



WKSP Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude

Teil III

Plausibilitätsprüfung der geothermalen Randbedingungen und
Numerische Simulation des Temperaturregimes im
Gründungsbereich

Gesamtleitung	TU Braunschweig Institut für Gebäude- und Solartechnik – IGS Prof. Dr.-Ing. M. N. Fisch (Institutsleiter) Dipl.-Ing. Franziska Bockelmann (Projektleiter) Dipl.-Ing. Herdis Kipry Dipl.-Ing. Christian Sasse
Kooperationspartner	TU-Braunschweig, Institut für Grundbau und Bodenmechanik - IGB Bearbeitung: Dipl.-Ing. Christian Kuhn Eckhard Feistel
Bundesförderung	 Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
Förderkennzeichen	0327364A
Laufzeit	Juli 2004 – Februar 2010 (inkl. Aufstockung und Verlängerung)
Stand	November 2010

Der Forschungsbericht wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. (Förderkennzeichen: 0327364A) Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



VORWORT

In den letzten Jahren wurden Bürogebäude in Deutschland immer häufiger mit Erdwärmesystemen zum Heizen und Kühlen ausgeführt. Im Gegensatz zu konventionellen Systemen zur Gebäudeklimatisierung unterliegen oberflächennahe Erdwärmesysteme den standortabhängigen Baugrundeigenschaften. Bei der Planung solcher Anlagen sind daher neben den gebäudetechnischen Parametern immer auch die vor Ort angetroffenen Baugrundeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Grundwasser, etc.) zu berücksichtigen.

Der Betrieb von Erdwärmesystemen stellt einen Eingriff in das ungestörte Temperaturregime des Untergrundes dar. Aufgrund der trägen Reaktion des Untergrundes auf die induzierten Temperaturänderungen durch den Betrieb der Anlage werden falsche Annahmen in der Planungsphase oder Fehler während des Betriebs unter Umständen erst spät erkannt und lassen sich dann nur sehr schwer korrigieren. Dies kann bis zur Außerbetriebnahme der Anlage führen.

Ziel muss es daher sein, die standortabhängigen Parameter detailliert zu erfassen und die Erdwärmesysteme schon im Planungsstadium an diese Randbedingungen anzupassen. Daneben sollten Prognoseberechnungen über die Temperaturentwicklung im Untergrund vor Baubeginn durchgeführt werden, um eine langjährige Funktionsfähigkeit der Erdwärmeanlage sicherzustellen. Aufgrund der großen Anzahl und Variabilität der Modellierungsparameter wird empfohlen, entsprechende Anlagen mit einem Monitoring der Untergrundtemperaturen zu begleiten. Anhand des Monitorings lässt sich die korrekte Betriebsweise des Erdwärmesystems nachweisen. Bei signifikanten Diskrepanzen zwischen Monitoringergebnissen und Ergebnissen der Prognoseberechnungen lassen sich die Simulationen an den Messergebnissen kalibrieren und die Ursachen für die Differenzen ermitteln.



INHALTSVERZEICHNIS

1.	Zusammenfassung	4
2.	Zielsetzung.....	5
3.	Vorhabenbeschreibung.....	6
4.	Geothermische Kennwerte und Eignung des Untergrundes zur Erdwärmennutzung.....	7
4.1.	Geothermische Kennwerte des Untergrundes	7
4.2.	Eignung des Untergrundes zur Erdwärmennutzung.....	10
4.3.	Relevante Parameter für die Simulation der Erdreichtemperatur mit Hilfe numerischer Methoden	11
5.	Analyse der Erdspeichersysteme.....	12
5.1.	Projekt 1 – Gebäude RIC, Hamburg	14
5.2.	Projekt 2 - Hauptverwaltung der Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen	15
5.3.	Projekt 3 - Neues Regionshaus, Hannover	16
5.4.	Projekt 4 - Unibibliothek, Rostock	17
5.5.	Projekt 5 - EnergieForum Berlin	18
5.6.	Projekt 6 - VGH Regionaldirektion, Lüneburg	19
5.7.	Projekt 7 – Gebäude BIH, Hannover	20
5.8.	Projekt 8 - Kai 13, Düsseldorf.....	21
5.9.	Projekt 9 - AOK Regionaldirektion, Osnabrück	21
5.10.	Projekt 10 - VW-Bibliothek, Berlin	21
5.11.	Projekt 11 - Accent Office Center, Frankfurt.....	22
6.	Entwicklung von Laborversuchen zur Ermittlung geothermischer Parameter.....	25
6.1.	Entwicklung einer Divided-Bar-Apparatur zur Untersuchung von Bodenproben.....	25
6.2.	Laborversuch zur Ermittlung des Einflusses des Wassergehalts im Boden.....	27
6.3.	Laborversuch zur Ermittlung der Wärmekapazität von Bodenproben	29
7.	Detaillierte Untersuchung des Flächenabsorbers der VW-Bibliothek in Berlin	32
7.1.	Kriterien zur Auswahl des Objektes	32
7.2.	Bauwerk und Baugrund.....	33
7.3.	Monitoringergebnisse	36
7.4.	Numerische Simulation	41
7.4.1.	Geometrisches Modell.....	41
7.4.2.	Thermische Randbedingungen.....	42
7.5.	Berechnungsergebnisse und deren Qualität	43
7.6.	Ursache für den erhöhten Wärmeeintrag in das Erdreich	45
7.7.	Parameterstudie zur Verbesserung der saisonalen Speicherung	47
7.8.	Prognoseberechnungen	48
7.9.	Zusammenfassung und Bewertung.....	56
8.	Anhang.....	57
8.1.	Abkürzungsverzeichnis	57
8.2.	Quellen und Literatur zum Projekt.....	57



1. ZUSAMMENFASSUNG

In den letzten Jahren wurden in Deutschland vermehrt oberflächennahe geothermische Anlagen zur saisonalen Energiespeicherung installiert. Dabei werden neben den klassischen Erdsonden und Energiepfählen auch thermisch aktivierte Fundamentplatten eingesetzt.

Im vorliegenden Forschungsendbericht Teil III werden die besonderen Aspekte dieser Form der Erdwärmenutzung, sowie die damit verbundenen Risiken bei der Planung und während des Betriebs erläutert.

Im Rahmen einer Analyse der Planungsunterlagen von elf Erdwärmeeinrichtungen wird deutlich, dass die geothermalen Baugrundparameter oft nicht direkt bestimmt, sondern aus dem Baugrundaufbau mit Hilfe von Literaturwerten abgeleitet werden. So werden die Wärmekapazitäten in keinem der untersuchten Fälle bestimmt, sondern aus dem Baugrundaufbau angenommen. Die Leitfähigkeit des Untergrundes wird in nur vier von elf Fällen anhand eines Thermal Response Tests (TRT) ermittelt.

Bedingt durch die unterschiedlich umfangreiche Datenbasis an bekannten und zur Verwendung gestellten Daten der Gebäude und Anlagen, können bei einigen der untersuchten Anlagen eine anschließende Plausibilitätsprüfung der angesetzten Parameter nicht umgesetzt werden.

Zur unabhängigen Bestimmung der geothermischen Parameter des anstehenden Erdreichs werden am Institut für Grundbau und Bodenmechanik (IGB) der TU-Braunschweig Laborversuchsstände zur Bestimmung des Einflusses des Wassergehalts sowie zur Ermittlung der Wärmekapazität an Bodenproben entwickelt und in Betrieb genommen. Die Funktionsfähigkeit der Versuchsstände konnte anhand von Versuchsreihen nachgewiesen werden.

Im Weiteren werden Untersuchungen zum Verhalten des aktivierten Erdreichs unter der thermisch aktivierten Bodenplatte eines realen Bauwerks (VW-Bibliothek, Berlin, Projekt 10) durchgeführt. Grundlage der Untersuchungen bilden dabei die Monitoringergebnisse der Bodentemperaturen. Mit Hilfe numerischer Berechnungen kann das Verhalten der Anlage in der mehrjährigen Betriebsphase simuliert werden. Anhand der numerischen Simulation wird die Ursache für die erhöhten Baugrundtemperaturen nachvollzogen und eine Prognose der Temperaturen im Erdreich abgegeben. Die dabei gewonnen Erkenntnisse ermöglichen eine Optimierung der bestehenden Anlage und liefern Erfahrungen für die Planung zukünftiger Anlagen.



2. ZIELSETZUNG

Im Rahmen des vom BMWi geförderte Forschungs- und Entwicklungsprojekts „WKSP - Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude“ untersucht das Institut für Grundbau und Bodenmechanik (IGB) der Technischen Universität Braunschweig als Kooperationspartner des Instituts für Gebäude- und Solartechnik (IGS) schwerpunktmäßig die geothermalen Baugrundparameter.

Für die Planung und den Betrieb von Erdwärmeanlagen stellen die Materialparameter des Erdreichs und deren Randbedingungen die Grundlage dar. So werden die standortabhängigen Parameter von elf ausgeführten Erdwärmeanlagen durch das IGB zusammengestellt und hinsichtlich der geplanten Erdwärmennutzung bewertet. Zusätzlich wird die langfristige Betriebsweise eines Gebäudes mit Fundamentabsorber (Projekt 10, VW-Bibliothek, Berlin) näher analysiert. Die dabei ermittelten Differenzen zwischen Planungsstadium und realem Betrieb der Anlage sind Gegenstand der Forschungsergebnisse.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll eine weitere Methode, neben dem Thermal Response Test (TRT), zur Bestimmung der für Erdwärmesysteme relevanten geothermalen Bodenparameter entwickelt werden. Zur unabhängigen Ermittlung der Parameter sollen die dazu notwendigen Versuchsstände geschaffen werden.



3. VORHABENBESCHREIBUNG

Die Effizienz der im Forschungsvorhaben untersuchten Anlagen wird maßgeblich durch die geologischen und hydrogeologischen Untergrundeigenschaften beeinflusst.

Während der Anamnese der zu untersuchenden Gebäude wird in PHASE I des Forschungsvorhabens eine Grobanalyse der Gebäude bzw. Anlagen durchgeführt. Das IGB der TU Braunschweig wird dabei in Hinsicht auf geotechnische/ geologische Belange das IGS unterstützen. Dazu werden die verfügbaren Unterlagen wie Baugrundgutachten, Fundament- und Gründungspläne, geologische Karten, etc. eingesehen und bewertet. Die für die Auslegung der Anlagen angesetzten geothermalen Randbedingungen werden ermittelt und auf Plausibilität überprüft.

Zur Auslegung der Anlagen zur Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund ist die Kenntnis der zentralen geothermalen Bodenparameter unabdingbar. Am IGB der TU Braunschweig sollen daher Laborversuchsstände zur Bestimmung der geothermalen Bodenparameter entwickelt und validiert werden. Zusätzlich werden numerische Simulationen zur Ermittlung des Temperaturregimes im Gründungsbereich von Erdwärmesystemen durchgeführt. Eingesetzt wird dazu das FEM Programm ANSYS [01]. In einem numerischen Modell eines Erdreichwärmeübertragers eines ausgewählten Gebäudes soll der Einfluss des heterogenen Bodenaufbaus sowie von Grundwasserströmungen auf das sich einstellende Temperaturfeld um das Gründungsbauwerk untersucht werden.

Kurz gefasst werden folgende Punkte im Teil III des Forschungsvorhabens bearbeitet:

PHASE I

- Durchsicht und Auswertung der Baugrundgutachten und geologischen Unterlagen
- Plausibilitätsuntersuchungen an den untersuchten Gebäuden anhand der angesetzten geothermalen Parameter und Randbedingungen
- Entwicklung und Bau von Laborversuchsständen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherfähigkeit sowie Durchführung der Laborversuche an beigestellten Proben

PHASE II

- Beurteilung der Gründungen hinsichtlich statischer und energetischer Belange
- Mitwirkung bei der Optimierung der untersuchten Erdwärmesysteme
- Mitwirkung bei der Validierung der thermischen Gebäude- und Anlagensimulation
- Erstellen eines numerischen Modells eines Erdwärmesystems und Simulationen zum Verhalten im Erdreich



4. GEOTHERMISCHE KENNWERTE UND EIGNUNG DES UNTERGRUNDES ZUR ERDWÄRMENUTZUNG

Die Wärme-/Kältespeicherung im Untergrund ist ein komplexer Vorgang, der nicht nur von thermodynamischen Prinzipien, sondern auch von hydrologischen und bodenmechanischen Parametern beeinflusst wird. Aufgrund der Komplexität der Problematik lässt sich die Betriebsweise solcher Anlagen und die Temperaturentwicklung im Untergrund mit empirischen Ansätzen nicht zutreffend beschreiben. Daher werden zur Auslegung und Simulation von Erdwärmanlagen physikalisch-mathematische Modelle entwickelt, die mit Hilfe numerischer Methoden gelöst werden.

Neben der mathematischen Formulierung im Programm sind dabei die Modelleingangsparameter von grundsätzlichem Interesse. Im Rahmen der Modellbildung wird aus einem realen Baugrund ein numerisches Modell abstrahiert. Der Ermittlung bzw. Abschätzung dieser Parameter kommt bei der Modellierung daher eine wichtige Rolle zu. Im Optimalfall können alle benötigten Werte im Voraus in Versuchen ermittelt werden. Aufgrund des hohen zeitlichen und kostenabhängigen Aufwandes werden viele Angaben jedoch aus einem Baugrundgutachten abgeschätzt.

Die für die Modellierung eines Erdwärmespeichers und dem angrenzenden Erdreich relevanten Parameter sind im Folgenden aufgeführt. Vor allem die geothermischen Größen des Untergrundes - Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität – sind von besonderem Interesse. Um eine grobe Einordnung des Standortes hinsichtlich der Umsetzung von Wärme-/Kältespeicherung zu ermöglichen, werden aus verschiedenen Literaturquellen die entsprechenden Werte zusammengestellt. Hinzu kommt die Fragestellung der grundsätzlichen Eignung zum reinen Entzug von Wärme bzw. Kälte oder zur saisonalen Speicherung.

Eine endgültige Aussage über die Temperaturentwicklung im Untergrund ist jedoch ohne eine numerische Simulation nur sehr schwer möglich.

4.1. Geothermische Kennwerte des Untergrundes

Einen entscheidenden Einfluss auf die geothermale Nutzung des Untergrundes haben die geothermischen Baugrundparameter. In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die generalisierten geothermischen Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität mit den entsprechenden Quellenangaben dargestellt. Sofern eine Ermittlung der Parameter nicht Vorort oder im Labor erfolgt, werden bei den weiteren Untersuchungen die Parameter aus dem hier aufgeführten Tabellenwerk entnommen.

Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeit von Baugrund bei 20°C

Stoff	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Quelle
	Bereich (typischer Rechenwert)	
Minerale		
Quarz	8,1	[04]
Feldspat	2,3	
Muskovit	2,1	
Biotit	1,45	
Porenfüllung		
Luft	2,6e-2	[05]
Wasser	0,6	
Eis (bei 0°C)	2,2	
Lockergesteine		
Kies, trocken	0,4 - 0,5 (0,4)	[05]
Kies, wassergesättigt	ca. 1,8 (1,8)	
Sand, trocken	0,3 - 0,8 (0,4)	
Sand, wassergesättigt	1,7 - 5,0 (2,4)	
Ton/Schluff, trocken	0,4 - 1,0 (0,5)	
Ton/Schluff, wassergesättigt	0,9 - 2,3 (1,7)	
Torf	0,2 - 0,7 (0,4)	
Sedimentgesteine		
Sandstein	1,3 - 5,1 (2,3)	[05]
Kalkstein	2,5 - 4,0 (2,8)	
Quarzit	3,6 - 6,6 (6,0)	
Mergel	1,5 - 3,5 (2,1)	
Ton-/Schluffstein	1,1 - 3,5 (2,2)	
Salz	5,3 - 6,4 (5,4)	
Magmatische Gesteine		
Granit	2,1 - 4,1 (3,4)	[05]
Basalt	1,3 - 2,3 (1,7)	
Diorit	2,0 - 2,9 (2,6)	
Gabbro	1,7 - 2,5 (1,9)	
Metamorphe Gesteine		
Gneis	1,9 - 4,0 (2,9)	[05]
Marmor	1,3 - 3,1 (2,1)	
Glimmerschiefer	1,5 - 3,1 (2,0)	
Tonschiefer	1,5 - 2,6 (2,1)	
Andere Stoffe		
Bentonit	0,5 - 0,8 (0,6)	[05]
Beton	0,9 - 2,0 (1,6)	
Eis (-10°C)	2,32	
Kunststoff (PE)	0,39	
Luft (0-20°C, trocken)	0,02	
Stahl	60	
Wasser (+10°C)	0,59	

Tabelle 2: Volumenbezogene spez. Wärmekapazität von Baugrund bei 20°C

Stoff	Volumenbezogene spez. Wärmekapazität	Quelle
	MJ/m³/K	
Mineral		
Quarz	2,13	[02]
Biotit	2,55	
Porenfüllung		
Luft	0,001	[06]
Wasser	4,18	
Lockergesteine		
Kies, trocken	1,4 - 1,6	[05]
Kies, wassergesättigt	ca. 2,4	
Sand, trocken	1,3 - 1,6	
Sand, wassergesättigt	2,2 - 2,9	
Ton/Schluff, trocken	1,5 - 1,6	
Ton/Schluff, wassergesättigt	1,6 - 3,4	
Torf	0,5 - 3,8	
Sedimentgesteine		
Sandstein	1,6 - 2,8	[05]
Kalkstein	2,1 - 2,4	
Quarzit	2,1 - 2,2	
Mergel	2,2 - 2,3	
Ton-/Schluffstein	2,1 - 2,4	
Salz	1,2	
Magmatische Gesteine		
Granit	2,1 - 3,0	[05]
Basalt	2,3 - 2,6	
Diorit	2,9	
Gabbro	2,6	
Metamorphe Gesteine		
Gneis	1,8 - 2,4	[05]
Marmor	2,0	
Glimmerschiefer	2,2	
Tonschiefer	2,2 - 2,5	
Andere Stoffe		
Bentonit	ca. 3,9	[05]
Beton	ca. 1,8	
Eis (-10°C)	1,87	
Kunststoff (PE)	n.a.	
Luft (0-20°C, trocken)	0,0012	
Stahl	3,12	
Wasser (+10°C)	4,15	

4.2. Eignung des Untergrundes zur Erdwärmenutzung

Für eine orientierende Aussage über die Eignung des Untergrundes zur Erdwärmenutzung reichen mitunter wenige Informationen über die Situation vor Ort aus. Dabei kommt den geothermalen Bodenparametern und der Grundwasserhydrologie eine zentrale Rolle zu. Der Einfluss dieser Parameter auf die Nutzungsarten der oberflächennahen Geothermie sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 dargestellt.

