (Breitenfelder Vorstoß)	Geschiebemergel und –lehm	1,0E-06	0,05
3	Grundmoräne S2 (Bruckdorfer Vorstoß)	Geschiebemergel und –lehm	1,0E-08	0,05
4	Drenthe-Stadium	Sand, Kies	1,0E-04	0,15
5	Grundmoräne S1	Geschiebemergel und –lehm	1,0E-08	0,05
6	Tiefere Mittelterrasse	Sand, Kies	1,0E-04	0,15
7	Nachschütt sedimente undifferenziert, E2	Sand, Kies, Schluff, Ton	1,0E-04	0,15
8	Bitterfelder Decktonkomplex	Ton, Schluff, Sand, Kies, Braunkohle	1,0E-06	0,05
9	Flözkomplex Bitterfeld	Sand, Kies, Schluff, Ton, Braunkohle	1,0E-05	0,10
10	Cottbus-Formation	Sand, wenig Braunkohle	1,0E-04	0,15
11	Rupelschluff, Muschelschluff, Septarienton	Schluff, Ton, Sand	1,0E-06	0,05
12	Flöz 4 (Gröbers)	Braunkohle	1,0E-06	0,05
13	Liegendes Flözkomplex 4	Sand, Schluff	5,0E-04	0,15
14	Klastische Folgen (Molasse)	Konglomerat, Sandstein, Schiefer-ton	5,0E-04	0,05
15	Grauwacke	Grauwacke, untergeordnet, Pelitlagen	5,0E-08	0,05

Bei der richtungsabhängigen Parametrisierung der Durchlässigkeit wurde davon ausgegangen, dass der kf-Wert in vertikaler Richtung 50 % des horizontalen Wertes beträgt.

Die Umsetzung der Parameterbelegung in FEFLOW ist für die Durchlässigkeit in x- Richtung in Abbildung 11 dargestellt.

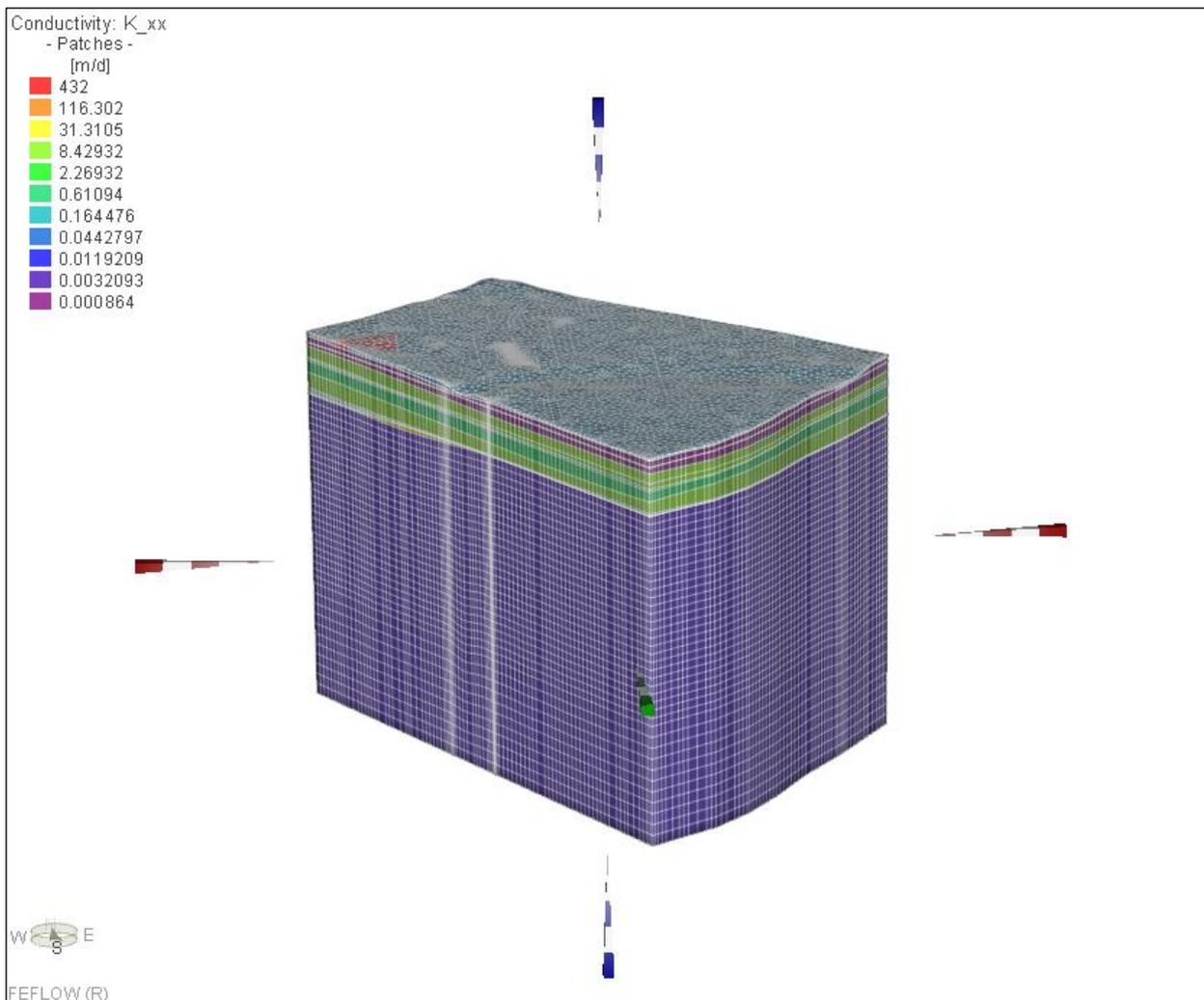


Abbildung 11: Durchlässigkeit in x-Richtung, Modellgebiet Leipzig

6.1.6 Hydrogeologische Randbedingungen

Für die Durchführung der geothermischen Modellierung sind eine Reihe von Randbedingungen zu definieren.

Als hydrogeologische bzw. hydraulische Randbedingungen fungieren der an- und abstromige Rand des Modellgebietes, welche anhand der Grundwasserisohypsen aus der sächsischen Landesgrundwasserdynamik 2016 (LfULG 2019) abgegrenzt wurden. Im Modellgebiet Leipzig liegt der anstromige Rand im Bereich einer Wasserscheide bei ca. 116,5 m HN. Der abstromige Rand des Modellgebiets wird durch die Grundwasserisohypse 115 m HN festgelegt. Daraus resultiert ein Grundwasserfließgefälle von ca. 1 ‰.

Die jeweiligen Wasserstände wurden in den grundwasserführenden Lockergesteinen als Randbedingungen erster Art berücksichtigt.

6.1.7 Geothermische Eigenschaften der Modellschichten

Die Ableitung der Werte für die geothermischen Parameter spezifische Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität erfolgte in Analogie zu den hydrogeologischen Eigenschaften für alle definierten hydrogeologischen Einheiten des Modellgebiets. Dabei wurden die beim AG vorliegenden Ergebnisse aus geophysikalischen Testarbeiten an geothermischen Bohrungen, das bereits erwähnte Forschungsprojekt zur Nutzung von Geothermie in sächsischen Gärtnereien (LfULG, 2015) sowie ergänzend die Ergebnisse eigener durchgeführter Testarbeiten genutzt.

Tabelle 10: Geothermische Eigenschaften der Modellschichten, Modellgebiet Leipzig

HGK	Layer	Lithologische Beschreibung	Spezifische Wärmeleitfähigkeit (W/m ² K)	Spezifische Wärmekapazität (MJ/m ³ K)
0	Anthropogene Bildungen	Aufschüttung	0,3	1,6
1	Nach- bis Vorschüttbildungen	Sand, Kies	0,4	1,4
2	Grundmoräne S2 (Breitenfelder Vorstoß)	Geschiebemergel und -lehm	0,5	1,5
3	Grundmoräne S2 (Bruckdorfer Vorstoß)	Geschiebemergel und -lehm	1,45	1,5
4	Drenthe-Stadium	Sand, Kies	2,4	2,5
5	Grundmoräne S1	Geschiebemergel und -lehm	2,4	2,5
6	Tiefere Mittelterrasse	Sand, Kies	2,4	2,5
7	Nachschüttsedimente undifferenziert, E2	Sand, Kies, Schluff, Ton	2,0	2,45
8	Bitterfelder Decktonkomplex	Ton, Schluff, Sand, Kies, Braunkohle	1,7	2,4
9	Flözkomplex Bitterfeld	Sand, Kies, Schluff, Ton, Braunkohle	2,0	2,45
10	Cottbus-Formation	Sand, wenig Braunkohle	2,4	2,4
11	Rupelschluff, Muschelschluff, Septarienton	Schluff, Ton, Sand	1,7	2,4
12	Flöz 4 (Gröbers)	Braunkohle	0,6	1,8
13	Liegendes Flözkomplex 4	Sand, Schluff	2,0	2,5
14	Klastische Folgen (Molasse)	Konglomerat, Sandstein, Schiefertone	2,3	2,2
15	Grauwacke	Grauwacke, untergeordnet, Pelitlagen	2,6	2,2

Bei der geothermischen Modellierung in FEFLOW ist die Eingabe der spezifischen Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität getrennt nach Feststoff und Fluid erforderlich. Für das Fluid Wasser wird dabei generell eine spezifische Wärmeleitfähigkeit von 0,65 W/m²·K und eine spezifische Wärmekapazität von 4,2 MJ/m³·K angesetzt. Die Umrechnung der in Tabelle 10 angegebenen Werte erfolgt über die nutzbare Porosität.

6.1.8 Geothermische Randbedingungen

Die Ableitung der Temperaturrandbedingungen ist in Abschnitt 5.2 ausführlich beschrieben worden. Für das Modellgebiet Leipzig wurde gemäß Tabelle 8 an der Modellunterkante eine Temperatur von 19,3 °C angesetzt. An der Modelloberkante sind 11,3 °C angesetzt worden. Beide Werte fanden als Randbedingungen 1. Art Berücksichtigung.

Weiterhin sind als Voraussetzung für die geothermische Modellierung Temperaturrandbedingungen zu definieren, die beim Betrieb der Erdwärmesonden sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall nicht unter- bzw. überschritten werden dürfen. Nach Abstimmung mit dem AG wurden dabei folgende Werte angesetzt:

■ Heizen:

Gemäß LfULG, 2014 „Erdwärmesonden: Informationsbroschüre zur Nutzung oberflächennaher Geothermie in Sachsen“ sollte eine absolute Minimaltemperatur von -3 °C nicht unterschritten werden. Unter Berücksichtigung dieser Empfehlung resultiert daraus bei einer angesetzten Spreizung von 5 K eine minimale Solemitteltemperatur von -0,5°C.

■ Kühlen

Gemäß VDI 4640, Blatt 2 (VDI, 2001) ist im Grundlastfall eine Temperaturerhöhung von 11 K gegenüber ungestörter Untergrundtemperatur und im Spitzenlastfall von 17 K zulässig. Da zum Zeitpunkt der Modellrechnungen die VDI 4640, Teil 2 – Stand 2019 noch nicht vorlag, erfolgte die Festlegung der maximal zulässigen Temperaturen unter Bezugnahme auf die damals gültige Fassung der VDI 4640, Teil 2. Dies gilt für die durchgeführten Modellrechnungen an allen drei Standorten.

Die ungestörte Untergrundtemperatur über die Sondenlänge beträgt im Modellgebiet Leipzig gemäß Tabelle 8 14,1°C. Damit ergeben sich folgende Werte:

- Grundlast: 14,1°C + 11 K 25,1°C
- Spitzenlast: 14,1°C + 17 K 31,1°C

6.1.9 Wärmeentzug/ Wärmeeintrag

Die Erdwärmesonden wurden als innere Randbedingung BHE (Borehole Heat Exchanger) berücksichtigt, die die reale Geometrie einer Erdwärmesonde zu einem Linienelement abstrahiert. Die Lösung der innerhalb der Erdwärmesonde ablaufenden Prozesse beruht dabei auf dem analytischen Ansatz nach Eskilson, der z.B. auch im analytischen Softwareprodukt EED Verwendung findet.

Bei der geothermischen Modellierung werden dabei der vorgesehene Bohrdurchmesser, Geometrie und Material der Erdwärmesonde, die spezifischen Eigenschaften des Sondenfluids (Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials gemäß beschriebenem Bohrkonzept aus Abschnitt 4.2.2 berücksichtigt.

Der Durchsatz durch die Sondenanlage entspricht dem angegebenen Wärmequellendurchsatz einer exemplarisch ausgewählten Wärmepumpe (Novellan SIP 100 H). Für 200 kW werden dabei zwei Wärmepumpen mit einem Durchsatz von je 18 m³/h, also insgesamt 36 m³/h benötigt.

Damit ergibt sich bei insgesamt neun Erdwärmesonden pro Erdwärmesonde ein Durchsatz von 4,0 m³/h.

Für den sondenspezifischen Wärmeentzug bzw. Wärmeeintrag wurde die durch den AG vorgegebene Energetik unter Berücksichtigung der benannten Jahresarbeitszahlen angesetzt: Für die Kühlung wurde dabei in der Grundlast von freier Kühlung, in der Spitzenlast von aktiver Kühlung ausgegangen. Die Umsetzung der Spitzenlasten erfolgte durch eine Verfeinerung der Zeitschrittweite in den betreffenden Monaten. Die Lastspitzen wurden dabei jeweils zur Monatsmitte angesetzt. Die in FEFLOW eingelesenen Entzugs- und Eintragsfunktionen sind in Anlage 5 enthalten.

6.1.10 Durchführung der Modellierung

Vor der Implementierung der Erdwärmesonden in das Modell wurde unter Berücksichtigung der beschriebenen Temperaturrandbedingungen zunächst ein stationäres „Leermodell“ zur Ermittlung der Ausgangswerte der Temperaturverteilung gerechnet. Die anschließende geothermische Modellierung erfolgte über einen Zeitraum von 50 Jahren.

Für alle simulierten Varianten erfolgte der Modellstart im Januar des 1. Jahres und endete im Dezember des 50. Jahres. Sowohl die Grundwasserströmung als auch der Wärmetransport wurden instationär berechnet.

Auf eine vorherige Kalibrierung des Strömungsmodells konnte verzichtet werden, da die Grundwasserströmung über die gesetzten Randbedingungen am ober- und unterstromigen Modellrand abgebildet wurden, und durch die Erdwärmesonden selbst keine Beeinflussung der Grundwasserströmungsverhältnisse erfolgt.

6.1.11 Modellergebnisse

Das Resultat mehrerer Simulationen, bei denen die Anzahl der Erdwärmesonden variiert wurde, ergab, dass neun Sonden à 350 m ausreichend zur Abdeckung der definierten Lasten sind.

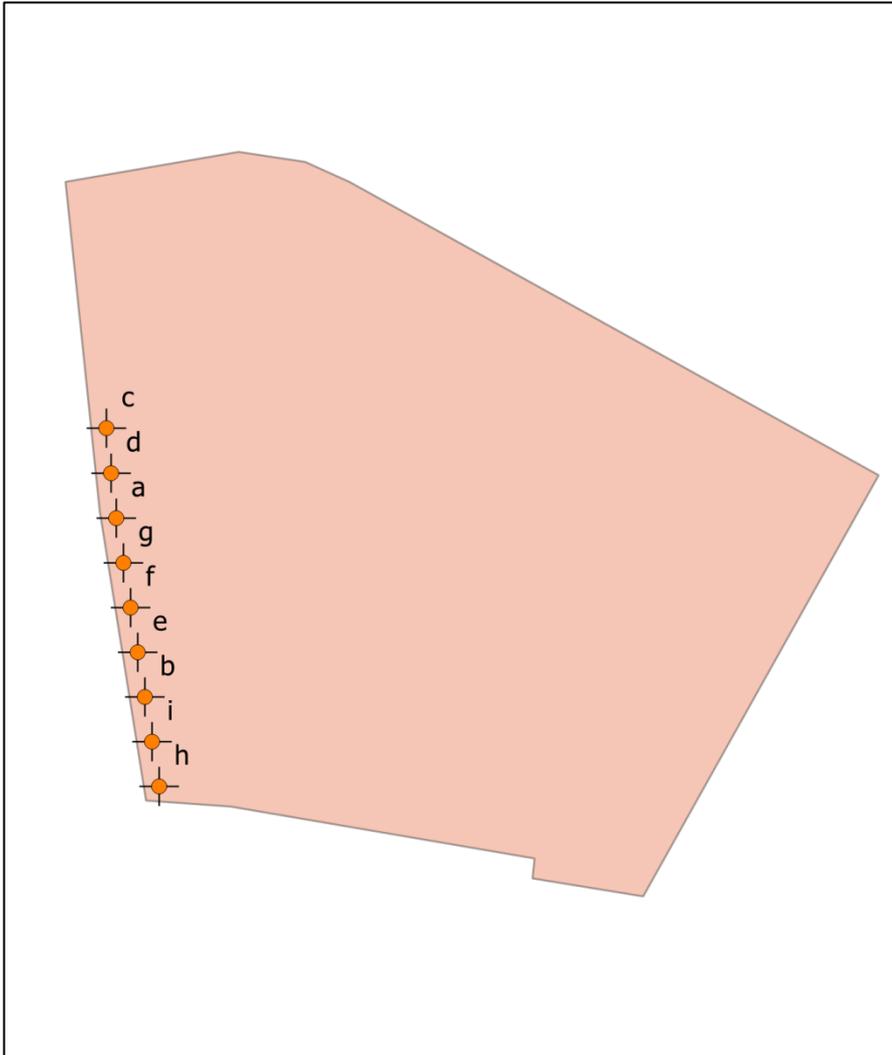


Abbildung 12: Lage der Sonden innerhalb des Modellstandorts Leipzig, Maßstab 1:2.500

Die Lage der Sonden, die untereinander einen Abstand von 15 m aufweisen, ist aus Abbildung 12 ersichtlich. Die Sonden wurden an allen Modellstandorten nah an der Grundstücksgrenze positioniert. Hier lag die Annahme zugrunde, dass im urbanen Raum bei Neubebauung vorhandener Grundstücke eine effiziente Ausnutzung des Grundstückes erfolgt. Sowohl hinsichtlich der endgültigen Nutzung, z.B. bei Tiefgaragen als auch hinsichtlich des Bauablaufs, beispielsweise durch die Lage von Sonden in der Baugrube ergeben sich dabei zahlreiche Wechselwirkungen mit der Geothermienutzung. Diese werden durch eine Positionierung der Sonden außerhalb der Baugrube und nah an der Grundstücksgrenze wesentlich minimiert.

Ein wesentliches Modellergebnis stellt die Entwicklung der Soletemperaturen in den Erdwärmesonden über den Modellierungszeitraum dar.

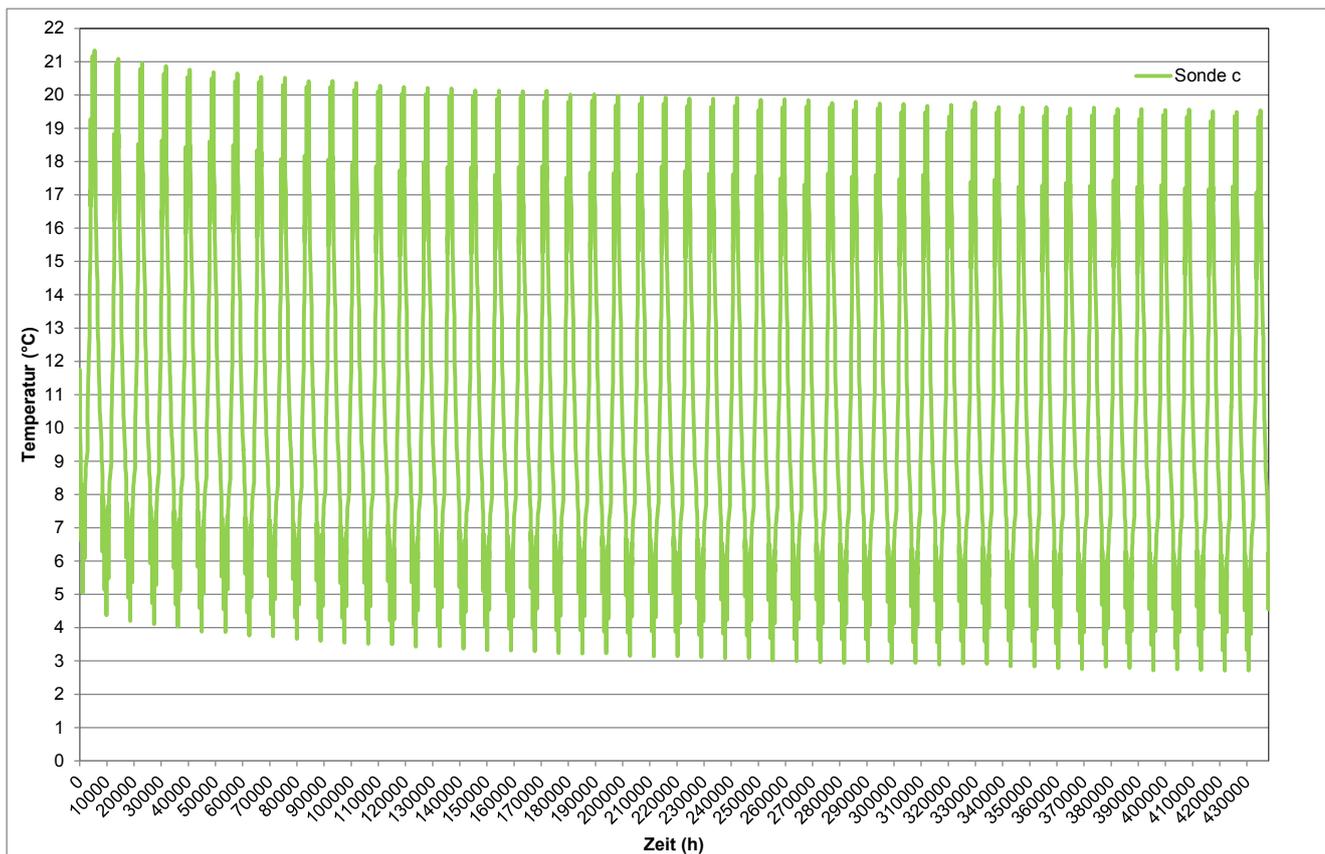


Abbildung 13: Entwicklung der mittleren Sondentemperaturen über 50 Jahre- „wärmste“ Sonde, Modellgebiet Leipzig

In Abbildung 13 ist exemplarisch der Temperaturverlauf für die „wärmste“ Sonde des Sondenfeldes dargestellt.

Da die abzudeckenden energetischen Anforderungen deutlich heizlastig sind, nehmen die prognostizierten Soletemperaturen über die Betrachtungsdauer kontinuierlich ab. Für die wärmste Sonde ist nach 50 Jahren eine minimale Solemitteltemperatur von 2,7 °C zu erwarten.

Die maximalen Solemitteltemperaturen bei sommerlicher Kühlung werden in den Anfangsjahren erzielt. Sie nehmen aufgrund der fortschreitenden Auskühlung des Untergrundes über den Betrachtungszeitraum ebenfalls ab. Als Maximalwert werden 21,3 °C erreicht.

Abbildung 14 zeigt als Pendant den Temperaturverlauf für die „kälteste“ Sonde des Modellgebiets Leipzig. Für sie wird nach 50 Jahren eine minimale Solemitteltemperatur von -0,1 °C prognostiziert. Der Maximalwert infolge Kühlung beträgt für diese Sonde 22,7 °C.

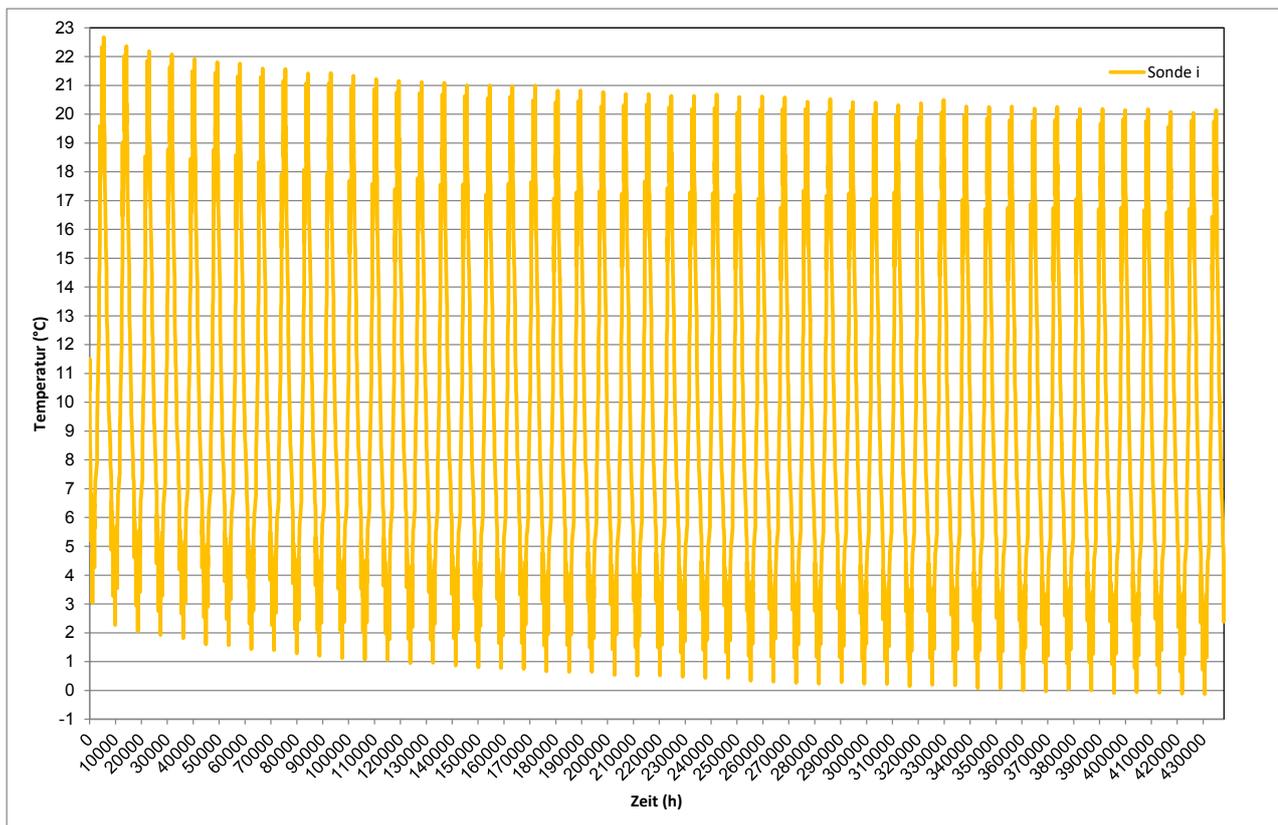


Abbildung 14: Entwicklung der mittleren Sondentemperaturen über 50 Jahre- „kälteste“ Sonde, Modellgebiet Leipzig

Zur Darstellung der Auswirkungen auf den Untergrund wurden Karten mit den Beeinflussungsbereichen erstellt. Dabei sind in Abstimmung mit dem AG die folgenden hydrogeologischen Einheiten betrachtet worden:

- Pleistozäner Grundwasserleiter,
- Tertiärer Grundwasserleiter,
- Festgesteinsbereich – Grauwacke.

Zudem wurde bei den Darstellungen zwischen Heiz- und Kühlperiode unterschieden.

Die Darstellungen für das Modellgebiet Leipzig sind in Anlage 6 enthalten. Alle Abbildungen beziehen sich auf den gesamten Bereich in dem eine Beeinflussung durch die Erdwärmesonden nachweisbar ist ($\Delta T \geq 0,1 \text{ K}$).

Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass sowohl im pleistozänen als auch im tertiären Grundwasserleiter eine leichte Verfrachtung der Temperaturbeeinflussung in Grundwasserfließrichtung zu beobachten ist. Diese ist im tertiären Grundwasserleiter ausgeprägter als im pleistozänen Grundwasserleiter.

Im Bereich der Grauwacke, aus der der größte Anteil der Erdwärme gewonnen wird, sind elliptische Beeinflussungsbereiche um die Sonden ausgebildet. Dort ist im unteren Bereich im Vergleich zum ebenfalls dargestellten oberen Bereich eine größere Ausdehnung des beeinflussten Bereiches zu erkennen.

Eine anschauliche Erklärung für die beschriebenen Unterschiede in den Beeinflussungsbereichen liefern die Schnittdarstellungen in Längsrichtung der Temperaturbeeinflussung, die ebenfalls in Anlage 6 enthalten sind. Hier ist deutlich zu erkennen, dass durch die Erdwärmesonden eine massive vertikale Beeinflussung des natürlichen Untergrundtemperaturregimes erfolgt.

In den folgenden Tabellen sind die Größen der Beeinflussungsbereiche ($\Delta T \geq 0,1 \text{ K}$) aus Anlage 6, getrennt für Heiz- und Kühlperiode, zusammengefasst.

Tabelle 11: Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche Ende Heizperiode, Modellgebiet Leipzig

Hydrogeologische Einheit	Längsausdehnung	Querausdehnung
Pleistozäner Grundwasserleiter (HGK 6)	265 m	175 m
Tertiärer Grundwasserleiter (HGK 10)	300 m	220 m
Grauwacke (HGK 15), 175 m Tiefe	275 m	220 m
Grauwacke (HGK 15), 330 m Tiefe	305 m	245 m

Es wird deutlich, dass die Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche in den betrachteten hydrogeologischen Einheiten am Ende der jeweiligen Betriebszustände Heizen und Kühlen identisch ist bzw. sich nur unwesentlich unterscheidet. Dies geht anschaulich auch aus den vertikalen Längsschnitten in Anlage 6 hervor. Hier ist deutlich zu erkennen, dass Unterschiede im Temperaturregime zwischen den beiden Betriebszuständen auf den Nahbereich der Sondenanlage beschränkt sind.

Tabelle 12: Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche Ende Kühlperiode, Modellgebiet Leipzig

Hydrogeologische Einheit	Längsausdehnung	Querausdehnung
Pleistozäner Grundwasserleiter (HGK 6)	265 m	170 m
Tertiärer Grundwasserleiter (HGK 10)	300 m	220 m
Grauwacke (HGK 15), 175 m Tiefe	275 m	220 m
Grauwacke (HGK 15), 330 m Tiefe	310 m	245 m

Weiterhin geht aus den Darstellungen in Anlage 6 hervor, dass sich um die Erdwärmesonden aufgrund des deutlich heizlastigen Betriebs ein klarer Abkühlungsbereich ausgebildet hat, der durch die in ihrer Größenordnung wesentlich geringere Kühlarbeit nur leicht beeinflusst wird. Daher unterscheiden sich die Darstellungen zum Ende der Heiz- und Kühlperiode nur wenig, da die Kühlung nicht ausreicht um die heizungsbedingte Abkühlung des Untergrundes auszugleichen bzw. erheblich zu reduzieren.

Für die betrachteten hydrogeologischen Körper können die im Folgenden benannten Unterschiede abgeleitet werden. In allen hydrogeologischen Körpern sind am Ende der Kühlperiode im Vergleich zur Heizperiode im unmittelbaren Umfeld der Sonden höhere Untergrundtemperaturen zu verzeichnen. Zudem weist der äußere Rand des beeinflussten Bereichs im unteren Abschnitt der Grauwacke am Ende der Kühlperiode gegenüber der Heizperiode eine um 0,4 K höhere Untergrundtemperatur auf.

Wie bereits erläutert, beziehen sich die Darstellungen in Anlage 6 auf die beeinflussten Bereiche, die sich mindestens 0,1 K von der ungestörten Untergrundtemperatur unterscheiden. Folglich resultieren daraus für größere Temperaturunterschiede geringere Beeinflussungsbereiche. Als Beispiel wird an dieser Stelle die Relation zur 1 K Temperaturdifferenz aufgeführt. Im Modellgebiet Leipzig beträgt bei einer angesetzten Temperaturdifferenz von 1 K gegenüber der ungestörten Untergrundtemperatur die Längsausdehnung der in ihrer Temperatur veränderten Bereiche nur etwa 50 % der in Tabelle 11 und Tabelle 12 angegebenen Werte. In der Querausdehnung reduziert sich der beeinflusste Bereich auf ca. 35% der Werte in Tabelle 11 und Tabelle 12.

6.2 Modellstandort Chemnitz

6.2.1 Geologischer Überblick

Am Modellstandort Chemnitz sind bis ca. 2 m unter Gelände holozäne Lockergesteinsablagerungen zu erwarten, die jedoch nicht grundwassererfüllt sind.