Hohe Wärmekapazitäten sind generell erwünscht, da dies ein hohes Speichervermögen bzw. thermisches Potenzial darstellt. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit entspricht, bei gleich bleibender Kapazität und induzierten Temperaturänderungen, einem großvolumigen Temperaturengleich mit nur geringen Temperaturgradienten. Gleichzeitig bedeutet dies einen schnellen Temperaturengleich.

Anstehendes Grundwasser wirkt sich generell positiv aus, da sich der Luftporenraum verringert und sich sowohl die Kapazität als auch die Leitfähigkeit erhöht. Zudem führen Grundwasserbewegungen bei der einseitigen Nutzung des Erdreichs zum reinen Entzug bzw. Eintrag von Wärme zu Ausgleichsprozessen im Untergrund und erhöhen somit die Effektivität des Entzugs. Für die Umsetzung eines Speichers sind die durch die Grundwasserbewegungen bedingten konvektiven Transportvorgänge jedoch unvorteilhaft.

Tabelle 3: Speicherung von Erdwärme

	Positiver Einfluss	Negativer Einfluss	Neutral
Hohe Wärmekapazität	Hohes Speichervermögen		
Hohe Wärmeleitfähigkeit			Großes aktiviertes Volumen mit mäßigen Temperaturgradienten
Grundwasser vorhanden	Erhöhtes Speichervermögen, Erhöhte Wärmeleitfähigkeit		
Hohe Grundwasserströmung		Verschleppung der gespeicherten Wärme/Kälte	

Tabelle 4: Nutzung des Untergrundes zum Entzug von Wärme/Kälte

	Positiver Einfluss	Negativer Einfluss	Neutral
Hohe Wärmekapazität	Hohes thermisches Potenzial		
Hohe Wärmeleitfähigkeit	Großes aktiviertes Volumen mit mäßigen Temperaturgradienten		
Grundwasser vorhanden	Erhöhtes Speichervermögen, erhöhte Wärmeleitfähigkeit		
Hohe Grundwasserströmung	Schneller Ausgleich der im Untergrund induzierten Temperaturänderungen		



4.3. Relevante Parameter für die Simulation der Erdreichtemperatur mit Hilfe numerischer Methoden

Für die genaue Prognose der Temperaturverteilung im Untergrund während des Betriebes von oberflächennahen geothermischen Anlagen werden vermehrt numerische Methoden eingesetzt. Zur Modellierung eines Erdwärmespeichers mit Hilfe numerischer Methoden ist die Kenntnis über zahlreiche Parameter der Anlage und des Untergrundes notwendig. Die Anzahl der Parameter richtet sich dabei nach der Komplexität der zu untersuchenden Anlage und des Baugrundaufbaus vor Ort sowie des Detaillierungsgrades des eingesetzten Modells.

Im Folgenden werden generelle Parameter aufgeführt, die benötigt werden, um die Modellierung solcher Anlagen zu realisieren. Zahlreiche Parameter beeinflussen sich dabei gegenseitig, bzw. sind aus anderen ableitbar. So gibt es z.B. eine direkte Korrelation zwischen bodenphysikalischen Eigenschaften (z.B. Dichte und Porosität) und den geothermischen Parametern (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität).

Die hier aufgeführten Parameter stellen dabei eine sehr umfangreiche Grundlage für die Bildung eines physikalisch/mathematischen Modells zur Simulation der Erdreichtemperaturen dar, die bei der Planung von Anlagen zur Wärme-/Kältespeicherung nur selten erreicht wird.

Die Qualität des Baugrundaufbau/Anlagen bestimmt die Anzahl der Parameter, erhebliche Abweichungen ergeben sich durch die Art des Untergrundes.

Generelle Baugrundparameter

- Baugrundaufbau (Schichtung/Schichtmächtigkeit/Bodenklassifikation)

- Dichte des Bodens

- Porosität

Hydrogeologie

- Grundwasserstand

- Grundwasser-Stockwerke

- Durchlässigkeitsbeiwerte

- Grundwasser-Fließgeschwindigkeiten

- Wassersättigung des Bodens oberhalb des Grundwasserstandes

Geothermische Baugrundparameter

- Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Schichten des abstrahierten Baugrundaufbaues

- bzw. mittlere Wärmeleitfähigkeit des Bodens

- Spezifische Wärmekapazität des Bodens

Geothermische Randbedingungen

- Temperaturregime im ungestörten Untergrund

- (Temperaturverteilung über Höhe und Zeit)

- Geothermischer Wärmestrom

- Temperaturganglinie an der Geländeoberkante (GOK)

Absorberbauteile

Erdwärmesystem

Lage und Abmessungen der erdberührenden Bauteile bzw. Absorberrohre

Baustoffkennwerte (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Dichte)

Kennwerte des Wärmeträgermediums

5. ANALYSE DER ERDSPEICHERSYSTEME

In Phase I des WKSP-Projektes werden zunächst alle verfügbaren Unterlagen der untersuchten Gebäude aus der Grobanalyse (siehe Teil I Kapitel 4.2) hinsichtlich der geothermalen Eigenschaften des Untergrundes ausgewertet. Neben Plausibilitätskontrollen der angesetzten Parameter wird auch die Eignung zur geplanten Erdwärmennutzung untersucht und bewertet.

Dazu werden zunächst der generelle Anlagen- und Baugrundaufbau, sowie die bodenmechanischen Parameter zusammengestellt. Ebenso werden die hydrogeologischen Randbedingungen, soweit bekannt, zusammengetragen.

Von besonderem Interesse sind die geothermalen Baugrundeigenschaften. Diese werden aus dem Baugrundaufbau unter Berücksichtigung der Tabelle 1 und Tabelle 2 abgeschätzt. Werden die Parameter im Vorfeld der Baumaßnahme durch Tests oder Bohrungen ermittelt (z.B. Wärmeleitfähigkeit aus Thermal Response Test), so wird eine Plausibilitätskontrolle dieser Werte anhand der Literaturwerte durchgeführt. Auf Grundlage der vorhandenen und ermittelten Parameter sowie der Nutzungsart des Erdwärmesystems wird eine grobe Einschätzung hinsichtlich der Eignung vorgenommen.

Für die im Rahmen von WKSP untersuchten Gebäude stehen die in Tabelle 5 dargestellten Unterlagen zur Analyse der Erdspeichersysteme zur Verfügung. Zusammenfassend werden alle Gebäude und deren Erdwärmesysteme in einer Übersichtsmatrix zusammengestellt.

Hinweis: Die in den nachfolgenden Tabellen aufgeführten Bodenparameter unterscheiden sich in ermittelte und *abgeleitete* Werte, wobei die *abgeleiteten* Bodenparameter kursiv dargestellt werden.

Tabelle 5: Verwendete Literatur, geordnet nach Gebäude

Gebäude	Verwendete Unterlagen
Projekt 1 Gebäude RIC, Hamburg	<ul style="list-style-type: none"> Hydrogeologische Untersuchung für den Bau einer Erdwärmesondenanlage Geotechnisches Gutachten Geologische Karte Hamburg
Projekt 2 Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen	<ul style="list-style-type: none"> Informationsbroschüre der Uni Wuppertal Antrag auf Zulassung eines Hauptbetriebsplanes für die Gewinnung von Erdwärme Antrag auf Niederbringen von Erdsonden Genehmigungsantrag zur Erstellung von 2 Probebohrungen für TRT Abschlussbericht zum TRT Dykerhoff Dämmer Bindemittel zum Verfüllen
Projekt 3 Neues Regionshaus, Hannover	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes mittels GeRT, Fa. UBeG
Projekt 4 Unibibliothek, Rostock	<ul style="list-style-type: none"> Bericht zum Response-Test der Fa. Aetna Energiesysteme GmbH



Gebäude	Verwendete Unterlagen
Projekt 5 EnergieForum, Berlin	<ul style="list-style-type: none">• Dokumentation zur Einrichtung von Temperaturmessstellen der Fa. Arcadis Consult• Bericht zum Geothermal Response Test• Antrag auf Erteilung einer wasserbehördlichen Erlaubnis• Ergebnisbericht zur Berechnung von Grundwasserströmungen und Wärmetransport• Bericht "Kombiniertes Heizen und Kühlen mit Hilfe einer Energiepfahlanlage"• Grundwasserauskunft HGW• Integrales Energie und Ökokonzept• Auszüge aus dem Gutachten „Ergänzende Baugrunduntersuchungen“• Auszüge aus dem Baugrundgutachten
Projekt 6 VGH Regionaldirektion, Lüneburg	<ul style="list-style-type: none">• Überwachung der Pfahlherstellung und Durchführung der Probebelastungen (2001)• Herstellungsdiagramme Pfähle• Gründungsgutachten• Wärmeschutznachweis
Projekt 7 Gebäude BIH, Hannover	<ul style="list-style-type: none">• Hydrogeologisches Gutachten• Gutachten „Wärmetransport ...-Wärmetausch über Pfahlgründungen“
Projekt 8 KAI13, Düsseldorf	<ul style="list-style-type: none">• keine Unterlagen zur Verfügung gestellt
Projekt 9 AOK Regionaldirektion, Osnabrück	<ul style="list-style-type: none">• keine Unterlagen zur Verfügung gestellt
Projekt 10 VW-Bibliothek, Berlin	<ul style="list-style-type: none">• Ergebnisbericht zur Berechnung von Wärmeausbreitung (2001)• Ergebnisbericht zur Berechnung von Grundwasserströmung und Wärmetransport (2000)• Baugrundgutachten• Gutachten für den Bau des Untergeschosses – Auswirkungen auf den Baumbestand
Projekt 11 Accent Office Center, Frankfurt	<ul style="list-style-type: none">• Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie- Standortbeurteilung• Baugrundgutachten

5.1. Projekt 1 – Gebäude RIC, Hamburg

Erdwärmesystem

Zur saisonalen Energiespeicherung wird ein Erdwärmesondenfeld hergestellt. Das Feld besteht aus 17 Sonden mit einer Länge von 99 m. Die Oberkante des Erdwärmesystems liegt ca. 1,5-2 m unter Geländeoberkante (GOK).

Grundlagen

Der Baugrund ist bis in eine Tiefe von 20 m aufgeschlossen. Ein genauer Baugrundaufbau in tieferen Schichten ist am geplanten Standort nicht bekannt. In den tieferen Schichten ist jedoch gemäß geologischer Karte mit Sand/Mergel zu rechnen. Ab ca. 100 m Tiefe stehen Glimmertone an. Porenzahl und Dichten werden im vorliegenden Bodengutachten nicht bestimmt. Geothermische Parameter können aufgrund der Baugrunderkundung nur für die oberen 20 Meter abgeschätzt werden. Unterlagen über einen Thermal-Response-Test (TRT) liegen nicht vor.

Zur Abschätzung der Durchlässigkeiten werden Siebanalysen an gewonnenem Probenmaterial durchgeführt. Zusätzlich werden im oberen Bereich der Erdwärmesonden (bis 20 m Tiefe) Pumpversuche an zwei Pegeln ausgeführt. Über diese Untersuchung wird der Grundwasserstand bestimmt. Da sich das Gebäude direkt an der Elbe befindet, ist mit jahreszeitlichen und tideabhängigen Wasserstandsschwankungen zu rechnen. Aufgrund der tideabhängigen Wasserstandsänderung ist mit inhomogenen Grundwasserbewegungen und damit schwankenden Temperaturverläufen im Untergrund zu rechnen. Eine genaue Bestimmung der Bodentemperaturen liegt nicht vor.

Für den Standort Hamburg liegen langjährige Aufzeichnungen über die Lufttemperatur vor. Angaben über den geothermischen Wärmestrom lassen sich aus der Literatur ermitteln.

Tabelle 6: Ermittelte und *abgeleitete* Bodenparameter (k.A.: keine Angaben)

Tiefe unter GOK [m]	Boden	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spez. Wärmekapazität $c_p \cdot \rho$ [MJ/(m ³ ·K)]	Durchlässigkeit k_f [m/s]	Fließgeschwindigkeit v [m/a]
0-20	Sand, wassergesättigt	2,4	2,2 – 2,9	$4,0 \cdot 10^{-4}$ - $7,0 \cdot 10^{-4}$	k.A.
20-	Sand/Mergel	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Einschätzung

Für den Bereich bis 20 m unterhalb Geländeoberkante (GOK) lässt sich auf Grundlage der Wärmeleitfähigkeit und der Speicherkapazität (Grundwasser vorhanden) für das Erdwärmesondenfeld eine gute Eignung zur saisonalen Energiespeicherung feststellen. Durch die hohe Durchlässigkeit ist allerdings mit Temperaturverschleppungen zu rechnen. Ebenso kann sich der Tideeinfluss nachteilig auf den Betrieb des Erdreichs als Speicher auswirken. Im unteren Bereich der Sonden (Tiefe > 20 m) ist mit geringeren Grundwasser (GW) -Bewegungen zu rechnen, genaue Angaben liegen jedoch nicht vor. Aufgrund der Datenbasis ist die Eignung zur saisonalen Energiespeicherung im unteren Ausbaubereich nicht zu beurteilen.

5.2. Projekt 2 - Hauptverwaltung der Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen

Erdwärmesystem

Die Hauptverwaltung der Gelsenwasser AG wird über 36 Erdwärmesonden mit einer Länge von je 150 m an das Erdreich gekoppelt, der als saisonaler Speicher genutzt werden soll. Die Oberkante (OK) des Speichers liegt ca. 0-2 m unter GOK.

Grundlagen

Der Baugrundaufbau ist durch ein Bodengutachten bekannt. Genaue Kenntnisse der Bodenparameter der einzelnen Schichten liegen nicht vor.

In den vorliegenden Unterlagen finden sich keine Angaben bzgl. der Grundwasserdynamik. Detaillierte Informationen hinsichtlich der Durchlässigkeiten liegen nicht vor.

Die Wärmeleitfähigkeit des Bodens (1,6 W/(mK)) sowie die Bodentemperatur (10,7°C - 12,4°C) werden im Zuge eines Thermal Response Test (TRT) ermittelt. Die ermittelte Wärmeleitfähigkeit stimmt gut mit den Literaturwerten überein. Die Wärmekapazität wird der VDI-Norm entnommen.

Keine Angaben gibt es zur Oberflächentemperatur und zum thermischen Gradienten.

Tabelle 7: Ermittelte und *abgeleitete* Bodenparameter

Tiefe unter GOK [m]	Boden	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spez. Wärmekapazität $c_p \cdot \rho$ [MJ/(m ³ ·K)]	Durchlässigkeit k_f [m/s]	Fließgeschwindigkeit v [m/a]
6,0	Sande, Auffüllungen	2,1	2,4	durchlässig	
15,0	Schluffe	1,5	2,5	gering durchlässig	k.A.
62,0	Tone	1,5	2,5		
85,0	Schluffe	1,5	2,5		
97,0	Mergel	2,1	2,2		
107,0	Schluff	1,5	2,5		
150,0	Ton/Tonstein	1,7	2,3		
gemittelt:		1,6	2,4	k.A.	k.A.

Einschätzung

Ab einer Tiefe von 6 m unter GOK werden nach Baugrundgutachten nur noch bindige Bodenschichten angetroffen. Grundwasserbewegungen sind somit nur im oberen Sondenbereich (0 bis 6 m unter GOK) zu erwarten. Der Wärmeaustausch mit dem Erdreich findet daher auf 97% der Sondenlänge fast ausschließlich über Konduktion (Wärmeleitung) statt. Der Untergrund ist für eine saisonale Energiespeicherung geeignet.

5.3. Projekt 3 - Neues Regionshaus, Hannover

Erdwärmesystem

Für das Erdwärmesystem werden 12 Erdwärmesonden mit einem Durchmesser von 16 cm und einer Länge von 70 m hergestellt. Das Erdwärmesystem dient vorrangig zur Kühlung (Wärmeintrag in den Untergrund) des Gebäudes. Als Erdreich gekoppelte Übergabesysteme stehen eine Betonkernaktivierung sowie ein Kühlregister zur Vorkonditionierung der Zuluft aus der RLT-Anlage zur Verfügung. Ein minimaler Wärmeentzug im Heizbetrieb durch die Vorerwärmung der Außenluft fällt in der Jahresbilanz nicht ins Gewicht. Die Oberkante (OK) des Erdwärmesystems befindet sich auf Höhe der GOK.

Grundlagen

Der Baugrundaufbau geht aus dem Thermal Response Test (TRT) Protokoll hervor.

Tabelle 8: Baugrundaufbau

Boden	Tiefe unter GOK [m]
Auffüllungen	0 bis 1
Mutterboden	1 bis 1,3
Lehm, sandig	1,3 bis 4
Sand	4 bis 5
Feinsand, Mittelsand	5 bis 7
Mittelsand	7 bis 11
Grobsand, Kies	11 bis 12
Grobsand, Mittelsand	12 bis 13,5
Ton	13,5 bis 72

Aus dem TRT wird die mittlere Wärmeleitfähigkeit für die o.a. Sondenlänge mit $\lambda_{\text{eff}} = 1,59 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ bestimmt. Die Bodenausgangstemperatur ist aus einer Messung vor dem TRT bekannt und liegt im Mittel bei 13°C . Weitere Daten liegen nicht vor.

Tabelle 9: Ermittelte und *abgeleitete* Bodenparameter

Tiefe unter GOK [m]	Boden	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spez. Wärmekapazität $c_p \cdot \rho$ [MJ/(m ³ ·K)]	Durchlässigkeit k_f [m/s]	Fließgeschwindigkeit v [m/a]
0-3	Lehm	1,3	2,0	k.A.	k.A.
3-13,5	Sande, Kiese wassergesättigt	2,1	2,4	k.A.	k.A.
13,5-70	Ton, wassergesättigt	1,5	2,5	k.A.	k.A.

Einschätzung

Die Erdwärmesonden haben im oberen Bereich (3,0 bis 13,5 m unter GOK) direkten Kontakt zu den wassergesättigten Sanden und Kiesen des Grundwasserleiters. Ab einer Tiefe von 13,5 m bis zur Sondenlänge von 70 m liegt Kreideton an. Im konvektiv beeinflussten Bereich des Grundwasserleiters sind hohe Entzugsleistungen (in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit) zu erwarten, im Tonstein aufgrund der herabgesetzten Wärmeleitfähigkeit geringere. Die Anlage scheint für die geplante Nutzung mit Einschränkungen geeignet.

5.4. Projekt 4 - Unibibliothek, Rostock

Erdwärmesystem

Für das Erdwärmesystem werden 28 Erdwärmesonden mit einem Durchmesser von 18 cm und einer Länge von 74 bis 84 m installiert. Das System wird als saisonaler Speicher betrieben. Die Oberkante des Wärmespeichers liegt ca. 1 m unter GOK.

Grundlagen

Der Baugrundaufbau wird aus dem durchgeführten Thermal Response Test (TRT) und den dazu vorhandenen Protokollen hergeleitet. Weitere bodenmechanische und hydrogeologische Größen liegen nicht vor.

Aus dem TRT wird für eine Sondenlänge von 80 m die mittlere Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} von 1,9 W/(m·K) bestimmt. Die Untergrundtemperatur beträgt in 30 m Tiefe 9,3 °C.

Weitere Daten liegen nicht vor.

Tabelle 10: Ermittelte und *abgeleitete* Bodenparameter

Tiefe unter GOK [m]	Boden	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spez. Wärmekapazität $c_p \cdot \rho$ [MJ/(m ³ ·K)]	Durchlässigkeit k_f [m/s]	Fließgeschwindigkeit v [m/a]
0-30	Geschiebemergel	1,5	2,2	k.A.	k.A.
30-80	Sand	2,1	2,3	k.A.	k.A.

Einschätzung

Die ermittelten Daten aus dem TRT lassen eine Eignung als saisonalen Speicher zu. Auch wenn die Grundwasserverhältnisse nicht bekannt sind, ist davon auszugehen, dass Grundwasser in der Nähe der GOK ansteht. Für eine endgültige Bewertung sind jedoch weitere Untersuchungen hinsichtlich der hydrogeologischen Verhältnisse notwendig.



5.5. Projekt 5 - EnergieForum Berlin

Erdwärmesystem

Für das EnergieForum wurde eine Energiepfahlanlage mit 196 Energiepfählen und einer Länge von 9,0 m umgesetzt. Die Nutzung des Erdwärmesystems erfolgt als saisonaler Speicher. Oberkante des Speichers ist ca. 3,5 m unter GOK.

Grundlagen

Aus den Baugrundgutachten mit Aufschlussbohrungen und Grundwassermessstellen sowie den Bohrprofilen können die Untergrundverhältnisse bezüglich der Schichtung und der Grundwassersituation sehr genau erfasst werden. Baugrundaufbau und Lagerungsdichten können als bekannt vorausgesetzt werden. Im Rahmen der Baugrunderkundung werden Bohrungen mit Entnahme von Bodenmaterial in repräsentativen Schichten abgeteuft. Anhand der gewonnenen Proben werden Korngrößenverteilungen zur Abschätzung der Durchlässigkeiten ermittelt.

Auf Grundlage der bekannten Grundwassersituation und der Durchlässigkeiten lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit im Modellgebiet gut prognostizieren.

Des Weiteren wird ein TRT zur Ermittlung der geothermischen Bodenparameter durchgeführt. Im Bereich des TRT kann somit über die Höhe der Bohrung eine durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} von 3,3 W/(m·K) ermittelt werden. Dieser Wert liegt deutlich über dem Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit aus der Literatur.

Untersuchungen zur Bestimmung der Wärmekapazität werden nicht durchgeführt. Aufgrund der übersichtlichen Baugrundsituation in Berlin kann diese jedoch abgeschätzt werden.

Für den Standort Berlin liegen Aufzeichnungen über die Lufttemperatur der letzten Jahre vor (z.B. Meteorologisches Institut). Ebenso lassen sich Angaben über den geothermischen Wärmestrom und das Temperaturregime im Untergrund durch Literaturquellen annehmen.

Um die Entzugsleistungen zu bestimmen, wird in der Planungsphase eine Grundwasserströmungs- und Wärmetransportsimulation durchgeführt. Diese Berechnungen erfolgen vor Durchführung des TRT. In der Simulation wird von einer deutlich schlechteren Wärmeleitfähigkeit im Untergrund ausgegangen, so dass die berechneten Entzugsleistungen deutlich von den tatsächlichen Entzugsleistungen abweichen.

Mit Hilfe von insgesamt vier Messstellen (zwei zur Anstromseite und zwei zur Abstromseite) werden die Temperaturentwicklungen im Untergrund aufgezeichnet. Die Sensoren dienen der Kontrolle der Bodentemperaturen und sind Teil der Auflagen der unteren Wasserbehörde, unter denen die Betriebserlaubnis der Anlage erteilt wird.

Tabelle 11: Ermittelte und *abgeleitete* Bodenparameter

Tiefe unter GOK [m]	Boden	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spez. Wärmekapazität $c_p \cdot \rho$ [MJ/(m ³ ·K)]	Durchlässigkeit k_f [m/s]	Fließgeschwindigkeit v [m/a]
0-2,5	Auffüllungen				
2,5-10	Mitteldichte Sande	2,4	2,2 - 2,9	$0,8 \cdot 10^{-4}$ bis $9 \cdot 10^{-4}$	ca. 4

Einschätzung

Aufgrund des in den Unterlagen genannten geringen hydraulischen Gefälles von 0,20 ‰ und der genannten Durchlässigkeit, sind geringe Grundwasserfließgeschwindigkeiten zu erwarten. Ein signifikanter konvektiver Wärmetransport wird daher nicht erwartet. Die generelle Eignung zur saisonalen Energiespeicherung ist daher gegeben.

5.6. Projekt 6 - VGH Regionaldirektion, Lüneburg

Erdwärmesystem

Die Energiepfahlanlage für die Regionaldirektion der VGH besteht aus 101 Energiepfählen mit einer Länge zwischen 17,5 und 21,5 m. Die Nutzung des Erdwärmesystems erfolgt über saisonale Speicherung. Die Oberkante des Erdwärmespeichers liegt ca. 2 m unter GOK.

Grundlagen

Das Gründungsgutachten wird bis in eine Tiefe von 20 m unter GOK erstellt und gibt genaue Aufschlüsse über die Schichtenfolge und die geotechnischen Bodenkennwerte des Untergrundes. Neben der Schichtenfolge und den Laborversuchen zur Klassifizierung werden unter anderem Durchlässigkeiten und Porenzahlen im Labor bestimmt.

Im Rahmen der Baugrunduntersuchung wird die Grundwassersituation untersucht und die Grundwasserstände in den Aufschlussbereichen ermittelt. Aufgrund der gemessenen Wasserstände (auf Höhe OK Speicher) und der untersuchten Durchlässigkeiten können die Grundwasserfließgeschwindigkeiten und -richtungen ermittelt werden (vgl. Tabelle 12). Langjährige Datenreihen von benachbarten Grundwassermessstellen liegen nicht vor.

Über die thermischen Bodenkennwerte liegen keine Unterlagen vor, so dass diese aufgrund der Bodenarten abgeschätzt werden müssen. Ob ein TRT durchgeführt wurde, ist nicht bekannt. Langjährige Datenreihen über die Lufttemperatur in Lüneburg können von den meteorologischen Diensten bezogen werden.

Angaben zum geothermischer Wärmestrom und der ungestörten Untergrundtemperatur sind nicht bekannt.

Tabelle 12: Ermittelte und *abgeleitete* Bodenparameter (k.A.: keine Angabe)

UK Schicht unter GOK [m]	Boden	Wärmeleit- fähigkeit λ [W/(m·K)]	Spez. Wär- mekapazität $c_p \cdot \rho$ [MJ/(m ³ ·K)]	Durchlässig- keit k_f [m/s]	Fließge- schwindig- keit v [m/d]
2,5-3,5	Sande mit eingelagerten Lehmen	2,4	2,55	$0,5 \cdot 10^{-4}$	0,45
16-20	Lehme (Schluffe)	1,8	2,4	$5 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-5}$
> 20	Lehmige Sande	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Einschätzung

Die Energiepfähle haben im oberen Bereich (2 bis 3,5 m unter GOK) auf einer Länge von 1-2 m direkten Kontakt zu den Sanden des Grundwasserleiters. Aufgrund der Grundwasserströmung sind hier konvektive Wärmetransporte zu erwarten. Der intensive Wärmeaustausch erfolgt allerdings nur auf 5% bis 10% der Pfahlänge und ist somit von untergeordneter Bedeutung. Im unteren Bereich (> 3,5 m unter GOK) stehen Schluffe mit geringen Durchlässigkeiten an. Die abgeschätzten geothermischen Parameter lassen eine Eignung zur saisonalen Energiespeicherung zu.

5.7. Projekt 7 – Gebäude BIH, Hannover

Erdwärmesystem

Das Erdwärmesystem besteht aus 121 Energiepfählen mit einer Länge von 20,0 m und einem Durchmesser von 90 cm, die den Untergrund zur saisonalen Speicherung nutzen. Die GOK liegt auf 54,5 m üNN, die Oberkante (OK) des Speichers zwischen 43,1 und 45,8 m üNN.

Grundlagen

Der Baugrundaufbau liegt aus Erkundungsbohrungen vor. Unterlagen über Dichte und Porenvolumen sind nicht vorhanden. Die hydrogeologische Situation für das Erdwärmesystem ist durch langjährige Grundwassermessstandsreihen im Planungsgebiet bekannt. Die Durchlässigkeiten des vorgefundenen Bodens wird mit einem Pumpversuch bestimmt. Zur Ermittlung der Bodenausgangstemperatur werden hochauflösende Temperaturmessungen in neun Grundwassermessstellen durchgeführt. Der Einfluss des Grundwassers und der Grundwasserdynamik ist hier allerdings von untergeordneter Bedeutung, da die Energiepfähle nur auf einer Länge von 3,0 m direkten Kontakt zum fließenden Grundwasser haben.

Die thermodynamischen Bodenparameter werden anhand des ermittelten Baugrundaufbaus der Literatur entnommen, ein TRT (Thermal Response Test) wird nicht durchgeführt. Die Lufttemperaturen können für den Standort Hannover aufgrund langjähriger Datenreihen gut prognostiziert werden. Angaben über den geothermischen Wärmestrom liegen nicht vor.

Im Vorfeld der Planung wird die Temperaturentwicklung im Untergrund mit Hilfe einer Wärmetransportsimulation bewertet. Die dabei angesetzte Wärmeleitfähigkeit mit $3,07 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ erscheint jedoch im Vergleich zu hoch, die angesetzte Wärmekapazität mit $1,3 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ gegenüber den Literaturwerten, s. Tabelle 13, zu gering.

Tabelle 13: Ermittelte und *abgeleitete* Bodenparameter

UK Schicht [müNN]	Boden	Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	Spez. Wärmekapazität $c_p \cdot \rho$ [$\text{MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$]	Durchlässigkeit k_f [m/s]	Fließgeschwindigkeit v [m/d]
45,0 – 48,0	Sandiger/schluffiger GW-Leiter	2,4	2,55	$1 \cdot 10^{-5}$ – $2 \cdot 10^{-4}$	k.A.
41,0 – 42,0	Kiesiger GW-Leiter	1,8	2,4	$5 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-2}$	k.A.
< 41,0	Kreideton	1,5	2,5	$10 \cdot 10^{-15}$	k.A.

Einschätzung

Die aufgrund des Bodenaufbaues angenommenen geothermischen Bodenparameter lassen eine saisonale Speicherung von Wärme im unteren Bereich (< 41 müNN; Kreideton) zu. Der obere Bereich des Speichers (> 41 müNN) liegt mit 1,0-4,0 m im Bereich des Grundwasserleiters. Hier ist mit Temperaturverschleppungen aufgrund von konvektiven Wärmetransportvorgängen zu rechnen. Induzierte Temperaturdifferenzen werden in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit wieder reduziert. Eine effektive saisonale Wärmespeicherung ist daher nur bei mäßigen Grundwasserbewegungen und im Bereich des Kreidetons zu erwarten.

5.8. Projekt 8 - Kai 13, Düsseldorf

Es sind keine Unterlagen zur Auswertung und Analyse vorhanden.

5.9. Projekt 9 - AOK Regionaldirektion, Osnabrück

Es sind keine Unterlagen zur Auswertung und Analyse vorhanden.

5.10. Projekt 10 - VW-Bibliothek, Berlin

Erdwärmesystem

Ausgeführt wird ein Bodenabsorber mit 8.100 m^2 Grundfläche. Über diesen Wärmetauscher soll eine saisonale Energiespeicherung im Untergrund erfolgen. Die Oberkante des Speichers liegt ca. 6 m unter GOK.

Grundlagen

Aus dem Baugrundgutachten gehen der Baugrundaufbau und die Bodendichten hervor. Porositäten werden nicht genannt. Die Durchlässigkeiten beruhen auf Erfahrungswerten bzw. lassen sich aus den Kornverteilungen abschätzen. Grundwasserstände im Bereich der Bibliothek sind aus bestehenden Pegeln bekannt. Ebenso lassen sich das Grundwassergefälle und somit auch die Strömungsgeschwindigkeit aus vorhandenen Messwerten aus der Umgebung der VW Bibliothek ableiten.

Die geothermalen Parameter werden nicht bestimmt, lassen sich aber für den Berliner Baugrund abschätzen (siehe EnergieForum). Keine Angaben gibt es zur Oberflächentemperatur und zum thermischen Gradienten. Diese Größen lassen sich für den Standort Berlin aus Literaturquellen ermitteln.

Im Vorfeld wird die Temperaturentwicklung im Untergrund mit Hilfe einer Wärmetransportsimulation ermittelt. Die dabei angesetzten Wärmeleitfähigkeiten erscheinen mit $1,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ niedrig, die angesetzte Wärmekapazität mit $0,2 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ deutlich zu gering im Vergleich zu den aus Literaturwerten abgeleiteten Parametern, siehe Tabelle 14. Mit Hilfe von insgesamt 45 Sensoren werden die Temperaturentwicklungen im Untergrund aufgezeichnet. Die Sensoren dienen der Kontrolle der Bodentemperaturen und sind wie beim EnergieForum Teil der Auflagen der unteren Wasserbehörde, unter denen die Betriebserlaubnis der Anlage erteilt wird.

Tabelle 14: Ermittelte und *abgeleitete* Bodenparameter

Tiefe unter GOK [m]	Boden	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spez. Wärmekapazität $c_p \cdot \rho$ [MJ/(m ³ ·K)]	Durchlässigkeit k_f [m/s]	Fließgeschwindigkeit v [m/a]
0-2	Auffüllungen	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
2-10	Locker bis mitteldichte Sande	2,4	2,2 - 2,9	0,75·10 ⁻³ bis 1,5·10 ⁻³	12
> 10	Dichte Sande	2,4	2,2 - 2,9		

Einschätzung

Aufgrund des in den Unterlagen genannten geringen hydraulischen Gefälles von 0,14 ‰ sind trotz hoher Durchlässigkeiten nur geringe Grundwasserfließgeschwindigkeiten zu erwarten. Ein signifikanter konvektiver Wärmetransport ist daher nicht anzunehmen. Die generelle Eignung zur saisonalen Energiespeicherung ist gegeben.

5.11. Projekt 11 - Accent Office Center, Frankfurt

Erdwärmesystem

Umgesetzt wird ein Bodenabsorber mit einer Fläche von 5.870 m^2 . Über den Bodenabsorber soll ein reiner Wärmeeintrag in den Untergrund realisiert werden. Die GOK liegt auf 99 müNN. Die Unterkante der thermisch aktivierten Bodenplatte liegt ca. 7,5 m unter GOK.

Grundlagen

Der Baugrundaufbau ist anhand von drei Aufschlussbohrungen bis in einer Tiefe von 15 m bekannt. Zusätzliche Rammsondierungen ermöglichen gesicherte Kenntnisse über den Baugrundaufbau. Porenzahlen, Dichten etc. sind im Baugrundgutachten nicht angegeben. Die Durchlässigkeiten werden anhand des angetroffenen Bodens angegeben. In den Sanden und Kiesen der Mainterrassen ist mit hohen Grundwasserfließgeschwindigkeiten zu rechnen. Der mittlere Grundwasserspiegel wird mit 95 mÜNN angegeben.

Der Bodenabsorber liegt aus statischen Gründen am Übergang zwischen Grundwasserleiter und Grundwasserstauer. Der Abtransport der einzuleitenden Wärme erfolgt daher fast ausschließlich im Grundwasserstauer. Konvektiver Wärmetransport findet nur in untergeordneter Größenordnung statt. Die geothermischen Kennwerte können aus dem Baugrundaufbau nur abgeschätzt werden, da keine Unterlagen über einen TRT vorliegen.