Bohrdaten) zusammengestellt. Im Ergebnis der Betrachtungen ergaben sich 23 hydrogeologische Einheiten, die für das geologische Strukturmodell erstellt wurden. Sie sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 13: Normalprofil für den Modellstandort Chemnitz

Code	HYE	Geologische Einheit
00	11100	Anthropogene Bildungen, undifferenziert
01	11320	Auelehm (bindiger Anteil der Auensedimente)
03	11378	Kiesanteil der Auensedimente großer Auen (Elbe, Mulde, Saale, Elster, Neiße)
04	12210	Handlehm, Fließlehm
05	12200	Löss und Löss-Derivate
06	12800	Blockschutt, Schuttdecken
08	12500	Niederterrassen (TNT und HNT), undifferenziert
09	14510	Tiefere Mittelterrasse (TMT), undifferenziert
12	16150	glazilimnische Vorschüttimente, E2v
13	16245	Mittlere Mittelterrasse (MMT), E2, undifferenziert
15	16350	Grundmoräne, E1
17	16360	glazilimnische Vorschüttimente, E1v
18	16410	Höhere Mittelterrasse (HMT) Frühelsterterrasse, undifferenziert
19	18210	Mittlere Hochterrasse (MHT), undifferenziert
192	10016	Höhere Hochterrasse (HHT), allgemein
311	95522	Obere Sedimentgruppe (Schluffstein, Sandstein, Tonstein, Konglomerat)
30	95506	Zeisigwald-Tuff (Pyroklastit)
312	95504	Untere Sedimentgruppe (Schluffstein, Sandstein, Tonstein, Konglomerat, Karbonat, Pyroklastit)
321	78960	„Rochlitz“-Ignimbrit (vgl. Rochlitz-Formation), zeitgleiche Bildung
322		Pyroklastite der Planitzformation
323	78671	Grüna-Tuff
33	95514	Konglomerat, Sandstein, Schluffstein, Kalkstein (Härtensdorf-Formation)
60	96602	Kambroordovizische Phyllite

Codierung der Bohrungen anhand des Normalprofils und Erstellung der Verbreitungsgrenzen

Hauptaufgabe bei der Vorbereitung der Modellierung des Strukturmodells und wichtiger Bestandteil der Grundlagenerarbeitung war die Codierung sämtlicher genutzter Bohrungen und die Anpassung der Verbreitungsgrenzen der geologischen Einheiten. Dabei wurden den angesprochenen Schichten der Bohrprofile entsprechend des Normalprofils eindeutige Nummern (Code/HYE) zugewiesen.

Im Anschluss der Bohrungscodierung sind aus den gewonnenen Informationen die entsprechenden Verbreitungsflächen jedes darzustellenden hydrogeologischen Körpers erstellt worden. Das Ziel bestand in der Erzeugung eines in sich homogenen Datensatzes ohne Widerspruch zwischen Bohrungsinformationen sowie einer Verbreitungsfläche als Ausgangsbasis für die Konstruktion und 3D-Modellierung der geologischen Einheiten.

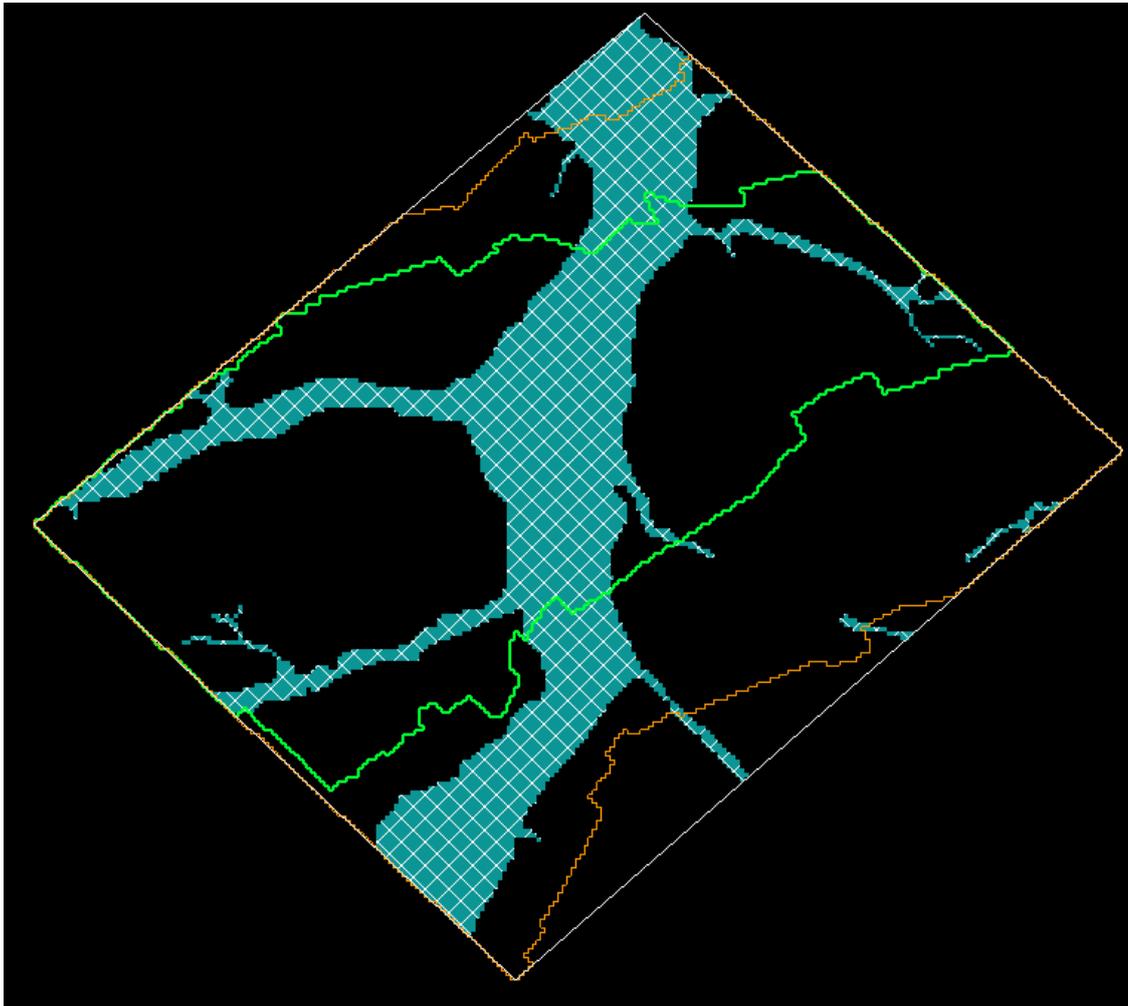


Abbildung 16: Verbreitungsflächen unterschiedlicher geologischer Einheiten

In Abbildung 16 sind beispielhaft die Verbreitungsflächen für den Auenkies (blau-weiß-kariert), den Zeisigwald-Tuff (grün) und die untere Sedimentgruppe der Leukersdorf-Formation (orange) dargestellt.

6.2.4 3D-Konstruktion der geologischen Körper

Im Ergebnis der beschriebenen Grundlagenerarbeitung standen für die folgende 3D-Modellierung für jede geologische Einheit eine Verbreitungsgrenze und ein codierter Punktdatenbestand zur Verfügung, der am konkreten Punkt die über die Einzelschichten aufsummierte Gesamtmächtigkeit für die geologische Einheit angibt.

Setzen von Stützstellen

Zusätzlich zu den Punktdaten der Bohrungen, welche auf tatsächlichen Werten beruhen, sind zur Modellierung von Flächen und Körpern weitere Stützstellen erforderlich. Diese Stützstellen sollen eine numerische Interpolation von Höhen in den Bereichen mit zu geringer Bohrdatendichte ermöglichen. Weiterhin dienen Stützstellen der Modellierung von Geometrien, die zwar aus dem geologischen Verständnis der Genese der Bildungen oder aus weiteren Datenquellen wie geologischen Karten mit konstruierten Isolinien oder geologischen Schnitten vermutet werden können, die aber von den vorliegenden Bohrdaten nicht ausreichend oder flächendeckend beschrieben werden. Weiterhin sind Stützstellen an Bohrpunkten zu setzen, an denen ein hydrogeologischer Körper zwar angetroffen, aber nicht durchteuft wurde. Mit diesen Stützstellen wird das Vorhandensein des hydrogeologischen Körpers am Standort der Bohrung zwar explizit berücksichtigt, die Lage der Unterkante wird jedoch lediglich geschätzt.

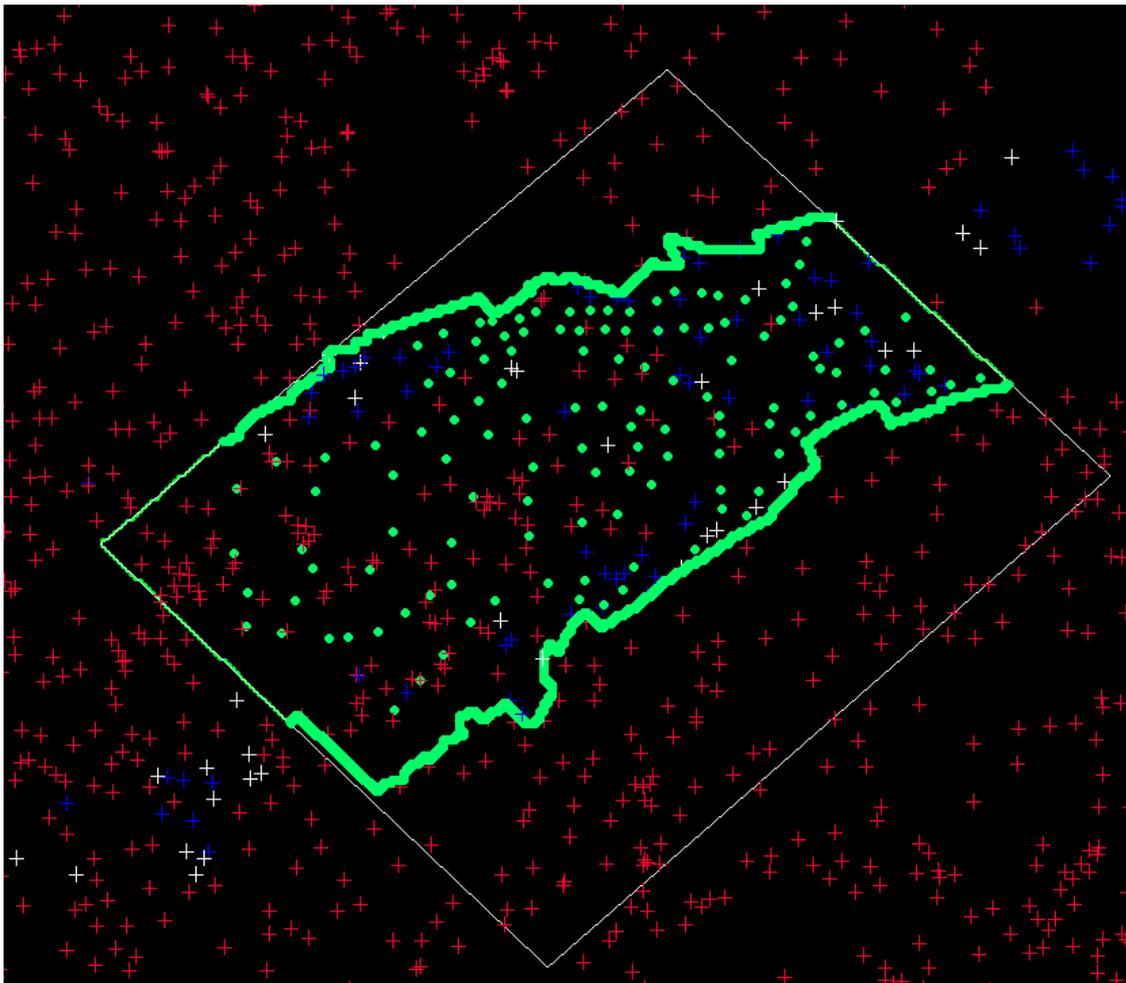


Abbildung 17: Verwendeter Punktdatenbestand für die Interpolation, Beispiel Zeisigwald-Tuff

In Abbildung 17 ist der verwendete Punktdatenbestand für die Modellierung des Zeisigwald-Tuffs dargestellt. Dabei ist zwischen Bohrungen mit durchteufter Unterkante (weiße Kreuze), Bohrungen mit nicht durchteufter Unterkante (blaue Kreuze) und händisch gesetzten Stützstellen (grüne Punkte) unterschieden. Des Weiteren sind Bohrungen dargestellt, die die zu modellierende Einheit nicht angetroffen haben, da sie zu flach sind (rote Kreuze).

Konstruktion der Modellkörper für die geologischen Einheiten

Für die Erstellung der Modellkörper wurde die 3D-Software GEOVIA SURPAC verwendet. Mit Hilfe der Software sind anhand der zuvor erzeugten Punkt- und Flächendaten mittels geostatistischer Verfahren durch Interpolation (Kriging) plausible Geometrien berechnet worden. Dabei lässt sich die Vorgehensweise für die Berechnung der Modellkörper wie folgt zusammenfassen:

- Im ersten Schritt erfolgt die Prüfung der Eingangsdaten auf Plausibilität. Als Eingangsdaten zählen Bohrungen (Punktdaten), Verbreitungsgrenzen (Flächendaten) und zusätzliche Informationen (Basislinien, geologische Schnitte usw.) aus den unterschiedlichen Datenquellen.
- Im zweiten Schritt wird der geologische Kenntnisstand an Stellen, an denen die Informationsdichte der Eingangsdaten nicht ausreicht, durch das Setzen sinnvoller Stützstellen ergänzt.
- Im dritten Schritt erfolgt die Interpolation der Schichtmächtigkeiten oder Schichtbasisflächen mittels eines geeigneten Interpolationsverfahrens (Kriging). Die Parameter des Interpolationsverfahrens werden anhand der verfügbaren Ausgangsdaten mittels geostatistischer Methoden (Variogramme) bestimmt.
- Im vierten Schritt erfolgt eine Begutachtung des Ergebnisses und eine Nachbearbeitung zur Beseitigung von Unplausibilitäten.

Als Ergebnis der Modellierung erhält man die Unterkanten der im Modellgebiet vorhandenen geologischen Einheiten.

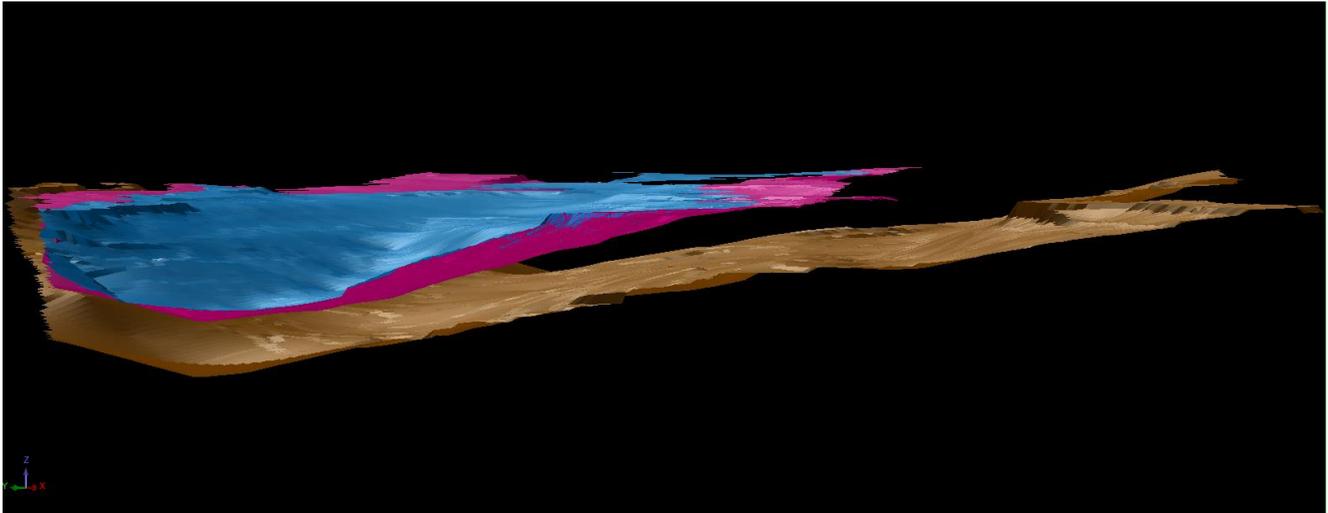


Abbildung 18: Modellierte Unterkanten verschiedener geologischer Einheiten in SURPAC

In Abbildung 18 sind die modellierten Unterkanten der oberen Sedimentgruppe (blau), des Zeisigwald-Tuffs (pink) und der unteren Sedimentgruppe (braun) dargestellt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Modellierung wurden als Vorprofil für den Modellstandort und als hydrogeologischer Schnitt visualisiert. Das geologische Vorprofil ist in Anlage 3 dargestellt. Den hydrogeologischen Schnitt durch das Modellgebiet zeigt Anlage 7. Anlage 4 enthält eine Übersicht zu allen hydrogeologischen Körpern des Modellgebiets.

Im folgenden Bearbeitungsschritt wurde das Strukturmodell in ein hydrogeologisches Modell überführt. Dazu war die Entwicklung eines Konzepts für die geeignete Datenübernahme in FEFLOW notwendig. Für die geothermische Modellierung wurde wie im Modellgebiet Leipzig die Software FEFLOW, Version 7.1 verwendet.

6.2.5 Supermesh-Design und Finite Elemente Netz

Unter Beachtung der beim Supermesh-Design festgelegten Punkt- und Flächenelemente, der Anzahl zu erzeugender finiter Elemente sowie der Festlegung des Algorithmus der Netzbildung (Dreiecksvermaschung) wurde anschließend ein Finite-Elemente-Netz erzeugt. Im Bereich der Erdwärmesonden wurde das Netz feiner diskretisiert. Weitere Netzverfeinerungen ergaben sich an den Grenzen von Modellkörpern. In Abbildung 19 ist das Netz für das Modellgebiet Chemnitz dargestellt.

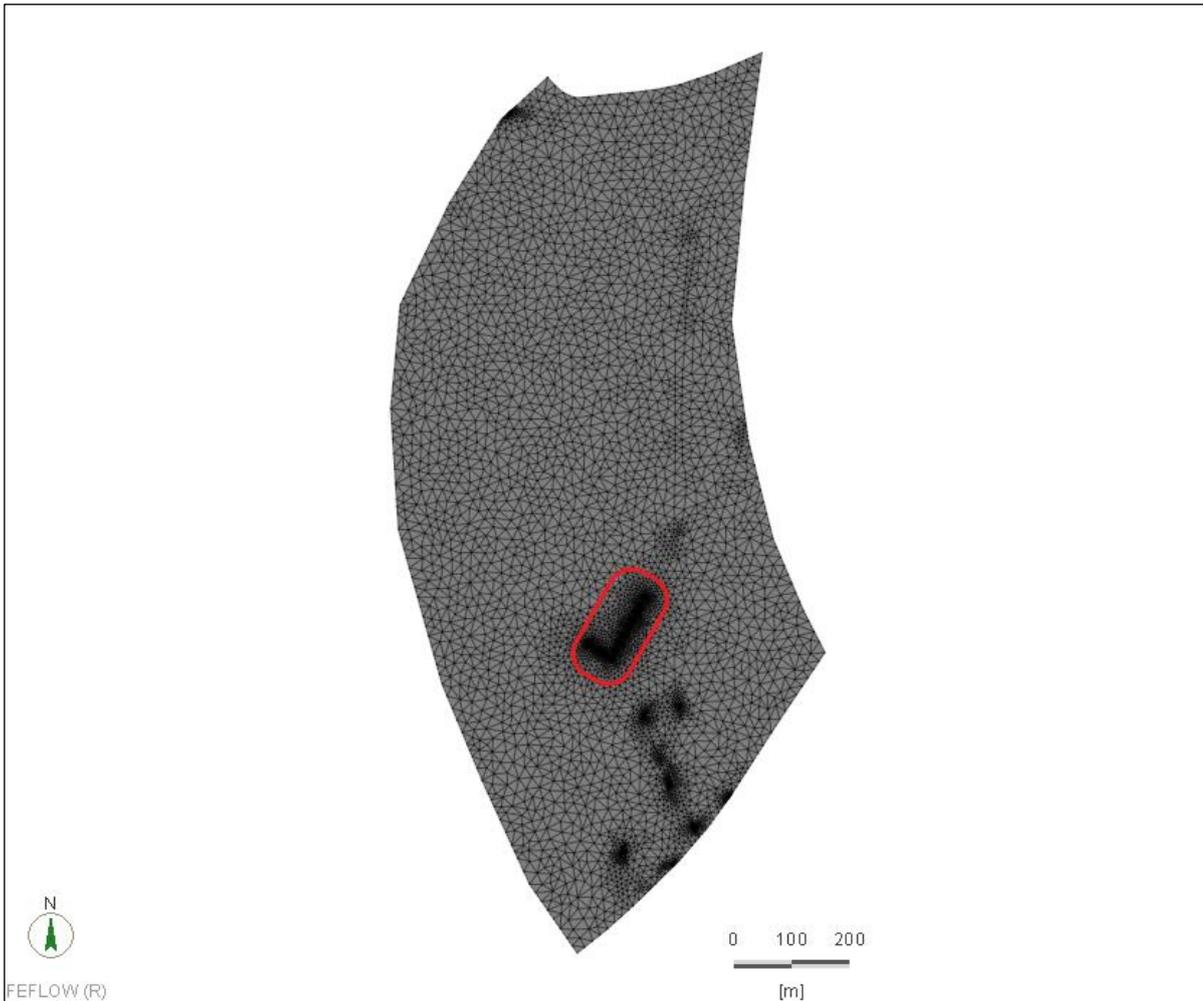


Abbildung 19: Finite-Elemente-Netz des Modellgebiets Chemnitz mit Verdichtung entlang von Supermesh-Elementen

Der Bereich des Sondenfeldes ist durch eine besonders hohe Diskretisierung gekennzeichnet. Er wird durch die rote Markierung in Abbildung 19 umrissen.

6.2.6 3D-Modellaufbau

Der 3D-Modellaufbau beginnt mit der Konstruktion der Geländeoberkante aus dem digitalen Geländemodell. Abbildung 20 zeigt die zugehörige Darstellung für das Modellgebiet Chemnitz.

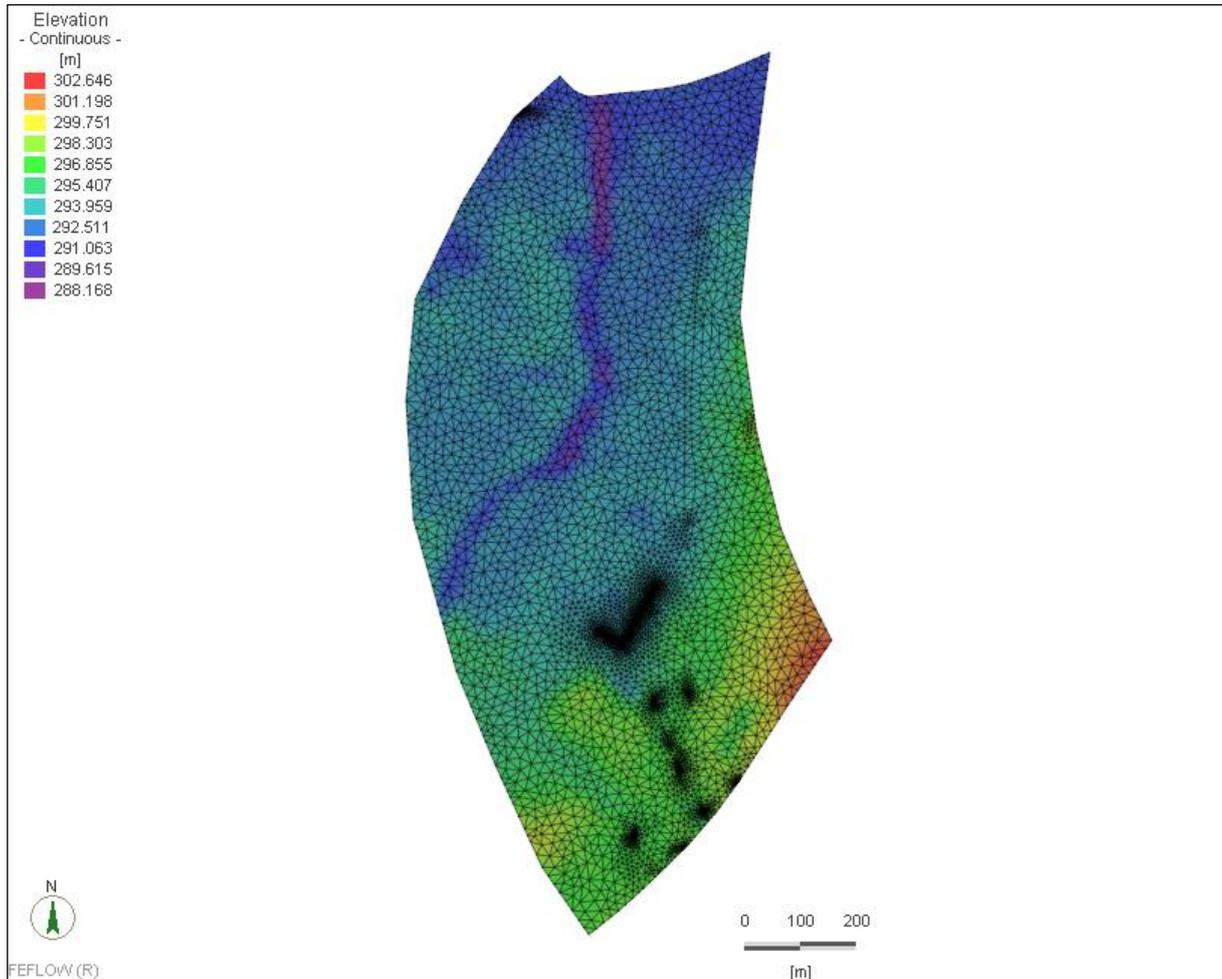


Abbildung 20: Digitales Geländemodell des Modellgebietes Chemnitz (Legendenangaben in m NHN)

Ausgehend vom erstellten hydrogeologischen Strukturmodell erfolgte im nächsten Schritt der 3D-Modellaufbau/Schichtaufbau in FEFLOW. Das hydrogeologische Modell setzt sich aus den geologischen Einheiten des Modellgebietes zusammen.

Für die Bildung der Layerober- bzw. -unterkanten wurden die aufbereiteten Modelldaten aus der firmeninternen Datenbank verwendet. Dafür sind für das Modellgebiet die Modelloberkanten sowie die Unterkanten jedes hydrogeologischen Körpers exportiert und als Excel-File (x,y,z-Werte) gespeichert worden. Die Excel-Files wurden im folgenden Schritt in FEFLOW eingelesen. Über diese Verknüpfung kann den Modellschichten die exakte Modellgeometrie aus dem hydrogeologischen Strukturmodell zugewiesen werden.

Für den beschriebenen Modellaufbau ist zu beachten, dass bei der realisierten Herangehensweise jede Modellschicht über das gesamte Modellgebiet ausgehalten werden muss. Wenn eine geologische Einheit in der Realität auskeilt und nicht überall im Modellgebiet verbreitet ist, wird der entsprechende Bereich, in dem diese Einheit in der Realität nicht auftritt, im Modell mit einer Mindestmächtigkeit von 0,1 m und den Eigenschaften der dort verbreiteten hydrogeologischen Einheit belegt.

Im Anschluss wurden im Bereich mächtiger hydrogeologischer Einheiten, wie z.B. dem Festgestein, Hilfsschichten eingezogen. Diese dienen der Erhöhung des Detailierungsgrades und führen zu einer verbesserten

Modellgenauigkeit. Das in FEFLOW aufgebaute 3D-Modell besteht aus insgesamt 46 Schichten. Es ist aus Abbildung 21 ersichtlich.

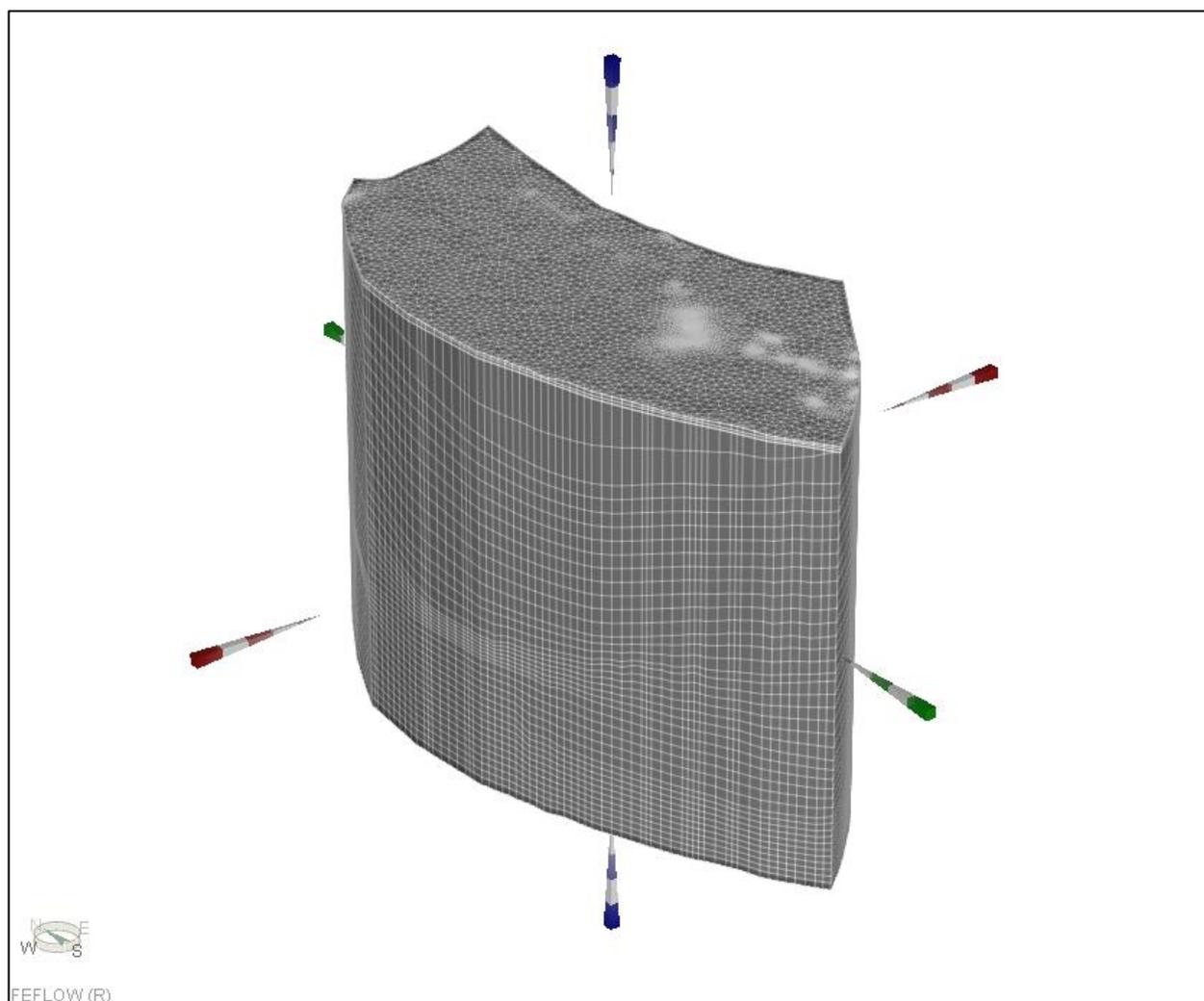


Abbildung 21: 3D-Modellaufbau des Modellgebiets Chemnitz

6.2.7 Hydrogeologische Eigenschaften der Modellschichten

Zur Zuweisung der hydrogeologischen Parameter wurden zunächst alle im Modellgebiet vorhandenen hydrogeologischen Einheiten in einer Tabelle erfasst.

Anschließend erfolgte die Parametrisierung. Für die hydrogeologischen Eigenschaften Durchlässigkeit und Porosität konnte zunächst auf die in den Datenbanken des AG gespeicherten Angaben zurückgegriffen werden. Hier liegen v.a. Werte für die Durchlässigkeit vor. Die Parametrisierung für die Porosität erfolgte anhand der vorliegenden lithologischen Beschreibungen auf Basis von Erfahrungswerten. Weiterhin wurden die Daten des Forschungsprojektes zum Einsatz von Geothermie in sächsischen Gärtnereibetrieben (LfULG 2015) berücksichtigt.

In Tabelle 14 sind die hydrogeologischen Parameter für das Modellgebiet Chemnitz zusammengestellt.

Tabelle 14: Hydrogeologische Eigenschaften der Modellschichten, Modellgebiet Chemnitz

HGK	Layer	Lithologische Beschreibung	kf-Wert (m/s)	Nutzbare Porosität
0	Anthropogene Bildungen	Aufschüttung	1,0E-06	0,15
1	Auelehm	Ton, Schluff	1,0E-06	0,08
3	Kiesanteil der Auensedimente	Sand, Kies	5,0E-04	0,18
5	Löss und Lössderivate	Löss, Lösslehm	1,0E-06	0,08
8	Niederterrassen	Sand, Kies	5,0E-04	0,18
311	Obere Sedimentgruppe	Schluffstein, Tonstein, Sandstein, Konglomerat	1,0E-06	0,10
30	Zeisigwaldt-Tuff	Tuff, Ignimbrit	5,0E-06	0,05
312	Untere Sedimentgruppe	Schluffstein, Tonstein, Sandstein, Konglomerat, Pyroklastit	1,0E-06	0,10
321	Rochlitz-Ignimbrit	Ignimbrit	1,0E-06	0,05
322	Pyroklastite Planitzformation	Pyroklastit	1,0E-06	0,05
323	Grüna-Tuff	Tuff	1,0E-06	0,05
33	Härtensdorf-Formation	Konglomerat, Sand- und Schluffstein, Kalkstein	1,0E-06	0,10
44	Hainichen-Subgruppe	Konglomerat, Sand- und Schluffstein, Kalkstein	1,0E-06	0,10
60	Kambroordovizium	Phyllit	5,0E-08	0,05

Bei der richtungsabhängigen Parametrisierung der Durchlässigkeit ist davon ausgegangen worden, dass der kf-Wert in vertikaler Richtung 50 % des horizontalen Wertes beträgt. Die Umsetzung der Parameterbelegung in FEFLOW ist für die Durchlässigkeit in x- Richtung in Abbildung 22 dargestellt.