Die Bodentemperaturen werden nicht ermittelt. Lufttemperatur und geothermischer Wärmestrom können für den Standort Frankfurt als bekannt vorausgesetzt werden.

Tabelle 15: Ermittelte und *abgeleitete* Bodenparameter

Schicht UK [mNN]	Bodenart	Wärmeleit- fähigkeit λ [W/(m·K)]	Spez. Wär- mekapazität $c_p \cdot \rho$ [MJ/(m ³ ·K)]	Durchläs- sigkeit k_f [m/s]	Fließge- schwindigkeit v [m/s]
98 bis 97	Auffüllungen	1,7 - 5,0	2,2 - 2,9	2·10 ⁻³ bis 5·10 ⁻⁴	0,5-1,0
97 bis 96	Hochflutlehm				
92	Mainterrassen (Grundwasser- leiter, Sande und Kiese)				
< 92	Ruppelton (Grundwasser- stauer)	0,9 - 2,3	1,6 - 3,4	1·10 ⁻¹⁰ bis 1·10 ⁻¹¹	k.A. (sehr gering)

Einschätzung

Aufgrund der fehlenden Grundwasserströmung im Bereich der Bodenplatte (Lage im Stauer) ist mit einem primären Wärmetransport in Form von Konduktion (Wärmeleitung) zu rechnen. Dadurch wirkt das Erdwärmesystem wie ein saisonaler Speicher, aus dem keine Wärme entnommen wird. Mittelfristig ist mit einem Anstieg der Bodentemperatur im Umfeld des Absorbers zu rechnen. Die Eignung für einen dauerhaften Wärmeeintrag wird kritisch eingeschätzt.

Zusammenfassend werden in Tabelle 16 die Ergebnisse der Analyse aller untersuchten Gebäude dargestellt. Für Projekt 8 (Kai 13, Düsseldorf) und Projekt 9 (AOK Regionaldirektion, Osnaabrück) sind keine Unterlagen zur Auswertung vorhanden.

Tabelle 16: Zusammenfassung der vorhandenen Eingangsparameter

	Genereller Baugrundaufbau	Porenvolumen / Dichte	Durchlässigkeiten	Wärmeleitfähigkeit	Wärmekapazität	Grundwassersituation	GW-Strömung	GW-/Baugrundtemperatur	Jahresgang der Temperatur im Untergrund	Geothermischer Wärmestrom	Lufttemperatur	Umfang der Datenbasis	Bewertung hinsichtlich Nutzung/Eignung
Gebäude RIC 1) Hamburg 2)	+ -	- -	+ -	o -	- -	+*** -	o*** -	- -	- -	o o	o o	- -	- -
Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen	+	-	o	+	o	-	-	+	-	-	o	o	+
Neues Regionshaus Hannover	o	-	-	+	o	-	-	+	-	o	o	-	+
Unibibliothek Rostock	o	-	-	+	o	-	-	+	-	-	o	-	-
EnergieForum, Berlin	+	-	o	+	o	+	o	o**	o**	o	o	o	+
VGH Reginaldirektion, Lüneburg	+	+	+	o	o	+	o	-	-	-	o	o	+
Gebäude BIH, Hannover	+	-	+	o	o	+	-*	+	-	o	o	o	o/-
VW-Bibliothek, Berlin	+	-	o	o	o	+	o	+**	o	o	o	o	+
Accent Office Center, Frankfurt	+	-	o	o	o	+	o	-	-	o	o	o	-

Legende

- | | | | |
|--------|------------------------------------------------------|----|-------------------------------------------------|
| 1) | bis 20 m Tiefe | 2) | 20- 100 m Tiefe |
| * | nur geringer Einfluss | ** | aus Simulation |
| *** | Tideabhängig | | |
| + | Parameter bekannt /geeignet | o | abgeleiteter Parameter, bzw. Ermittlung möglich |
| - | Parameter unbekannt, nicht zu bestimmen / ungeeignet | | |
| „leer“ | Keine Angabe / keine Aussage | | |



6. ENTWICKLUNG VON LABORVERSUCHEN ZUR ERMITTLUNG GEOTHERMISCHER PARAMETER

Neben der Abschätzung der geothermalen Bodenparameter aus Baugrundgutachten sowie unter Berücksichtigung von Literaturwerten, lassen sich diese Werte auch in Laborversuchen bzw. Vorort ermitteln. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens entwickelt das IGB der TU-Braunschweig einen Wärmeleitfähigkeitsversuchsstand sowie einen Kapazitätsversuchsstand, um die geothermischen Parameter für die zu untersuchenden Gebäude bestimmen zu können.

Stand der Technik und Wissenschaft

Ein in der Praxis weit verbreitetes Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes ist der Thermal Response Tests (TRT). Dabei wird einer Erdwärmesonde bzw. einem Energiepfahl über ein zirkulierendes Wärmeträgermedium eine konstante Heizleistung zugeführt. Aus den dabei aufgezeichneten Ein- und Austrittstemperaturverläufen der Sonde kann die integrale Wärmeleitfähigkeit im Testbereich über die gesamte Sondenlänge bestimmt werden. Inhomogener Baugrundaufbau wie Schichtungen, Linsen, GW-Stände und -strömungen wird hierbei jedoch nicht erfasst.

Für detaillierte 3D-Simulationen des Untergrundes ist zusätzlich eine detaillierte Kenntnis der geothermischen Bodenparameter im untersuchten Modellgebiet notwendig. Die Bestimmung dieser Parameter erfolgt üblicherweise im bodenmechanischen Labor anhand von Bodenproben aus unterschiedlichen Tiefen.

6.1. Entwicklung einer Divided-Bar-Apparatur zur Untersuchung von Bodenproben

Um die Untersuchungen an möglichst vielen Bodenproben mit in der Bodenmechanik gängigen Durchmessern durchführen zu können, wird ein Wärmeleitfähigkeitsversuchsstand für Bodenproben konzipiert. Übliche Proben haben einen Durchmesser von bis zu 10 cm und einer Probenhöhe von bis zu 8 cm, siehe Abbildung 1.

Die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Bodenarten lässt sich im thermo-stationären Zustand ermitteln. Dazu wird die Bodenprobe einem eindimensionalen Temperaturfeld ausgesetzt, bis sich in der Versuchszelle eine stationäre Temperaturverteilung einstellt (vgl. Abbildung 2). Während des Versuches werden die Temperaturen über und unter der Probe gemessen (Messingscheiben, T2 und T3). Neben den Temperaturen ist auch die Kenntnis des Wärmestroms in der Probe von Bedeutung. Zwei Referenzproben (Glasscheiben) mit bekannter Wärmeleitfähigkeit werden über und unter der zu bestimmenden Bodenprobe angeordnet. Der Wärmestrom in der unbekanntem Bodenprobe kann ebenfalls über die Temperaturdifferenz in den Referenzproben ermittelt werden.



Abbildung 1: Apparatur zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Bodenproben mit einem max. Durchmesser von 10 cm

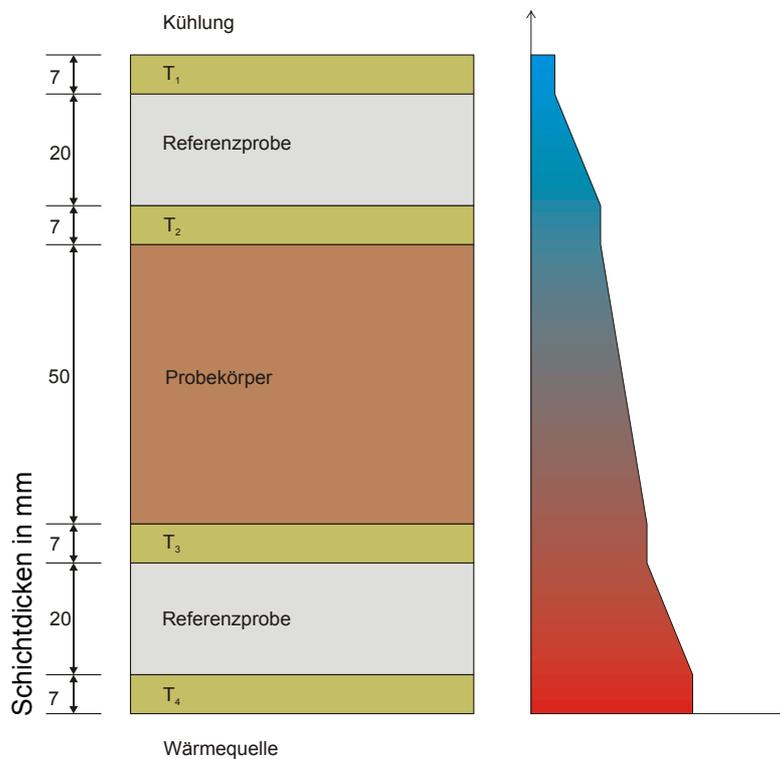


Abbildung 2: Schnitt durch die Versuchsanordnung (links) mit qualitativer Temperaturverteilung über die Höhe (rechts)

Der Temperaturgradient wird bei der beschriebenen Anordnung über eine Heisscheibe (unten) und ein Peltierelement in Verbindung mit einem Kühler (oben) erzeugt. Die Temperaturmessung erfolgt im Zentrum und am Rand der Messingscheiben. Aus den aufgezeichneten Temperaturen bei Temperaturkonstanz kann die Wärmeleitfähigkeit des Bodens über folgende Beziehungen ermittelt werden:

$$\lambda_{Probe} = \frac{\dot{q}_{Probe} \cdot h_{Probe}}{\Delta T_{Probe}}$$

$$\dot{q}_{Probe} = \frac{\dot{q}_{ref,o} + \dot{q}_{ref,u}}{2} \quad \dot{q}_{ref,o} = \lambda_{ref} \frac{\Delta T_{ref,o}}{h_{ref}} \quad \dot{q}_{ref,u} = \lambda_{ref} \frac{\Delta T_{ref,u}}{h_{ref}}$$

mit:

λ_{Probe}	Wärmeleitfähigkeit der Bodenprobe [W/(mK)]
\dot{q}_{Probe}	Wärmestromdichte in der Bodenprobe [W/m ²]
h_{Probe}	Höhe der Bodenprobe [m]
$\Delta T_{Probe} = T_3 - T_2$	Temperaturdifferenz in der Bodenprobe [K]
$\lambda_{ref,o} = \lambda_{ref,u}$	Wärmeleitfähigkeit der Referenz [W/(mK)]
$\dot{q}_{ref,o/u}$	Wärmestromdichte in den Referenzproben [W/m ²]
$h_{ref,o} = h_{ref,u}$	Höhe der Referenzproben [m]
$\Delta T_{ref,o} = T_2 - T_1$	Temperaturdifferenz obere Referenzprobe [K]
$\Delta T_{ref,u} = T_4 - T_3$	Temperaturdifferenz untere Referenzprobe [K]

Da der Versuchsstand mit den o.g. Abmessungen nicht zu vernachlässigenden Wärmeverlusten unterliegt, wird zuvor eine Kalibrierung der Apparatur mit Materialien bekannter Wärmeleitfähigkeit durchgeführt.

6.2. Laborversuch zur Ermittlung des Einflusses des Wassergehaltes im Boden

Im Rahmen der Untersuchung wird der Einfluss des Wassergehaltes von zwei Sanden auf die Wärmeleitfähigkeit ermittelt. Dabei werden ein Feinsand (fS) und ein mittelsandiger Grobsand (gS) untersucht. Die Körnungslinien der beiden Sande sind in Abbildung 3 und Abbildung 4 zu dargestellt.

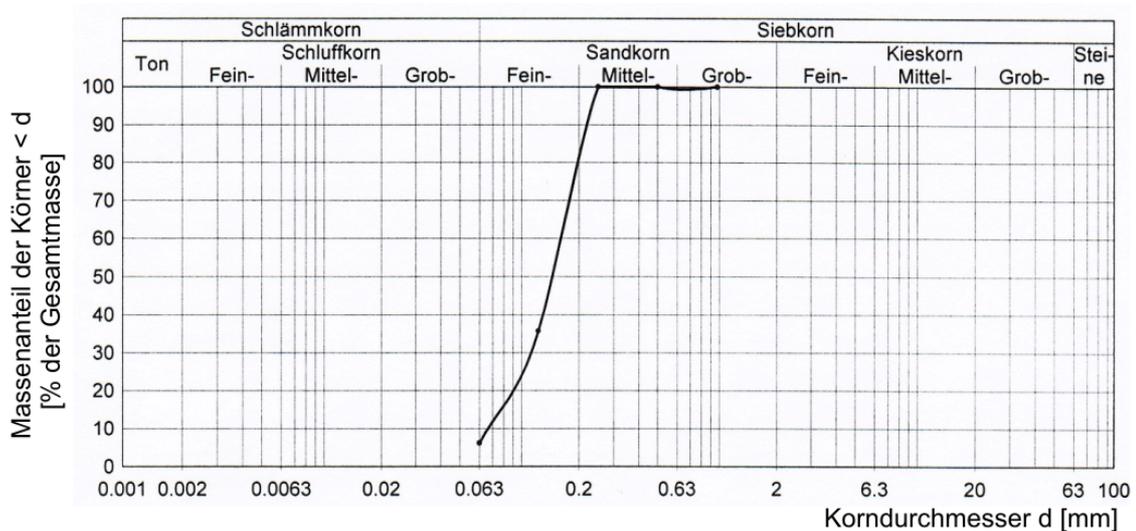


Abbildung 3: Körnungslinie Feinsand

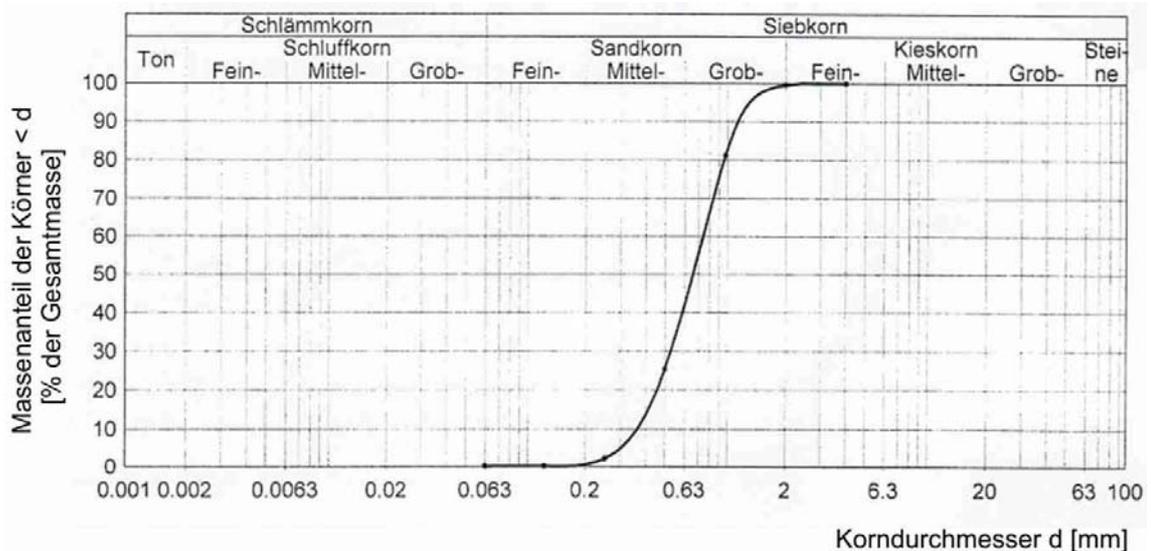


Abbildung 4: Körnungslinie Grobsand

In den Versuchsreihen wird der Wassergehalt von ofentrocken bis vollständig wassergesättigt gesteigert und die Wärmeleitfähigkeit ermittelt. Trägt man die Wärmeleitfähigkeit gegenüber dem Wassergehalt der Probe auf (vgl. Abbildung 5), so ergibt sich eine annähernd lineare Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit steigendem Wassergehalt. Mit steigendem Wassergehalt nimmt die Wärmeleitfähigkeit des Grobsandes gegenüber dem Feinsand proportional stärker zu, was ursächlich mit der deutlich höheren Trockendichte von $1,62 \text{ t/m}^3$ gegenüber $1,40 \text{ t/m}^3$ zusammenhängt.

Demnach sind neben der Kenntnis des Wassergehaltes auch Informationen über die Porenzahl bzw. Trockendichte der zu untersuchenden Bodenprobe von Relevanz. Eine Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit aus Tabellenwerten, ohne eine eingehende Wärmeleitfähigkeitsbestimmung im Labor unter Berücksichtigung der Verhältnisse Vorort, kann daher zu beträchtlichen Fehleinschätzungen führen. Daher ist für eine korrekte Auslegung geothermischer Anlagen die Be-

stimmung der Wärmeleitfähigkeit mit Hilfe von Feldversuchen (z.B. TRT) oder Laborversuchen dringend zu empfehlen.

Wärmeleitfähigkeit für Sande in Abhängigkeit des Wassergehaltes

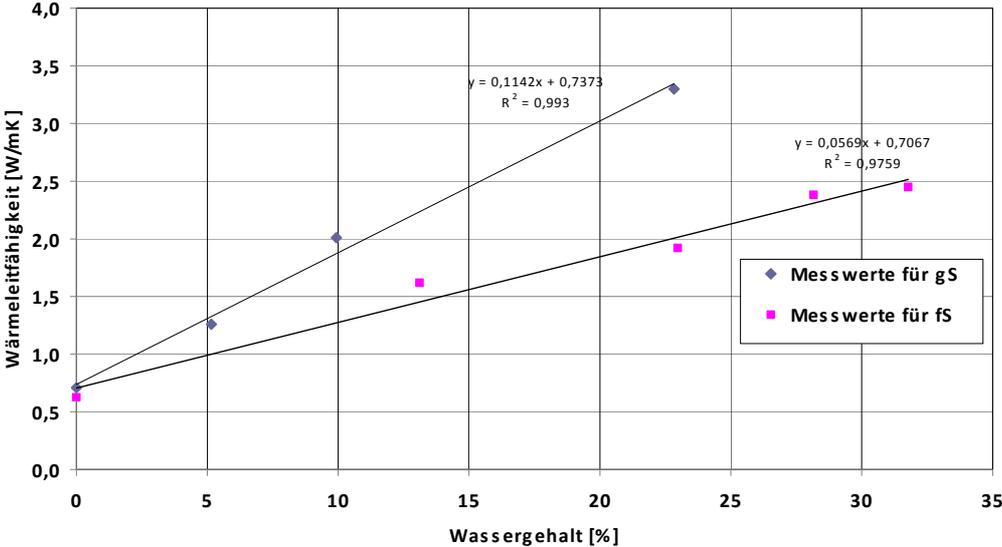


Abbildung 5: Einfluss des Wassergehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit zweier Sande

6.3. Laborversuch zur Ermittlung der Wärmekapazität von Bodenproben

Neben der Wärmeleitfähigkeit wird die Temperatursausbreitung im Untergrund maßgeblich von der Wärmekapazität bestimmt. Die Ermittlung der Wärmekapazität erfolgt in einem modifizierten Mischungskalorimeter. Das Kalorimeter besteht hauptsächlich aus einem Dewargefäß, in dem ein Becherglas zur Probenaufnahme eingelassen ist, siehe Abbildung 6.



Abbildung 6: Versuchsstand zur Ermittlung der Wärmekapazität

Bei der Ermittlung der Wärmekapazität wird eine Flüssigkeit der Masse m_w und der bekannten spezifischen Wärmekapazität c_w bei einer Temperatur T_w sowie die Probe der Masse m_s und der unbekanntes spezifischen Wärmekapazität c_s bei einer Temperatur T_s im Mischungskalorimeter in thermischen Kontakt gebracht. Der Zusammenhang ergibt sich wie folgt:

$$c_s = \frac{(c_w \cdot m_w + C_k) \cdot (T_w - T_m)}{m_s \cdot (T_m - T_s)}$$

c_s Wärmekapazität Bodenmatrix [J/(g K)]

c_w Wärmekapazität Wasser [J/(g K)]

m_w Masse Wasser [g]

C_k Wärmekapazität Kalorimeter [J/K]

T_w Temperatur Wasser [°C]

T_m Mischtemperatur [°C]

m_s Masse Boden [g]

T_s Temperatur Boden [°C]

Nach erfolgtem Temperatúrausgleich wird die Mischungstemperatur T_m gemessen und über die spezifische Wärmekapazität der Probe bestimmt. Dabei ist C_k [J/K] die Wärmekapazität des Kalorimeters die über die Mischung zweier Wassermassen unterschiedlicher Temperatur bestimmt werden kann:

$$C_k = \frac{c_w \cdot m_{w2} \cdot (T_{wm} - T_{w2})}{(T_{w1} - T_{wm})} - c_w \cdot m_{w1}$$

c_w Wärmekapazität Wasser [J/(g K)]

m_{w2} Masse Wasser warm [g]

T_{w2} Temperatur Wasser warm [°C]

m_{w1} Masse Wasser kalt [g]

T_{w1} Temperatur Wasser kalt [°C]

T_{wm} Mischtemperatur [°C]

Über die Beziehung

$$c_{p,ges} = \sum \theta_i \cdot c_{p,i} \text{ mit}$$

θ_i Massenanteile der einzelnen Phasen [-]

$c_{p,i}$ spezifische Wärmekapazität der einzelnen Phasen [J/(g K)]

lassen sich die Wärmekapazitäten für beliebige Wassergehalte bestimmen.

Für die beiden untersuchten Sande (siehe Kapitel 6.2) konnten mittels des Kalorimeters spezifische Wärmekapazitäten von 0,92 J/(g·K) (gS) und 1,07 J/(g·K) (fS) ermittelt werden. Die Werte beziehen sich dabei auf ofentrockene Sande.

Die ermittelten Werte sind in den Tabelle 17 und Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 17: Messergebnisse für gS - Mischungskalorimeter

Versuch	m_1 [g]	T_1 [°C]	m_s [g]	T_s [°C]	T_m [°C]	c_w [$\frac{J}{g \cdot K}$]	C_k [$\frac{J}{K}$]	c_s [$\frac{J}{g \cdot K}$]
1	276,17	51,7	67,21	21,6	50,3	4,182	56,87	0,88
2	316,87	45,8	69,73	22,1	44,7	4,182	56,87	0,96
3	329,41	51,8	94,51	22,3	50,1	4,182	56,87	0,93
Mittelwert:								0,92

Tabelle 18: Messergebnisse für fS - Mischungskalorimeter

Versuch	m_1 [g]	T_1 [°C]	m_s [g]	T_s [°C]	T_m [°C]	c_w [$\frac{J}{g \cdot K}$]	C_k [$\frac{J}{K}$]	c_s [$\frac{J}{g \cdot K}$]
1	234,78	51,9	31,71	23,7	51,0	4,182	56,87	1,08
2	319,09	60,9	56,29	23,5	59,4	4,182	56,87	1,03
3	396,42	61,6	67,45	23,3	60,0	4,182	56,87	1,11
Mittelwert:								1,07

Eine Abschätzung der Wärmekapazität aus Tabellenwerten, ohne eine eingehende Bestimmung im Labor unter Berücksichtigung der Verhältnisse Vorort, kann daher ebenfalls zu Fehleinschätzungen führen. Daher ist für eine korrekte Auslegung geothermischer Anlagen die Bestimmung der Wärmekapazität mit Hilfe von Laborversuchen zu empfehlen.



7. DETAILLIERTE UNTERSUCHUNG DES FLÄCHENABSORBERS DER VW-BIBLIOTHEK IN BERLIN

In Phase II des Forschungsvorhabens werden einzelne Erdwärmesysteme hinsichtlich der energetischen Effizienz näher untersucht.

Aufgrund von aktuellen Problemen beim Betrieb des saisonalen Speichers der VW-Bibliothek in Berlin, konzentriert sich die Phase II auf die numerische Simulation der Erdreichtemperaturen unter dem Gebäude (Projekt 10). Nachfolgend, siehe 7.1, werden die Kriterien für die Auswahl der VW-Bibliothek als Simulationsobjekt aufgeführt.

Des Weiteren werden in diesem Kapitel folgende Unterlagen dokumentiert:

- Gebäudekenndaten und Erdreichparameter
- Monitoringergebnisse der Betriebsjahre 2005 bis 2008
- Kalibriertes numerisches Simulationsmodell für den Bodenabsorber
- Simulationsergebnisse der Parameterstudie
- Prognoseberechnungen für die Temperaturentwicklung im Erdreich

7.1. Kriterien zur Auswahl des Objektes

Die Auswahl der entsprechenden Erdwärmesysteme für die detaillierte Untersuchung orientiert sich zum einen an Fragestellungen im Zusammenhang mit der Betriebserlaubnis und den Folgen von sich ergebenden Änderungen aus dem laufenden Betrieb. Zum anderen muss die Voraussetzung für eine numerische Modellierung durch Vollständigkeit aller notwendigen Parameter gegeben sein.

Das Gebäude der VW-Bibliothek in Berlin kommt aus folgenden Gründen zur detaillierten Untersuchung der Wärmetransportvorgänge im Untergrund in Betracht:

1. Aufgrund einer unplanmäßigen Erwärmung des Erdreichs in der ersten Betriebsphase kann der Bodenabsorber für den freien Kühlbetrieb seit 2006 nicht mehr genutzt werden. Um die Kühllasten aus dem Gebäude abführen zu können, wird eine Kältemaschine nachgerüstet.
2. In der Literaturanalyse wird die grundsätzliche Eignung zur saisonalen Energiespeicherung festgestellt, so dass die Ursache für die sich verringerende Kühlleistung detaillierter untersucht werden sollte.
3. Der Betrieb der Anlage erfolgt unter Auflagen der unteren Wasserbehörde. Unter anderem ist eine ausgeglichene Wärmebilanz im Untergrund sowie die Einhaltung von Grenzwerten der Grundwassertemperaturen nachzuweisen. Dazu sind im Vorfeld fünf Temperaturmessstellen mit jeweils neun Messgebern im Untergrund installiert worden. Während der ersten Betriebsjahre der Anlage werden gegenüber den prognostizierten Temperaturen im Untergrund deutlich höhere Werte gemessen, siehe Abbildung 11 und Abbildung 12.
4. Aufgrund der Vollständigkeit der in Abschnitt 5.10 dargestellten Parameter lässt sich eine numerische Finite-Elemente-Berechnung zur Ermittlung der Temperaturverteilung im

Untergrund auf Basis der gemessenen Temperaturprofile kalibrieren und die zukünftige Entwicklung der Erdreichtemperaturen prognostizieren.

5. Flächenabsorber als saisonale Speicher wurden bisher nur vereinzelt umgesetzt, so dass für den Betrieb dieser Anlagen nur wenige Erfahrungswerte existieren. Das untersuchte Erdwärmesystem ist daher prototypisch und für eine detaillierte Untersuchung wissenschaftlich relevant.
6. Die in der Planungsphase angesetzten Parameter weichen teilweise deutlich von den Literaturwerten ab. So wird die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds mit $1,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ angesetzt und liegt damit am unteren Rand des in der Literatur angegebenen Spektrums für einen wassergesättigten Sand ($1,7$ bis $5,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Die Wärmekapazität liegt mit $0,2 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ deutlich unter einem für Sandboden realistischem Wert ($2,2$ bis $2,9 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$).

7.2. Bauwerk und Baugrund

Bei dem betrachteten Standort handelt es sich um eine innerstädtische Lage. Das Gebäude ist voll unterkellert und hat fünf Obergeschosse.

Das im Untergeschoss untergebrachte Magazin weist eine nahezu doppelte Geschossfläche wie ein Obergeschoss auf. Neben den Buchbeständen befinden sich dort auch Technikzentralen, eine Werkstatt und Magazine mit Sondernutzung.

Zentrale Rolle bei der Energieversorgung der Bibliothek spielt der 8.100 m^2 große Bodenabsorber, der das Erdreich unter dem Gebäude als thermischen Speicher erschließt. Der Aufbau des Absorbers ist in Abbildung 7 dargestellt. Über dem anstehenden Erdreich wird zunächst eine Sauberkeitsschicht hergestellt, in der die Absorberleitungen verlegt werden. Darüber befindet sich eine Wärmedämmung, um das Absorbersystem gegenüber dem Bauwerk thermisch zu entkoppeln. Das eigentliche Gründungselement ist eine Stahlbetonbodenplatte mit Verbundestrich, siehe auch Teil I Kapitel 4.2.10.

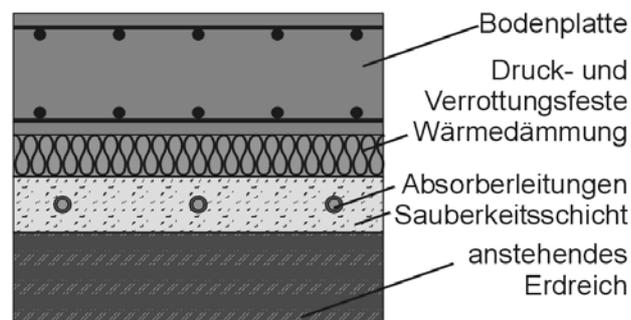


Abbildung 7: Aufbau des Fundamentabsorbers (gemäß dem angefertigten Bauteilkatalog)

Der Baugrund besteht aus mitteldicht gelagerten Sanden mit annähernd homogenen geothermischen Bodenparametern. Die angesetzten Bodenparameter sind

Tabelle 19 zu entnehmen. Hierbei handelt es sich um Daten, die aus den Baugrundgutachten ermittelt bzw. abgeleitet werden, siehe Kapitel 5.10. Die Werte werden dann im Rahmen der Modellerstellung variiert, um eine optimale Anpassung von Simulationsmodell und Messergebnisse zu erreichen.

Tabelle 19: Bodenparameter im Untersuchungsgebiet

Wärmeleitfähigkeit Gestein	2,3	W/(m K)
Wärmekapazität Gestein	2,7	MJ/(m ³ K)
Dichte Gestein	1.800	kg/m ³
Porosität Gestein	0,24	-

Grundwasser steht ca. 3,5 m unter GOK an. Die Grundwasserbewegungen werden aufgrund eines sehr geringen hydraulischen Gefälles im Bereich des Gebäudes mit 12 m/a angenommen.

Die Einbausituation der fünf Temperaturmessstellen zur Überprüfung der Erdreichtemperaturen mit jeweils neun Messgebern ist in den Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt.

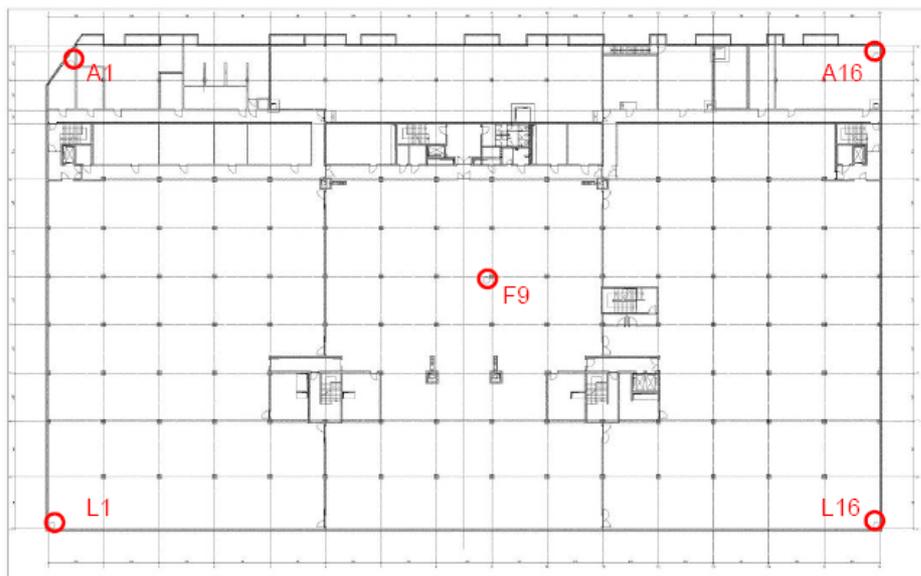


Abbildung 8: Lageplan des Kellergeschoss mit Lage der Temperaturmessstellen

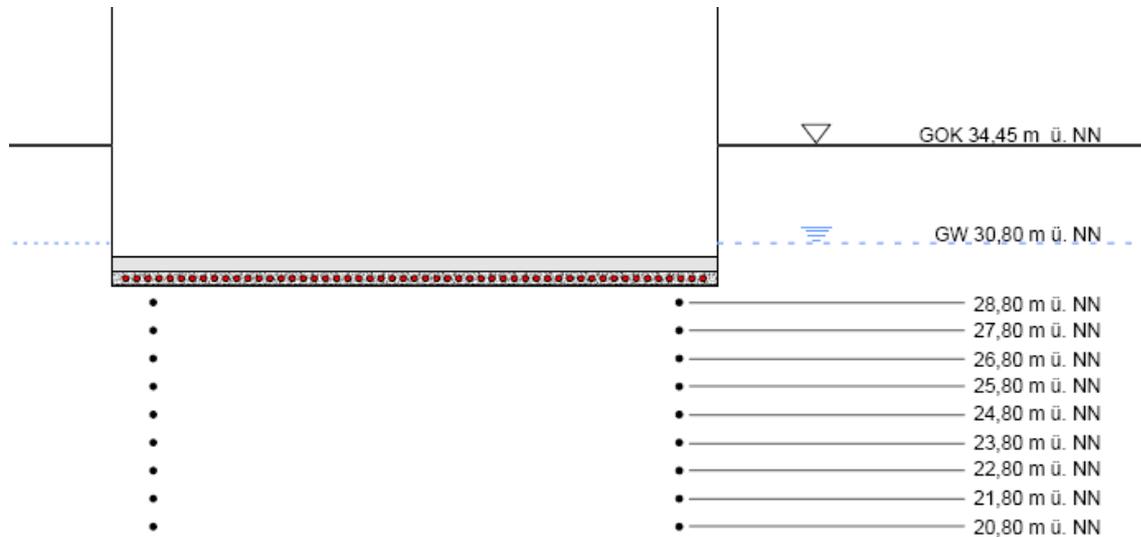


Abbildung 9: Lage der Temperaturmessstellen unter dem Gebäude

Die detaillierte Erfassung und Entwicklung der Erdreichtemperaturen ist Teil der Genehmigungsaufgaben für den Betrieb des Bodenabsorbers als saisonaler Speicher. Die einzuhaltenen minimalen bzw. maximalen Erdreichtemperaturen aus der Betriebserlaubnis sind in Tabelle 20 angegeben.

Tabelle 20: Grenzwerte der Bodentemperatur aus der Betriebserlaubnis der unteren Wasserbehörde, Berlin

Tiefe	minimale Temperatur	maximale Temperatur
Bereich Sauberkeitsschicht	4°C	15°C
2,0 m unter der Sauberkeitsschicht	5°C	12°C

Abbildung 10 zeigt, unter Berücksichtigung der Wärmeausbreitung, die in der Planungsphase prognostizierten mittleren Erdreichtemperaturen unterhalb des Wärmespeichers. Dabei werden die Grenzwerte nach Tabelle 20 eingehalten.