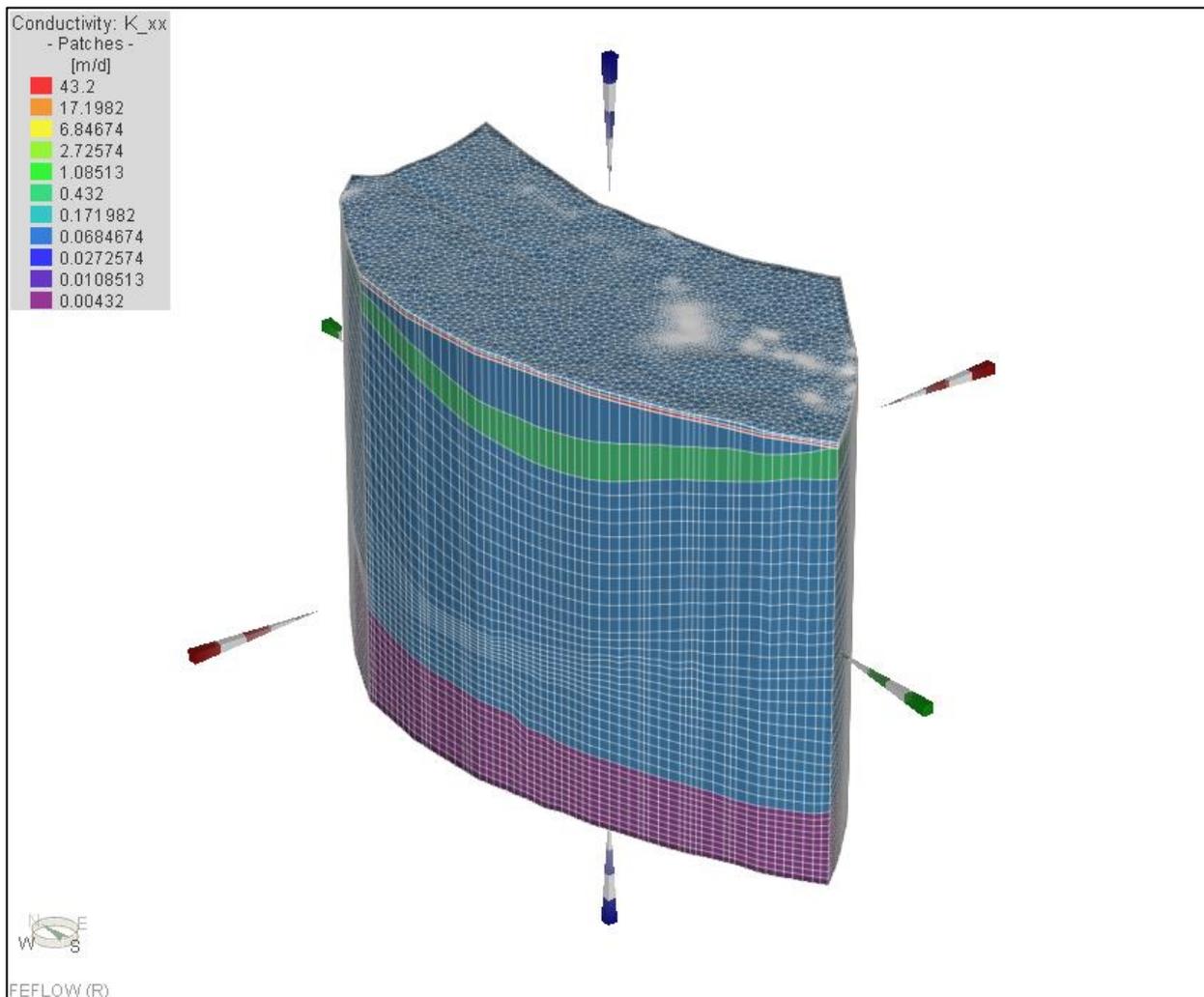


Abbildung 22: Durchlässigkeit in x-Richtung, Modellgebiet Chemnitz

6.2.8 Hydrogeologische Randbedingungen

Wie bereits erwähnt, wurden die hydrogeologischen Randbedingungen entlang der an- und abstromigen Ränder des Modellgebietes gesetzt. Im Modellgebiet Chemnitz wird der anstromige Rand durch die Grundwasserisohypse 293 m HN und der der abstromige Rand durch die Grundwasserisohypse 288 m HN definiert. Damit ergibt sich ein Grundwasserfließgefälle von ca. 3,8 ‰. Die jeweiligen Wasserstände wurden innerhalb des Rotliegenden als Randbedingungen erster Art berücksichtigt.

6.2.9 Geothermische Eigenschaften der Modellschichten

Die Ableitung der Werte für die geothermischen Parameter spezifische Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität erfolgte in Analogie zu den hydrogeologischen Eigenschaften für alle definierten hydrogeologischen Einheiten des Modellgebiets. Dabei wurden die beim AG vorliegenden Ergebnisse aus geophysikalischen Testarbeiten an geothermischen Bohrungen, das bereits erwähnte Forschungsprojekt zur Nutzung von Geothermie in sächsischen Gärtnereien (LfULG, 2015): sowie ergänzend die Ergebnisse eigener durchgeführter Testarbeiten genutzt.

Tabelle 15: Geothermische Eigenschaften der Modellschichten, Modellgebiet Chemnitz

HGK	Layer	Lithologische Beschreibung	Spezifische Wärmeleitfähigkeit (W/m·K)	Spezifische Wärmekapazität (MJ/m ³ ·K)
0	Anthropogene Bildungen	Aufschüttung	0,3	1,5
1	Auelehm	Ton, Schluff	0,5	1,5
3	Kiesanteil der Auensedimente	Sand, Kies	1,4	1,9
5	Löss und Lössderivate	Löss, Lösslehm	0,5	1,5
8	Niederterrassen	Sand, Kies	1,4	1,9
311	Obere Sedimentgruppe	Schluffstein, Tonstein, Sandstein, Konglomerat	2,3	2,2
30	Zeisigwaldt-Tuff	Tuff, Ignimbrit	2,4	2,2
312	Untere Sedimentgruppe	Schluffstein, Tonstein, Sandstein, Konglomerat, Pyroklastit	2,3	2,2
321	Rochlitz-Ignimbrit	Ignimbrit	2,4	2,2
322	Pyroklastite Planitzformation	Pyroklastit	2,4	2,2
323	Grüna-Tuff	Tuff	2,4	2,2
33	Härtensdorf-Formation	Konglomerat, Sand- und Schluffstein, Kalkstein	2,3	2,2
44	Hainichen-Subgruppe	Konglomerat, Sand- und Schluffstein, Kalkstein	2,3	2,2
60	Kambroordovizium	Phyllit	2,9	2,4

Für die geothermische Modellierung in FEFLOW wird die spezifische Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität getrennt nach Feststoff und Fluid eingegeben. Für das Fluid Wasser wird dabei generell eine spezifische Wärmeleitfähigkeit von 0,65 W/m·K und eine spezifische Wärmekapazität von 4,2 MJ/m³·K angesetzt. Die Umrechnung der angegebenen Werte erfolgt über die nutzbare Porosität.

6.2.10 Geothermische Randbedingungen

Die Ableitung der Temperaturrendbedingungen wurde in Abschnitt 5.2 ausführlich beschrieben. Für das Modellgebiet Chemnitz wurde gemäß Tabelle 5 an der Modellunterkante eine Temperatur von 21,8 °C berücksichtigt. An der Modelloberkante wurden 9,4 °C berücksichtigt. Beide Werte wurden als Randbedingungen 1. Art angesetzt.

Weiterhin sind als Voraussetzung für die geothermische Modellierung Temperaturrendbedingungen zu definieren, die beim Betrieb der Erdwärmesonden sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall nicht unter- bzw. überschritten werden dürfen. Nach Abstimmung mit dem AG ergaben sich folgende Werte:

■ Heizen:

Gemäß der Informationsbroschüre zur Nutzung oberflächennaher Geothermie in Sachsen (LfULG 2014) sollte eine absolute Minimaltemperatur von -3 °C nicht unterschritten werden. Unter Beachtung dieser Empfehlung resultiert daraus bei einer angesetzten Spreizung von 5 K eine minimale Solemitteltemperatur von -0,5 °C.

■ Kühlen

Gemäß VDI 4640, Blatt 2 (VDI, 2001) ist im Grundlastfall eine Temperaturerhöhung von 11 K gegenüber ungestörter Untergrundtemperatur und im Spitzenlastfall von 17 K zulässig (analoge Herangehensweise wie für den Standort Leipzig – Kapitel 6.1.8).

Die ungestörte Untergrundtemperatur über die Sondenlänge von 350 m beträgt gemäß Tabelle 5 im Modellgebiet Chemnitz 13,7 °C. Daraus resultieren folgende Werte:

■ Grundlast: 13,7 °C + 11 K 24,7 °C

■ Spitzenlast: 13,7 °C + 17 K 30,7 °C

6.2.11 Wärmeentzug/ Wärmeeintrag

Die Erdwärmesonden wurden als innere Randbedingung BHE (Borehole Heat Exchanger) berücksichtigt, die die reale Geometrie einer Erdwärmesonde zu einem Linienelement abstrahiert. Die Lösung der innerhalb der Erdwärmesonde ablaufenden Prozesse beruht dabei auf dem analytischen Ansatz nach Eskilson, der auch im EED Verwendung findet.

Bei der geothermischen Modellierung werden dabei der vorgesehene Bohrdurchmesser, Geometrie und Material der Erdwärmesonde, die spezifischen Eigenschaften des Sondenfluids (Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials gemäß beschriebenen Bohrkonzept aus Abschnitt 4.2.3 berücksichtigt.

Der Durchsatz durch die Sondenanlage entspricht dem angegebenen Wärmequellendurchsatz einer exemplarisch ausgewählten Wärmepumpe (Novellan SIP 100 H). Für 200 kW werden dabei zwei Wärmepumpen mit einem Durchsatz von je 18 m³/h, also insgesamt 36 m³/h benötigt.

Damit ergibt sich bei insgesamt 11 Erdwärmesonden pro Erdwärmesonde ein Durchsatz von 3,3 m³/h.

Für den sondenspezifischen Wärmeentzug bzw. Wärmeeintrag wurde die durch den AG vorgegebene Energetik unter Berücksichtigung der benannten Jahresarbeitszahlen angesetzt: Für die Kühlung ist dabei in der Grundlast von freier Kühlung und in der Spitzenlast von aktiver Kühlung ausgegangen worden. Die Umsetzung der Spitzenlasten erfolgte durch eine Verfeinerung der Zeitschrittweite in den jeweiligen Monaten. Die Lastspitzen wurden dabei immer zur Monatsmitte angesetzt. Die in FEFLOW eingelesenen Entzugs- und Eintragsfunktionen sind in Anlage 5 enthalten.

6.2.12 Durchführung der Modellierung

Vor der Implementierung der Erdwärmesonden in das Modell wurde unter Berücksichtigung der beschriebenen Temperaturrandbedingungen zunächst ein stationäres „Leermodell“ zur Ermittlung der Ausgangswerte der Temperaturverteilung gerechnet. Die anschließende geothermische Modellierung erfolgte über einen Zeitraum von 50 Jahren.

Für alle simulierten Varianten erfolgte der Modellstart im Januar des 1. Jahres und endete im Dezember des 50. Jahres. Sowohl die Grundwasserströmung als auch der Wärmetransport wurden instationär berechnet.

Auf eine vorherige Kalibrierung des Strömungsmodells konnte verzichtet werden, da die Grundwasserströmung über die gesetzten Randbedingungen am ober- und unterstromigen Modellrand abgebildet wurden, und durch die Erdwärmesonden selbst keine Beeinflussung der Grundwasserströmungsverhältnisse erfolgt.

6.2.13 Modellergebnisse

Im Ergebnis verschiedener Simulationen, bei denen die Anzahl der Erdwärmesonden zwischen 10 und 12 variiert wurde, ergab sich, dass für das Modellgebiet Chemnitz 11 Sonden à 350 m zur Abdeckung der definierten Lasten benötigt werden.

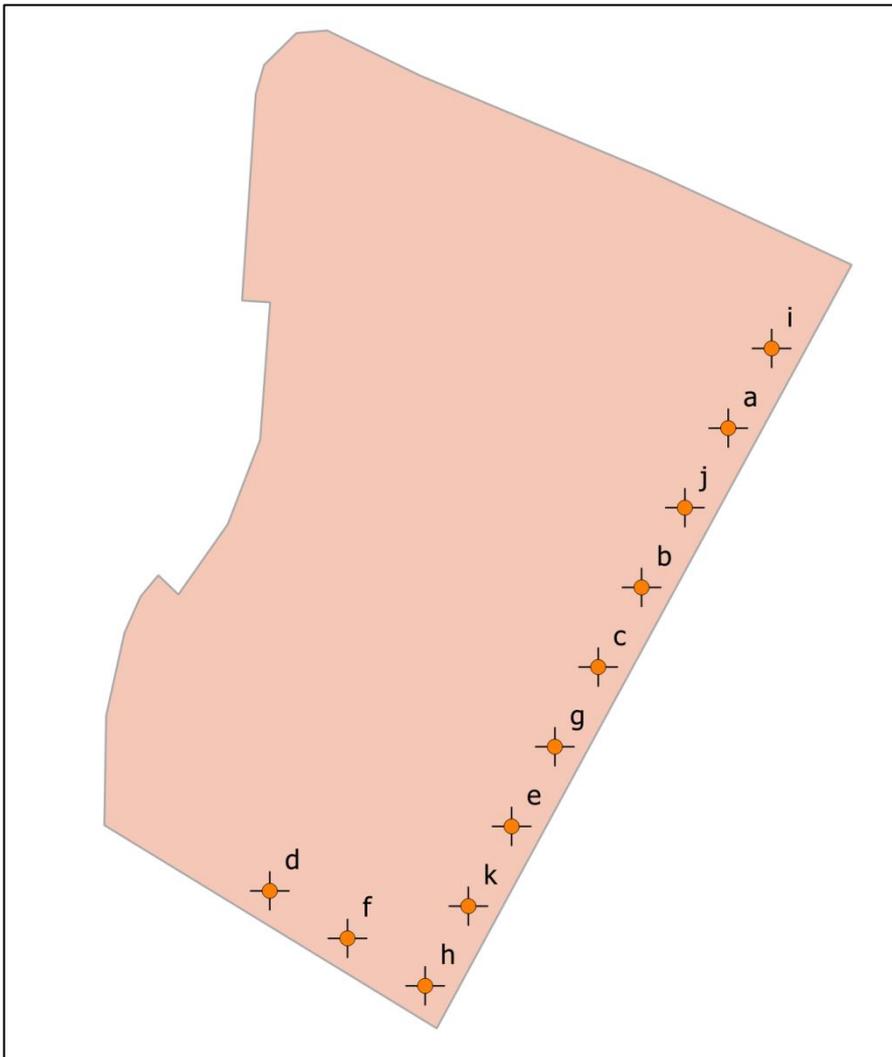


Abbildung 23: Lage der Sonden innerhalb des Modellstandorts Chemnitz, Maßstab 1:1250

Die Lage der Sonden, deren Abstand untereinander 15 m beträgt, geht aus Abbildung 23 hervor. Wie bereits zum Modellgebiet Leipzig erläutert, wurden die Sonden auch am Modellstandort Chemnitz nah an der Grundstücksgrenze positioniert.

Ein wesentliches Modellergebnis stellt die Entwicklung der Soletemperaturen in den Erdwärmesonden über den Modellierungszeitraum dar.

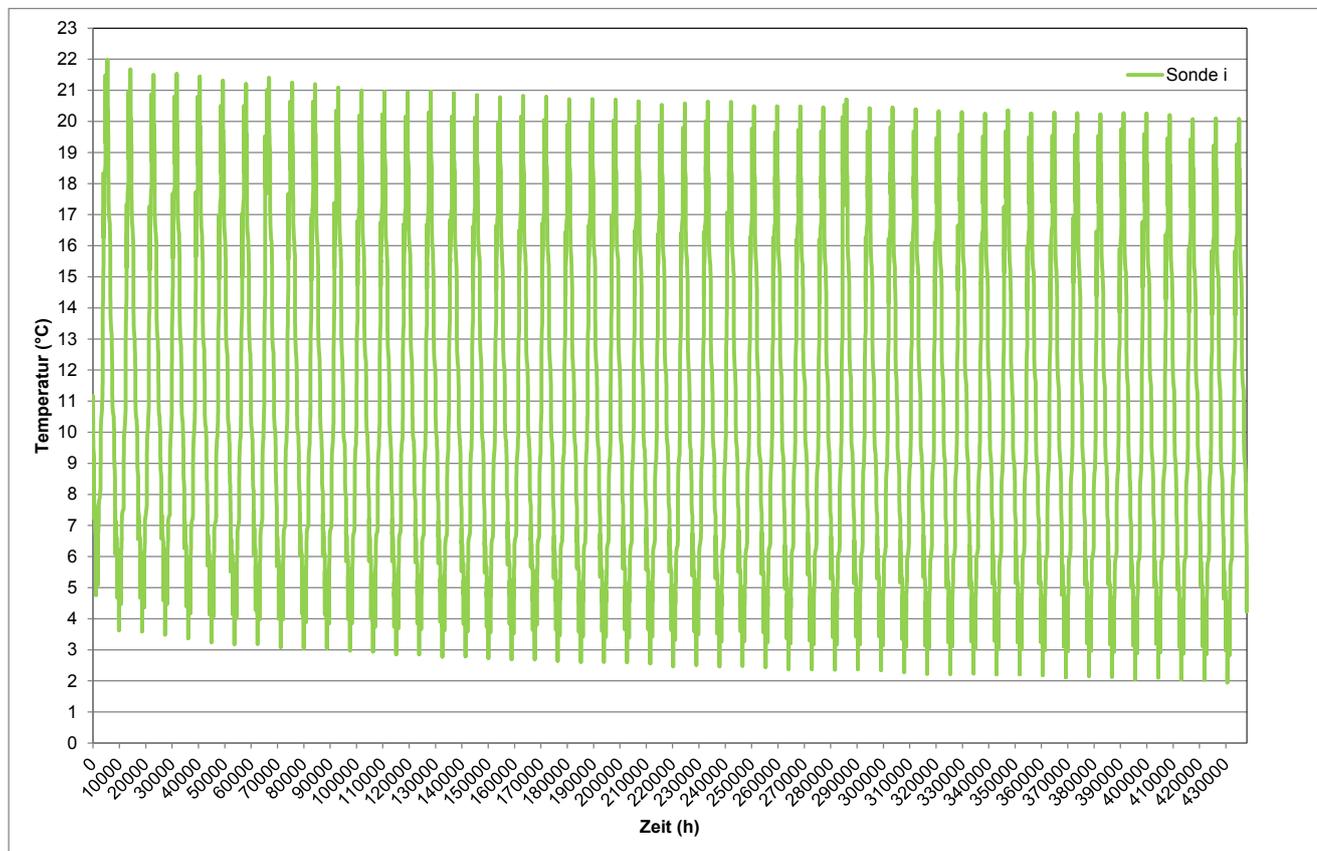


Abbildung 24: Entwicklung der mittleren Sondentemperaturen über 50 Jahre- „wärmste“ Sonde, Modellgebiet Chemnitz

In Abbildung 24 ist beispielhaft der Temperaturverlauf für die „wärmste“ Sonde des Sondenfeldes dargestellt. Da die abzudeckenden energetischen Anforderungen insgesamt von der Heizarbeit dominiert werden, ist ein kontinuierlicher Rückgang der prognostizierten Soletemperaturen über die Betrachtungsdauer zu erkennen. Für die wärmste Sonde wird nach 50 Jahren eine minimale Solemitteltemperatur von 1,9 °C vorhergesagt.

Die maximalen Solemitteltemperaturen infolge sommerlicher Kühlung sind in den Anfangsjahren zu erwarten. Sie nehmen aufgrund der fortschreitenden Auskühlung des Untergrundes über den Betrachtungszeitraum ebenfalls ab. Als Maximalwert werden 22,0 °C prognostiziert.

Abbildung 25 zeigt als Gegenstück den Temperaturverlauf für die „kälteste“ Sonde des Modellgebiets Chemnitz. Hier wird nach 50 Jahren eine minimale Solemitteltemperatur von 1,0 °C prognostiziert. Der Maximalwert infolge Kühlung beträgt für diese Sonde 22,0 °C.

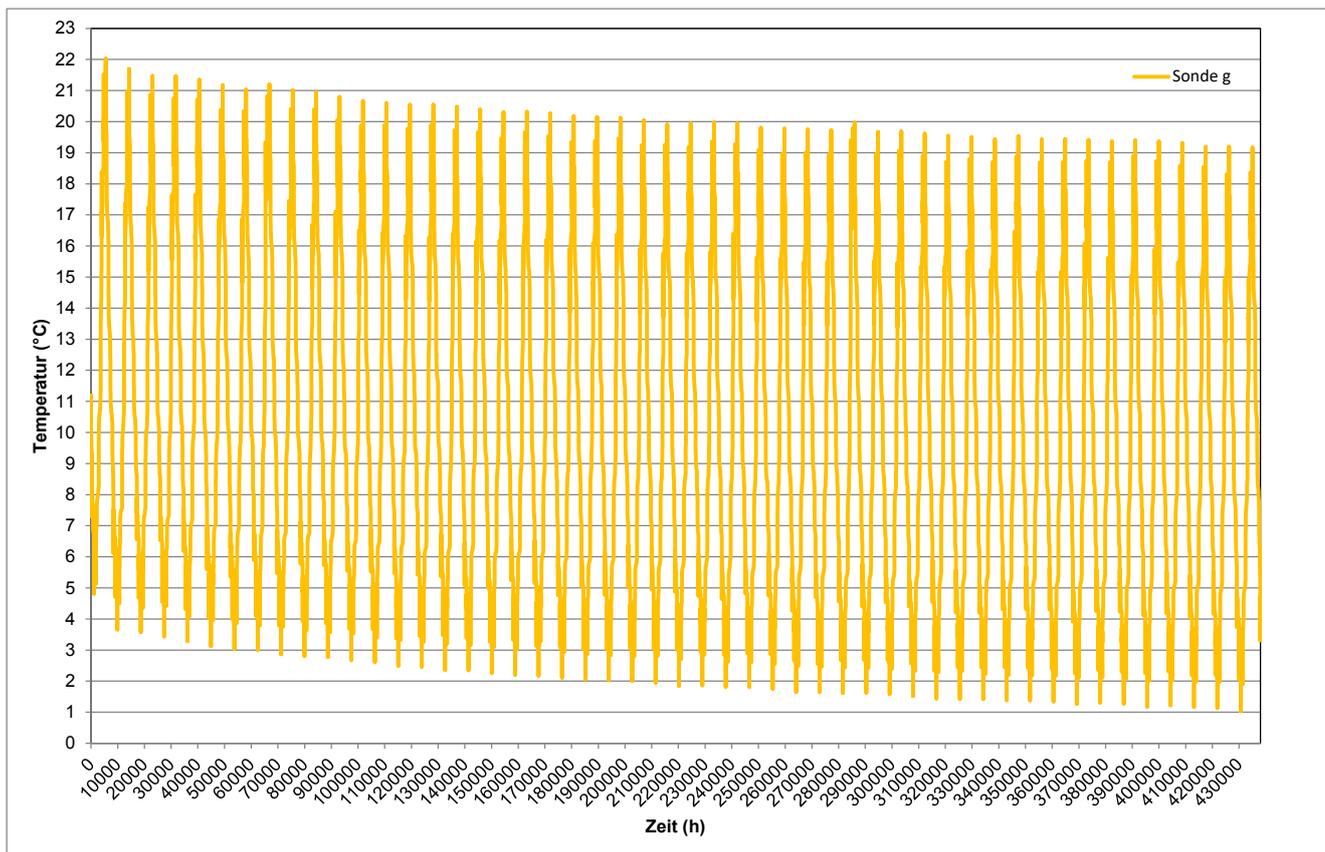


Abbildung 25: Entwicklung der mittleren Sondentemperaturen über 50 Jahre- „kälteste“ Sonde, Modellgebiet Chemnitz

Zur Darstellung der Auswirkungen auf den Untergrund wurden Karten mit den Beeinflussungsbereichen ($\Delta T \geq 0,1K$) erstellt. Dabei fanden in Abstimmung mit dem AG die folgenden hydrogeologischen Einheiten Beachtung:

- Zeisigwald-Tuff,
- Untere Sedimentgruppe, Leukersdorf-Formation,
- Pyroklastite, Planitz-Formation,
- Härtensdorf-Formation.

Weiterhin wurde bei den Darstellungen zwischen Heiz- und Kühlperiode unterschieden.

Die Darstellungen für das Modellgebiet Chemnitz sind in Anlage 8 enthalten.

Aus den Abbildungen geht hervor, dass der Wärmetransport im Modellgebiet Chemnitz keine relevante Beeinflussung durch strömendes Grundwasser erfährt. In allen betrachteten hydrogeologischen Körpern sind elliptische Beeinflussungsbereiche um die Sonden ausgebildet. Diese weisen in den einzelnen hydrogeologischen Einheiten unterschiedlich große Ausdehnungen auf.

In der obersten betrachteten Einheit, dem Zeisigwald-Tuff ist nur eine vergleichsweise geringe Beeinflussung zu beobachten, die einen Bereich von ca. 140 m x 30 m um die Sonden umfasst.

In der Unteren Sedimentgruppe der Leukersdorf-Formation wird ein deutlich größerer Bereich von ca. 270 m x 170 m beeinflusst.

Die größte Temperaturbeeinflussung innerhalb der ausgewählten Darstellungsbereiche ist im Modellgebiet Chemnitz für die Pyroklastite der Planitz-Formation festzustellen. Hier finden in einem Bereich von ca. 320 m x 290 m

Temperaturveränderungen statt. Als Ursache dafür ist die leicht höhere Wärmeleitfähigkeit der Planitz-Formation im Vergleich zur unteren Sedimentgruppe bzw. der Härtensdorf-Formation anzusehen.

Die Temperaturbeeinflussung im Bereich der Härtensdorf-Formation umfasst ein Areal von ca. 240 m x 170 m. In den folgenden Tabellen sind die Größen der Beeinflussungsbereiche aus Anlage 8, getrennt für Heiz- und Kühlperiode, nochmals zusammengestellt.

Tabelle 16: Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche Ende Heizperiode, Modellgebiet Chemnitz

Hydrogeologische Einheit	Längsausdehnung	Querausdehnung
Zeisigwald-Tuff (HGK 30)	130 m	40 m
Untere Sedimentgruppe (HGK 312)	270 m	170 m
Pyroklastite, Planitz-Formation (HGK 322)	320 m	190 m
Härtensdorf-Formation (HGK 33)	240 m	170 m

Wie bereits für das Modellgebiet Leipzig festgestellt, unterscheidet sich auch im Modellgebiet Chemnitz die jeweilige Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche ($\Delta T \geq 0,1$ K) für die betrachteten Betriebszustände nur unwesentlich. Deutlich wird dies auch aus den vertikalen Längsschnitten in Anlage 8, in denen die Zustände am Ende der Heizperiode sowie am Ende der Kühlperiode nebeneinander dargestellt sind. Es ist klar zu erkennen, dass Unterschiede der Untergrundtemperatur auf die unmittelbare Umgebung der Sondenanlage begrenzt sind.

Tabelle 17: Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche Ende Kühlperiode, Modellgebiet Chemnitz

Hydrogeologische Einheit	Längsausdehnung	Querausdehnung
Zeisigwald-Tuff (HGK 30)	135 m	40 m
Untere Sedimentgruppe (HGK 312)	270 m	175 m
Pyroklastite, Planitz-Formation (HGK 322)	320 m	190 m
Härtensdorf-Formation (HGK 33)	240 m	170 m

Aus allen Abbildungen für die einzelnen betrachteten hydrogeologischen Einheiten in Anlage 8 ($\Delta T \geq 0,1$ K) lässt sich die Ausbildung eines Abkühlungstrichters in der Umgebung der Sonden ableiten. Dieser wird durch Kühlung in Lage und Ausbildung nur leicht beeinflusst. Unterschiede zwischen den Betriebszuständen Heizen und Kühlen lassen sich für alle betrachteten hydrogeologischen Körper wiederum im nahen Umfeld der Sonden feststellen. Hier werden am Ende der Kühlperiode höhere Untergrundtemperaturen beobachtet.

Wie bereits mehrfach erwähnt, beziehen sich die Darstellungen der Auswirkungen in den ausgewählten hydrogeologischen Einheiten auf eine Temperaturdifferenz von mindestens 0,1 K gegenüber der ungestörten Untergrundtemperatur. Folglich sind bei einer größeren Temperaturdifferenz kleinere beeinflusste Bereiche zu erwarten. Als Beispiel soll hier die Größe der Beeinflussung bei einer Temperaturdifferenz von 1 K gegenüber der ungestörten Untergrundtemperatur angegeben werden. Im Bereich des Zeisigwald-Tuffs sind die Beeinflussungen auf den unmittelbaren Nahbereich der Sonden beschränkt. In den anderen dargestellten hydrogeologischen Einheiten reduziert sich der beeinflusste Bereich in Längsausdehnung auf ca. 60 % der in Tabelle 16 und Tabelle 17 genannten Werte. Der Beeinflussungsbereich in Querrichtung verringert sich auf ca. 50 % der Werte in Tabelle 16 und Tabelle 17.

6.3 Modellstandort Dresden

6.3.1 Geologischer Überblick

Bis ca. 12 m unter Gelände werden am Modellstandort Dresden überwiegend sandig-kiesige Lockergesteinsablagerungen angetroffen, die grundwasserführend sind. Unter dem Lockergestein folgen bis ca. 85

m kreidezeitliche Festgesteine, wobei die oberen Bereiche bis ca. 75 m Tiefe überwiegend aus Mergelsteinen (Pläner) und die unteren bis ca. 85 m Tiefe aus Sandsteinen bestehen.

Ab ca. 85 m unter Gelände bis zur betrachteten Endtiefe von 500 m u. GOK werden die kreidezeitlichen Ablagerungen von den Monzoniten des Meissner Massivs unterlagert. Bedingt durch die große Schichtmächtigkeit stellt diese geologisch älteste Einheit gleichzeitig auch das relevanteste Element hinsichtlich der geothermischen Nutzung dar. Die beschriebene Schichtenabfolge ist in grafisch dargestellt.

6.3.2 Aufbau geologisch-hydrogeologisches Strukturmodell

Die Schichtdaten für den Modellaufbau im Modellgebiet Dresden, die als Körper aus der hydrogeologischen Kartierung 1:50.000 entstammen, wurden Ende Juli 2018 durch den AG übergeben. Dabei handelt es sich um x, y-Werte in einem 50 x 50m-Raster mit beinhaltender Tiefeninformation. Diese 3D-Daten wurden aufbereitet und in die firmeninterne Datenbankstruktur importiert. Aus den vorhandenen Punktdaten konnte die Geländeoberkante für das Modellgebiet rekonstruiert werden. Weiterhin sind die übermittelten Punktdaten in die jeweiligen hydrogeologischen 3D-Modellkörper des Modellgebiets überführt worden. Dafür wurde für jede geologische Einheit die Verbreitungsfläche erzeugt und die Beziehung der Körper untereinander hergestellt. Dies stellt eine Voraussetzung für die Erzeugung von 3D-Körpern und Profilschnitten dar.

Anlage 4 enthält eine Übersicht über alle im Strukturmodell berücksichtigten hydrogeologischen Körper. Im folgenden Bearbeitungsschritt wurde das Strukturmodell in ein hydrogeologisches Modell überführt. Dazu erfolgte die Entwicklung eines Konzepts für die geeignete Datenübernahme in FEFLOW. Für die geothermische Modellierung fand auch hier die Software FEFLOW, Version 7.1 Verwendung.

6.3.3 Supermesh-Design und Finite Elemente Netz

Unter Berücksichtigung der beim Supermesh-Design festgelegten Punkt- und Flächenelemente, der Anzahl zu erzeugender finiter Elemente sowie der Festlegung des Algorithmus der Netzbildung (Dreiecksvermaschung) wurde anschließend ein Finite-Elemente-Netz erzeugt. Im Bereich der Erdwärmesonden wurde das Netz feiner diskretisiert. Weitere Netzverfeinerungen ergaben sich an den Grenzen von Modellkörpern. Dies wird aus Abbildung 26 deutlich, die das Netz für das Modellgebiet Dresden zeigt.