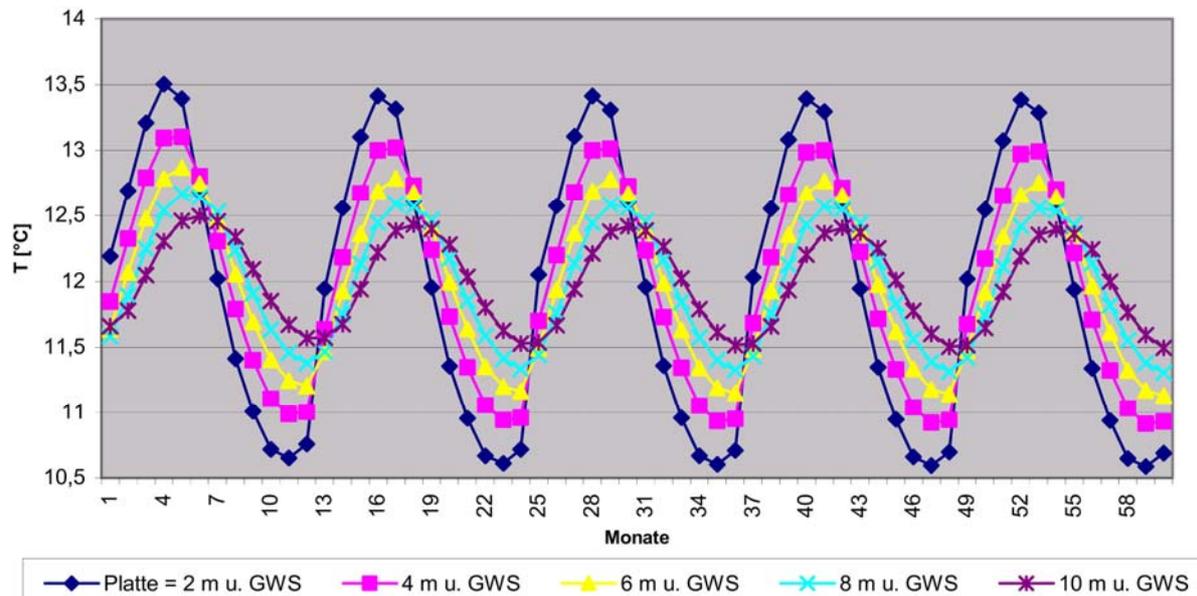


Abbildung 10: Prognostizierte mittlere Erdreichtemperaturen unterhalb des Wärmespeichers gemäß „Ergebnisbericht zur Berechnung von Wärmeausbreitung“

7.3. Monitoringergebnisse

In Abbildung 11: sind die Monitoringergebnisse der Betriebsjahre 2005 bis 2008 abgebildet. Neben dem monatlichen Wärmeeintrag bzw. –entzug sind auch die mittlere monatliche Außenlufttemperatur und die mittlere monatliche Bodentemperatur unter der Sohlplatte dargestellt.

Durch eine fehlerhafte Anlagensteuerung wird der Absorber unter der Bodenplatte seit betriebsbeginn im Jahr 2004 zunächst kaum zur Gebäudeheizung und nur zur Kühlung herangezogen. Der einseitige Wärmeeintrag hat eine deutliche Erhöhung der Temperaturen im Erdreich zur Folge.

Im Sommer 2005 (Kühlperiode) beträgt der Wärmeeintrag in das Erdreich 176 MWh, der Wärmezug in der darauf folgenden Heizperiode 2005/2006 demgegenüber nur 42 MWh. Dies führt zu einer weiteren Erwärmung des ohnehin schon warmen Erdreichs. Das zu hohe Temperaturniveau im Erdreich hat zur Folge, dass die freie Kühlung über den Bodenabsorber im Sommer 2006 nur kurzzeitig und im Sommer 2007 gar nicht in Betrieb genommen wird. Der Wärmeeintrag reduziert sich 2006 auf 41 MWh und wird 2007 völlig unterbunden. Eine deutliche Steigerung des Wärmeentzugs auf 131 MWh (2006/2007) bzw. 123 MWh (2007/2008) wird durch Umstellungen in der Regelung sowie Optimierungsmaßnahmen erreicht. Die mittlere Erdreichtemperatur unter dem Bodenabsorber kann durch den gesteigerten Wärmeentzug gegenüber 2005 und 2006 abgesenkt werden.

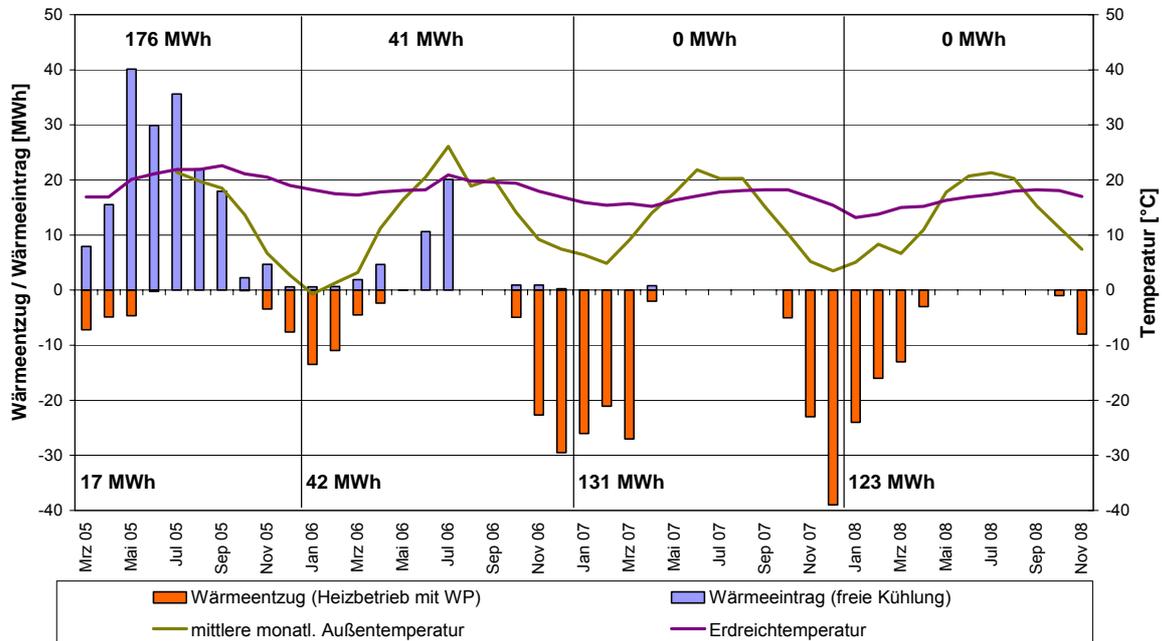


Abbildung 11: Wärmeeintrag und -entzug des Bodenabsorbers sowie mittlere monatliche Außentemperatur und Erdreichtemperatur, März 2005 bis November 2008

Abbildung 12 stellt exemplarisch den zeitlichen Verlauf der Erdreichtemperaturen an der Messstelle F9 von Juni 2005 bis Dezember 2008 dar. Während der Sommermonate 2005 ist die mittlere Erdreichtemperatur in 1 m Tiefe unter dem Gebäude bis auf knapp über 22 °C angestiegen. Um das Erdreich nicht noch weiter zu erwärmen, wird der Bodenabsorber daraufhin im Zeitraum vom 28.09. bis 20.10.2005 außer Betrieb genommen. In der Heizperiode 2005/2006 ist eine deutliche Temperaturabnahme erkennbar. Aufgrund des schnellen Anstiegs der mittleren Bodentemperatur in 1 m Tiefe unter dem Gebäude auf bis zu 20 °C wird der Bodenabsorber am 17. Juli 2006 wieder außer Betrieb genommen. Durch die Maßnahme konnte die mittleren Erdreichtemperaturen in 1 bzw. 2 m unter dem Gebäude auf einem Niveau 2 K unter den Werten des Vorjahres gehalten werden.

Mit Beginn des Wärmeentzugs im November 2006 nehmen auch die Temperaturen im Untergrund weiter ab. Aufgrund der im Vergleich zum Vorjahr geringeren Ausgangstemperaturen und einem Wärmeentzug, der um das Dreifache über dem Wärmeeintrag aus dem Sommer 2006 liegt, kann das Erdreich bis zum März 2007 unter das Vorjahresniveau abgekühlt werden.

Da im Sommer 2007 über den Bodenabsorber keine Wärme in das Erdreich eingetragen wird, muss die Temperaturerhöhung im Zeitraum von April bis September 2007 auf einen Wärmeeintrag aus der Umgebung zurückzuführen sein. Die Maximalwerte der mittleren Temperaturen in 1 und 2 m Tiefe unter dem Gebäude liegen im Sommer 2007 im Mittel etwa 3 K unter den Werten des Vorjahres. Erstmals wird im ersten Quartal 2007 an den oberflächennahen Messstellen eine niedrigere Temperatur als an den tiefer liegenden Sensoren gemessen.

Der Wärmeentzug im Winter 2007/2008 bewirkt eine Abkühlung des Untergrundes auf Werte unter Vorjahresniveau. Die Temperaturabnahme des Erdreiches setzt sich in allen Tiefenlagen fort. Je nach Tiefenlage ist die Temperaturabnahme unterschiedlich stark ausgeprägt.

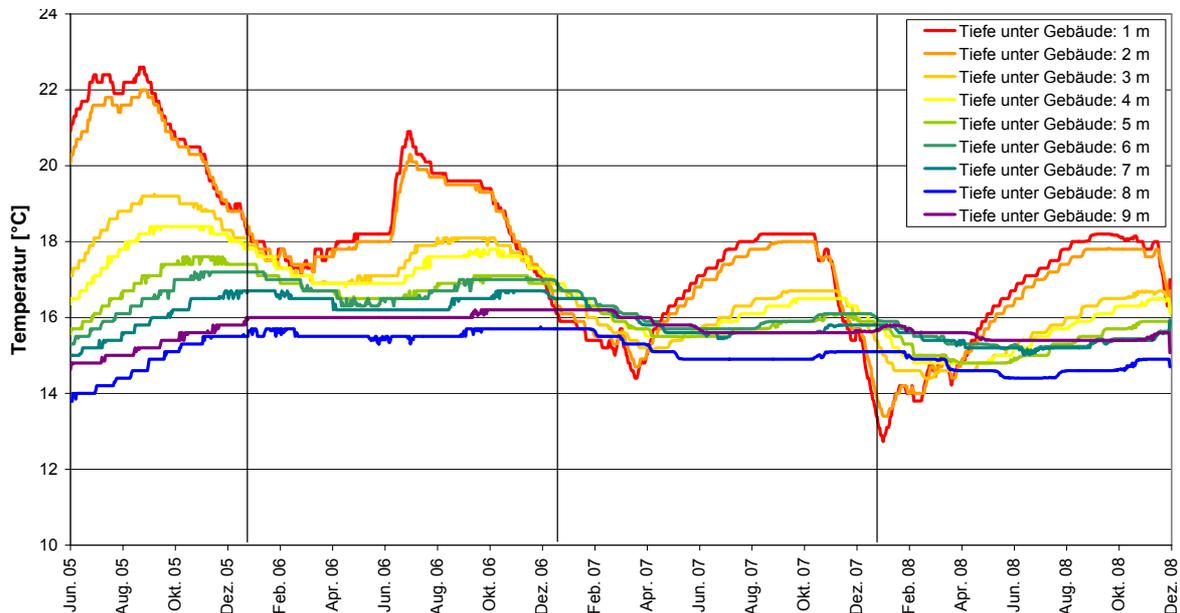


Abbildung 12: Gemessene Erdreichtemperaturen der Messstelle F9, Juni 2005 bis Dezember 2008

In Abbildung 13 bis Abbildung 17 werden für die fünf unter dem Gebäude vorhandenen Messstellen (A1, A16, F9, L1, L16) gemittelte Temperaturprofile über die Tiefe von 1 bis 9 m unter der Bodenplatte abgebildet. Im Messzeitraum werden die Daten von Juli 2004 bis Dezember 2008 erfasst. Dabei ist in einer Tiefe von 9 m unter der Bodenplatte eine Temperaturerhöhung von 13,5°C auf 15°C festzustellen. Eine unausgeglichene Temperaturverteilung im Untergrund ist an den rechtsschiefen Profilen erkennbar. In den Jahren 2006 bis 2008 nähern sich die Verläufe langsam saisonal ausgeglichenen Tiefenprofilen an. Dabei schwankt die Temperatur direkt unter dem Bodenabsorber zwischen 14,5°C in den Wintermonaten und 18 °C in den Sommermonaten

Im Sommerhalbjahr 2008 ist trotz ausgesetztem anlagentechnischen Wärmeeintrag in den Untergrund, ein deutlicher Anstieg der Erdreichtemperaturen zu erkennen. Die Ursache hierfür sind Ausgleichsvorgänge zwischen den oberen und unteren Bereichen des thermisch aktivierten Untergrundes. Der Anstieg bis auf das Vorjahresniveau wird aber durch einen anderen Umstand hervorgerufen. Um die Ursache für diesen Temperaturanstieg nachzuweisen, wird im Rahmen des Forschungsprojektes am IGB der TU-Braunschweig ein numerisches Modell des Fundamentabsorbers entwickelt.

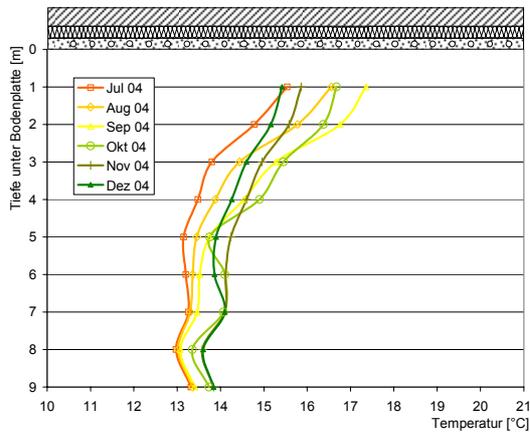


Abbildung 13: Gemittelt monatliches Tiefenprofil der Temperatur des Jahres 2004 aller Messstellen

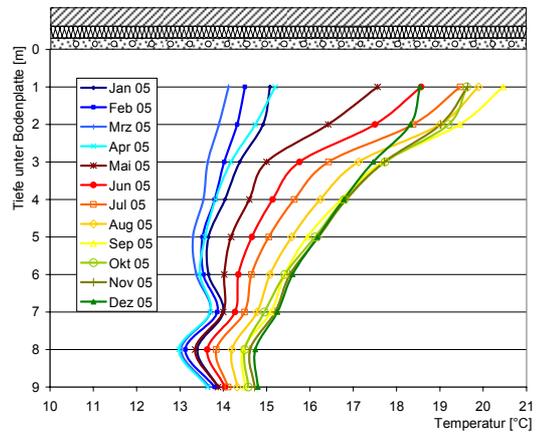


Abbildung 14: Gemittelt monatliches Tiefenprofil der Temperatur des Jahres 2005 aller Messstellen

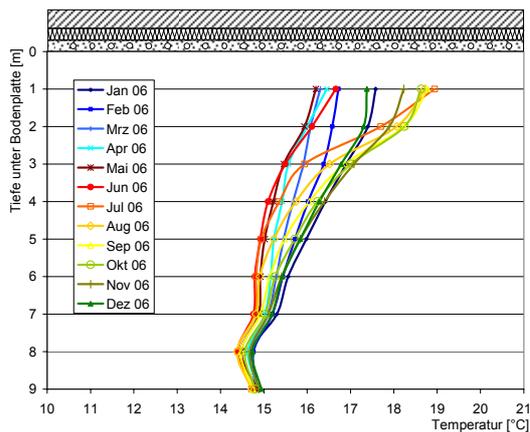


Abbildung 15: Gemittelt monatliches Tiefenprofil der Temperatur des Jahres 2006 aller Messstellen

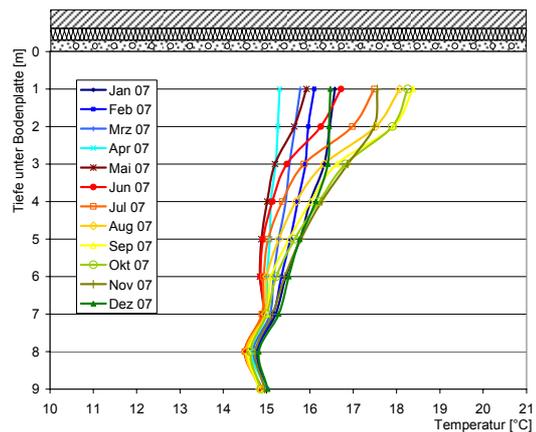


Abbildung 16: Gemittelt monatliches Tiefenprofil der Temperatur des Jahres 2007 aller Messstellen

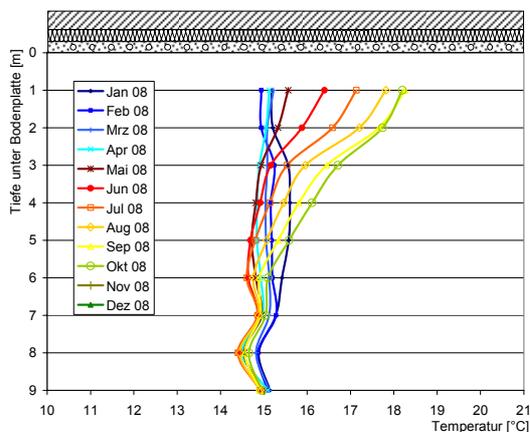


Abbildung 17: Gemittelt monatliches Tiefenprofil der Temperatur des Jahres 2008 aller Messstellen

Zum Vergleich der den gemessenen Tiefenprofile der VW Bibliothek aus dem Zeitraum 2004 bis 2008 (Abbildung 13 bis Abbildung 17) ist in Abbildung 18 ein beispielhaftes Tiefenprofil mit ausgeglichener Jahresbilanz dargestellt.

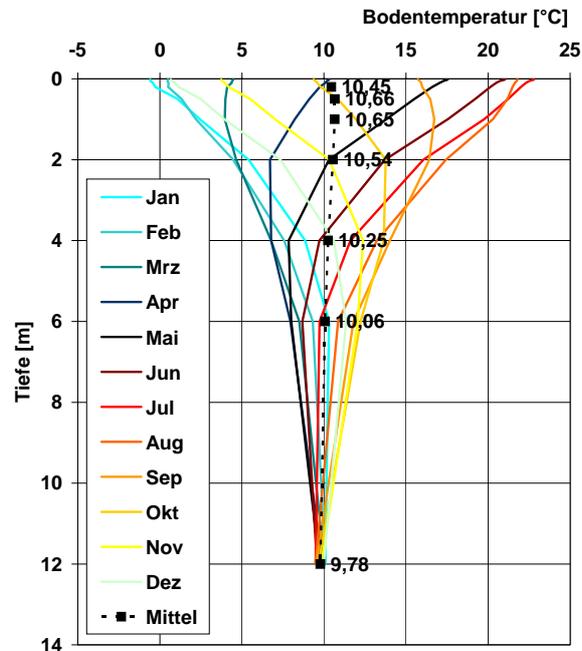


Abbildung 18: Beispiel für einen saisonalen Temperaturverlauf im Erdreich bei einer ausgeglichenen Wärmebilanz

7.4. Numerische Simulation

7.4.1. Geometrisches Modell

Für die numerischen Berechnungen zur Abbildung des thermischen Verhaltens der oberflächennahen Gründungsbereiche wird das Programm ANSYS [01] verwendet. ANSYS (Kurzform für ANalysis SYstem) ist ein Finite-Elemente-Programm, welches von Dr. John Swanson 1970 entwickelt wurde. Das Programm ANSYS dient zur Lösung von linearen und nichtlinearen Problemen aus den Bereichen Strukturmechanik, Fluidmechanik, Thermodynamik, etc. sowie von kombinierten Aufgabenstellungen (Multiphysik). Es besitzt eine Vielzahl von Elementtypen für 1-, 2-, und 3-dimensionale Aufgaben.

In dem hier verwendeten dreidimensionalen numerischen Modell werden der Untergrund und das Kellergeschoss des Bauwerkes abgebildet. Zur Reduzierung des Rechenaufwands wird auf eine Modellierung des übrigen Gebäudes verzichtet. Der Aufbau der Bodenplatte wird entsprechend Abbildung 7 schichtweise modelliert, um die Parameter der einzelnen Komponenten variieren zu können. Die Energieaustauschfläche des Erdwärmesystems wird als eine flächig gleichmäßig verteilte äquivalente Wärmequelle in der Absorberschicht abgebildet. Die Modellabmessungen betragen 300 m in der Länge und 200 m in der Breite. In der Tiefe wird das Modell auf 30 m unter dem Gebäude beschränkt. Einen Ausschnitt des numerischen 3D-FE-Modells zeigt Abbildung 19.

Im Bereich des Grundwassers wird ein kontinuierlicher Strom in Richtung der Längsseite des Modells angesetzt. Der Grundwasserfluss wird hierbei über ein numerisches Ersatzmodell abgebildet [03].

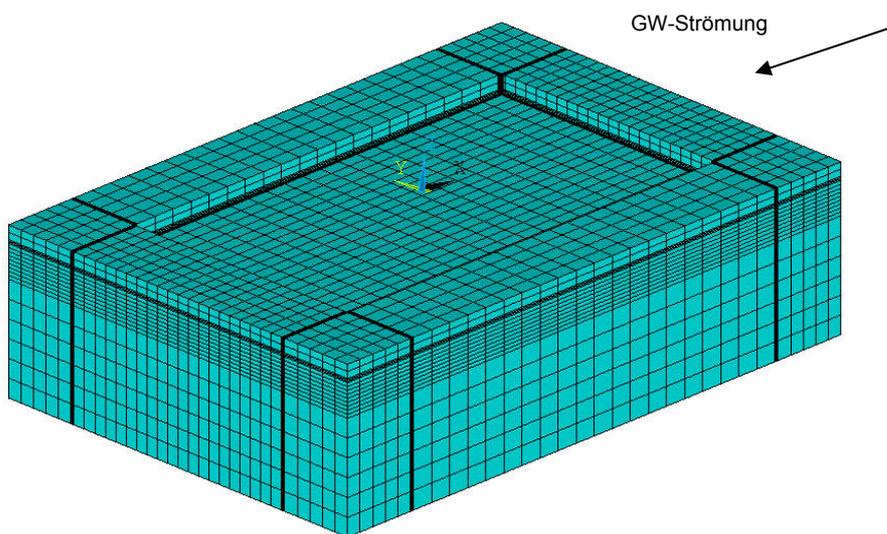


Abbildung 19: Ausschnitt des numerischen Modells zur Abbildung des thermischen Verhaltens des Untergrund, VW Bibliothek Berlin (Untergrund im Nahfeld des Gebäudes)

7.4.2. Thermische Randbedingungen

An den Längsrändern des Modells und der Abstromseite (linker Modellrand) werden keine thermodynamischen Randbedingungen gewählt. An der Anstromseite (rechter Modellrand) werden die Temperaturverteilungen entsprechend der jahreszeitlichen Temperaturprofile dynamisch angesetzt. Für den unteren Modellrand ist eine konstante Temperatur von 12,5°C entsprechend der lokalen Temperaturverhältnisse festgesetzt.

Der obere Modellrand wird in zwei Bereiche differenziert. Neben dem Gebäude wird die gemessene Außenlufttemperatur mit entsprechenden Übergangsbedingungen angesetzt. Unter dem Gebäude nimmt die Raumlufttemperatur im Keller über die Oberfläche des Kellerbodens und der Kellerwände Einfluss auf die Gründung. Da die Kellertemperatur nur temporär gemessen wird, ist der Verlauf für 2005 und 2008 aus den vorhandenen Messwerten extrapoliert worden. Der zeitliche Verlauf der Lufttemperatur, der Kellertemperatur sowie der Absorberleistung sind Abbildung 20 zu entnehmen. Der Wärmeeintrag bzw. -entzug des Absorbers wird über die oben beschriebenen Wärmequellen realisiert.

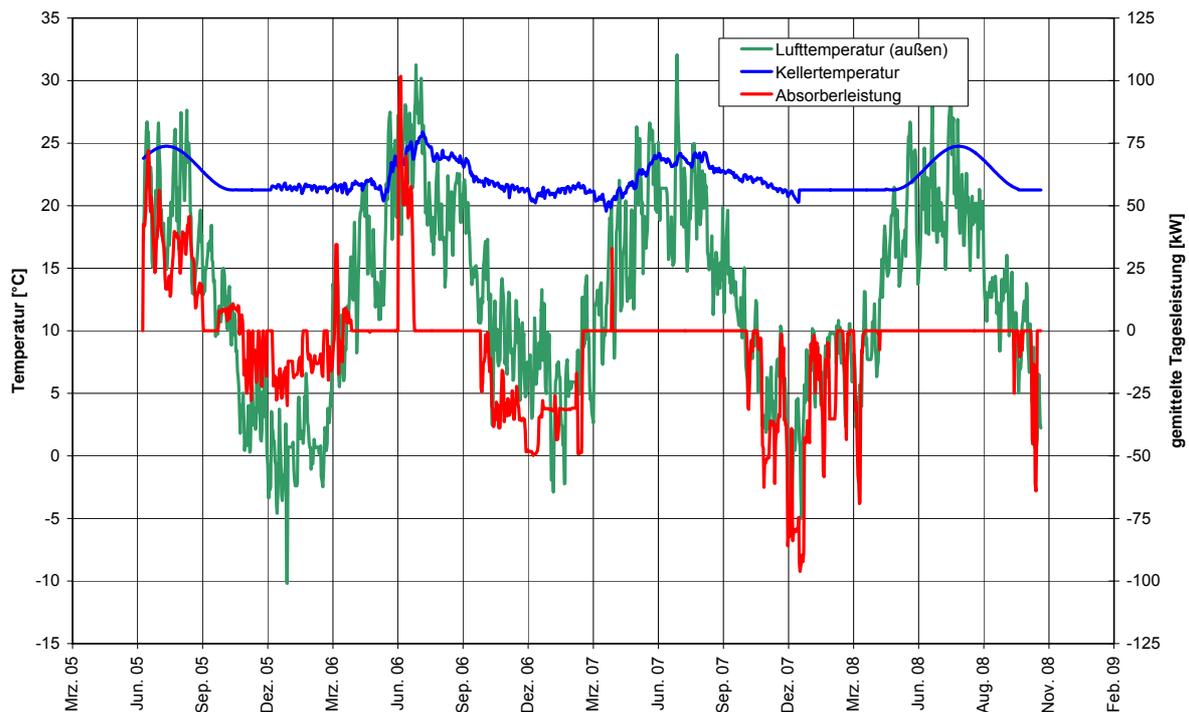


Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf der äußeren thermodynamischen Lasten, gemessen und extrapoliert, Juni 2005 bis November 2008

Da die numerische Berechnung aufgrund der Datenbasis erst im Juni 2005 startet, werden dem Modell als Startbedingung die aus der Messung bekannten Untergrundtemperaturen zugewiesen. Die folgende transiente Berechnung der Untergrundtemperaturen erfolgt auf Basis eines impliziten Lösungsalgorithmus. Dabei wird eine dem numerischem Residuum entsprechende variable Zeitschrittsteuerung eingesetzt. Die Ergebnisse werden alle 24 Stunden abgespeichert, um eine realitätsnahe zeitliche Abbildung zu erhalten.

Zunächst wird mit den in Abbildung 20 dargestellten Zeitverläufen der äußeren Belastung eine Kalibrierung des Modells anhand der Monitoringergebnisse der Erdreichtemperatur durchgeführt. Variiert werden dabei Zeitschrittgröße, Modellabmessungen sowie Materialparameter des Untergrunds und der Fundamentplatte.

7.5. Berechnungsergebnisse und deren Qualität

Im Folgenden werden die Berechnungsergebnisse des numerischen 3D-FE-Modells vorgestellt. Die dargestellten Ergebnisse entsprechen den optimierten Berechnungsergebnissen nach Validierung und Kalibrierung des Modells an den Monitoringergebnissen. Für die angegebenen Modellparameter und Randbedingungen sind die berechneten Temperaturverläufe der Messstelle F9, sowie die Temperatur direkt unter dem Absorber in Abbildung 21 dargestellt.

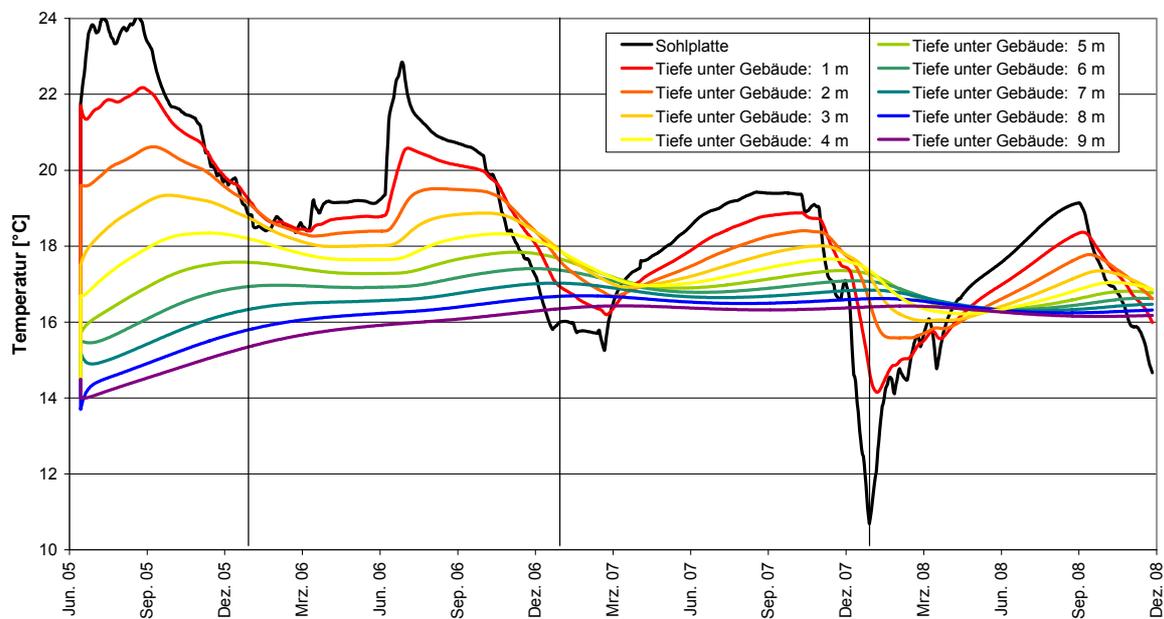


Abbildung 21: Berechnete Erdreichtemperaturen an der Messstelle F9, Juni 2005 bis Dezember 2008

Zur Prüfung der berechneten Temperaturverläufe werden die Differenzen zu den entsprechenden Messpunkten der Bodenschichten an der Messstelle F9 ermittelt. Die Ergebnisse der Temperaturdifferenzen zwischen Messwerten und berechneten Werten sind in Abbildung 22 dargestellt. Nach einer kurzen Einschwingzeit (Juni 2005) lässt sich eine weitgehende Übereinstimmung der berechneten Temperaturverläufe mit den gemessenen Ergebnissen erzielen.

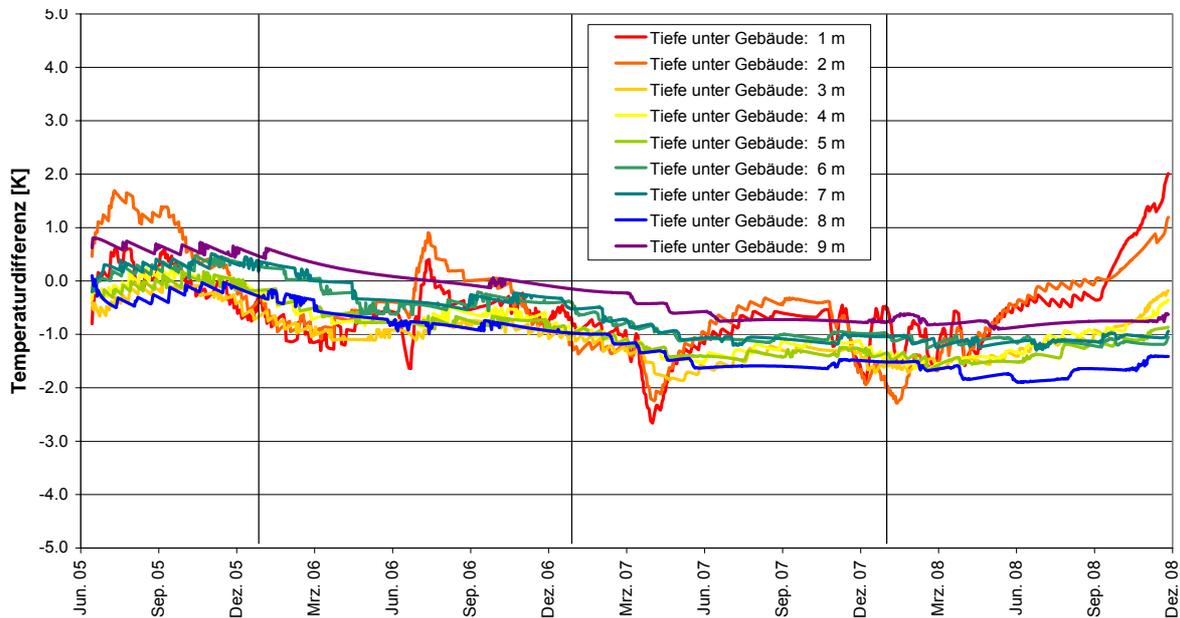


Abbildung 22: Differenz zwischen gemessenen und berechneten Erdreichtemperaturen an der Messstelle F9, Juni 2005 bis Dezember 2008

Als Kriterium für die Qualität der dabei erreichten Anpassung dienen neben einer optischen Kontrolle das arithmetische Mittel (μ) sowie die empirische Standardabweichung (s) der Temperaturdifferenz aus den Zeitreihen der gemessenen und berechneten Untergrundtemperaturen. Dies wird sowohl für einzelne Tiefenlagen k als auch für den Mittelwert aller Tiefenlagen m untersucht.

$$\mu_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta \vartheta_i$$

$$s_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta \vartheta_i - \mu_k)^2}$$

$$\mu_m = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{n=9} \mu_k$$

$$s_m = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{n=9} s_k$$

- mit: $\Delta \vartheta$ Temperaturdifferenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur
 n Anzahl der Datenpunkte
 k Tiefenlage
 m Mittelwert aller Tiefenlagen

Es ergeben sich folgende Werte für das arithmetische Mittel sowie für die Standardabweichung:

$$\mu_m = -0,73 \text{ K} \quad s_m = 0,57 \text{ K}$$

Das entspricht einer um 0,7 K höheren mittleren Temperatur im numerischen Modell bei einer durchschnittlichen Abweichung vom Mittelwert von 0,6 K.

7.6. Ursache für den erhöhten Wärmeeintrag in das Erdreich

Die Ursache für den erhöhten Wärmeeintrag in das Erdreich in den Sommermonaten wird im Folgenden genauer untersucht.

Werden die in vertikaler Richtung ausgetauschten Wärmeströme unter der Sohlplatte betrachtet, so wird eine Ursache für den Temperaturanstieg in den Sommerhalbjahren 2007 und 2008 erkennbar. Ein Wärmeeintrag über den Bodenabsorber ist seit 2006 unterbunden. Dem Wärmeeintrag im Winterhalbjahr steht trotzdem ein deutlicher Wärmeeintrag im Sommer gegenüber, siehe Abbildung 23. Dieser wird vor allem durch die Wärmeleitung über Kellerwände und Kellerbodenplatte verursacht. Temperaturen deutlich über 20°C in den Kellerräumen werden vor allem durch interne Wärmelasten, z.B. künstliche Beleuchtung oder Abwärme der Technikzentralen hervorgerufen. Solange die Kellertemperatur über der oberflächennahen Erdreichtemperatur liegt, wird primär über Wärmeleitung Energie in den Untergrund eingetragen.