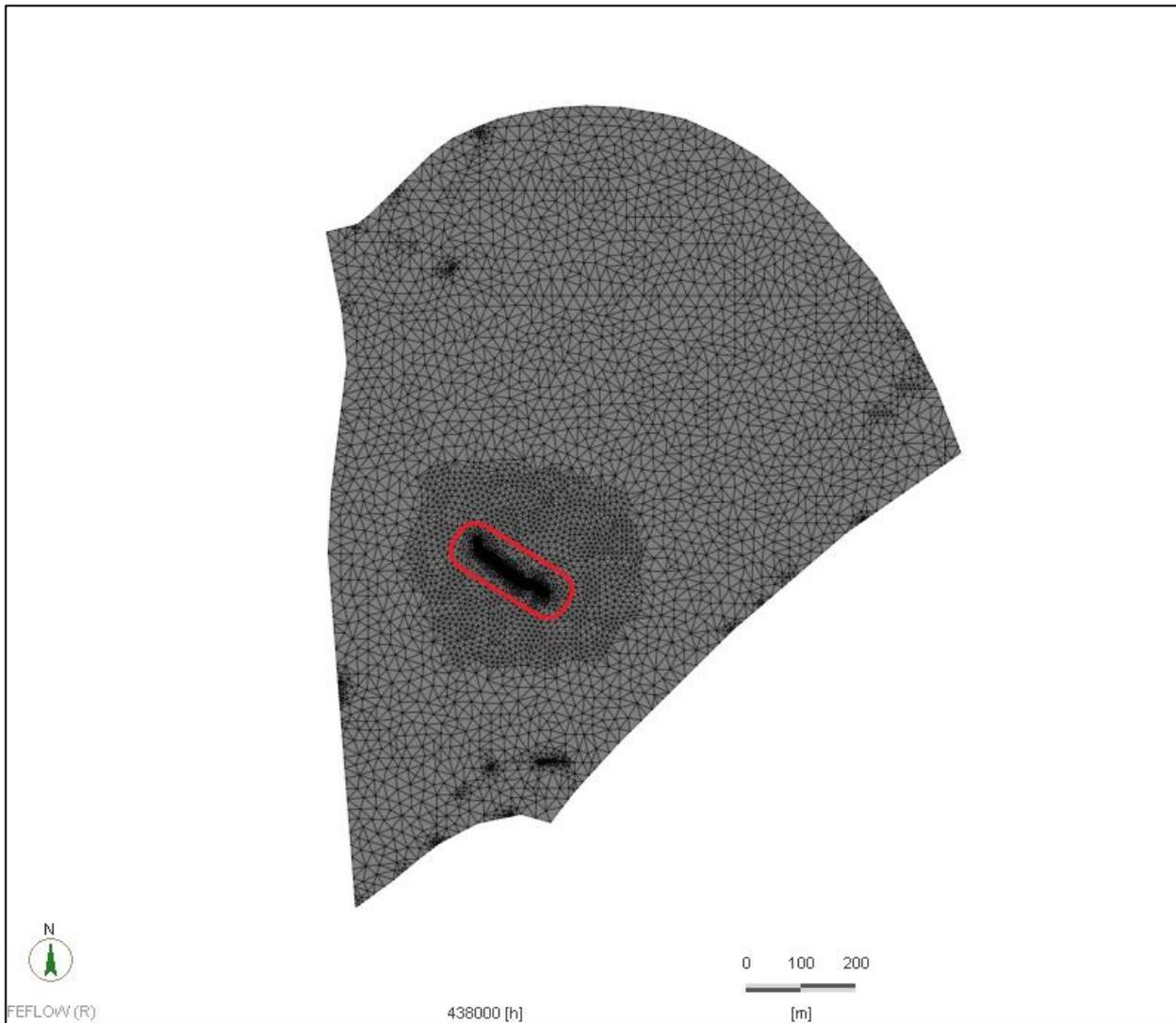


Abbildung 26: Finite-Elemente-Netz des Modellgebiets Dresden mit Verdichtung entlang von Supermesh-Elementen

Der Bereich des Sondenfeldes zeichnet sich durch eine besonders hohe Netzdichte aus. Er ist durch die rote Markierung in Abbildung 26 eingegrenzt.

6.3.4 3D-Modellaufbau

Der 3D-Modellaufbau beginnt mit der Konstruktion der Geländeoberkante aus dem zur Verfügung gestellten digitalen Geländemodell. Abbildung 27 enthält die entsprechende Darstellung für das Modellgebiet Dresden.

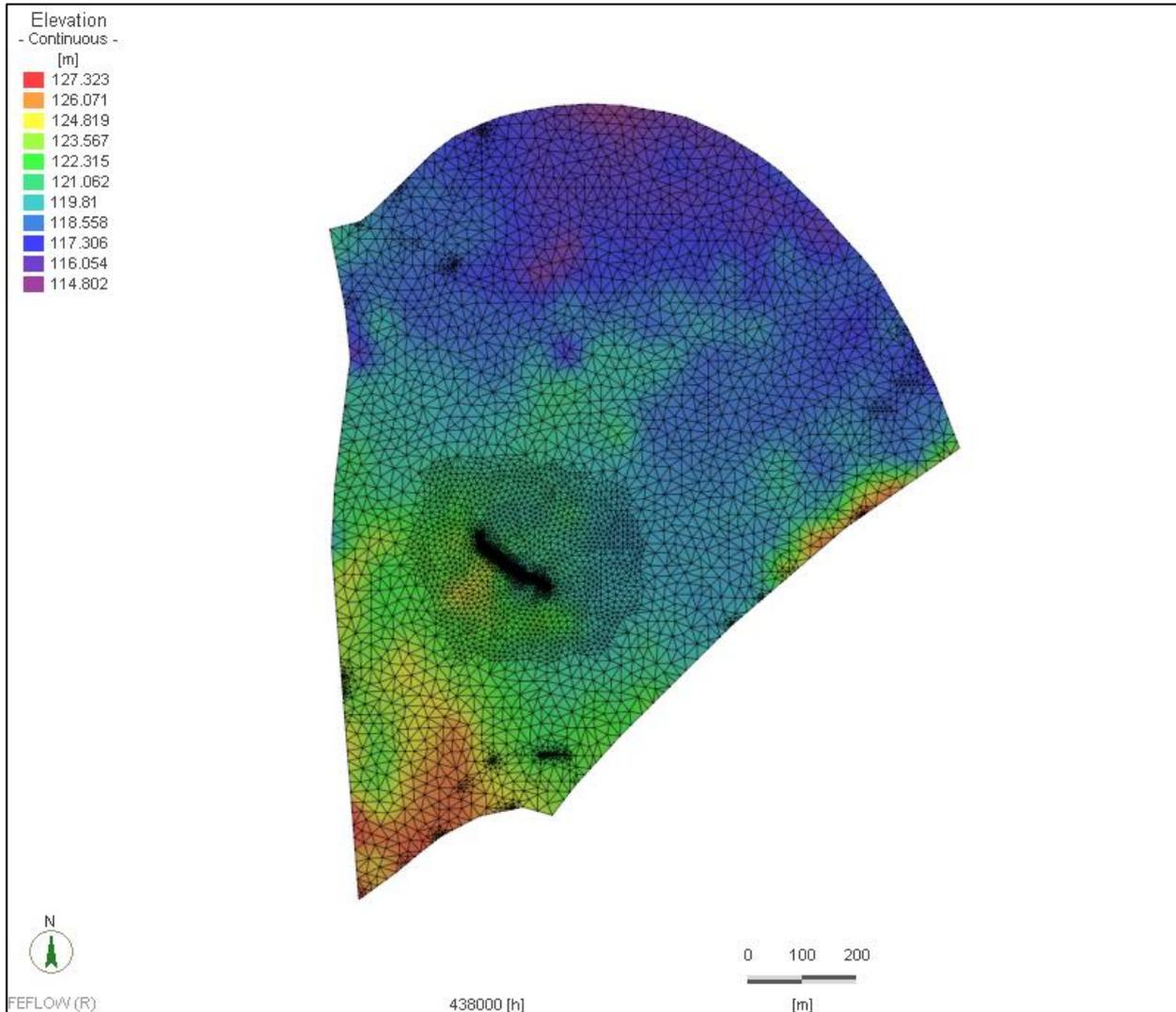


Abbildung 27: Digitales Geländemodell des Modellgebietes Dresden (Legendenangaben in m HNH)

Ausgehend von den vorliegenden geologischen Daten und dem daraus entwickelten hydrogeologischen Strukturmodell wurde im nächsten Schritt der 3D-Modellaufbau/ Schichtaufbau in FEFLOW durchgeführt. Das hydrogeologische Modell setzt sich aus den geologischen Einheiten des Modellgebiets zusammen.

Für die Bildung der Layerober- bzw. -unterkanten sind die aufbereiteten Modelldaten aus der firmeninternen Datenbank verwendet worden. Dafür wurden für das Modellgebiet die Modelloberkante sowie die Unterkanten jedes hydrogeologischen Körpers exportiert und als Excel-File (x,y,z-Werte) gespeichert. Diese konnten im folgenden Schritt in FEFLOW eingelesen werden. Über diese Verknüpfung kann den Modellschichten die exakte Modellgeometrie aus dem hydrogeologischen Strukturmodell zugewiesen werden.

Für den beschriebenen Modellaufbau ist zu beachten, dass bei der realisierten Herangehensweise jede Modellschicht über das gesamte Modellgebiet ausgehalten werden muss. Wenn eine geologische Einheit in der Realität auskeilt und nicht überall im Modellgebiet verbreitet ist, wird der entsprechende Bereich, in dem diese Einheit in der Realität nicht auftritt, im Modell mit einer Mindestmächtigkeit von 0,1 m und den Eigenschaften der dort verbreiteten hydrogeologischen Einheit belegt.

Im Anschluss wurden im Bereich mächtiger hydrogeologischer Einheiten, wie z.B. dem Festgestein Hilfsschichten eingezogen. Diese dienen der Erhöhung des Detaillierungsgrades und führen zu einer verbesserten Modellgenauigkeit. Das in FEFLOW aufgebaute 3D-Modell, das insgesamt über 72 Schichten verfügt, ist in Abbildung 28 visualisiert.

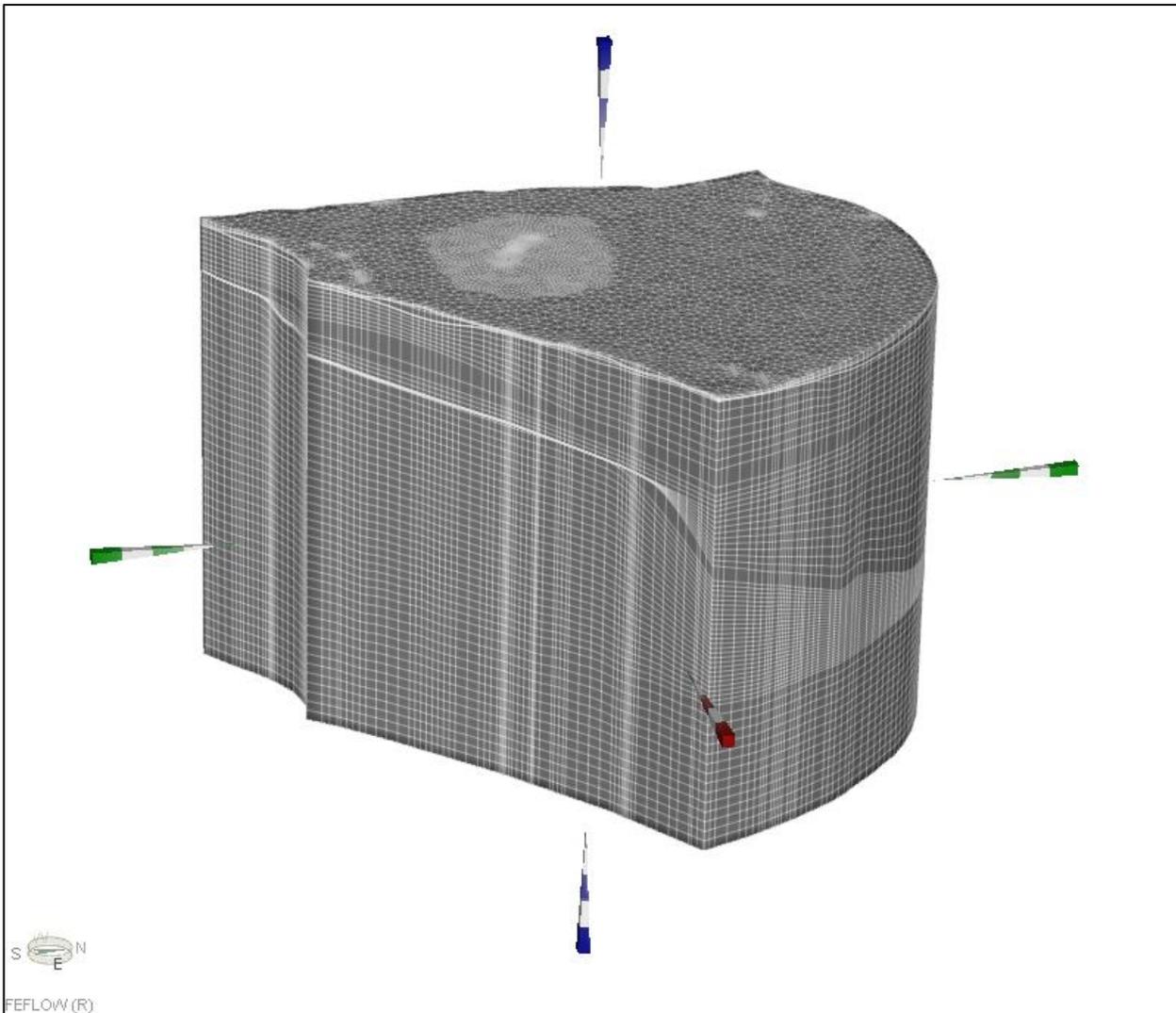


Abbildung 28: 3D-Modellaufbau des Modellgebiets Dresden

6.3.5 Hydrogeologische Eigenschaften der Modellschichten

Für die Zuweisung der hydrogeologischen Parameter wurden zunächst alle im Modellgebiet vorhandenen hydrogeologischen Einheiten in einer Tabelle erfasst.

Anschließend erfolgte die Parametrisierung. Für die hydrogeologischen Eigenschaften Durchlässigkeit und Porosität konnte zunächst auf die in den Datenbanken des AG gespeicherten Angaben zurückgegriffen werden. Hier liegen v.a. Werte für die Durchlässigkeit vor. Die Parametrisierung für die Porosität erfolgte anhand der vorliegenden lithologischen Beschreibungen auf Basis von Erfahrungswerten. Weiterhin sind die Daten des Forschungsprojektes zum Einsatz von Geothermie in sächsischen Gärtnereibetrieben (LfULG, 2015) berücksichtigt worden.

In Tabelle 14 sind die hydrogeologischen Parameter für das Modellgebiet Dresden zusammengestellt.

Tabelle 18: Hydrogeologische Eigenschaften der Modellschichten, Modellgebiet Dresden

HGK	Layer	Lithologische Beschreibung	kf-Wert (m/s)	Nutzbare Porosität
0	Anthropogene Bildungen	Aufschüttung	1,0E-05	0,15
1	Auensedimente, ungegliedert	Sand, Kies, Schluff	1,0E-06	0,10
2	Kiesanteil der Auensedimente Weißeritz	Kies, Sand	1,0E-04	0,15
3	Tallehm	Schluff	1,0E-06	0,10
4	Löss	Löss	1,0E-06	0,10
6	Niederterrasse (TNT+HNT) Weißeritz	Kies, Sand	1,0E-03	0,20
7	Mittelterrasse Weißeritz	Kies, Sand	1,0E-04	0,15
9	Mergel	Mergel	1,0E-07	0,08
10	Labiatus-Pläner	Mergel, karbonatische Schluffsteine und Sandsteine, Kalksteine, Quarzsandsteine	1,0E-07	0,08
11	Plenus-Pläner	sandig-kalkiger Schluffstein	1,0E-05	0,10
12	Oberhäslich-Formation ungegliedert, einschließlich „Unter-Quader“-Sandstein	Sandstein, Konglomerat	1,0E-05	0,12
13	Bannewitz-Formation	Konglomerat, Sandstein, Schluffstein, Tuff, Ignimbrit	1,0E-06	0,10
14	Döhlen-Senke	Sedimente, Vulkanite	1,0E-06	0,10
16	Vulkanite	Tuff, Tuffit in Wechsellagerung mit Konglomeraten und Pyroklastiten	1,0E-06	0,05
15	Monzonite des Meißner Massivs	Monzonite, Granodiorite, Hornblende-Monzonite	1,0E-06	0,07

Bei der richtungsabhängigen Parametrisierung der Durchlässigkeit wurde davon ausgegangen, dass der kf-Wert in vertikaler Richtung 50 % des horizontalen Wertes beträgt.

Die Umsetzung der Parameterbelegung in FEFLOW ist für die Durchlässigkeit in x- Richtung in Abbildung 29 dargestellt.

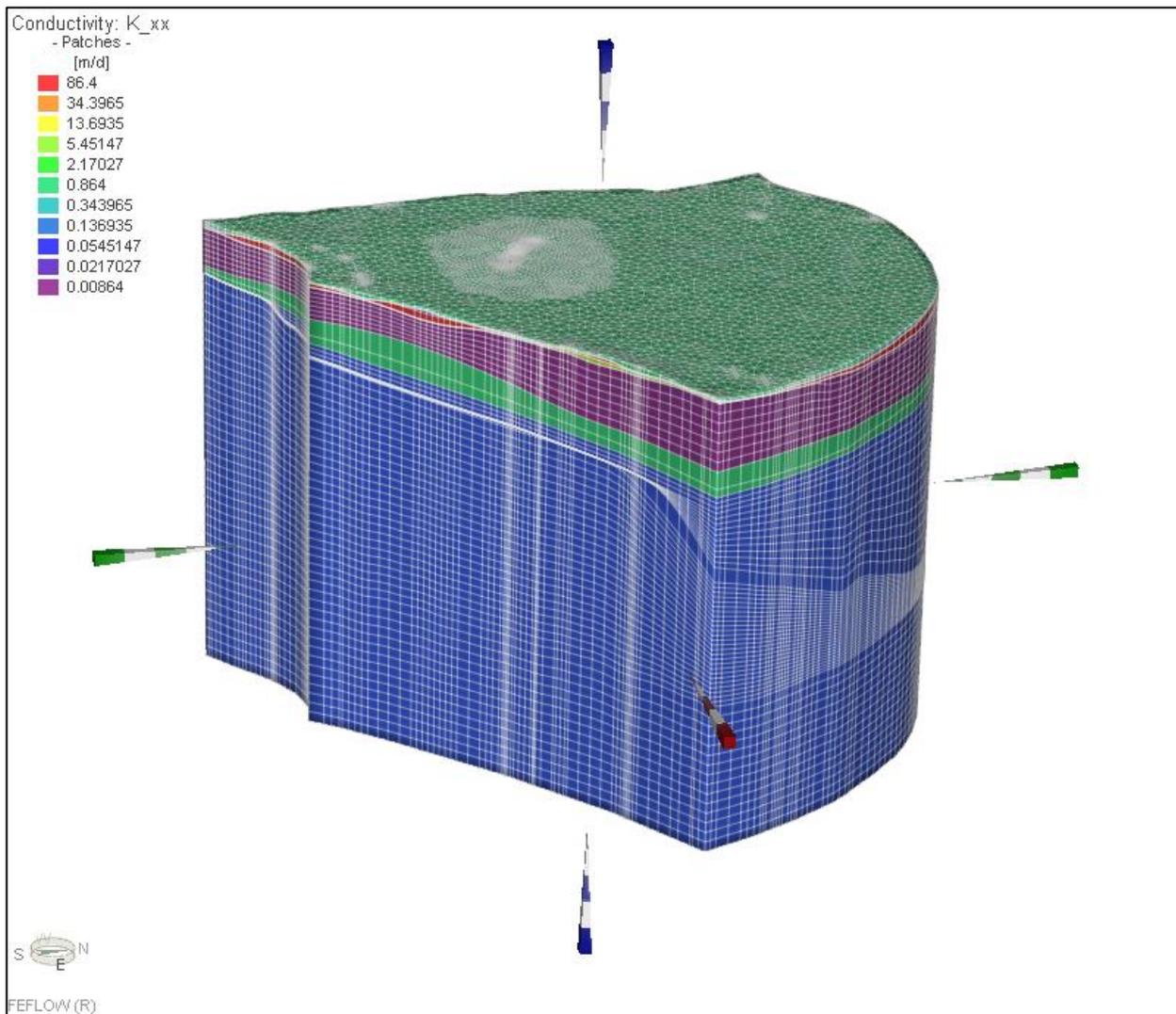


Abbildung 29: Durchlässigkeit in x-Richtung, Modellgebiet Dresden

6.3.6 Hydrogeologische Randbedingungen

Als Voraussetzung zur Durchführung der geothermischen Modellierung sind eine Reihe von Randbedingungen zu definieren.

Als hydrogeologische bzw. hydraulische Randbedingungen fungieren der an- und abstromige Rand des Modellgebietes, das anhand der Grundwasserisohypsen aus der sächsischen Landesgrundwasserdynamik 2016 (LfULG 2019) abgegrenzt wurde. Im Modellgebiet Dresden liegt der anstromige Rand auf der Grundwasserisohypse 115 m HN. Der abstromige Rand des Modellgebietes wird durch die Grundwasserisohypse 111 m HN festgelegt. Daraus resultiert ein Grundwasserfließgefälle von ca. 3 ‰.

Die jeweiligen Wasserstände wurden in den grundwasserführenden Lockergesteinen als Randbedingungen erster Art berücksichtigt.

6.3.7 Geothermische Eigenschaften der Modellschichten

Die Ableitung der Werte für die geothermischen Parameter spezifische Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität erfolgte in Analogie zu den hydrogeologischen Eigenschaften für alle definierten hydrogeologischen Einheiten des Modellgebietes. Dabei wurden, sofern auf die Standorte übertragbar, die beim AG vorliegenden Ergebnisse aus geophysikalischen Testarbeiten an geothermischen Bohrungen, das bereits erwähnte

Forschungsprojekt zur Nutzung von Geothermie in sächsischen Gärtnereien (LfULG, 2015) sowie ergänzend die Ergebnisse eigener durchgeführter Testarbeiten genutzt.

Tabelle 19: Geothermische Eigenschaften der Modellschichten, Modellgebiet Dresden

HGK	Layer	Lithologische Beschreibung	Spezifische Wärmeleitfähigkeit (W/m·K)	Spezifische Wärmekapazität (MJ/m ³ ·K)
0	Anthropogene Bildungen	Aufschüttung	0,5	1,55
1	Auensedimente, ungegliedert	Sand, Kies, Schluff	1,4	1,9
2	Kiesanteil der Auensedimente Weißeritz	Kies, Sand	1,4	2,4
3	Tallehm	Schluff	1,4	1,9
4	Löss	Löss	1,4	1,9
6	Niederterrasse (TNT+HNT) Weißeritz	Kies, Sand	2,4	2,4
7	Mittelterrasse Weißeritz	Kies, Sand	2,4	2,4
9	Mergel, schwarz	Mergel	2,3	2,2
10	Labiatus-Pläner	Mergel, karbonatische Schluffsteine und Sandsteine, Kalksteine, Quarzsandsteine	2,3	2,2
11	Plenus-Pläner	sandig-kalkiger Schluffstein	2,3	2,2
12	Oberhäslich-Formation ungegliedert, einschließlich „Unter-Quader“-Sandstein	Sandstein, Konglomerat	2,8	2,2
13	Bannewitz-Formation	Konglomerat, Sandstein, Schluffstein, Tuff, Ignimbrit	2,3	2,2
14	Döhlen-Senke	Sedimente, Vulkanite	2,3	2,2
16	Vulkanite	Tuff, Tuffit in Wechsellagerung mit Konglomeraten und Pyroklastiten	2,3	2,2
15	Monzonite des Meißner Massivs	Monzonite, Granodiorite, Hornblende-Monzonite	2,8	2,6

Analog zur bereits beschriebenen Vorgehensweise wurde auch im Modellgebiet Dresden für die geothermische Modellierung in FEFLOW die spezifische Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität getrennt nach Feststoff und Fluid berücksichtigt. Für das Fluid Wasser ist dabei immer eine spezifische Wärmeleitfähigkeit von 0,65 W/m·K und eine spezifische Wärmekapazität von 4,2 MJ/m³·K angesetzt worden. Die Umrechnung der in Tabelle 19 angegebenen Werte erfolgte über die nutzbare Porosität.

6.3.8 Geothermische Randbedingungen

Die Ableitung der Temperaturrendbedingungen ist in Abschnitt 5.2 ausführlich beschrieben worden. Für das Modellgebiet Dresden sind gemäß Tabelle 8 an der Modellunterkante eine Temperatur von 20,8 °C und an der Modelloberkante eine Temperatur von 10,8 °C angesetzt worden. Beide Werte wurden als Randbedingungen 1. Art berücksichtigt.

Weiterhin sind als Voraussetzung für die geothermische Modellierung Temperaturrendbedingungen zu definieren, die beim Betrieb der Erdwärmesonden sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall nicht unter- bzw. überschritten werden dürfen. Nach Abstimmung mit dem AG sind dabei folgende Werte verwendet worden:

■ Heizen:

Nach den Empfehlungen der „Erdwärmesonden: Informationsbroschüre zur Nutzung oberflächennaher Geothermie in Sachsen“ (LfULG, 2014) sollte eine absolute Minimaltemperatur von -3 °C nicht unterschritten werden. Daraus resultiert bei einer angesetzten Spreizung von 5 K eine minimale Solemitteltemperatur von $-0,5\text{ °C}$.

■ Kühlen

Nach VDI 4640, Blatt 2 (VDI, 2001) ist im Grundlastfall eine Temperaturerhöhung von 11 K gegenüber ungestörter Untergrundtemperatur und im Spitzenlastfall von 17 K zulässig (hinsichtlich des Bezugs auf die VDI 4640, Teil 2 aus dem Jahr 2001 siehe unter Kapitel 6.1.8).

Die ungestörte Untergrundtemperatur über die Sondenlänge von 350 m beträgt im Modellgebiet Dresden nach den Angaben in Tabelle 8 $14,3\text{ °C}$. Damit ergeben sich folgende Werte:

- Grundlast: $14,3\text{ °C} + 11\text{ K}$ $25,3\text{ °C}$
- Spitzenlast: $14,3\text{ °C} + 17\text{ K}$ $31,3\text{ °C}$

6.3.9 Wärmeentzug/ Wärmeeintrag

Die Erdwärmesonden wurden die innere Randbedingung BHE (Borehole Heat Exchanger) berücksichtigt, die die reale Geometrie einer Erdwärmesonde zu einem Linienelement abstrahiert. Die Lösung der innerhalb der Erdwärmesonde ablaufenden Prozesse beruht dabei auf dem analytischen Ansatz nach Eskilson, der auch im EED Verwendung findet.

Bei der geothermischen Modellierung werden dabei der vorgesehene Bohrdurchmesser, Geometrie und Material der Erdwärmesonde, die spezifischen Eigenschaften des Sondenfluids (Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials gemäß beschriebenen Bohrkonzept aus Abschnitt 4.2.4 berücksichtigt.

Der Durchsatz durch die Sondenanlage entspricht dem angegebenen Wärmequellendurchsatz einer exemplarisch ausgewählten Wärmepumpe (Novellan SIP 100 H). Für 200 kW werden dabei zwei Wärmepumpen mit einem Durchsatz von je $18\text{ m}^3/\text{h}$, also insgesamt $36\text{ m}^3/\text{h}$ benötigt.

Damit ergibt sich bei insgesamt neun Erdwärmesonden pro Erdwärmesonde ein Durchsatz von $4,0\text{ m}^3/\text{h}$.

Für den sondenspezifischen Wärmeentzug bzw. Wärmeeintrag wurde die durch den AG vorgegebene Energetik unter Berücksichtigung der benannten Jahresarbeitszahlen angesetzt: Für die Kühlung wurde dabei in der Grundlast von freier Kühlung, in der Spitzenlast von aktiver Kühlung ausgegangen. Die Umsetzung der Spitzenlasten erfolgte durch eine Verfeinerung der Zeitschrittweite in den zu betrachtenden Monaten. Die Lastspitzen wurden dabei jeweils zur Monatsmitte angesetzt. Die in FEFLOW eingelesenen Entzugs- und Eintragsfunktionen sind in Anlage 5 enthalten.

6.3.10 Durchführung der Modellierung

Vor der Implementierung der Erdwärmesonden in das Modell wurde unter Berücksichtigung der beschriebenen Temperaturrandbedingungen zunächst ein stationäres „Leermodell“ zur Ermittlung der Ausgangswerte der Temperaturverteilung gerechnet. Die anschließende geothermische Modellierung erfolgte über einen Zeitraum von 50 Jahren.

Für alle simulierten Varianten erfolgte der Modellstart im Januar des 1. Jahres und endete im Dezember des 50. Jahres. Sowohl die Grundwasserströmung als auch der Wärmetransport sind instationär berechnet worden.

Auf eine vorherige Kalibrierung des Strömungsmodells konnte verzichtet werden, da die Grundwasserströmung über die gesetzten Randbedingungen am ober- und unterstromigen Modellrand abgebildet wurden, und durch die Erdwärmesonden selbst keine Beeinflussung der Grundwasserströmungsverhältnisse erfolgt.

6.3.11 Modellergebnisse

Im Resultat mehrerer Simulationen, bei denen die Anzahl der Erdwärmesonden zwischen neun und elf variiert wurde, ergab sich, dass neun Sonden à 350 m ausreichend zur Abdeckung der definierten Lasten sind.

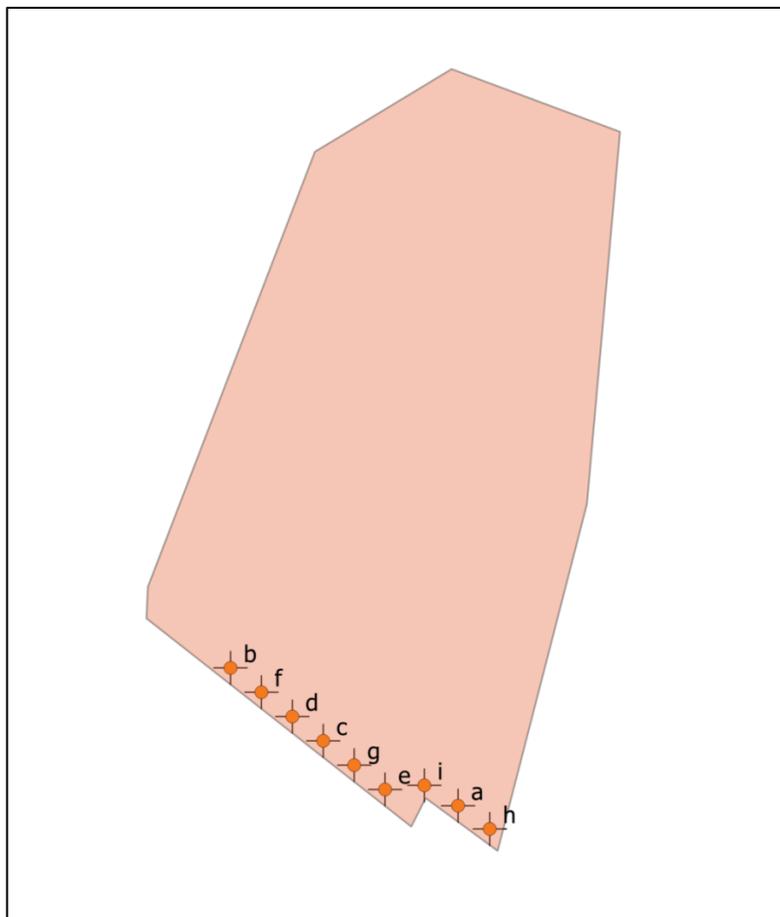


Abbildung 30: Lage der Sonden innerhalb des Modellstandorts Dresden, Maßstab 1:2.500

Analog zu den beiden anderen Modellgebieten wurden die Sonden auch am Modellstandort Dresden nah an der Grundstücksgrenze positioniert. Die Lage der Sonden, die untereinander einen Abstand von 15 m aufweisen, ist aus Abbildung 30 ersichtlich.

Ein wichtiges Modellergebnis stellt die Entwicklung der Soletemperaturen in den Erdwärmesonden über den Modellierungszeitraum dar.

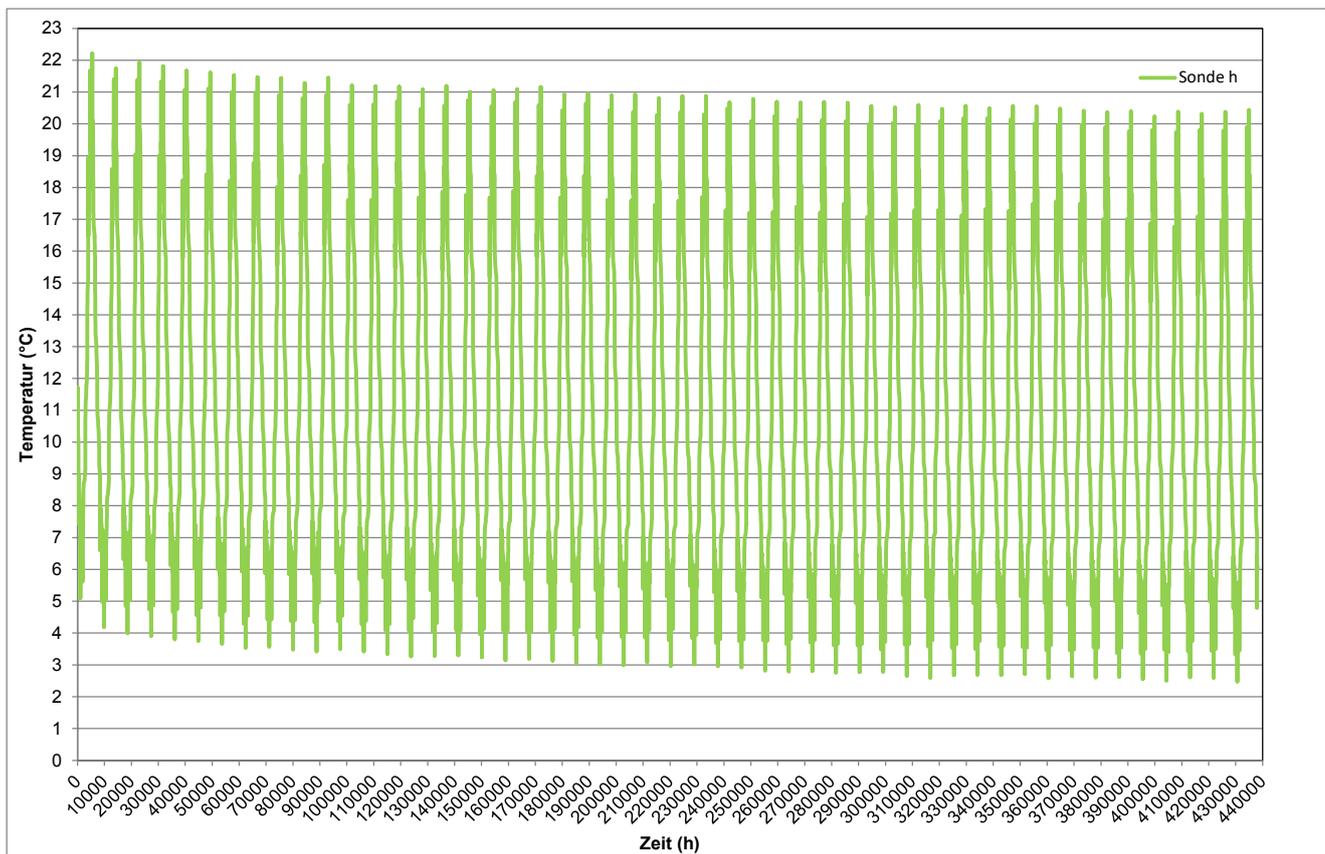


Abbildung 31: Entwicklung der mittleren Sondentemperaturen über 50 Jahre „wärmste“ Sonde, Modellgebiet Dresden

In Abbildung 31 ist exemplarisch der Temperaturverlauf für die „wärmste“ Sonde des Sondenfeldes dargestellt. Da die abzudeckenden energetischen Anforderungen deutlich heizlastig sind, nehmen die prognostizierten Soletemperaturen über die Betrachtungsdauer kontinuierlich ab. Für die wärmste Sonde ist nach 50 Jahren eine minimale Solemitteltemperatur von 2,5 °C zu erwarten.

Die maximalen Solemitteltemperaturen bei sommerlicher Kühlung werden in den Anfangsjahren erzielt. Sie nehmen aufgrund der fortschreitenden Auskühlung des Untergrundes über den Betrachtungszeitraum ebenfalls ab. Als Maximalwert werden 22,2 °C erreicht.

Abbildung 32 zeigt als Pendant den Temperaturverlauf für die „kälteste“ Sonde des Modellgebiets Dresden. Für sie wird nach 50 Jahren eine minimale Solemitteltemperatur von 1,6 °C prognostiziert. Der Maximalwert infolge Kühlung beträgt für diese Sonde 22,2 °C.

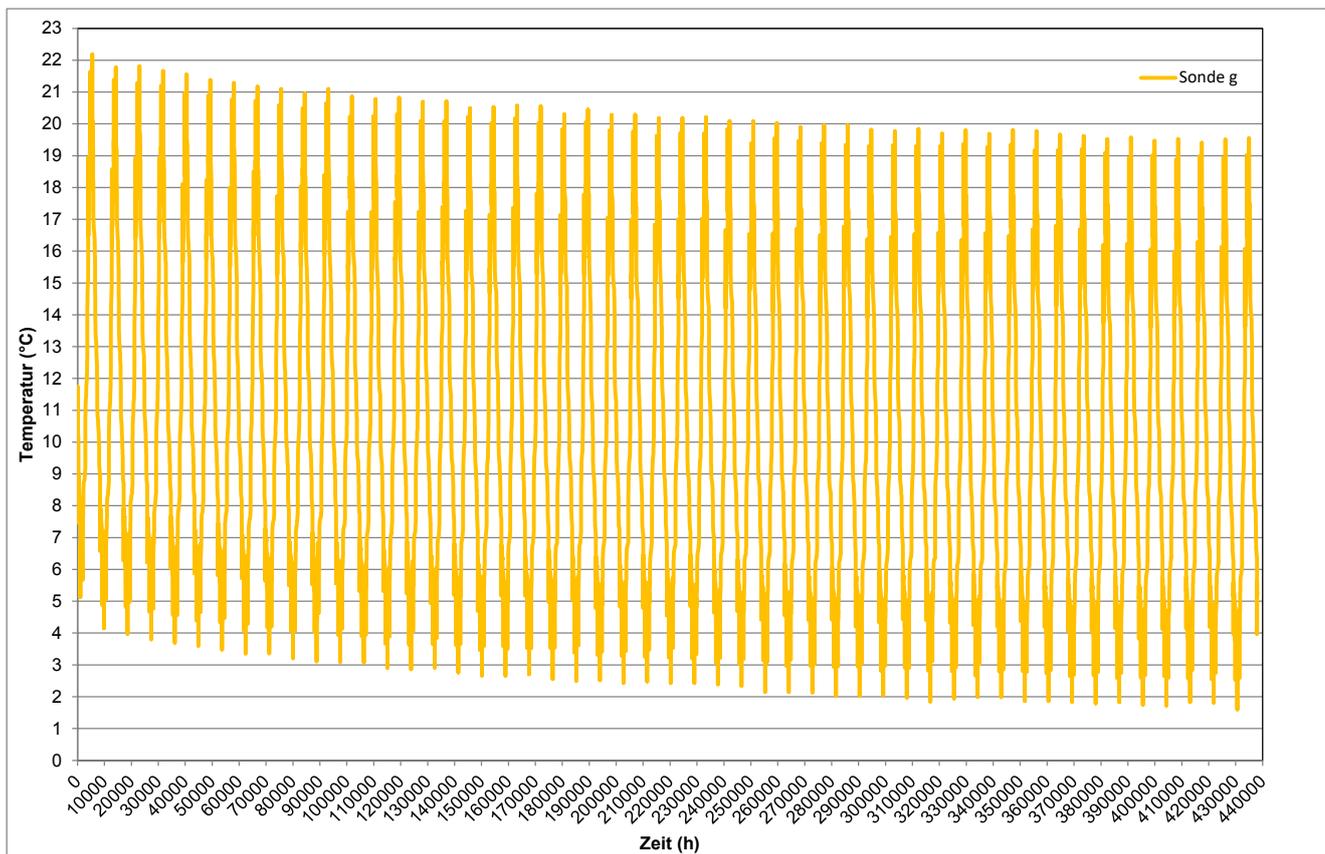


Abbildung 32: Entwicklung der mittleren Sondentemperaturen über 50 Jahre- „kälteste“ Sonde, Modellgebiet Dresden

Zur Darstellung der Auswirkungen auf den Untergrund wurden Karten mit den entsprechenden Beeinflussungsbereichen erstellt. Dabei wurden in Abstimmung mit dem AG die folgenden hydrogeologischen Einheiten betrachtet:

- Pleistozäner Grundwasserleiter (Niederterrassen),
- Labiatus-Pläner,
- Oberhäslich-Formation,
- Meissner Monzonite.

Zudem wurde bei den Darstellungen zwischen Heiz- und Kühlperiode unterschieden.

Die Darstellungen für das Modellgebiet Dresden sind in Anlage 9 enthalten. Die Abbildungen beziehen sich analog der Vorgehensweise für die beiden anderen Modellgebiete auf den gesamten Bereich, in dem eine Beeinflussung durch die Erdwärmesonden nachweisbar ist ($\Delta T \geq 0,1 \text{ K}$).

Aus der Abbildung für den pleistozänen Grundwasserleiter am Ende der Heizperiode ist eine deutliche Verfrachtung der Temperaturbeeinflussung in Grundwasserfließrichtung zu erkennen. Gleichzeitig lässt sich aus der Abbildung für den pleistozänen Grundwasserleiter am Ende der Kühlperiode ableiten, dass der Wärmetransport mit dem Grundwasserleiter in Kombination mit der Wärmeeinspeisung durch die Kühlung zu einer nahezu vollständigen Regeneration der Sonden im Bereich des Grundwasserleiters führt.

In den wesentlich geringer durchströmten, darunterliegenden hydrogeologischen Einheiten der sächsischen Kreide sind elliptische Beeinflussungsbereiche um die Sonden ausgebildet.

In den folgenden Tabellen sind die Größen der Beeinflussungsbereiche ($\Delta T \geq 0,1 \text{ K}$) aus Anlage 9, getrennt für Heiz- und Kühlperiode, zusammengefasst.

Tabelle 20: Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche Ende Heizperiode, Modellgebiet Dresden

Hydrogeologische Einheit	Längsausdehnung	Querausdehnung
Pleistozäner Grundwasserleiter (HGK 6)	170 m	160 m
Labiatus-Pläner (HGK 10)	180 m	120 m
Oberhäslich-Formation (HGK 12)	215 m	160 m
Meissner Monzonite (HGK 15), 175 m Tiefe	240 m	180 m
Meissner Monzonite (HGK 15), 330 m Tiefe	240 m	185 m

Es ist ersichtlich, dass die Beeinflussung in der Oberhäslich-Formation größer ausfällt, als im Labiatus-Pläner. Dabei ist die Oberhäslich-Formation sowohl durch eine bessere Wärmeleitfähigkeit als auch eine größere Tiefenlage gekennzeichnet.

Im Bereich der Meissner Monzonite, die am Modellstandort ab ca. 85 m u. GOK anstehen, wird der größte Anteil der Erdwärme gewonnen. Daher sind hier die räumlich größten ellipsenförmigen Beeinflussungsbereiche um die Sonden ausgebildet. Diese unterscheiden sich für die betrachteten Tiefen von 175 m u. GOK und 330 m u. GOK nur unwesentlich voneinander.

Tabelle 21: Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche Ende Kühlperiode, Modellgebiet Dresden

Hydrogeologische Einheit	Längsausdehnung	Querausdehnung
Pleistozäner Grundwasserleiter (HGK 6)	30 m	15 m
Labiatus-Pläner (HGK 10)	180 m	120 m
Oberhäslich-Formation (HGK 12)	215 m	165 m
Meissner Monzonite (HGK 15), 175 m Tiefe	240 m	180 m
Meissner Monzonite (HGK 15), 330 m Tiefe	240 m	185 m

Aus einem Vergleich der Werte in Tabelle 20 und Tabelle 21 geht hervor, dass sich mit der schon erwähnten Ausnahme für den pleistozänen Grundwasserleiter über den Zeitraum von 50 Jahren klar definierte Beeinflussungsareale um die Sonden ausgebildet haben, die sich für die Zustände Heizen und Kühlen nur unwesentlich voneinander unterscheiden. Anschaulich deutlich wird dies auch aus den vertikalen Schnittdarstellungen in Anlage 9. Unterschiede zwischen den beiden Betriebszuständen Heizen und Kühlen lassen sich im Nahumfeld der Sonden erkennen, das am Ende der Kühlperiode höhere Temperaturen durch den erfolgten Wärmeeintrag aufweist.

Wie bereits beschrieben, beziehen sich die Darstellungen in Anlage 9 auf die beeinflussten Bereiche, die sich mindestens 0,1 K von der ungestörten Untergrundtemperatur unterscheiden. Folglich ist bei einer größeren Temperaturdifferenz eine geringere Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche zu erwarten. Als Beispiel soll hier das Verhältnis zu 1 K Temperaturdifferenz aufgeführt werden. Im Bereich des pleistozänen Grundwasserleiters sind die Beeinflussungen auf die unmittelbare Umgebung der Sonden begrenzt. In den anderen dargestellten hydrogeologischen Einheiten reduziert sich der beeinflusste Bereich in Längsausdehnung auf ca. 60 % der in Tabelle 20 und Tabelle 21 genannten Werte. Der Beeinflussungsbereich in Querrichtung verringert sich auf ca. 30 % der Werte in Tabelle 20 und Tabelle 21.

6.4 Vergleich der Modellergebnisse

Die geothermische Modellierung wurde für alle Modellgebiete mit denselben energetischen/gebäudetechnischen Anforderungen durchgeführt.

Im Ergebnis der Modellierung ist festzustellen, dass zur Deckung des Energiebedarfs für die Musterstandorte in den Modellgebieten Leipzig und Dresden jeweils 3.150 Bohrmeter bzw. neun Sonden à 350 m benötigt werden. Trotz

leichter Unterschiede der berechneten maximalen und minimalen Temperaturverhältnisse nach/innerhalb 50 Betriebsjahren ähneln sich somit beide Musterstandorte. Als Ursachen für die vergleichbaren Modellergebnisse werden die nachfolgend aufgeführten Sachverhalte angesehen.

Beide Modellgebiete sind durch das Vorhandensein von Grundwasser oberhalb des Festgesteins gekennzeichnet. Die über die Sondentiefe von 350 m angesetzten ungestörten Untergrundtemperaturen von 14,1 °C bzw. 14,3 °C (vgl. Tabelle) unterscheiden sich nur wenig. Des Weiteren liegt die Wärmeleitfähigkeit der angetroffenen Gesteine zumeist in vergleichbarer Größenordnung. Allerdings fällt die Größe der Beeinflussungsbereiche im Modellgebiet Dresden etwas geringer aus als im Modellgebiet Leipzig. Dies resultiert vor allem aus der etwas besseren Wärmeleitfähigkeit des Meissner Monzonits sowie leicht höheren Untergrundtemperaturen am Modellstandort Dresden von durchschnittlich 14,3 °C über die Sondenlänge von 350 m im Vergleich zur Grauwacke (am Modellstandort Leipzig liegt die Durchschnittstemperatur bei 14,1°C).

Im Modellgebiet Chemnitz werden 3.850 Bohrmeter bzw. 11 Sonden à 350 m benötigt. Dies entspricht im Vergleich zu den beiden anderen Modellgebieten einem Plus von ca. 20 %.

Als Gründe für die ungünstigeren Verhältnisse im Modellgebiet Chemnitz sind die geringeren Wärmeleitfähigkeiten der anstehenden Gesteine, die fehlende Grundwasserströmung in der Lockergesteinsbedeckung, aber auch die geringste Untergrundtemperatur über die Sondentiefe von 350 m zu nennen (13,7°C).

7 Monitoringkonzept

Das Monitoring von Erdwärmeanlagen erfolgt mit der Zielstellung, den laufenden Anlagenbetrieb zu erfassen und anhand der gewonnenen Daten die Effizienz der Erdwärmennutzung zu beurteilen sowie im Bedarfsfall eine Optimierung des Anlagenbetriebes vornehmen zu können. Auf diese Weise können Beeinträchtigungen, die nicht zum sofortigen Anlagenausfall führen, identifiziert und behoben werden.

Des Weiteren wird an größeren Erdwärmeanlagen in der Regel ein Monitoring durchgeführt, um die Einhaltung genehmigungsrechtlicher Vorgaben im nahen und weiteren Umfeld der Anlage, z.B. bestimmte Temperaturreichweiten, zu kontrollieren.

Für ein sinnvolles geothermisches Monitoring ist neben der kontinuierlichen Messwerterfassung auch eine regelmäßige Auswertung dieser Daten erforderlich. Im Hinblick auf die Betriebszustände einer Erdwärmeanlage, die sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen genutzt wird, bietet sich die Auswertung 2 x pro Jahr, jeweils am Ende der Heiz- und Kühlperiode an.

Im Folgenden wird ein exemplarisches Monitoringkonzept, das für die im Forschungsvorhaben betrachtete Musteranlage adäquat ist, beschrieben. Es wird darauf hingewiesen, dass das beschriebene Monitoring eine Orientierung für die Errichtung zukünftiger Anlagen gibt, die jedoch unter Berücksichtigung der gestellten behördlichen Vorgaben sowie der Anforderungen des Bauherrn für das Einzelvorhaben geprüft und modifiziert werden sollte.

7.1 Geothermisches Anlagenmonitoring

7.1.1 Optimierung des Anlagenbetriebes

Zur Überprüfung und Optimierung des Anlagenbetriebes einer Erdwärmeanlage erfolgt eine kontinuierliche Erfassung der Volumenströme durch die einzelnen Erdwärmesonden, der Vor- und Rücklauftemperaturen (sondenspezifisch oder als Mittelwert über alle Sonden) bzw. der Wärmemengen zu den Sonden (ebenfalls sondenspezifisch oder als Mittelwert).

Diese Daten können dazu verwendet werden, den Wärmeaustrag (Heizfall) bzw. Wärmeeintrag (Kühlfall) in die Sonden zu überwachen und diesen so zu steuern, dass ein effizienter Anlagenbetrieb gewährleistet wird. Zielstellung ist dabei, die Durchströmung und den Wärmeaustrag/ Wärmeeintrag der einzelnen Sonden so zu steuern, dass eine möglichst gleichmäßige Belastung der Sonden erfolgt. Als Messort für die Erfassung der genannten Parameter bietet sich der Bereich unmittelbar vor Anschluss an den Soleverteiler an.

Zur Regulierung der Durchflüsse in den Vor- und Rückläufen werden Strangreguliertventile, wie z.B. Hydrocontrol verwendet. Für die Erfassung der Durchflüsse im laufenden Betrieb sind induktiv- magnetische Sensoren oder Ultraschallsensoren mit entsprechendem Datenloggeranschluss geeignet. Dabei sind Ultraschallsensoren auch als Aufschallsensoren verfügbar. Für die Erfassung der Temperaturen im Vor- und Rücklauf empfehlen sich Tauchfühler, die für den Anschluss an einen Datenlogger geeignet sind und mit diesem kombiniert werden.

Die Aufnahme des Monitorings sollte zeitgleich mit der Inbetriebnahme der Sondenanlage bzw. kurz davor erfolgen. Für das erste Betriebsjahr wird eine minütliche Messwertaufnahme vorgeschlagen. Nach der Auswertung jeweils eines Heiz- und Kühlzeitraumes kann, auch im Hinblick auf die konkrete Zielstellung des Monitorings durch den Betreiber, ggf. eine Anpassung der Messwertaufnahme erfolgen.

7.1.2 Temperaturmonitoring im Nahumfeld der Sondenanlage

Das Temperaturmonitoring im Nahumfeld der Erdwärmesonden, in der Regel ist hiermit der Ringraum gemeint, kann zur Überwachung genehmigungsrechtlicher Temperaturvorgaben für den Untergrund genutzt werden. Zudem ist damit prinzipiell auch eine Optimierung des Energieaustrages / -eintrages der einzelnen Sonden unter Einhaltung vorgegebener Temperaturrandbedingungen möglich.

Für das kontinuierliche Temperaturmonitoring des Untergrundes im unmittelbaren Bereich der Erdwärmesondenanlage bieten sich drei unterschiedliche Systeme an. Sie werden im Folgenden näher vorgestellt und verglichen.

7.1.3 Temperaturmessketten

Temperaturmessketten bestehen aus einem Messkabel, an dem in definierbaren Abschnitten Temperatursensoren angebracht sind. Eine praktikable Größenordnung besteht dabei in der Anordnung von bis zu neun Sensoren über eine Tiefe von 350 m. Die Anordnung der Sensoren über die Tiefe sollte dabei unter Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse erfolgen (repräsentative Erfassung der einzelnen Schichten). Eine ungleichmäßige Platzierung der Sensoren entlang der Messkette ist somit zu erwarten. Die Messketten werden kabellos mit einer Auslese- und Datenspeichereinheit verbunden. Die Datenübertragung findet per Funk statt.

Der Einbau der Temperaturmessketten erfolgt außen an einem Rohr der Erdwärmesonde im Zug der Installation. Dafür sollte ein Vorlaufrohr ins Erdreich gewählt werden, um die minimalen Fluidtemperaturen zu erfassen. Dabei wird die Temperaturmesskette z.B. mit Klebeband fest an der Wandung der Erdwärmesonde fixiert. Beim Einbau und der Verfüllung der Erdwärmesonde muss besonders sorgfältig gearbeitet werden, um Beschädigungen der Messkette während der Einbauphase zu vermeiden. Gerade bei mitteltiefen Erdwärmesonden ist das Risiko einer Beschädigung der Messkette während des Einbaus aufgrund der langen Einbaustrecke als hoch einzuschätzen.

Alternativ zur Fixierung der Messkette an ein Sondenrohr ist auch der Einbau der Temperaturmesskette in einem separaten, fluidgefüllten (meist Wasser) Rohr innerhalb des Ringraumes möglich. Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht im deutlich besseren Schutz vor Beschädigungen während des Einbaues. Zudem kann bei dieser Variante im Fall von Defekten an der Messkette auch jederzeit deren Ausbau und Reparatur erfolgen. Als Nachteile können ein etwas schlechterer Anschluss der Messkette an den Untergrund (separater thermischer Widerstand durch Schutzrohr) und der Einbau eines zusätzlichen Rohres mit eventuell notwendiger Erhöhung des Bohrdurchmessers genannt werden. Mit der beschriebenen Vorgehensweise werden die Untergrundtemperaturen im unmittelbaren Nahbereich einer Erdwärmesonde in definierten Tiefenbereichen kontinuierlich aufgezeichnet.

Prinzipiell ist der Einbau einer Temperaturmesskette auch in einem bzw. mehreren separaten Messrohren innerhalb eines Sondenfeldes denkbar. Dafür wären jedoch entsprechend separate Bohrungen notwendig.

7.1.4 Faseroptisches Temperaturmesssystem

Das faseroptische Temperatursensorkabel ist zur lückenlosen Erfassung der Temperaturen entlang des gesamten Messkabels geeignet. Standardmäßig werden jeweils die integralen Werte je 0,5 m erfasst und ausgegeben. Die Sensorkabel werden stationär mit einem Temperaturmessgerät und einem Mess-PC zur Datenspeicherung verbunden.

Der Einbau des Temperatursensorkabels erfolgt außen an einem Rohr der Erdwärmesonde im Zuge der Installation. Dabei ist die Vorgehensweise analog zu den vorab beschriebenen Temperaturmessketten. Nach dem Einbau muss das Temperaturmesssystem auf den Standort kalibriert werden. Mit der beschriebenen Vorgehensweise werden die Untergrundtemperaturen im unmittelbaren Nahbereich einer Erdwärmesonde über die gesamte Rohrlänge von Vor- und Rücklauf kontinuierlich erfasst.

Prinzipiell ist der Einbau auch in einem separaten Messrohr innerhalb des Ringraumes einer Erdwärmesonde oder separaten Messrohren innerhalb des Sondenfeldes denkbar. In diesem Fall ist jedoch keine getrennte Erfassung von Vor- und Rücklauftemperaturen möglich.

7.1.5 Temperaturmessmolch

Beim Temperaturmessmolch handelt es sich um eine Kugel mit einem Durchmesser von 20 mm, die in eine Erdwärmesonde eingebracht wird. Die Kugel sinkt in der Sonde nach unten, erfasst dabei Druck und Temperatur und speichert diese Daten ab. Maximal ist die Abspeicherung von 3.200 Messwerten möglich. Die Messwertaufnahme kann zwischen einem Wert pro Minute bis 32 Werte pro Sekunde frei gewählt werden. Die Sinkgeschwindigkeit wird vom Hersteller mit 6,5 m/min für Sonden DA 32 und 15,0 m/min für Sonden DA 40 (bezogen auf Wasser) angegeben. Die Einstellung der Messwertaufnahme muss daher an die gewünschte Auflösung über die Tiefe und die zu erwartende Sinkgeschwindigkeit individuell angepasst werden. Für Sonden größeren Durchmessers liegen bisher keine Erfahrungen zur Sinkgeschwindigkeit vor. Weiterhin wird vom Hersteller ein maximaler Einsatzbereich bis 30 bar bzw. 300 m angegeben.

Für den Einsatz in produzierenden Erdwärmesonden ist die Kombination mit einem Autobypass möglich, der zu definierten Zeitpunkten den Messmolch ein- und ausschleust. In diesem Fall wird ein Temperaturprofil im Vorlauf der Sonde gemessen. Die genaue Sinkgeschwindigkeit muss dabei für das konkret vorhandene Wärmeträgermedium im Vorfeld ermittelt werden.

7.1.6 Schlussfolgerungen

In Zusammenfassung der beschriebenen drei Systeme wird für ein mögliches Langzeitmonitoring an mitteltiefen Erdwärmeeinrichtungen die Auswahl eines kabelgebundenen Systems empfohlen.

Vorteile der kabelgebundenen Systeme sind:

- Erfassung der Untergrundtemperaturen im Nahfeld der Sonden,
- wartungsfreie Messwertaufnahme,
- frei wählbare zeitliche Auflösung,
- bewährte Messverfahren,
- Nutzung auch für die Optimierung des Energieeintrages /- austrages an den Sonden möglich.

Ein Nachteil wird in einer möglichen Beschädigung/ Zerstörung der Messkabel während des Einbaus gesehen, soweit die Befestigung an der Außenwand der Erdwärmesonde erfolgt.

Um einen Vergleich der beschriebenen kabelgebundenen Systeme hinsichtlich der anfallenden Kosten zu erhalten, wurden von zwei Anbietern Angebote abgefragt. Dafür ist als exemplarische Randbedingung vorgegeben worden, dass das Temperaturmonitoring an drei Erdwärmesonden a 400 m erfolgen soll. Hierbei sollten jeweils die beiden Sonden an den Rändern sowie eine Sonde in der Mitte des Sondenfeldes in das Monitoring einbezogen werden.

Für die Temperaturmessketten einschließlich Ausleseeinheit und Software sowie Zubehör fallen danach ca. 28.000 € netto an Investitionen an. Bei Einbau von nur einer Messkette (z.B. an der thermisch am stärksten belasteten (kältesten oder wärmsten) Sonde) belaufen sich die Kosten auf ca. 11.500 € netto. Für die Temperaturerfassung über die Tiefe stehen 9 Sensoren zur Verfügung, so dass bei (theoretisch) gleichmäßiger Aufteilung über die Tiefe alle 44 m ein Messwert erfasst wird.

Für das faseroptische Temperaturmesssystem ergeben sich Investitionskosten von ca. 80.000 € netto, wobei der Hauptanteil von ca. 60.000 € netto auf das benötigte Temperaturmessgerät einschließlich PC und Software entfällt. Bei Ausrüstung von nur einer Sonde fallen für das Messsystem ungefähre Kosten von 72.000 € netto an. Im Vergleich

zu den Temperaturmessketten liefert das faseroptische Messsystem bei Weitem höher aufgelöste Daten in einem Intervall von 0,5 m. Inwiefern diese höhere vertikale Temperaturauflösung erforderlich bzw. angemessen ist, muss im Einzelfall jeweils separat bewertet werden.

7.2 Monitoring zu Auswirkungen auf den Untergrund im weiteren Umfeld der Erdwärmeanlage

Für die Erfassung der Auswirkungen auf den Untergrund im Umfeld der Sondenanlage bieten sich Temperaturmessungen an entsprechend tiefen Grundwassermessstellen bzw. wassererfüllten Leerrohren oder Einfach-U-Sonden an. Für die Untersuchung möglicher Einflüsse auf das Grundwasser und die Verfrachtung von Wärme- und Kältefahnen mit dem Grundwasser sollten mit den Messstellen alle am Standort anzutreffenden Grundwasserleiter zu beobachten sein. Die konkrete Planung zur Errichtung von Temperaturmessstellen muss dabei stets einzelfallbezogen unter Beachtung der Untergrundverhältnisse erfolgen. Bei Standorten mit Stockwerksbau wird in Sachsen die Basis des tiefsten Grundwasserleiters in der Regel oberhalb der Unterkante einer mitteltiefen Erdwärmesonde liegen. Für entsprechende Standorte wird beispielsweise empfohlen, die Temperaturmessstellen noch ca. 2 m in den, den tiefsten Grundwasserleiter unterlagernden Stauer einzubinden. Beim Neubau von Temperaturmessstellen ist grundsätzlich auf eine fachgerechte Ringraumabdichtung zu achten, um hydraulische Verbindungen zwischen getrennten Grundwasserleitern dauerhaft zu unterbinden.

Für die Beobachtung der Einhaltung von Temperaturrestriktionen an Grundstücksgrenzen, Grenzen von bergrechtlichen Bewilligungsfeldern o.ä. kann es darüber hinaus erforderlich sein, das Temperaturmonitoring mit Temperaturmessstellen über die gesamte, durch die Sonden erschlossene Gebirgsmächtigkeit durchzuführen. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn wie am Modellstandort Leipzig die größten Auswirkungen im Festgesteinsbereich zu erwarten sind. Anhaltspunkte, ob hier ein entsprechendes Erfordernis vorliegen könnte, liefert die Dimensionierung der mitteltiefen Sondenanlage im Rahmen einer geothermischen Modellierung.

Für das Temperaturmonitoring im Umfeld von Erdwärmesondenanlagen werden in der Regel eine Anstrommessstelle und eine Abstrommessstelle benötigt. Die Anstrommessstelle muss dabei so positioniert sein, dass sie unter Berücksichtigung der Grundwasserfließrichtung die möglichst unbeeinflussten Temperaturverhältnisse im Untergrund erfasst. Die Abstrommessstelle ist im Abstrom der Sondenlage so zu positionieren, dass sie Informationen über die (tiefenspezifische) Entwicklung der Untergrundtemperatur an einem definierten Punkt des Strömungsfeldes liefert. Das können im Hinblick auf zugrundeliegende Bescheide und Genehmigungen beispielsweise die Grundstücksgrenze oder die Grenze eines bergrechtlichen Bewilligungsfeldes sein. Sollen Abstrommessstellen auf fremden Grundstücken errichtet werden, ist hierfür die Zustimmung des Eigentümers erforderlich.

Die einfachste Möglichkeit des Temperaturmonitorings im weiteren Umfeld der Erdwärmeanlage besteht in einer manuellen Messung des Temperaturprofils an definierten Stichtagen. Diese werden in wasserrechtlichen und / oder bergrechtlichen Genehmigungsbescheiden bestimmt und liegen in der Regel am Ende der Heiz- und Kühlperiode. Die Messung kann mit einem kabelgebundenen Temperatursensor oder dem Temperaturmessmolch (ggf. mit Rückholhilfe) erfolgen.

Der Vorteil eines Temperaturmessmolches liegt dabei im verringerten Messaufwand und im einfacheren Datenhandling durch die automatische Datenerfassung. Alternativ zu den beschriebenen manuellen Messverfahren ist auch der Einbau einer Temperaturmesskette möglich. Hier sollte jedoch berücksichtigt werden, ob die Erfassung von neun Messwerten über die Tiefe als ausreichend betrachtet wird. Der Einsatz hochauflösender, faseroptischer Messsysteme lässt sich aufgrund der deutlich höheren Kosten (im Vergleich zu den vorgenannten Messverfahren) kaum wirtschaftlich darstellen.

7.3 Empfehlungen zum Monitoringumfang mitteltiefer Erdwärmeanlagen

Aufbauend auf die bisherigen Ausführungen zur Konzeption eines Monitoringsystems sollen abschließend Empfehlungen für ein mögliches Monitoring an einer mitteltiefen Erdwärmeanlage gegeben werden. Für ein Monitoring zur Überwachung und Optimierung des Anlagenbetriebes wird folgender Mindestumfang empfohlen:

- Erfassung der Vor- und Rücklauftemperaturen jeder Erdwärmesonde,
- Erfassung Gesamtdurchfluss und Wärmemenge für die gesamte Sondenanlage.

Der einzusetzende Wärmemengenzähler sollte dabei folgenden Anforderungen genügen:

- Durchfluss einzeln abrufbar,
- für den Einbau im Solekreislauf geeignet,
- für getrennte Erfassung von Wärme- und Kälte geeignet.

Für die Temperaturmessung inklusive Datenspeicherung und -visualisierung ist von ca. 700 € netto pro Erdwärmesonde auszugehen. Für die Erfassung, Speicherung und Visualisierung der Wärme- und Kältemengen sowie des Gesamtdurchflusses ergeben sich ungefähre Kosten von 3.500 € netto.

Eine mögliche Erweiterung des beschriebenen Systems stellt die sondenspezifische Erfassung der Durchflüsse dar. Hier ist pro Sonde mit zusätzlichen Kosten von ca. 1.500 € netto zu rechnen.

Das Einbringen einer Temperaturmesskette oder eines faseroptischen Messsystems in den Ringraum einer oder mehrerer Erdwärmesonden wird für die Optimierung des Anlagenbetriebs nicht für unbedingt erforderlich gehalten. Ein Einbau ist zu empfehlen, wenn ein wissenschaftliches Interesse an der Erforschung ablaufender Prozesse im Ringraum produzierender Erdwärmesonden besteht. Gegebenenfalls könnte sich auch aus fall- und anlagenspezifischen behördlichen Forderungen die Notwendigkeit eines Einbaus ergeben.

Die Errichtung von Temperaturmessstellen im An- und Abstrom einer mitteltiefen Erdwärmeanlage leitet sich in der Regel aus den behördlichen Forderungen im Rahmen des Genehmigungsverfahrens ab und dient der Dokumentation der Auswirkungen auf den Untergrund im Umfeld der Sondenanlage. Sowohl die Notwendigkeit zum Bau der Messstellen als auch ihre Positionierung, Tiefe und geforderte Messintervalle ergeben sich aus der konkreten behördlichen Abwägung des Einzelfalls, so dass außer den in Abschnitt 7.2 getroffenen Aussagen an dieser Stelle keine detaillierteren Angaben einschließlich Kostenschätzung erfolgen können.

8 Kostenbetrachtungen

8.1 Grundlagen

Eine wichtige Bedingung für Betrachtungen zur wirtschaftlichen Realisierbarkeit eines Nutzungskonzeptes stellt der Vergleich mit anderen in Frage kommenden Nutzungskonzepten dar. Daher werden die Kosten für den Bau und Betrieb einer mitteltiefen Erdwärmesondenanlage an den einzelnen Modellstandorten mit denen in Frage kommender Alternativen konventioneller Systeme verglichen.

Für die Beheizung erfolgte ein Vergleich gegen die Energieträger Erdgas und Fernwärme. Für die Kühlung ist grundsätzlich von Kompressionskälte ausgegangen worden. Vernachlässigt wurden für den Vergleich die Forderungen des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmeG), wonach ein bestimmter Anteil der Wärmeenergie aus erneuerbaren Energien erzeugt werden muss. Während dies bei Fernwärme durch den Versorger realisiert wird, müsste dies bei Erdgas z.B. durch Berücksichtigung eines Anteils von 30 % Biogas oder durch Kombination mit Solarthermie erfolgen. Die daraus entstehenden Zusatzkosten sind aufgrund der unterschiedlichen Möglichkeiten zur Deckung des regenerativen Anteils (und entsprechend unterschiedlicher Kostenansätze) unberücksichtigt geblieben. Beim Variantenvergleich konkreter Planungen müssen diese jedoch berücksichtigt werden.

Zusammengefasst werden damit folgende Systeme in die Kostenbetrachtungen einbezogen:

- Wärmepumpenanlage mit mitteltiefen Erdwärmesonden,
- Erdgas und Kompressionskälte,
- Fernwärme und Kompressionskälte.

Prinzipiell könnte auch Kälte wie Wärme über Nahversorgungsnetze verteilt werden. Eine Recherche zum Stand des Ausbaus der Kältenetze in den sächsischen Großstädten ergab allerdings, dass nur die Stadt Chemnitz über ein größeres Kältenetz verfügt. Daher wurde Fernkälte nicht den Vergleich einbezogen.

Die Kostenbetrachtungen für den Bau und den Betrieb der benannten Wärme- und Kälteversorgungssysteme an den einzelnen Modellstandorten wurden in Anlehnung an VDI 2067, Blatt 1 (VDI, 2012) durchgeführt. Sie basieren auf den jeweiligen Nettokosten. Daher handelt es sich bei allen Kostenangaben im Kapitel 8 um Nettowerte.

Nach der genannten Richtlinie werden die zu berücksichtigenden Kosten in folgende Kostengruppen unterteilt:

- kapitalgebundene Kosten,
- bedarfsgebundene Kosten,
- betriebsgebundene Kosten,
- sonstige Kosten.

Unter den *kapitalgebundenen Kosten* werden allgemein die Ausgaben für Planung, Anschaffung und Erneuerung zusammengefasst.

Um eine möglichst realistische Kostenberechnung durchzuführen, fanden auch die anfallenden Planungskosten Beachtung. Dazu wurden anhand der geschätzten Investitionskosten die jeweiligen Planungskosten nach HOAI (HOAI, 2013) ermittelt. Zugrunde lag dabei §56 für Honorare Grundleistung „Technische Ausrüstung“. Dabei wurde die Honorarzone II, mittlerer Ansatz berücksichtigt.

Weiterhin sind in die Kostenbetrachtungen die möglichen Förderungen für den Einsatz erneuerbarer Energien einbezogen worden. Während der redaktionellen Überarbeitung des Berichts traten mit Beginn des Jahres 2020 erheblich günstigere Fördermöglichkeiten für Geothermie in Kraft. Gemäß (BAFA, 2020) sind ab 01.01.2020 nunmehr neben der bisherigen Wärmepumpenförderung auch die Investitionen für die Errichtung von Erdwärmesondenanlagen förderfähig. Der förderbare Anteil, welcher auch die Planungskosten einbezieht, beträgt für Neubauten dabei 35 % der Gesamtinvestition. Daher wurden die Kostenbetrachtungen unter Berücksichtigung der neuen Fördermöglichkeiten überarbeitet und auf die aktuellen Verhältnisse abgestellt.

In VDI 2067, Blatt 1 (VDI, 2012) werden für die einzelnen Bestandteile einer Heizungsanlage rechnerische Nutzungsdauern angegeben. Diese betragen für Gaskesselanlagen, Wärmepumpen und Fernwärmeübergabestationen jeweils 20 Jahre. Davon abweichend betragen die rechnerischen Nutzungsdauern für Erdwärmesonden 50 Jahre sowie für Kompressionskältemaschinen 15 Jahre.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Nutzungsdauern erfolgte die Kostenbetrachtung für eine einheitliche Nutzungsdauer von 20 Jahren. Die Gesamtinvestitionskosten für die Erdwärmesondenanlagen wurden rechnerisch damit zu 40 % berücksichtigt, die Investitionskosten für die Kompressionskälte zu 133 %.

Vereinfachend ist für die Berechnungen die Finanzierung über Fremdkapital unter Zahlung eines marktüblichen Zinses vernachlässigt worden. Es scheint nicht unrealistisch, dass bei einem Gebäudeneubau dieser Größenordnung Gesamtinvestitionen zwischen 50 und 100 Mio. € (je nach Ausstattungsgrad) anfallen. Damit betragen die Gesamtinvestitionskosten für eine mitteltiefe Erdwärmesondenanlage von ca. 1,5 Mio. € demnach 1,5 – 3 % der Gesamtsumme. Weiterhin wurde für die Betrachtungen die jährliche Inflationsrate vernachlässigt.

Die *bedarfsgebundenen Kosten* entsprechen den Energiekosten für Strom, Erdgas bzw. Fernwärme, die zur Bereitstellung der erforderlichen Wärme- und Kältemengen eingesetzt werden müssen. Für die Berechnungen wurden die jeweiligen Preisangaben der Stadtwerke in Leipzig, Chemnitz und Dresden herangezogen (Stand November 2019). Eine Berücksichtigung möglicher Preisentwicklungen / -anstiege blieb mit Hinblick auf die Preisentwicklungen bei den jeweiligen Wärmeträgern in den letzten fünf Jahren unberücksichtigt. Diese wäre ohnehin als überaus spekulativ zu betrachten. Gemäß Angaben der Bundesnetzagentur (Stand April 2019) ist für Erdgas gegenüber 2014 ein Preisrückgang um 6,4 % bzw. 1,3 % pro Jahr zu verzeichnen. Für Strom wird dagegen ein Preisanstieg um 4,5 % bzw. 0,9 % pro Jahr angegeben.

Die *betriebsgebundenen Kosten* beinhalten die Kosten, die bei der Bedienung, Wartung, Inspektion und Reparatur der Anlage anfallen. Nach VDI 2067, Blatt 1 (VDI, 2012) werden betriebsgebundene Kosten als Prozentsatz von der Investitionssumme sowie mit einem bestimmten Ansatz an Stundenaufwand pro Jahr berücksichtigt. Einen Überblick über die angesetzten Werte gibt die folgende Tabelle.

Tabelle 22: Ansatz für betriebsgebundene Kosten

System	Kostenanteil	Stundenaufwand
mitteltiefe Erdwärmesondenanlage - Wärmepumpe	2,5 %	5 h
mitteltiefe Erdwärmesondenanlage - Erdwärmesonden	0,5 %	0 h
Erdgaskesselanlage	3,0 %	20 h
Fernwärmeübergabestation	3,0 %	0 h
Kompressionskältemaschine	3,5 %	1 h

Weitere *sonstige Kosten* entstehen für Ausgaben für z.B. Versicherungen und Steuern. Diese wurden bei den Kostenbetrachtungen vernachlässigt.

8.2 Wärmepumpenanlage mit mitteltiefen Erdwärmesonden

Unter Berücksichtigung der vorab beschriebenen Ansätze wurden für die Wärme- und Kälteversorgung mit elektrischen Wärmepumpen unter Nutzung von Geothermie aus einer mitteltiefen Erdwärmesondenanlage als Wärmequelle die folgenden Investitionskosten ermittelt.

Tabelle 23: Investitionskosten Erdwärme

Bestandteil	Leipzig	Chemnitz	Dresden
Erdwärmesondenanlage	1.094.650,00 €	1.166.600,00 €	1.132.900,00 €
Wärmepumpe und Zubehör	106.244,00 €	106.244,00 €	106.244,00 €
Planungskosten	208.830,00 €	218.666,00 €	214.135,00 €
Summe	1.409.724,00 €	1.491.510,00 €	1.453.279,00 €

Nach den aktuellen Richtlinien (BAFA, 2020) fördert das BAFA beim Neubau von Gebäuden den Einsatz von Geothermie mit 35 % der Gesamtinvestitionskosten. Für die Inanspruchnahme der Förderung ist eine JAZ von 4,5 rechnerisch nachzuweisen. Tabelle 24 fasst die Förderanteile für die wesentlichen Bestandteile der Investitionskosten zusammen.

Tabelle 24: Förderfähige Kosten Erdwärme

Bestandteil	Leipzig	Chemnitz	Dresden
Erdwärmesondenanlage	383.128,00 €	408.310,00 €	396.515,00 €
Wärmepumpe und Zubehör	37.185,00 €	37.185,00 €	37.185,00 €
Planungskosten	73.091,00 €	76.533,00 €	74.947,00 €
Summe	493.403,00 €	522.029,00 €	508.647,00 €

Nach Abzug der förderfähigen Kosten resultieren daraus die folgenden, vom Bauherrn aufzubringenden Nettoinvestitionskosten.

Tabelle 25: Investitionskosten Erdwärme abzüglich Förderung

Bestandteil	Leipzig	Chemnitz	Dresden
Erdwärmesondenanlage	711.523,00 €	758.290,00 €	736.385,00 €
Wärmepumpe und Zubehör	69.059,00 €	69.059,00 €	69.059,00 €
Planungskosten	135.740,00 €	142.133,00 €	139.187,00 €
Summe	916.321,00 €	969.482,00 €	944.631,00 €

Unter Ansatz des einheitlichen rechnerischen Nutzungszeitraumes von 20 Jahren sind für die Kostenbetrachtungen die in Tabelle 26 angegebenen Investitionskosten zu berücksichtigen. Dabei wird noch einmal darauf hingewiesen, dass die Investitionskosten für die Erdwärmesondenanlage und die Planungsleistungen aufgrund der Nutzungsdauer von 50 Jahren nur mit 40% angesetzt wurden (siehe Kapitel 8.1).

Tabelle 26: Investitionskosten Erdwärme bezogen auf Nutzungsdauer von 20 Jahren

Bestandteil	Leipzig	Chemnitz	Dresden
Erdwärmesondenanlage	284.609,00 €	303.316,00 €	294.554,00 €
Wärmepumpe und Zubehör	69.059,00 €	69.059,00 €	69.059,00 €
Planungskosten	54.296,00 €	56.853,00 €	55.675,00 €
Summe	407.963,00 €	429.228,00 €	419.288,00 €

Bei linearer Abschreibung über die Nutzungsdauer ergeben sich aus den Investitionskosten die nachfolgend aufgeführten, jährlichen kapitalgebundenen Kosten.

Tabelle 27: Kapitalgebundene Kosten für Wärmepumpenanlagen mit mitteltiefen Erdwärmesonden

Modellstandort	Kosten (€/a)
Leipzig	20.398,17 €
Chemnitz	21.461,39 €
Dresden	20.964,38 €

Wie zu erkennen ist, fallen die kapitalgebundenen Kosten vergleichsweise sehr hoch aus, wobei der größte Anteil auf die Errichtung der mitteltiefen Erdwärmesondenanlage (Abteufen der Bohrungen, Ausbau zu Erdwärmesonden) entfällt. Die betriebsgebundenen Kosten für die Wärmepumpenanlage unter Berücksichtigung der in Tabelle 22 angegebenen Ansätze sind in Tabelle 28 aufgeführt. Die Stunden für den Wartungsaufwand wurden dabei mit 50 €/h berücksichtigt.

Tabelle 28: Betriebsgebundene Kosten (€/a) für Wärmepumpenanlage mit mitteltiefen Erdwärmesonden

Bestandteil	Leipzig	Chemnitz	Dresden
Erdwärmesondenanlage	1.726,47 €	1.726,47 €	1.726,47 €
Wärmepumpe und Zubehör	1.423,05 €	1.516,58 €	1.472,77 €
Wartungsaufwand	250,00 €	250,00 €	250,00 €
Summe	3.399,51 €	3.493,05 €	3.449,24 €

Zur Ermittlung der bedarfsgebundenen Kosten wurden die aktuell gültigen Wärmepumpentarife (Stand November 2019) der lokalen Versorger herangezogen. Diese betragen (Angaben als Nettokosten):

- Modellstandort Leipzig: 18,06 ct/ kWh,
- Modellstandort Chemnitz: 16,52 ct/kWh,
- Modellstandort Dresden: 15,28 ct/kWh.

Die Kostenermittlungen erfolgten unter Berücksichtigung folgender Jahresarbeitszahlen (JAZ) der Wärmepumpen:

- JAZ Heizung: 4,73,
- JAZ Kühlung: 2.

Die JAZ für den Heizbetrieb beruht auf einer rechnerischen Gesamtabstschätzung der Jahresarbeitszahl einer exemplarisch ausgewählten Wärmepumpe bei einer Quellentemperatur (Vorlauf zur Wärmepumpe) von + 2 °C. Dies entspricht den bei der Modellierung angesetzten Temperaturrandbedingungen. Der JAZ für die Kühlung liegt der Ansatz zugrunde, dass 75 % der Kühlarbeit passiv und 25 % der Kühlarbeit aktiv erbracht werden. Damit ergeben sich die in Tabelle 29 aufgeführten bedarfsgebundenen Kosten.

Tabelle 29: Bedarfsgebundene Kosten (€/a) für Wärmepumpenanlage mit mitteltiefen Erdwärmesonden

Bestandteil	Leipzig	Chemnitz	Dresden
Grundgebühr	87,00 €	56,88 €	68,95 €
Heizung Verbrauch	18.327,27 €	16764,48 €	15.506,13 €
Kühlung Verbrauch	1.444,80 €	1.321,60 €	1.222,40 €
Summe	19.859,07 €	18.142,96 €	16.797,48 €

8.3 Erdgas und Kompressionskälte

Bei dieser Variante wird die Gebäudebeheizung und die Warmwasserbereitung über eine Gasbrennwertkesselanlage abgedeckt. Die Kühlung erfolgt über eine Kompressionskältemaschine. Die Schätzung der Investitionskosten für einen Gasbrennwertkessel sowie die zugehörige Schornsteinanlage ist in Tabelle 30 aufgeführt.

Tabelle 30: Investitionskosten Gasbrennwertkesselanlage

Bestandteil	Kosten standortunabhängig
Gasbrennwertkessel	20.000,00 €
Schornstein	3.000,00 €
Planungskosten	9.232,00 €
Summe	32.232,00 €

Bei linearer Abschreibung über die Nutzungsdauer resultieren daraus kapitalgebundene Kosten von 1.611,61 €/a. Die betriebsgebundenen Kosten für die Gasbrennwertkesselanlage unter Berücksichtigung des in Tabelle 22 angegebenen Ansatzes sind in Tabelle 31 aufgeführt. Die Stunden für den Wartungsaufwand wurden dabei mit 50 €/h berücksichtigt.

Tabelle 31: Betriebsgebundene Kosten (€/a) für Gasbrennwertkesselanlage

Bestandteil	Kosten standortunabhängig
Gasbrennwertkesselanlage	690,00 €
Wartungsaufwand	1.000,00 €
Summe	1.690,00 €

Zur Berechnung der bedarfsgebundenen Kosten wurden die Gaspreise der jeweiligen lokalen Versorger (Stand November 2019) berücksichtigt. Folgende Werte (Nettoangaben) wurden angesetzt:

- Modellstandort Leipzig: 4,30 ct/ kWh,
- Modellstandort Chemnitz: 4,57 ct/kWh,
- Modellstandort Dresden: 4,86 ct/kWh.

Daraus resultieren die in Tabelle 32 angegebenen bedarfsgebundenen Kosten.

Tabelle 32: Bedarfsgebundene Kosten (€/a) für Gasbrennwertkesselanlage

Bestandteil	Leipzig	Chemnitz	Dresden
Grundgebühr	117,00 €	220,00 €	399,60 €
Heizung Verbrauch	20.640,00 €	21.936,00 €	23.328,00 €
Summe	20.757,00 €	22.156,00 €	23.727,60 €

Ein Vergleich mit den Werten in Tabelle 29 zeigt, dass die bedarfsgebundenen Kosten einer mitteltiefen Erdwärmesondenanlage unter denen einer Gasbrennwertheizung liegen.

Zur Klimatisierung der Räume in den Sommermonaten kommt eine Kompressionskältemaschine zum Einsatz. Die geschätzten Investitionskosten betragen 78.000 € bei einer rechnerischen Nutzungsdauer von 15 Jahren. Bezogen auf den Vergleichszeitraum von 20 Jahren und den damit zu berücksichtigenden Anteil für die Neuinvestition resultieren daraus Investitionskosten von 104.000 €.

Tabelle 33: Kapitalgebundene Kosten (€/a) für Kompressionskältemaschine

Bestandteil	Kosten standortunabhängig
Kompressionskältemaschine	104.000,00 €
Planungskosten	30.394,56 €
Summe	134.394,56 €

Unter Ansatz einer linearen Abschreibung über die Nutzungsdauer ergeben sich kapitalgebundenen Kosten von 6.719,73 €/a.

Die betriebsgebundenen Kosten für eine Kompressionskältemaschine unter Bezug auf die in Tabelle 22 aufgeführten Werte sind in Tabelle 34 zusammengestellt.

Tabelle 34: Betriebsgebundene Kosten (€/a) für Kompressionskältemaschinen

Bestandteil	Kosten standortunabhängig
Kompressionskältemaschine	3.640,00 €
Wartungsaufwand	50,00 €
Summe	3.690,00 €

Die Berechnung der bedarfsgebundenen Kosten erfolgte auf Basis der jeweiligen Ökostromtarife der lokalen Stromversorger (Stand November 2019). Dabei liegt der Arbeitspreis für Ökostrom nur unwesentlich über dem für Normalstrom.

Folgende Werte wurden angesetzt:

- Modellstandort Leipzig: 24,12 ct/ kWh,
- Modellstandort Chemnitz: 23,45 ct/kWh,
- Modellstandort Dresden: 22,81 ct/kWh.

Für die Performance der Kompressionskältemaschine wurde ein Wert von 3 geschätzt. Damit ergeben sich die in Tabelle 35 angegebenen bedarfsgebundenen Kosten.

Tabelle 35: Bedarfsgebundenen Kosten (€/a) für Kompressionskältemaschinen

Bestandteil	Leipzig	Chemnitz	Dresden
Grundgebühr	105,84 €	105,00 €	147,48 €
Kühlung Verbrauch	12.864,00 €	12506,67 €	12.165,33 €
Summe	12.969,84 €	12.611,67 €	12.312,81 €

8.4 Fernwärme und Kompressionskälte

Bei dieser Variante wird die Beheizung über den Bezug von Fernwärme realisiert, während die Kühlung über eine Kompressionskältemaschine erfolgt. Nach den Angaben der Stadtwerke Leipzig ist beim gegenwärtigen Ausbaugrad des Fernwärmenetzes am gewählten Modellstandort derzeit kein Fernwärmebezug möglich. Um einen Vergleich zu den anderen Modellstandorten zu ermöglichen, wurde Fernwärme für den Modellstandort Leipzig dennoch mit in die Betrachtungen einbezogen. Die Investitionskosten für einen Fernwärmeanschluss umfassen die Hausanschlussstation sowie die wärme- und schallschutztechnische Ertüchtigung des Übergaberaumes. Dafür wurden die in Tabelle 36 angegebenen Kosten geschätzt.

Tabelle 36: Investitionskosten Fernwärmeanschluss

Bestandteil	Kosten standortunabhängig
Hausanschlussstation	20.000,00 €
Übergaberaum	3.000,00 €
Planungskosten	9.232,00 €
Summe	32.232,00 €

Unter Ansatz linearer Abschreibung über die Nutzungsdauer resultieren daraus kapitalgebundene Kosten von 1.611,61 €/a.

Die betriebsgebundenen Kosten für den Fernwärmeanschluss unter Berücksichtigung des in Tabelle 22 angegebenen Ansatzes sind in Tabelle 37 aufgeführt.

Tabelle 37: Betriebsgebundene Kosten (€/a) für Fernwärmeanschluss

Bestandteil	Kosten standortunabhängig
Hausanschlussstation	690,00 €
Wartungsaufwand	0,00 €
Summe	690,00 €

Zur Ermittlung der bedarfsgebundenen Kosten wurden die Abgabepreise für Fernwärme der jeweiligen lokalen Versorger berücksichtigt (Stand November 2019). Diese setzten sich aus einer leistungsbezogenen Grundgebühr, einem Messpreis sowie einem Arbeitspreis zusammen. Für den Arbeitspreis sind folgende Werte berücksichtigt worden:

- Modellstandort Leipzig: 6,32 ct/ kWh,
- Modellstandort Chemnitz: 6,03 ct/kWh,
- Modellstandort Dresden: 6,037 ct/kWh.

Die Werte für Grundgebühr und Messpreis sind in Tabelle 38 angegeben.

Tabelle 38: Bedarfsgebundene Kosten (€/a) für Fernwärme

Bestandteil	Leipzig	Chemnitz	Dresden
Grundgebühr	6.696,60 €	8.758,00 €	11.790,00 €
Messpreis	0,00 €	300,64 €	196,32 €
Heizung Verbrauch	30.336,00	28.944,00	28.977,60
Summe	37.032,60 €	38.002,64 €	40.963,92 €

Die für diese Variante anzusetzenden Kosten für die Kühlung entsprechen den Angaben in Tabelle 35.

8.5 Vergleich der Modellstandorte

Unter Bezug auf die in den Abschnitten 8.2 bis 8.4 ermittelten Daten lassen sich somit die Kosten für die verschiedenen Systeme an den einzelnen Standorten hinsichtlich ihrer Kosten vergleichen. Für das System aus mitteltiefer Erdwärmesondenanlage und Wärmepumpen wurden für den Kostenvergleich die kapitalgebundenen Kosten anteilig nach dem Verhältnis von Heiz- und Kühlarbeit aufgeteilt. Die betriebsgebundenen Kosten wurden dagegen vollständig bei der Heizung berücksichtigt, da der überwiegende Anteil der Kühlung passiv erfolgt.

8.5.1 Modellstandort Leipzig

Den Kostenvergleich für die jährlichen Heizkosten am Modellstandort Leipzig zeigt Abbildung 33.

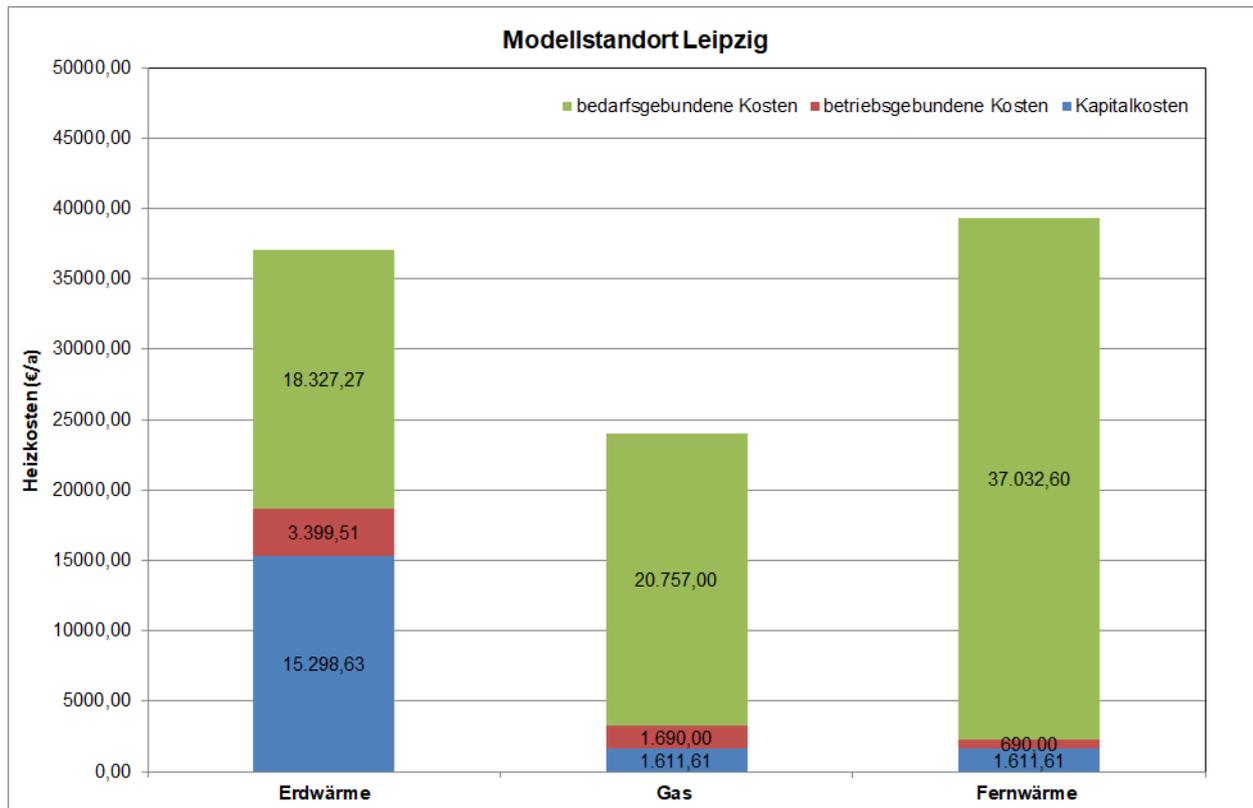


Abbildung 33: Kostenvergleich Heizkosten (€/a) am Modellstandort Leipzig

Es ist ersichtlich, dass bei der Beheizung mit Erdwärme vor allem die hohen kapitalgebundenen Kosten aber auch der vergleichsweise hohen betriebsgebundenen Kosten den Gesamtpreis erhöhen. Dies kann durch die geringsten bedarfsgebundenen Kosten aller Systeme nicht vollständig ausgeglichen werden. Das Heizen mit mitteltiefer Geothermie stellt daher am Modellstandort Leipzig die zweitgünstigste Variante dar.

Unter Bezug auf die in Abbildung 33 dargestellten jährlichen Heizkosten können sogenannte Wärmegestehungskosten ermittelt werden. Dazu werden die anfallenden Kosten auf die zu erbringende Heizarbeit bezogen.

Für den Modellstandort Leipzig fallen für die betrachteten Systeme die folgenden Wärmegestehungskosten an:

- Mitteltiefe Erdwärmesondenanlage: 7,71 ct/kWh,
- Gas: 5,01 ct/kWh,
- Fernwärme: 8,19 ct/kWh.

Ein Vergleich der Werte zeigt, dass die Beheizung mit Gas kostenmäßig am preiswertesten ist. Hier fallen bezogen auf die Erdwärmenutzung nur 65 % der Kosten an. Im Vergleich zur Fernwärme weist Erdwärme einen Kostenvorteil von 6 % auf.

In Abbildung 34 sind die Beträge der jährlichen Kosten für Kühlung am Modellstandort Leipzig zusammengefasst. Es wird deutlich, dass die Erdwärme gegenüber Kompressionskälte bei allen Kostenanteilen als auch insgesamt einen enormen Kostenvorteil aufweist.

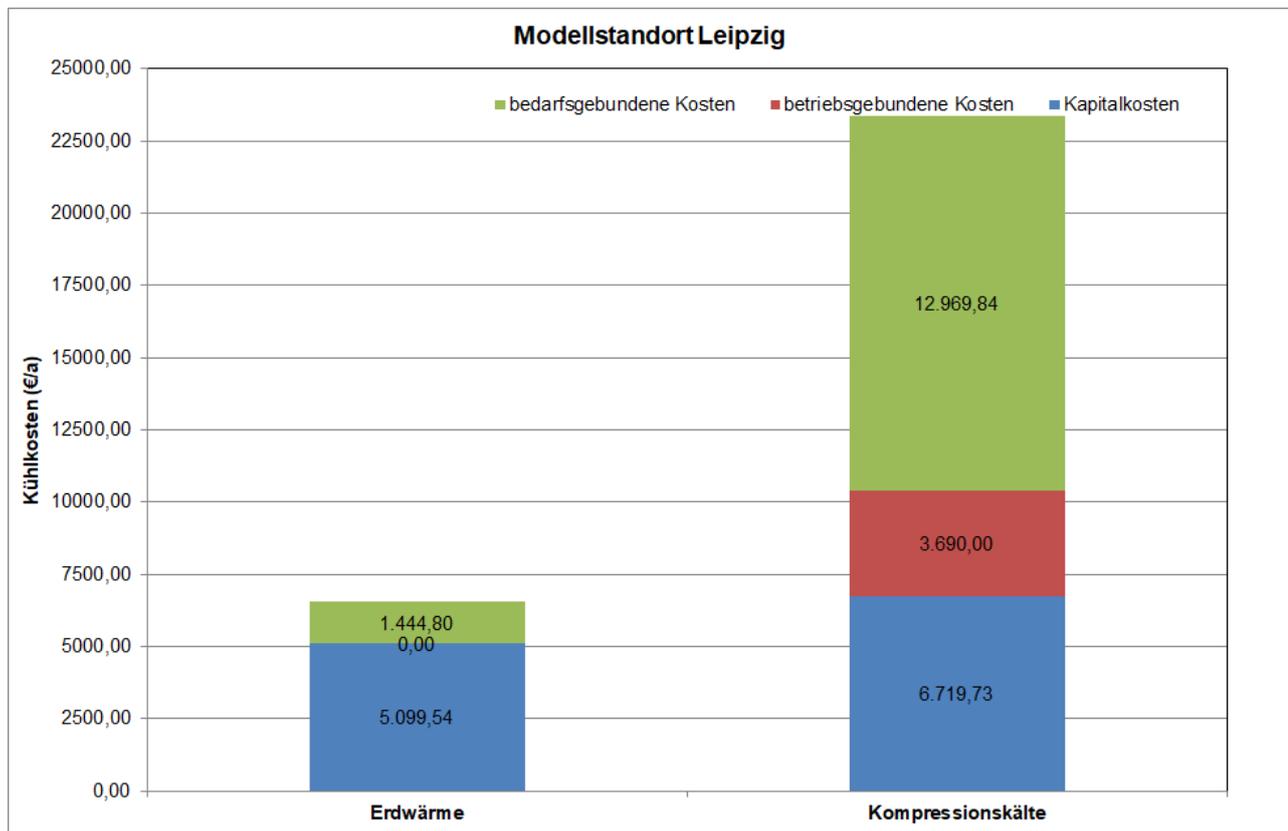


Abbildung 34: Kostenvergleich Kältekosten (€/a) am Modellstandort Leipzig

Analog zu den Heizkosten lassen sich auch für die Kühlung Kältegestehungskosten ausweisen, die die anfallenden Gesamtkosten auf die zugrundeliegende Kühlarbeit beziehen.

Am Modellstandort Leipzig fallen die nachfolgend aufgeführten Kältegestehungskoten an:

- Mitteltiefe Erdwärmesondenanlage: 4,09 ct/kWh,
- Kompressionskälte: 14,61 ct/kWh.

Aus den Werten lässt sich ableiten, dass beim System mitteltiefe Erdwärmesondenanlage die Kosten für die Kühlung nur 28 % im Vergleich zu Kompressionskälte betragen.

In Abbildung 35 sind die jährlichen Gesamtkosten für Heizung und Kühlung am Modellstandort Leipzig dargestellt.

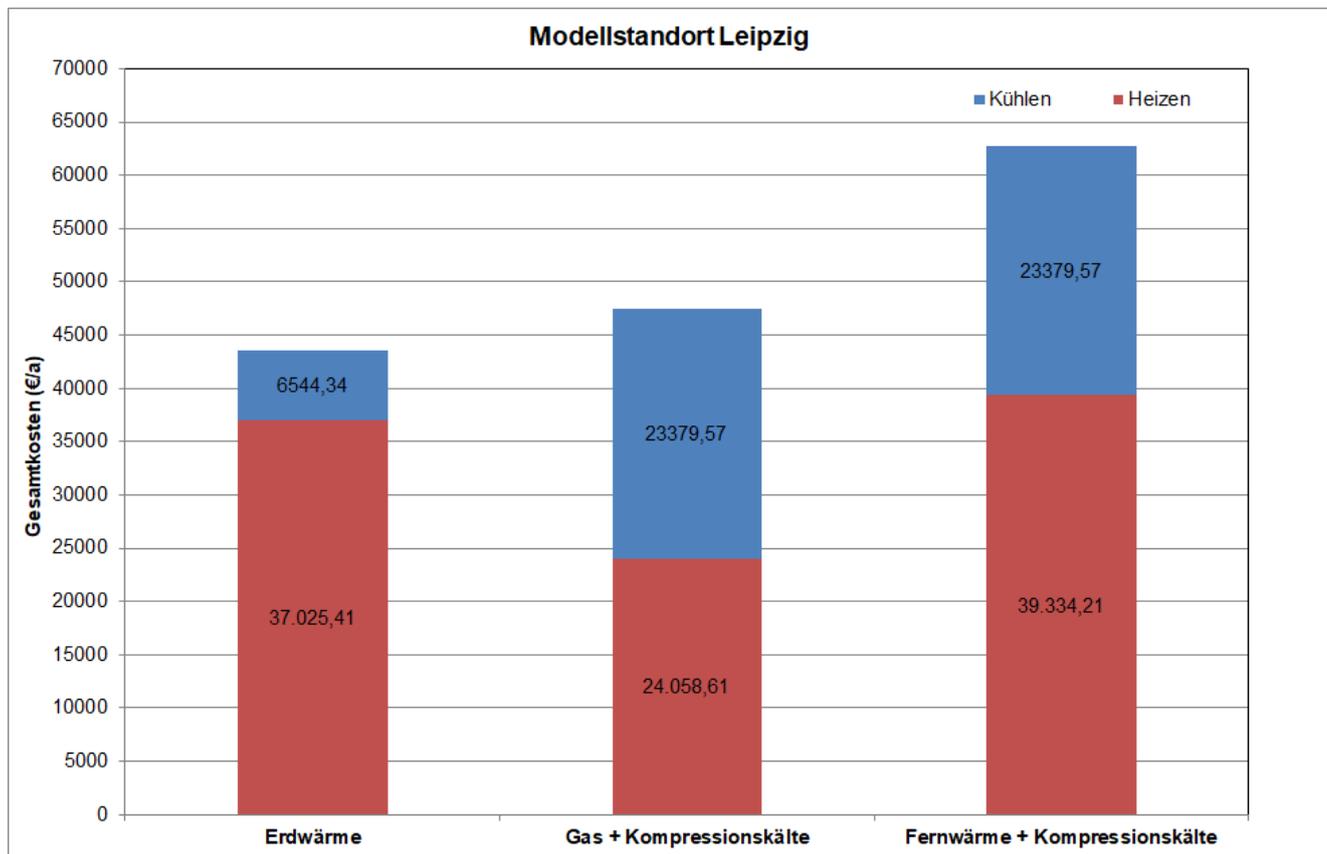


Abbildung 35: Kostenvergleich Gesamtkosten (€/a) am Modellstandort Leipzig

Es ist zu erkennen, dass die Erdwärmennutzung über eine mitteltiefe Erdwärmesondenanlage in Summe das günstigste System darstellt. Die ist vor allem auf die sehr günstigen Kühlkosten zurückzuführen.

Aus den in Abbildung 35 angegebenen Kosten lassen sich theoretische Gestehungskosten ermitteln, die die anfallenden jährlichen Kosten auf die Summe aus Heiz- und Kühlarbeit beziehen. Es ergeben sich folgende Werte:

- Mitteltiefe Erdwärmesondenanlage: 6,81 ct/kWh,
- Gas und Kompressionskälte: 7,41 ct/kWh,
- Fernwärme und Kompressionskälte: 9,80 ct/kWh.

Aus den Werten lässt sich ableiten, dass bei Gesamtbetrachtung der Gebäudeklimatisierung die mitteltiefe Geothermie insgesamt die wirtschaftlichste Nutzung darstellt. Der Kostenvorteil von mitteltiefer Erdwärmennutzung gegenüber Gas und Kompressionskälte beträgt dabei ca. 9 % und gegenüber Fernwärme und Kompressionskälte ca. 44 %.

8.5.2 Modellstandort Chemnitz

Der Kostenvergleich für die jährlichen Heizkosten am Modellstandort Chemnitz ist in Abbildung 36 enthalten.

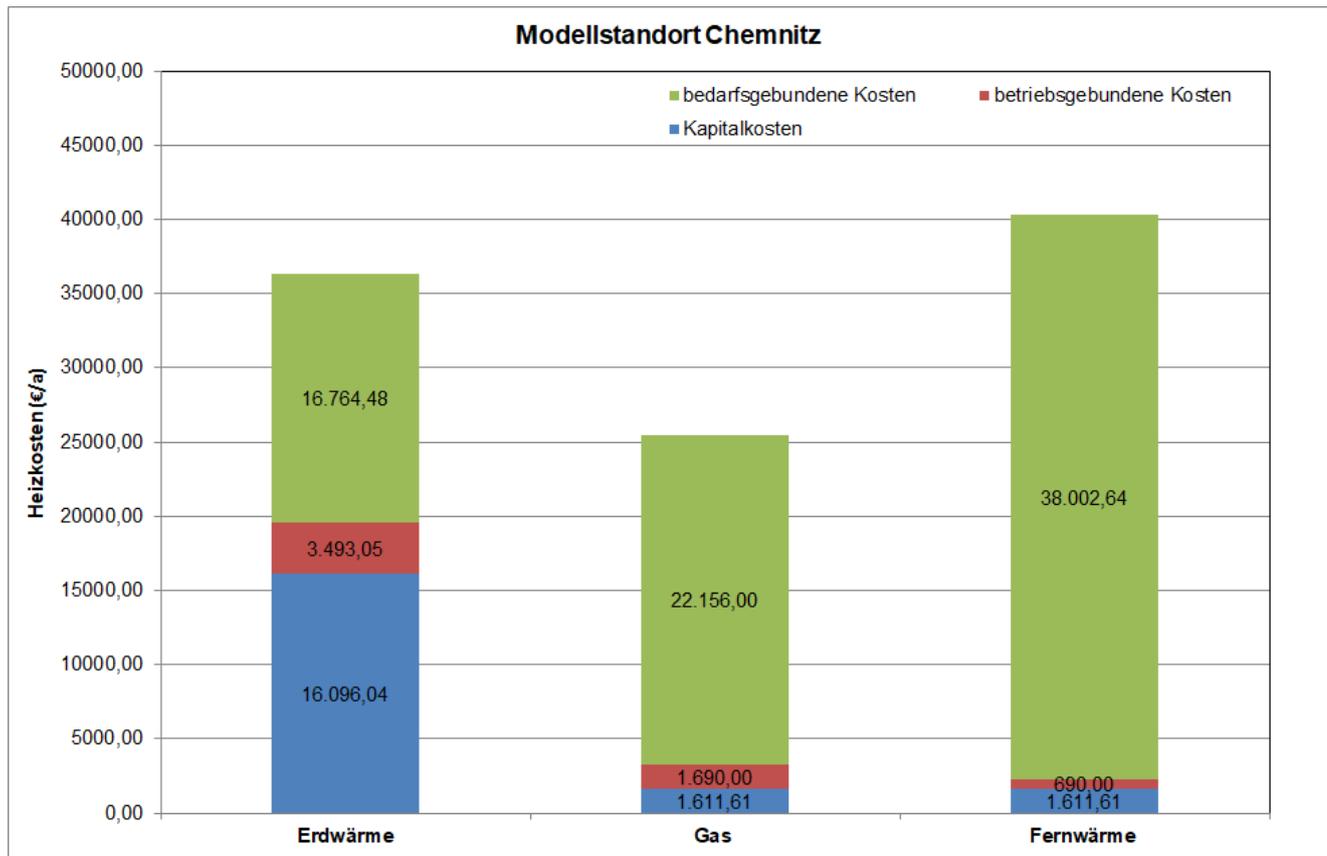


Abbildung 36: Kostenvergleich Heizkosten (€/a) am Modellstandort Chemnitz

Wie bereits für den Modellstandort Leipzig ausgeführt, ist auch am Modellstandort Chemnitz die Beheizung mit Erdwärme aufgrund der hohen kapitalgebundenen Kosten sowie relativ hohen betriebsgebundenen Kosten vergleichsweise teuer. Dieser Nachteil kann durch die niedrigen bedarfsgebundenen Kosten gegenüber Gas nicht ausgeglichen werden.

Unter Bezugnahme auf die in Abbildung 36 dargestellten jährlichen Heizkosten ergeben sich für den Modellstandort Chemnitz die nachfolgend aufgeführten Wärmegestehungskosten:

- Mitteltiefe Erdwärmesondenanlage: 7,57 ct/kWh,
- Gas: 5,30 ct/kWh,
- Fernwärme: 8,40 ct/kWh.

Ein Vergleich der Werte ergibt, dass die Beheizung mit Gas analog zum Modellstandort Leipzig am günstigsten ist. Allerdings fällt der Kostenvorteil aufgrund der standortspezifischen Preisgestaltung mit 70 % anfallenden Kosten im Vergleich zu Erdwärme etwas geringer aus. Im Vergleich zu Fernwärme ist die Beheizung mit mitteltiefen Erdwärmesonden preiswerter, der Kostenvorteil beläuft sich auf 11 %.

In Abbildung 37 sind die Kosten für die jährlichen Kosten für Kühlung am Modellstandort Chemnitz dargestellt. In Analogie zum Modellstandort Leipzig lässt sich ableiten, dass die mitteltiefe Erdwärmesondenanlage gegenüber Kompressionskälte bei allen Kostenanteilen, insbesondere jedoch bei den Verbrauchskosten einen deutlichen Kostenvorteil aufweist.

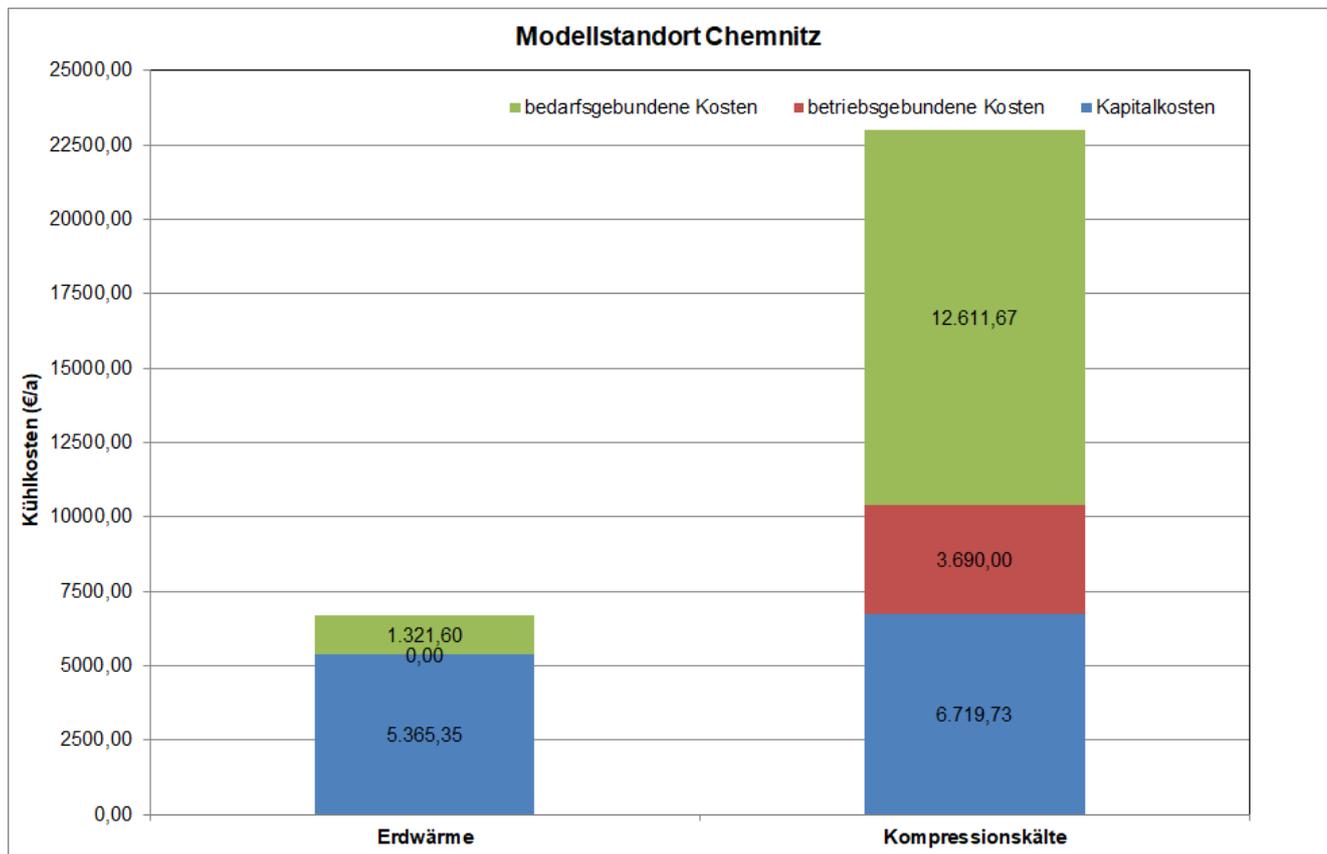


Abbildung 37: Kostenvergleich Kältekosten (€/a) am Modellstandort Chemnitz

Unter Bezugnahme auf die in Abbildung 37 dargestellten Kosten ergeben sich für den Modellstandort Chemnitz die folgenden Kältegestehungskoten:

- Mitteltiefe Erdwärmesondenanlage: 4,18 ct/kWh,
- Kompressionskälte: 14,39 ct/kWh.

Aus den Werten lässt sich für den Modellstandort Chemnitz ein Kostenvorteil der mitteltiefen Erdwärmesondenanlage gegenüber der Kompressionskälte von 71 % ableiten.

In Abbildung 38 sind die jährlichen Gesamtkosten für Heizung und Kühlung am Modellstandort Chemnitz zusammengestellt. Es lässt sich erkennen, dass die mitteltiefe Erdwärmesondenanlagennutzung insgesamt das günstigste System darstellt. Dies beruht vor allem auf den sehr niedrigen Kosten für die Kühlung.

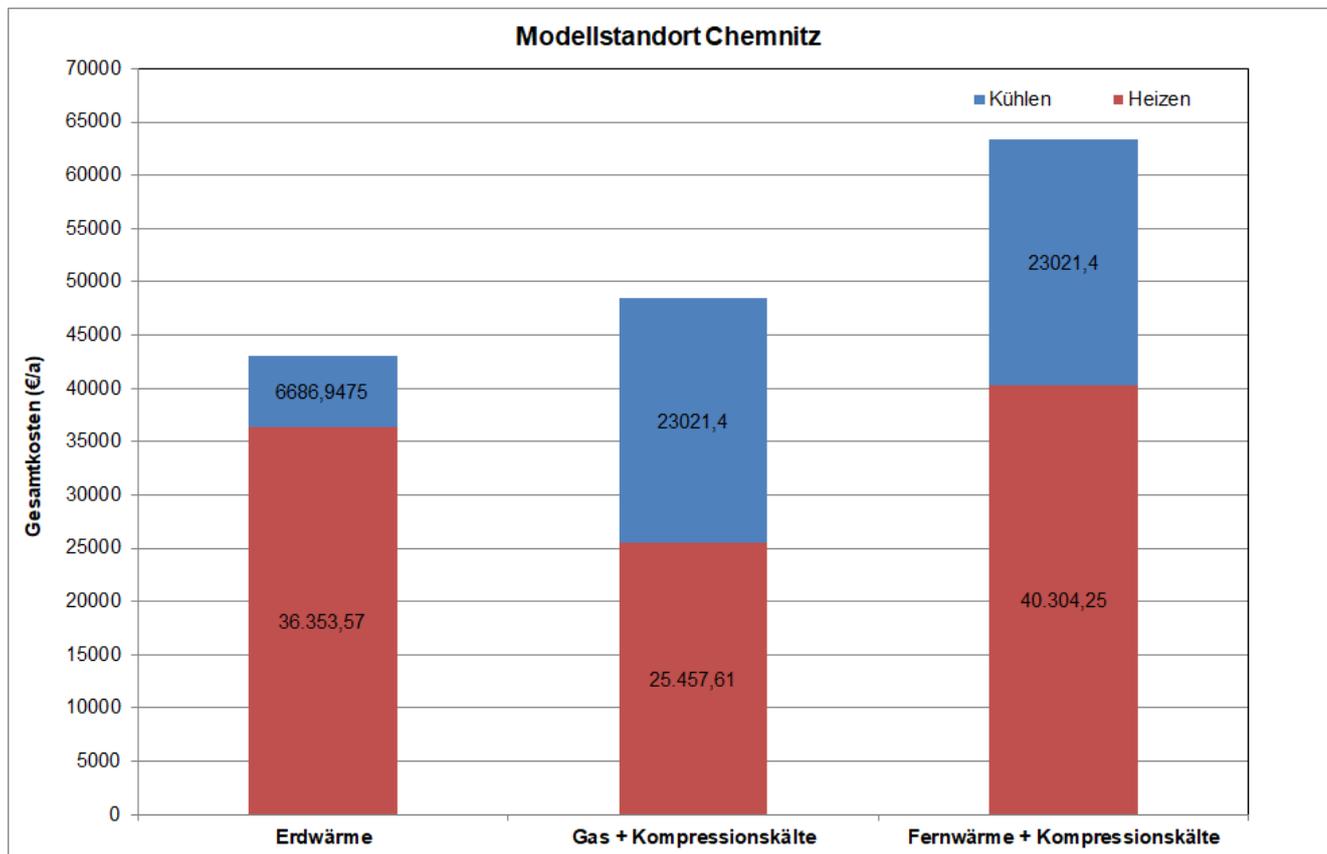


Abbildung 38: Kostenvergleich Gesamtkosten (€/a) am Modellstandort Chemnitz

Aus den in Abbildung 38 angegebenen Kosten lassen sich wie bereits für den Modellstandort Leipzig beschrieben, theoretische Gestehungskosten ermitteln. Dabei ergeben sich folgende Werte:

- Mitteltiefe Erdwärmesondenanlage: 6,73 ct/kWh,
- Gas und Kompressionskälte: 7,57 ct/kWh,
- Fernwärme und Kompressionskälte: 9,89 ct/kWh.

Aus den Werten geht hervor, dass bei Gesamtbetrachtung der Gebäudeklimatisierung der Kostenvorteil der mitteltiefen Geothermie gegenüber Gas und Kompressionskälte ca. 12 % beträgt. Im Vergleich zu Fernwärme und Kompressionskälte fällt dieser Kostenvorteil mit ca. 32 % noch wesentlich deutlicher aus.

8.5.3 Modellstandort Dresden

Der Kostenvergleich für die jährlichen Heizkosten am Modellstandort Dresden zeigt Abbildung 39.

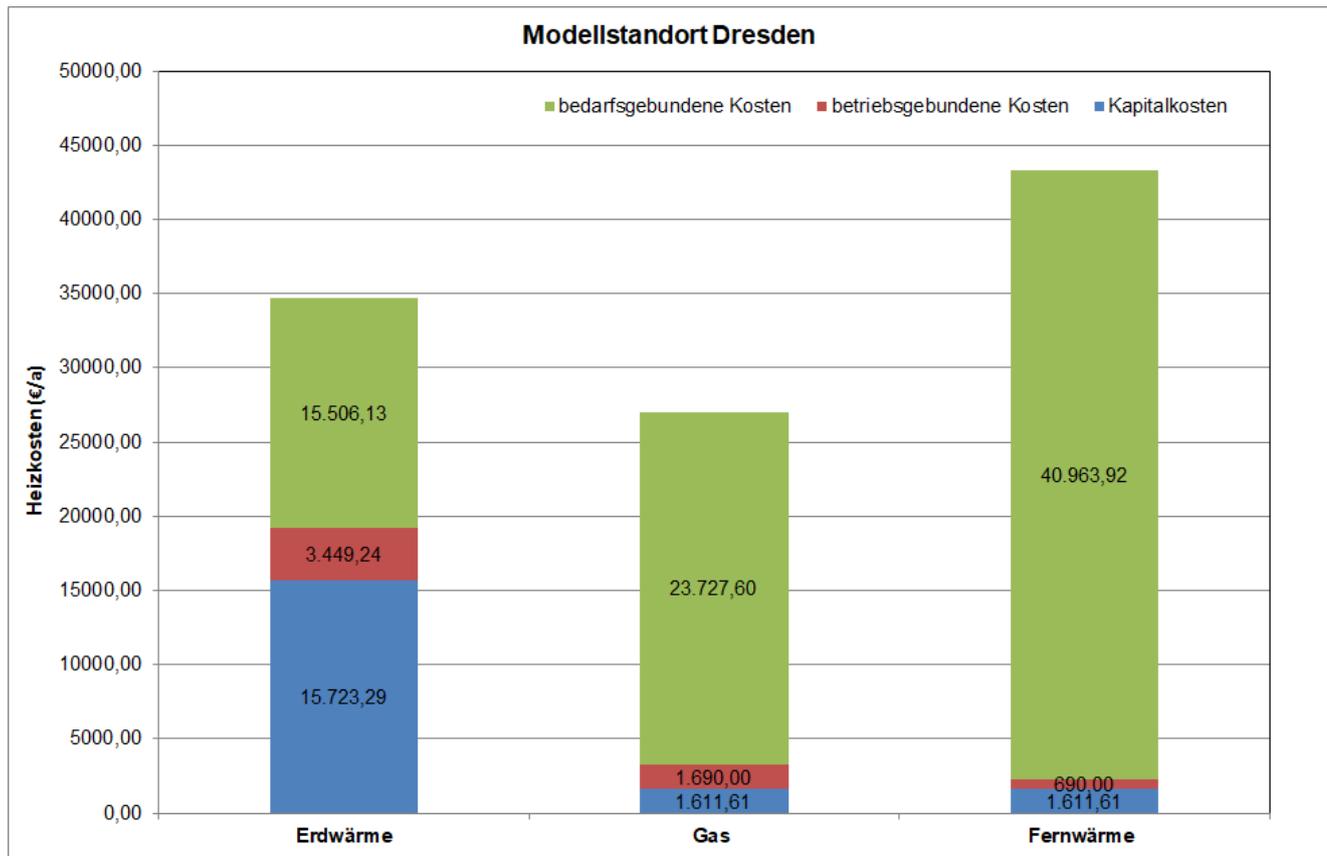


Abbildung 39: Kostenvergleich Heizkosten (€/a) am Modellstandort Dresden

Wie bereits für die beiden anderen Modellstandorte angeführt, ist auch am Modellstandort Dresden die Beheizung mit Gas am preisgünstigsten. Danach stellt die Gewinnung von Erdwärme aus mitteltiefen Erdwärmesonden die zweitgünstigste Beheizungsvariante dar.

Aus den in Abbildung 39 dargestellten jährlichen Heizkosten resultieren für den Modellstandort Dresden die nachfolgend aufgeführten Wärmegestellungskosten:

- Mitteltiefe Erdwärmesondenanlage: 7,22 ct/kWh,
- Gas: 5,63 ct/kWh,
- Fernwärme: 9,01 ct/kWh.

Wie bereits benannt, weist die Beheizung mit Gas auch am Modellstandort Dresden einen Kostenvorteil auf. Dieser beträgt gegenüber Erdwärme 22 % und fällt damit im Vergleich der Modellstandorte untereinander am geringsten aus. Der Preisvorteil der mitteltiefen Geothermie gegenüber Fernwärme beträgt am Modellstandort Dresden 20 %. Im Vergleich der Modellstandorte untereinander stellt dies den höchsten Wert dar.

In Abbildung 40 sind die Beträge der jährlichen Kosten für Kühlung am Modellstandort Dresden dargestellt. In Analogie zu den anderen Modellstandorten ergibt sich für die Nutzung von Erdwärme über mitteltiefe Erdwärmesondenanlagen bei allen Kostenanteilen, insbesondere jedoch bei den Verbrauchskosten ein deutlicher Kostenvorteil.

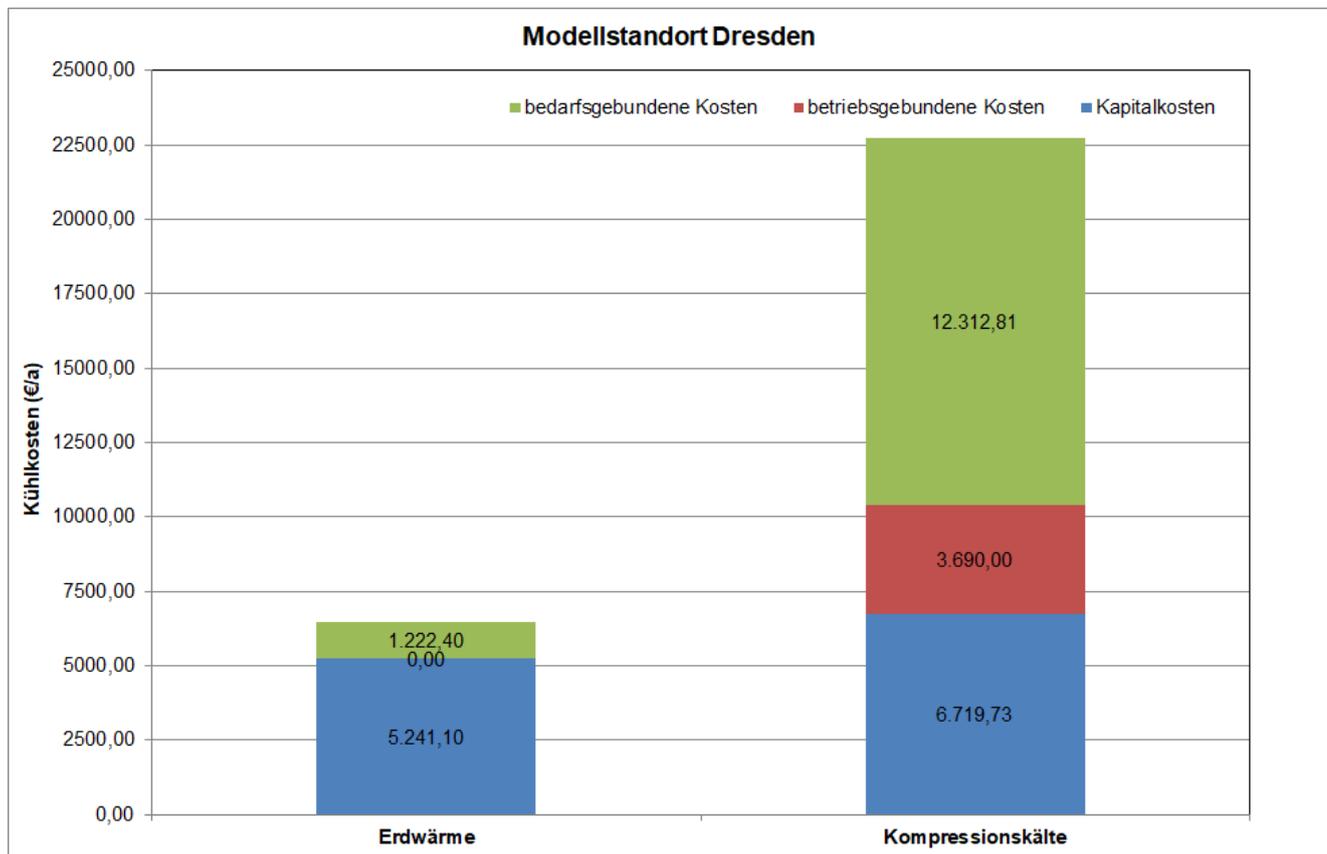


Abbildung 40: Kostenvergleich Kältekosten (€/a) am Modellstandort Dresden

Unter Bezug auf die in Abbildung 40 angeführten Kosten lassen sich für den Modellstandort Dresden die folgenden Kältegestehungskosten ableiten:

- Mitteltiefe Erdwärmesondenanlage: 4,04 ct/kWh,
- Kompressionskälte: 14,20 ct/kWh.

Aus den ermittelten Werten ergibt sich für den Modellstandort Dresden ein Kostenvorteil der mitteltiefen Erdwärmesondenanlagen gegenüber der Kompressionskälte von ca. 72 %.

In Abbildung 41 sind die jährlichen Gesamtkosten für Heizung und Kühlung am Modellstandort Dresden zusammengestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Nutzung von Erdwärme über mitteltiefe Erdwärmesonden wie auch an den beiden anderen Modellstandorten das insgesamt günstigste System darstellt.

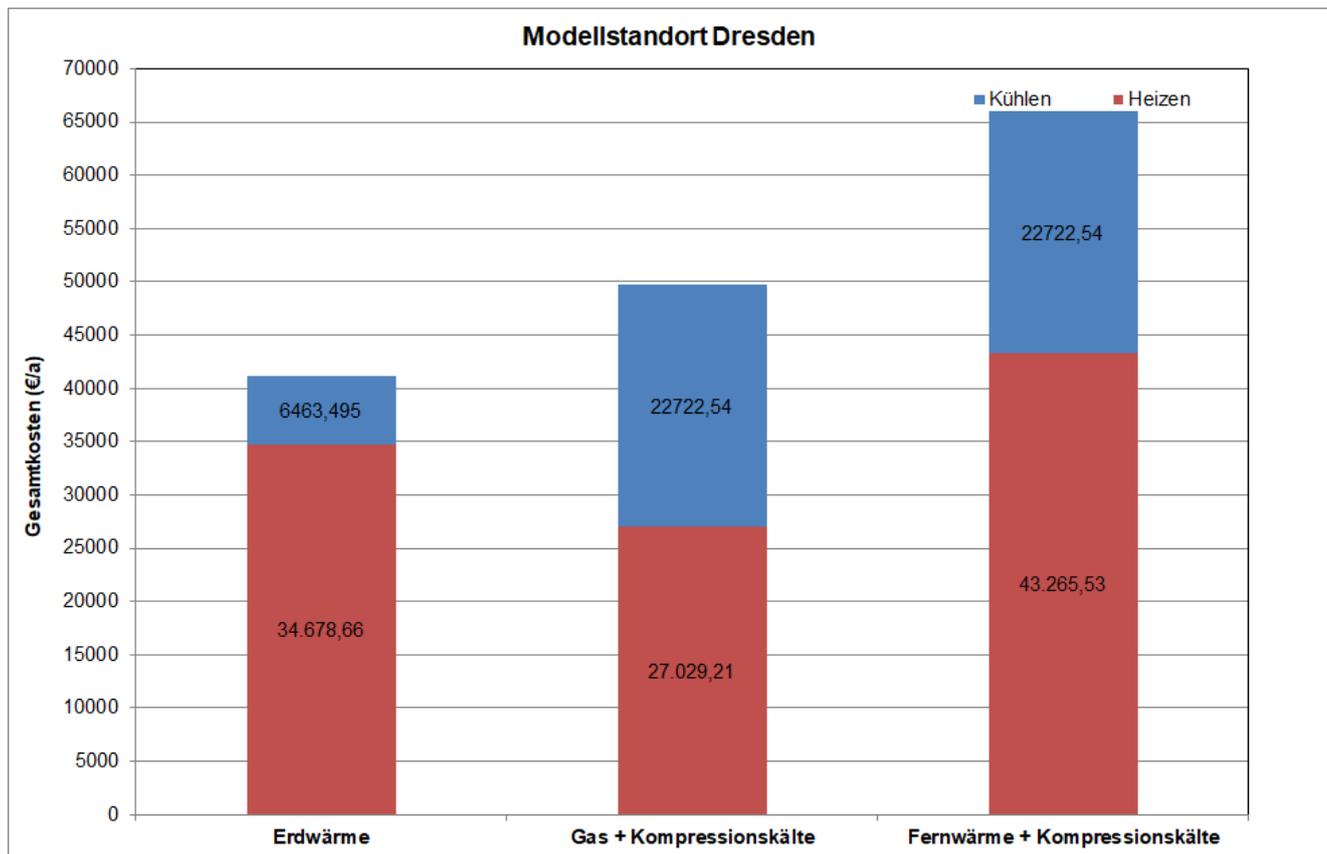


Abbildung 41: Kostenvergleich Gesamtkosten (€/a) am Modellstandort Dresden

Aus den in Abbildung 41 aufgeführten Kosten lassen sich theoretische Gestehungskosten für die insgesamt bereitgestellte Summe aus Heiz- und Kühlarbeit berechnen. Daraus resultieren folgende Werte:

- Mitteltiefe Erdwärmesondenanlage: 6,43 ct/kWh,
- Gas und Kompressionskälte: 7,77 ct/kWh,
- Fernwärme und Kompressionskälte: 10,31 ct/kWh.

Aus den ausgewiesenen Kosten ergibt sich in der Gesamtbetrachtung für mitteltiefe Erdwärmesondenanlagen gegenüber Gas und Kompressionskälte ein Kostenvorteil von ca. 21 %. Gegenüber Fernwärme und Kompressionskälte fällt der Kostenvorteil der mitteltiefen Erdwärmesondenanlagen mit ca. 40 % noch deutlicher aus.

8.5.4 Zusammenfassung

Durch die Kostenbetrachtungen, die um eine möglichst große Realitätsnähe zu erzielen, auch die Planungskosten beinhalten, wurde gezeigt, dass die Nutzung mitteltiefer Geothermie an allen Modellstandorten in der Gesamtbetrachtung die kostengünstigste Variante darstellt.

Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass die Nutzung erneuerbarer Energien, und insbesondere der Geothermie zur Klimatisierung von Gebäuden seit 01.01.2020 deutlich stärker gefördert wird (BAFA, 2020). Während bis 31.12.2019 lediglich der Einbau von hocheffizienten Wärmepumpen mit einem Festbetrag gefördert wurde, sind nun auch die Errichtung der Erdwärmesondenanlagen sowie die aufgrund der hohen Investitionskosten auch nicht unerheblichen Planungskosten förderfähig. Die Förderung beträgt nunmehr für den Neubau von Gebäuden 35 % der Gesamtinvestition und stellt damit eine erhebliche Verbesserung dar. Es ist zu hoffen, dass dadurch die Realisierung mitteltiefer geothermischer Projekte in Zukunft deutlich interessanter wird und somit auch damit ein effektiver Beitrag zur Luftreinhaltung und zum Klimaschutz geleistet werden kann.

9 Diskussion

9.1 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Im Forschungsvorhaben wurden mitteltiefe Erdwärmesondenanlagen an ausgewählten Modellstandorten in den sächsischen Großstädten detailliert geplant. In diesem Zusammenhang ergibt sich die Frage nach der Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse für mögliche zukünftige Vorhaben.

Prinzipiell festzustellen ist, dass die durchgeführten Betrachtungen und insbesondere die Modellergebnisse nur unter den berücksichtigten Randbedingungen für den jeweils betrachteten Modellstandort gültig sind.

Dies gilt vor allem mit Hinblick auf die gebäudetechnischen Anforderungen sowie die geologischen Verhältnisse, die maßgeblich für die Ableitung der hydrogeologischen und geothermischen Eingangsdaten für die geothermische Modellierung sind.

Die erzielten Ergebnisse können daher als erste grobe Abschätzung für künftige Projekte in den drei sächsischen Großstädten herangezogen werden. Voraussetzung dafür ist, dass die energetischen Anforderungen mit denen der Musteranlage in ihrer Größenordnung und im Verhältnis der Heiz- und Kühlarbeit vergleichbar sind.

Unabhängig davon sind natürlich die gewählte Herangehensweise, die Bearbeitungsschritte und die beschriebenen Konzeptionen als Muster auf jedes mitteltiefe Erdwärmesondenprojekt übertragbar.

Nachfolgend werden einige Hinweise zur Variabilität der geologischen Verhältnisse innerhalb der Stadtgebiete der drei betrachteten Städte gegeben, die bei einer beabsichtigten groben Erstabschätzung unter Bezugnahme auf die erzielten Ergebnisse unbedingt berücksichtigt werden sollten.

Modellstandort Leipzig

Am Modellstandort Leipzig wird das Festgestein in Form von proterozoischer Grauwacke in einer Tiefe von ca. 80 m erwartet. Darüber lagern tertiäre und quartäre Lockersedimente.

Dieser Aufbau kann nicht grundsätzlich auf das gesamte Stadtgebiet übertragen werden. Zwar sind beispielsweise auch im Stadtzentrum zum Teil vergleichbare Verhältnisse zu erwarten, jedoch kann die Tiefenlage der Festgesteinsoberfläche um mehrere Zehnermeter variieren. Mitunter steht das Festgestein sogar fast an der Geländeoberfläche an (z.B. Region Leipzig Lindenau oder Plagwitz), während es im Nordosten der Stadt teilweise erst bei ca. 100 m Tiefe angetroffen wird. Auch tritt als Festgesteinuntergrund nicht überall Grauwacke auf. In den westlichen Stadtteilen steht darüber eine mächtige Abfolge von Sandsteinen, Konglomeraten und Schiefertönen des Karbons an. Im äußersten Osten der Stadt folgt unter den Lockergesteinen mächtiger Quarzporphyr, Tuff oder Ignimbrit des Rotliegenden. Selbst im Verbreitungsgebiet der Grauwacke können in diese paläozoische Granite und Granodiorite intrudiert sein. Für alle der genannten Gesteine sind im Vergleich zur Grauwacke größenordnungsmäßig keine wesentlich schlechteren geothermischen Eigenschaften zu erwarten.

Entsprechend der obigen Ausführungen gibt es innerhalb des Stadtgebietes auch Unterschiede in der Ausbildung und Mächtigkeit der Lockergesteinsbedeckung. Da jedoch hinsichtlich der geothermischen Nutzung vor allem das Festgestein von Bedeutung ist und diesbezüglich innerhalb des Stadtgebietes keine wesentlich schlechteren Verhältnisse erwartet werden, können die in den Modellrechnungen angesetzten geothermischen Randbedingungen in erster Näherung auf das Stadtgebiet übertragen werden. Dies ersetzt im Falle konkreter Bauvorhaben jedoch keinesfalls eine standortkonkrete Planung die sich an den grundlegenden Bearbeitungsschritten der hier betrachteten Musterstandorte orientieren sollte. Dies gilt grundsätzlich für alle konkreten Erdwärmavorhaben.

Modellstandort Chemnitz

Der Modellstandort Chemnitz befindet sich in relativ zentraler Lage des Chemnitzer Beckens. Am Standort werden bis ca. 430 m u. GOK die Ablagerungen des Rotliegenden angetroffen, deren Basis die Härtensdorf-Formation bildet. Darunter sind kambroordovizische Phyllite zu erwarten. Im Stadtgebiet ist innerhalb der Beckenlage von vergleichbaren geothermischen Eigenschaften der anzutreffenden Gesteine auszugehen. In Richtung Süden nimmt innerhalb des Stadtgebiets die Mächtigkeit der Rotliegendablagerungen ab, so dass die Phyllite schon in wesentlich geringerer Tiefe angetroffen werden können. Die geothermischen Eigenschaften des Phyllits werden gegenüber den Rotliegendablagerungen als vergleichbar oder günstiger eingestuft.

In Richtung Norden wird das Chemnitzer Becken durch das Sächsische Granulitgebirge begrenzt. Auch hier können in den Übergangsbereichen geringere Mächtigkeiten für die Rotliegendablagerungen erwartet werden. Die unterlagernden Gesteine werden dann unter anderem aus Grauwacken, Tonschiefern und Phylliten gebildet. Diese weisen im Vergleich zu den Sedimenten des Rotliegenden in der Regel günstigere geothermische Eigenschaften auf.

Zusammenfassend kann aus den vorangegangenen Ausführungen abgeleitet werden, dass eine Übertragung der geothermischen Randbedingungen auf das weitere Stadtgebiet im Sinne einer überschläglichen Erstabstschätzung prinzipiell zulässig ist. In Abhängigkeit vom konkreten Standort sind mindestens vergleichbare, gegebenenfalls potentiell bessere Standorteigenschaften zu erwarten.

Modellstandort Dresden

Der Modellstandort Dresden liegt im Randbereich der Dresdner Elbtalweitung. Am Standort werden bis ca. 10 m quartäre Sedimente, bis ca. 85 m Ablagerungen der Sächsischen Kreide und ab 85 m das Grundgebirge im Form von Monzoniten angetroffen. In nordöstlicher Richtung bis etwa zum Albertplatz (3,5 km Entfernung) nehmen sowohl die Mächtigkeiten der quartären als auch der kreidezeitlichen Ablagerungen zu. Die Basis der Kreidesedimente wird dann bei ca. 150 m bis 200 m u. GOK angetroffen. Das Grundgebirge unterhalb der Kreide wird von Granodiorit gebildet. Weiter in Richtung Nordosten bis zur Dresdener Heide (ca. 2,5 km Entfernung) ist an der Oberfläche teilweise mit bis zu 40 m mächtigen weitestgehend trockenen sandigen Ablagerungen zu rechnen, die über sehr geringe Wärmeleitfähigkeiten verfügen. Der Nordrand der Dresdener Elbtalweitung wird abrupt von der Lausitzer Überschiebung begrenzt. Jenseits der Lausitzer Überschiebung werden ab der Geländeoberkante Granodiorite und Granite verschiedener Varietät angetroffen.

Für das Stadtgebiet Dresden gestalten sich Aussagen zur Übertragbarkeit des geothermisch/hydrogeologischen Modells am schwierigsten. Im Bereich mächtigerer kreidezeitlicher Ablagerungen sollte von Einbußen hinsichtlich der geothermischen Ergiebigkeit ausgegangen werden.

Darüber hinaus muss in Dresden einzelfallspezifisch geprüft werden, ob die Errichtung einer mitteltiefen Sondenanlage am Standort genehmigungsfähig ist. In weiten Bereichen des Stadtgebiets wird an der Basis der Kreide innerhalb der Oberhäslich-Formation der sogenannte „Unter-Quader“-Sandstein angetroffen, der als Reservehorizont für die Trinkwassergewinnung dient und in der Regel nicht angebohrt werden darf. Es wird empfohlen, hier im Vorfeld entsprechende Auskünfte bei der Unteren Wasserbehörde einzuholen.

Eine näherungsweise Übertragung der geothermischen Randbedingungen auf Bereiche des Stadtgebietes, in denen das Grundgebirge in geringerer Tiefe oder wie im Bereich des nördlichen Elbhanges bereits an der Oberfläche angetroffen wird, ist dagegen möglich, da für das Grundgebirge von höheren Wärmeleitfähigkeiten auszugehen ist.

Es sollte jedoch aufgrund zu erwartender bohrtechnischer Probleme vermieden werden, eine Sondenanlage im direkten Bereich der Lausitzer Überschiebung zu platzieren.

9.2 Optimierungsmöglichkeiten

Wie aus den durchgeführten Kostenbetrachtungen deutlich abgeleitet werden kann, sind mitteltiefe Erdwärmesondenanlagen besonders im Hinblick auf die Gebäudekühlung sehr interessant und wirtschaftlich sehr gut darstellbar. Unter den seit 2020 geltenden Förderbedingungen für Heizen mit erneuerbaren Energien durch das BAFA (BAFA, 2020) stellen die mitteltiefen Erdwärmesondenanlagen bereits unter den im Forschungsvorhaben betrachteten energetischen Randbedingungen die kostengünstigste Variante dar. Diese sind durch eine dreifach höhere Heizarbeit im Vergleich zur Kühlarbeit gekennzeichnet. Eine höhere Effizienz und damit verbunden weitere Kostenvorteile ergeben sich, wenn neben der Heizarbeit möglichst viel Kühlarbeit über die Sonden abgedeckt wird. Ein Optimum stellt dabei der Fall dar, der durch ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen entzogener Wärmemenge im Winter und eingespeister Wärmemenge im Sommer gekennzeichnet ist. Eine dauerhaft höhere Kühlarbeit führt dagegen zu einer Erwärmung des Untergrundes und ist aus genehmigungsrechtlicher Sicht unter Umständen problematisch.

Für die Planung künftiger Anlagen wird deshalb empfohlen, diese (soweit möglich) mit Fokus auf eine ausgeglichene Energiebilanz auszulegen. Dass dies prinzipiell möglich sein dürfte, ergeben die Ansätze, die von Haustechnikplanern für eine erste Abschätzung von Heiz- und Kühlleistung angesetzt werden. Dabei wird für neu zu errichtende Bürogebäude von einem Kühlbedarf zwischen 40 W/m² und 80 W/m² ausgegangen, während sich der Heizbedarf in Abhängigkeit vom angestrebten Wärmeschutzstandard zwischen < 20 W/m² bis 40 W/m² bewegt.

Es wird empfohlen, den Heiz- und Kühlbedarf möglichst im Rahmen einer haustechnischen Gebäudesimulation zu ermitteln. Dadurch wird sichergestellt, dass unter Berücksichtigung der Gebäudekonfiguration (Wärmeschutzstandard, Anzahl und Ausrichtung der Fenster, Verschattung etc.) und der Gebäudenutzung (Temperaturen im Sommer und Winter, Anzahl Personen, weitere interne Lasten) möglichst realistische Größenordnungen für Heiz- und Kühlarbeit in die Dimensionierung der Erdwärmesondenanlagen einfließen.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten werden im Zusammenspiel mit anderen erneuerbaren Energien gesehen. So kann eine solarthermische Anlage heizungsunterstützend wirken und den Entzug von geothermischer Energie aus dem Untergrund verringern. Möglich ist auch eine solare Regeneration der Sonden während der Heizpause. Zudem ist auch eine Kombination mit Photovoltaik möglich, um den Strombedarf der Wärmepumpen ganz oder teilweise durch autark vor Ort erzeugten Strom zu decken. Da entsprechende Auslegungen in das Aufgabenfeld der Gebäude- und Haustechnikplanung fallen, erfolgen an dieser Stelle dazu keine weiteren vertiefenden Ausführungen. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass eine erfolgreiche Realisierung der genannten Optionen einer engen Zusammenarbeit zwischen Erdwärme- und Haustechnikplaner bedarf.

Des Weiteren wird ein möglicher Vorteil beim zukünftigen Betrieb von geothermischen Wärmepumpenanlagen in Kombination mit mitteltiefen Erdwärmesonden im sogenannten „netzdienlichen“ Betrieb gesehen. Durch den kontinuierlich ansteigenden Anteil erneuerbarer Energien aus Wind und Sonne, der eine Stromproduktion in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen zu Folge hat, werden künftig noch verstärkter als bisher Differenzen zwischen Stromproduktion und Strombedarf auftreten, die im extremsten Fall die gesamte Netzstabilität gefährden können. Ein möglicher Lösungsansatz wird darin gesehen, einzelne Gebäude oder ganze Quartiere als Stromspeicher und / oder regelbare Lasten zu betreiben. Für den Betrieb einer Wärmepumpe bedeutet dies, dass ihre Laufzeiten neben den energetischen Anforderungen des Gebäudes auch von den aktuellen Erfordernissen des Netzes bestimmt wird und im Bedarfsfall eine Aktivierung des Wärmepumpenbetriebs von außerhalb des Gebäudes erfolgt. Die anfallende Wärme bzw. Kälte wird in Wärme- bzw. Kältespeichern sowie in der Gebäudehülle selbst gespeichert. Es ist davon auszugehen, dass ein Betreiber netzdienlicher Gebäude zukünftig mit deutlichen Kostenvorteilen rechnen kann. Für den netzdienlichen geothermischen Wärmepumpenbetrieb erscheint dabei eine Wärme- bzw. Kälteerzeugung zum Nulltarif nicht völlig unrealistisch. Bereits bis Ende 2019 wurde der Einbau netzdienlicher Wärmepumpen vom BAFA mit einem Bonus von 500 € pro Wärmepumpe gefördert. Inwieweit diese Förderung unter den neuen Randbedingungen ab 2020 weitergeführt oder ausgebaut wird, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt (Stand Januar 2020) noch nicht klar.

10 Handlungsempfehlungen

Zur Dokumentation des Ablaufs der Planung einer mitteltiefen Erdwärmesondenanlage wurde ein Fließschema entwickelt, welches in Anlage 10 enthalten ist. Anhand dieses Schemas werden nachfolgend Hinweise für eine künftige Realisierung mitteltiefer Erdwärmesondenanlagen gegeben. Zudem wird an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass die Planungen immer unter Mitwirkung eines Geothermiefachplaners erfolgen sollten.

Auskünfte zum Standort

Ein mögliches Projekt beginnt mit der Bewertung des potentiellen Anlagenstandortes. Dazu werden als Voraussetzung geologische Daten zum erwarteten Bohrprofil sowie Auskünfte zu möglichen Restriktionen eingeholt. Die Restriktionen können z.B. wasserwirtschaftlicher Art sein oder Altlasten betreffen. Die Informationen zu den geologischen Verhältnissen können teilweise online über das Umweltdatenportal Sachsen (LfULG, 2020) eingesehen werden oder über eine Anfrage beim Bohrchiv des LfULG angefordert werden. Informationen zu wasserwirtschaftlichen Einschränkungen und zur Altlastensituation sind bei den zuständigen unteren Umweltbehörden abzufragen.

Bewertung Standort

Auf Basis der erteilten Auskünfte zu möglichen Restriktionen erfolgt eine Bewertung der prinzipiellen Realisierbarkeit des Projekts. Aus den Daten zum geologischen Aufbau am Standort werden die wesentlichen geothermischen Parameter Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität abgeleitet. Zu empfehlen ist außerdem eine Anfrage beim LfULG, ob Ergebnisse aus Thermal-Response-Tests in der Umgebung des geplanten Anlagenstandorts vorliegen.

Gebäudetechnische Anforderungen

Die Definition des Wärme- und Kältebedarfs durch den Fachplaner Heizung / Klimatechnik bildet die Grundlage für die Vordimensionierung der Anlage.

Vordimensionierung der Erdwärmesondenanlage

Die Vordimensionierung erfolgt auf Basis der definierten energetischen Anforderungen und der abgeleiteten geothermischen Parameter. Hinsichtlich der Bohrtiefe wird empfohlen, einen Maximalwert von 350 m nicht zu überschreiten. Die Empfehlung beruht zum einen auf den aktuell verfügbaren Sondentypen gemäß Kapitel 4.1.2. Des Weiteren beginnt bei Bohrtiefen von mehr als 400 m die Pflicht zur UVP-Vorprüfung. Hier sind in einer Studie mögliche Auswirkungen des Vorhabens auf die Umwelt zu beschreiben. Anhand der Studie wird entschieden, ob für die Errichtung der Bohrungen eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen ist. Da diese Entscheidung nicht vorhergesehen werden kann, muss bei geplanten Bohrtiefen von mehr als 400 m mit einem zusätzlichen Zeitbedarf für die Genehmigung von mindestens 2 Jahren gerechnet werden.

Im Zuge der Vordimensionierung ist auch die Lage der mitteltiefen Erdwärmesondenanlage auf dem zu bebauenden Grundstück festzulegen. Sie sollte so gewählt werden, dass möglichst wenige Überschneidungen mit dem Bauablauf anderer Gewerke existieren und zugleich eine kurze Anbindung der Erdwärmesonden zur Wärmepumpe realisiert werden kann. Aufgrund des relativ geringen Platzbedarfs an der Oberfläche kann dies besser umsetzbar sein als bei vergleichbaren oberflächennahen Anlagen. Bei der Positionierung der Sonden wird für den Fall eines Genehmigungsverfahrens nach Wasserrecht empfohlen, die erforderlichen Mindestabstände zu den Grundstücksgrenzen mit der zuständigen unteren Wasserbehörde abzustimmen. Soweit die Genehmigung der geplanten Anlage nach Bergrecht und damit unter Ausweisung eines Bergwerksfeldes erfolgt, müssen keine Mindestabstände eingehalten werden. Die Erdwärmesonden müssen sich dann lediglich auf dem Grundstück des Antragstellers befinden. Hinsichtlich des umzusetzenden Genehmigungsverfahrens wird die frühzeitige Abstimmung mit den zuständigen Genehmigungsbehörden (untere Wasserbehörde, Oberbergamt) empfohlen.

Für die Durchführung der Vordimensionierung ist die Verwendung des analytischen Programms EED oder vergleichbarer Software ausreichend. Aus Erfahrungen bisheriger Projekte ist davon auszugehen, dass in der Phase der Vordimensionierung Varianten mit unterschiedlichen energetischen Anforderungen zu untersuchen sind. Für die Ermittlung der optimalen Anlagenkonfiguration ist deshalb eine enge Abstimmung zwischen den Fachplanern Heizung / Klimatechnik und Geothermie erforderlich.

Bewertung Wirtschaftlichkeit

Die Ergebnisse der bisherigen Bearbeitung einschließlich Vordimensionierung sollten in einem Bericht (Machbarkeitsstudie) dokumentiert und durch eine überschlägliche Kostenschätzung zur Errichtung der Sondenanlage ergänzt werden.

Auf dieser Basis erfolgt (in der Regel durch den Fachplaner Heizung / Klimatechnik) die Durchführung von Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Anhand der Ergebnisse entscheidet der Bauherr, ob der Bau einer mitteltiefen Erdwärmesondenanlage weiterverfolgt wird.

Wie durch die Betrachtungen in Kapitel 8 gezeigt werden konnte, bestehen nicht zuletzt durch die seit Jahresbeginn 2020 geltenden Förderrichtlinien des BAFA (BAFA, 2020) gute Chancen, die Errichtung einer mitteltiefen Erdwärmesondenanlage wirtschaftlich darzustellen.

Genehmigungsverfahren

Bei positiv bewerteter Wirtschaftlichkeit erfolgt als nächster Bearbeitungsschritt die Erarbeitung der Unterlagen, die zur Erlangung der benötigten Genehmigungen zur Errichtung und zum Betrieb der Anlage erforderlich sind.

Die Genehmigung einer mitteltiefen Erdwärmesondenanlage kann prinzipiell sowohl nach Wasserrecht als auch nach Bergrecht erfolgen. Es ist daher erforderlich, zu Beginn der Bearbeitung in einem Abstimmungstermin mit der unteren Wasserbehörde und den durch die Wasserbehörde beteiligten weiteren Behörden zu klären, welche Behörde das Verfahren führen wird. In Sachsen liegen dazu bisher keine eindeutigen Regelungen vor. Aus Sicht des Bauherrn ist eine Genehmigung nach Bergrecht vorteilhaft. In diesem Fall wird im Zuge des Verfahrens ein Bergwerksfeld für die Nutzung der Erdwärme ausgewiesen. Dadurch sind konkurrierende Nutzungen innerhalb des Bergwerksfeldes ausgeschlossen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass bei Ausweisung eines Bergwerksfeldes keine Mindestabstände zur Grundstücksgrenze einzuhalten sind, solange die Sonden auf dem Grundstück des Bauherrn liegen.

Bei Verfahrensführung durch das Sächsische Oberbergamt werden die ebenfalls zuständigen Behörden (Untere Wasserbehörde, LfULG als Fachbehörde, ggf. weitere Behörden) am Verfahren beteiligt. Die weiteren Erläuterungen zum Projektablauf erfolgen unter Zugrundelegung dieser Annahme. Im Zuge des Genehmigungsverfahrens findet auch die Prüfung statt, inwieweit die Errichtung einer mitteltiefen Erdwärmesondenanlage mit der Endlagersuche nach Standortauswahlgesetz vereinbar ist. Mittlerweile liegen hierfür schematisierte Prüfroutinen vor, so dass nicht von einer wesentlichen Verlängerung des Genehmigungsprozesses auszugehen ist

Im bergrechtlichen Genehmigungsverfahren ist zunächst ein Hauptbetriebsplan für die Aufsuchung einzureichen. Die Gliederung und der Inhalt des Hauptbetriebsplanes richten sich nach der Betriebsplanrichtlinie des Sächsischen Oberbergamtes (SOBA, 2011).

Weiterhin ist ein Antrag auf Erlaubnis zur Aufsuchung sowie ein Antrag auf Bewilligung zu stellen. Der Antrag auf Erlaubnis dient dem Nachweis des Vorhandenseins der Erdwärme und kann zur Genehmigung der Testbohrung einschließlich Thermal-Response-Test gestellt werden. Alternativ kann die Genehmigung der Testbohrung auch nach Wasserrecht erteilt werden. In diesem Fall kann der Antrag auf Erlaubnis zur Aufsuchung entfallen, alternativ ist dann ein wasserrechtlicher Antrag auf Erlaubnis zu stellen. Da die genaue Ausgestaltung eines Verfahrens der behördlichen Einzelfallentscheidung unterliegt, ist hier eine frühzeitige, vorhabensbezogene Abstimmung mit den beteiligten Behörden unerlässlich.

Der Antrag auf Bewilligung ist für die Abgrenzung des Bergwerksfeldes zu stellen. Die Beantragung sollte auf den Ergebnissen der numerischen Anlagendimensionierung beruhen. Dabei ist mit der Bergbehörde im Vorfeld das Abgrenzungskriterium, z.B. gesamter Beeinflussungsbereich ($\Delta T < 0,1 \text{ K}$) oder zu definierende Isothermen der Temperaturänderung (z.B. 1 K-Isotherme) abzustimmen. Zur Erarbeitung der Anträge auf Erlaubnis bzw. Bewilligung liegt eine Richtlinie des Sächsischen Oberbergamtes (SOBA, 2004) vor.

Im Zuge des Genehmigungsverfahrens ist für die Einreichung des Hauptbetriebsplans Aufsichtung auch die Erarbeitung eines Bohr- und Ausbaukonzepts erforderlich.

Weiterhin muss eine Anzeige der Pilotbohrung beim LfULG erfolgen.

Pilotbohrung und Thermal-Response-Test

Die fachliche Grundlage für die Erarbeitung der Genehmigungsunterlagen bilden eine separat zu genehmigende Pilotbohrung und ein an ihr durchgeführter Thermal Response Test inklusive Temperaturmessprofil. Aufgrund der deutlichen Kosten für die Errichtung einer separaten Testbohrung bis zur geplanten Endtiefe der zu errichtenden mitteltiefen Erdwärmesondenanlage wird zur Reduzierung des finanziellen Aufwandes folgendes Verfahren vorgeschlagen.

Die Pilotbohrung wird nur so tief niedergebracht, dass sie ca. 20 m ins unverwitterte Festgestein vordringt und mit einer Erdwärmesonde ausgebaut. Im anschließend durchgeführten TRT erfolgt eine Auswertung sowohl über die gesamte Sondenlänge als auch separat nur für das Festgestein. Die Ergebnisse des TRT's fließen in die im Anschluss durchzuführende numerische Anlagendimensionierung ein.

Die Vorteile der beschriebenen Vorgehensweise werden darin gesehen, dass eine standortspezifische Bestimmung geothermischer Parameter (Wärmeleitfähigkeit, geothermischer Gradient) erfolgt, die in die nachfolgenden Planungsschritte einfließen. Zudem kann durch die gewonnenen Erkenntnisse zu Schichtenaufbau, Standfestigkeit des Gesteins und zur Wasserführung eine Präzisierung des Bohrkonzepts hinsichtlich Bohrverfahren, Notwendigkeit der Verrohrung etc. vorgenommen werden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Standorterkundung, einschließlich Dokumentation der Baubegleitung und der Bohrergebnisse werden jeweils in Berichten dokumentiert. Sie sind den Antragsunterlagen für die Genehmigung als Anlage beizufügen. Bei Vorliegen sehr detaillierter Archivdaten für den geplanten Anlagenstandort kann im Einzelfall unter Umständen von der Errichtung einer separaten Testbohrung abgesehen werden. Dazu sind vorab Abstimmungen mit den zuständigen Behörden zu treffen. In diesem Fall sollte die Durchführung des TRT an der ersten fertig gestellten Erdwärmesonde des Sondenfeldes erfolgen.

Numerische Anlagendimensionierung

Die numerische Anlagendimensionierung erfolgt mit einem entsprechend geeigneten Grundwassermodellierungsprogramm, das auch den Wärmetransport berücksichtigt (z.B. FEFLOW). Grundsätzlich ist das zu nutzende Programm jedoch vorab mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen.

Für die Erarbeitung des geologisch / hydrogeologischen Strukturmodells sollte beim LfULG angefragt werden, ob für das zu betrachtende Gebiet ggf. geologische/hydrogeologische 3D-Modelldaten vorliegen. Andernfalls ist das geologisch/hydrogeologische Strukturmodell nach Rücksprache mit dem LfULG aufzubauen. Es wird zudem empfohlen, auch die Parametrisierung der Modellschichten in Abstimmung mit dem LfULG durchzuführen.

Hinsichtlich der Temperaturrandbedingungen für die Modellierung wird vorab ebenfalls eine Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde empfohlen.

Die Anlagendimensionierung ist über einen Zeitraum von 50 Jahren durchzuführen.

Die Modellergebnisse sind so darzustellen, dass der Nachweis einer nachhaltigen Anlagendimensionierung erbracht werden kann. Dazu können z.B. die Temperaturentwicklungen in den Erdwärmesonden als Ganglinien dargestellt werden. Des Weiteren ist für zuvor festgelegte hydrogeologische Einheiten, die Beeinflussung der Temperaturverhältnisse im Untergrund darzustellen. Für die Abgrenzung des bergrechtlichen Bewilligungsfeldes ist unter Beachtung der abgestimmten Temperaturrandbedingungen ein entsprechender Vorschlag zu erarbeiten.

Zudem sind Vorschläge für die Positionierung von Temperaturmessstellen im Rahmen eines ggf. behördlich geforderten Temperaturmonitorings zu unterbreiten. Dazu ist vorab eine Abstimmung mit den zuständigen Behörden erforderlich.

Die Ergebnisse der numerischen Anlagendimensionierung fließen die Erstellung der Antragsunterlagen im Rahmen des Genehmigungsverfahrens ein und werden den Antragsunterlagen als Anlage beigelegt.

Ausführungsplanung

Nach Vorliegen der Genehmigungen zum Errichten der Erdwärmesondenanlage wird die Ausführungsplanung erstellt. Dabei sind die in den Nebenbestimmungen der Genehmigungen enthaltenen Auflagen zu berücksichtigen.

Inhaltlich fällt in die Phase der Ausführungsplanung die Erstellung des bohrtechnischen und materialtechnischen Feinkonzepts. Von der Bergbehörde kann dazu die Einreichung eines Bohrbetriebsplan gefordert werden.

Weiterhin erfolgt in der Ausführungsplanung die Erstellung des Monitoringkonzepts für die Anlage und die Auslegung der Sondenanbindung bis zum Verteilerschacht.

Ausschreibung

An die Ausführungsplanung schließt sich inhaltlich die Ausschreibung zur Errichtung der Sondenanlage an. Die Errichtung möglicherweise geforderter Temperaturmessstellen sollte dabei in die Ausschreibung integriert werden.

Aufgrund der zu erwartenden Investitionskosten für den Bau der Anlage dürfte in der Regel bei öffentlichen Auftraggebern ein öffentliches Vergabeverfahren erforderlich sein. Die genauen Modalitäten werden in diesem Fall vom Bauherrn bzw. Architekten vorgegeben.

Für private Auftraggeber wird eine beschränkte Ausschreibung mit vorherigem öffentlichen Teilnahmewettbewerb empfohlen.

Bauausführung

Mit der Erteilung des Zuschlages an einen der beteiligten Bieter beginnt die Realisierungsphase. Als wesentliche ingenieurtechnische Leistung ist in dieser Phase die Bauüberwachung der Bohr- und Ausbauarbeiten zu erbringen.

Dabei sind u.a. die Schichtenverzeichnisse der Bohrungen aufzunehmen, der Einbau der Sonden sowie die Verfüllung der Bohrungen zu begleiten. Die Ergebnisse der Bauüberwachung sind nach Abschluss der Bauarbeiten in einem Bericht zu dokumentieren.

Nach erfolgreichem Abschluss der Bauarbeiten ist zudem der Hauptbetriebsplan für die Gewinnung der Erdwärme einzureichen. Der Gültigkeitszeitraum sollte vorab mit dem Oberbergamt abgestimmt werden.

Abschließend soll nochmals nachdrücklich darauf hingewiesen werden, dass eine gute Zusammenarbeit aller beteiligten Fachplaner, insbesondere aber der Fachplaner Geothermie und Heizung / Klimatechnik unerlässlich für den Erfolg des Gesamtvorhabens ist. Dies beginnt bereits damit, dass auch der Fachplaner Heizung / Klimatechnik vom Bau einer mitteltiefen Erdwärmesondenanlage überzeugt ist.

11 Literaturverzeichnis

- BAFA (2020): Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt - Merkblatt zu förderfähigen Kosten; Stand 08.01.2020
- BRACKE, R. (2012): Hammerbohrsysteme für Coiled-Tubing- und Flachbohrtechniken: ein Vergleich von hydraulischen und pneumatischen Antrieben, bbr Sonderheft Geothermie 2012, S. 26-31
- BINE (2018): BINE Informationsdienst – Netzdienliche Gebäude und Quartiere, FIZ Karlsruhe, Bonn
- HGC (2017): 3D-Wärmetransportmodellierung für eine Erdwärmesondenanlage auf Basis mitteltiefer Soden, Abschlussbericht, Freiberg
- HOAI (2013): Verordnung über Honorare für Leistungen der Architekten und Ingenieure, 30. Auflage, Stand 01.08.2013, Deutscher Taschenbuchverlag, München
- HH Umwelt (2017): Behörde für Umwelt und Energie, Abteilung Wasserwirtschaft - Produktliste A der in Hamburg als geeignet erachteten Verpressuspensionen für den Bau von Erdwärmesonden mit Frost-Tau-Beanspruchung, Hamburg
- LfULG (2014): Erdwärmesonden. Informationsbroschüre zur Nutzung oberflächennaher Geothermie. – 5. Auflage, Dresden. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11868>
- LfULG (2015): Geothermienutzung in sächsischen Gartenbaubetrieben – Schriftenreihe, Heft 6, Dresden
- LfULG (2019): iDA- Umweltportal Sachsen; Grundwasser, Grundwasserisohypsen 2016; <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/ida/pages/map/default/index.xhtml#>
- LfULG (2020): iDA- Umweltportal Sachsen, Geologie, Geologische Aufschlüsse in Sachsen; <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/ida/pages/map/default/index.xhtml>
- SOBA (2004): Richtlinie für die Erteilung einer Erlaubnis zur Aufsuchung sowie einer Bewilligung zur Gewinnung bergfreier Bodenschätze, Freiberg
- SOBA (2011): Richtlinie zur Aufstellung und Gliederung von Betriebsplänen für Tagebaue und dazugehörige Tagesanlagen, Freiberg
- VDI (2001): VDI 4640, Blatt 2 – Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf
- VDI (2010): VDI 4640, Blatt 1 – Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf
- VDI (2012): VDI 2067, Blatt 1 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung, Beuth Verlag GmbH; Düsseldorf
- VDI (2019) VDI 4640, Blatt 2 – Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49351 2612-0
Telefax: +49351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autoren:

Katrin Reinhardt, Frank Schmiedel, Diana Hermann
G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Schwarze Kiefern 2, 09633 Halsbrücke

Redaktion:

Marcus Richter, Referat Hydrogeologie
Karina Hofmann, Referat Rohstoffgeologie PG Geothermie
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Abteilung Geologie
Halsbrücker Straße 31a, 09599 Freiberg
Telefon: +49 3731 294-1505
Telefax: +49 3731 294-1099
E-Mail: Marcus.Richter@smul.sachsen.de

Redaktionsschluss:

31.08.2020

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de