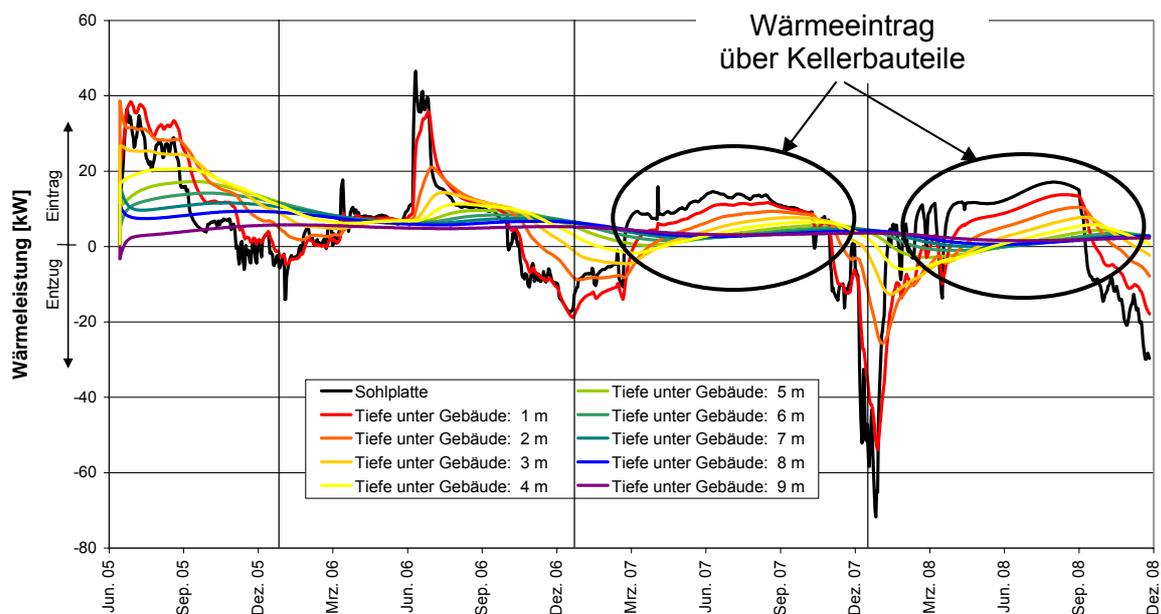


Abbildung 23: Resultierende Wärmeleistung (Absorber und temperierter Keller) an der Messstelle F9 (Gesamtwärmeleistung), Juni 2005 bis Dezember 2008

Mit Hilfe der aufgeführten Gleichung lässt sich der Zusammenhang des Wärmestroms über die Fundamentplatte (q_{platte}) vereinfachend formulieren.

$$q_{platte} = \frac{\Delta \vartheta}{\lambda \cdot d}$$

mit: $\Delta \vartheta$ Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite der Fundamentplatte

λ mittlere Wärmeleitfähigkeit der Platte

d Dicke der Fundamentplatte

Die eingebaute Dämmung zwischen Bodenplatte und Bodenabsorber führt zu einer thermischen Entkopplung und reduziert den Wärmeaustausch zwischen Kellergeschoss und Untergrund. Die Ursache für den Wärmeeintrag (Temperaturdifferenz zwischen Keller und Erdreich) bleibt jedoch bestehen und ändert sich mit dem zeitlichen Verlauf.

Wird das Integral der resultierenden Wärmeleistung, die eingeleitete Wärmemenge, über den Berechnungszeitraum ermittelt, siehe Abbildung 24, so wird die Ursache der Temperaturerhöhung im Untergrund an der insgesamt steigenden Wärme deutlich. Am flacher werdenden Verlauf ist die allmählich ausgeglichene Bilanz im oberen Bereich des Speichers zu erkennen. Diese stellt sich jedoch im oberen Bereich des Untergrundes erst im Jahre 2008 ein. Für die tiefer liegenden Bereiche ist dieser Vorgang noch nicht abgeschlossen. Dies ist ebenfalls an der leichten Rechtschiefe der Temperaturprofile im Jahr 2008 zu erkennen (vgl. Abbildung 17).

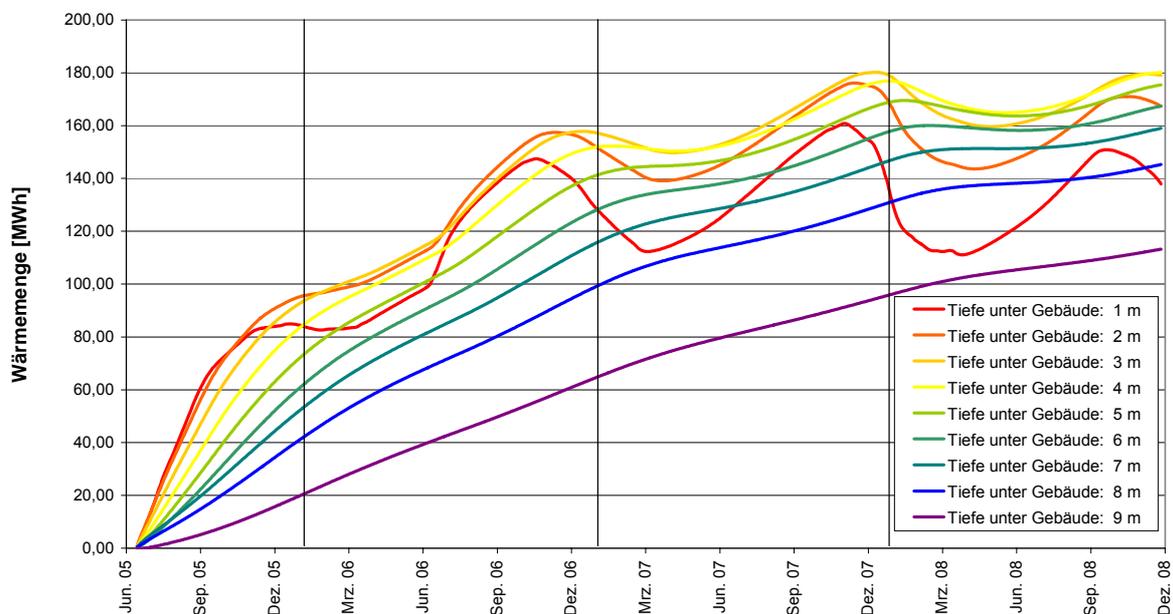


Abbildung 24: Resultierende Wärmemenge, extrapoliert aus Messstelle F9, Juni 2005 bis Dezember 2008

7.7. Parameterstudie zur Verbesserung der saisonalen Speicherung

Aufgrund der dargestellten Simulationsergebnisse ergeben sich zwei Varianten, das Erdreich so weit abzukühlen, dass das System wieder als saisonaler Speicher betrieben werden kann:

1. Absenkung der Kellertemperatur
2. Verbesserung der Dämmung zwischen Keller und Erdreich

Zur Bewertung der beiden Maßnahmen werden auf Grundlage der numerischen Berechnungen (vgl. Abbildung 21) Variationsberechnungen durchgeführt. In Abbildung 25 ist die Entwicklung der Untergrundtemperatur in der Tiefenlage 1m unter der Sohlplatte bei verringerter Kellertemperatur dargestellt. Neben der ursprünglichen Temperaturentwicklung (rote Linie, vgl. auch Abbildung 21) sind auch die Temperaturverläufe für verminderte Kellertemperaturen (1, 2, 3, und 4 K unter dem in Abbildung 20 dargestellten Niveau) dargestellt. Gegenüber den ursprünglichen Berechnungen lässt sich die Untergrundtemperatur durch eine dauerhafte Absenkung der Kellertemperatur reduzieren.

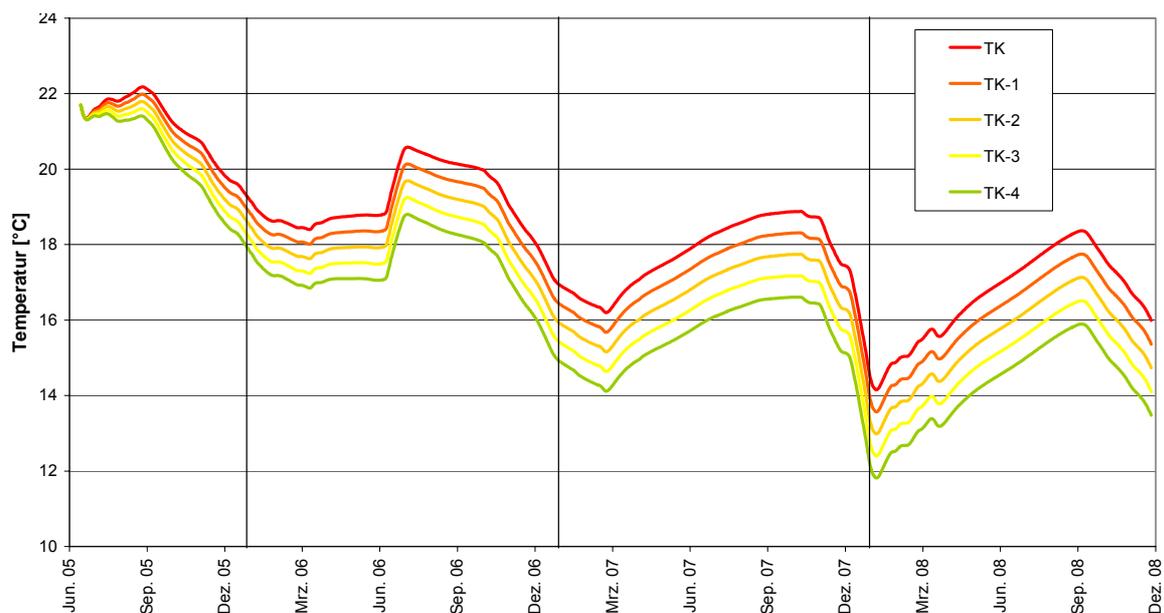


Abbildung 25: Temperaturverläufe 1m unter der Sohlplatte bei Absenkung der Kellertemperaturen um jeweils 1 Kelvin

In Abbildung 26 sind die Temperaturverläufe 1 m unter der Sohlplatte unter Berücksichtigung einer verbesserten Sohlplattendämmung dargestellt. Als Maß für die Dämmung zwischen Kellerraum und Untergrund dient der Wärmedurchgangskoeffizient λ_d . Für $\lambda_d = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ entspricht die Dämmung dem in Abbildung 7 dargestellten Sohlplattenaufbau (rote Linie). Daneben sind die Temperaturverläufe für bis zu 10-fach verbesserte Dämmeigenschaften dargestellt. Die Dämmung der Sohlplatte führt erst ab einer um den Faktor 10 verbesserten Dämmung zu einer signifikanten Temperaturreduzierung im Erdreich. Die Absenkung der Kellertemperatur führt dagegen lässt sich proportional an das Erdreich übertragen.

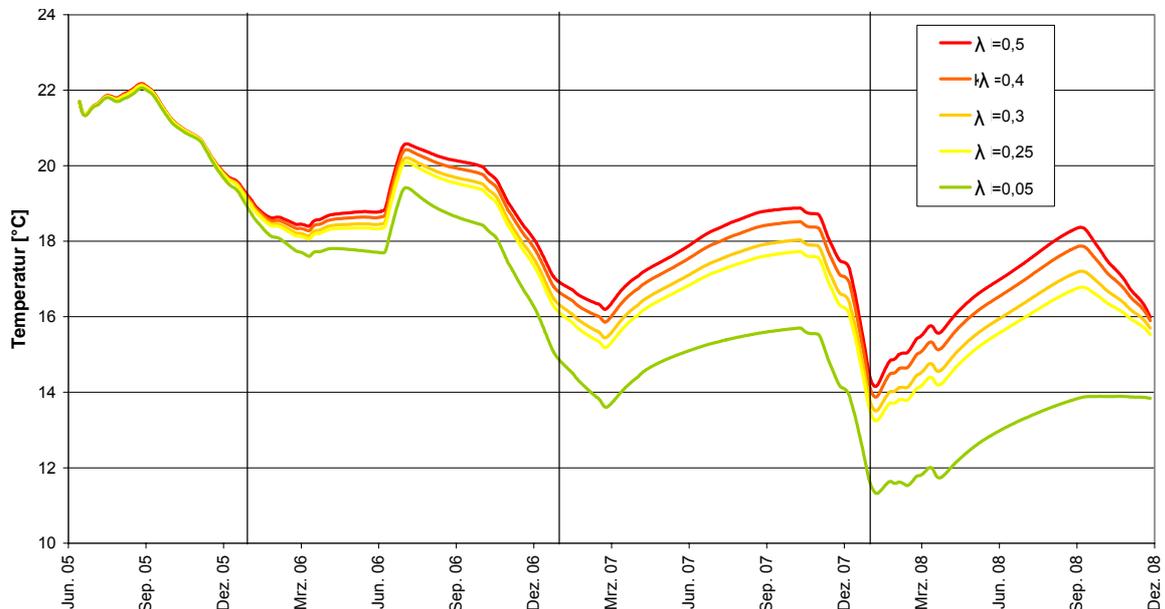


Abbildung 26: Temperaturverläufe 1m unter der Sohlplatte bei Variation der Dämmung der Sohlplatte

7.8. Prognoseberechnungen

Nach erfolgreicher Kalibrierung des Berechnungsmodells an den gemessenen Erdreichtemperaturen wird die Ursache – Wärmeabgabe über das Kellergeschoss - für die großen Abweichungen in der Temperaturverteilung im Untergrund aufgezeigt. Um Aussagen über den zukünftigen Betrieb der Anlage geben zu können, wird eine Prognose der Erdreichtemperaturen erstellt.

In den ersten drei Jahren (Juli 2005 bis Dezember 2008) liegen der gemessene Wärmeeintrag und -entzug sowie die gemessenen Außenluft-, Erdreich- und Raumtemperaturen zugrunde. Für die Folgejahre werden zunächst die Umgebungstemperaturen und die Kellertemperaturen bis 2013 extrapoliert. Somit wird ab dem vierten Jahr der Simulation (Januar 2009 bis Dezember 2013) von den in Tabelle 21 aufgeführten Betriebsstrategien sowie den in Abbildung 27 dargestellten Raum- und Außenlufttemperaturen ausgegangen.

Hinsichtlich der Entzugsleistung für die Folgejahre wird zwischen einer in der Planungsphase festgesetzten Entzugsleistung (Gutachten UDM) und einer tatsächlichen mittleren Entzugsleistung, die in den Jahren 2007 und 2008 gemessenen wird, unterschieden. Die angesetzten Leistungen sind in Abbildung 28 als Zeitreihen abgebildet.

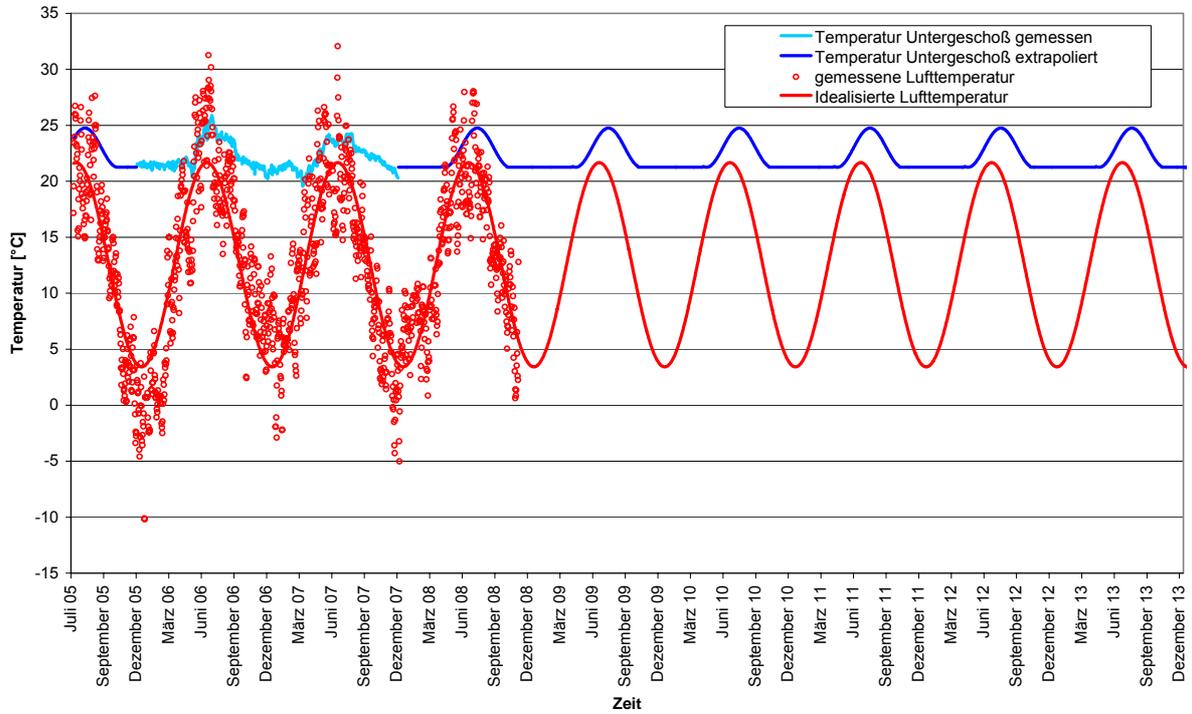


Abbildung 27: Zeitreihen der gemessenen und extrapolierten Umgebungs- und Kellertemperaturen, Juni 2005 bis Dezember 2013

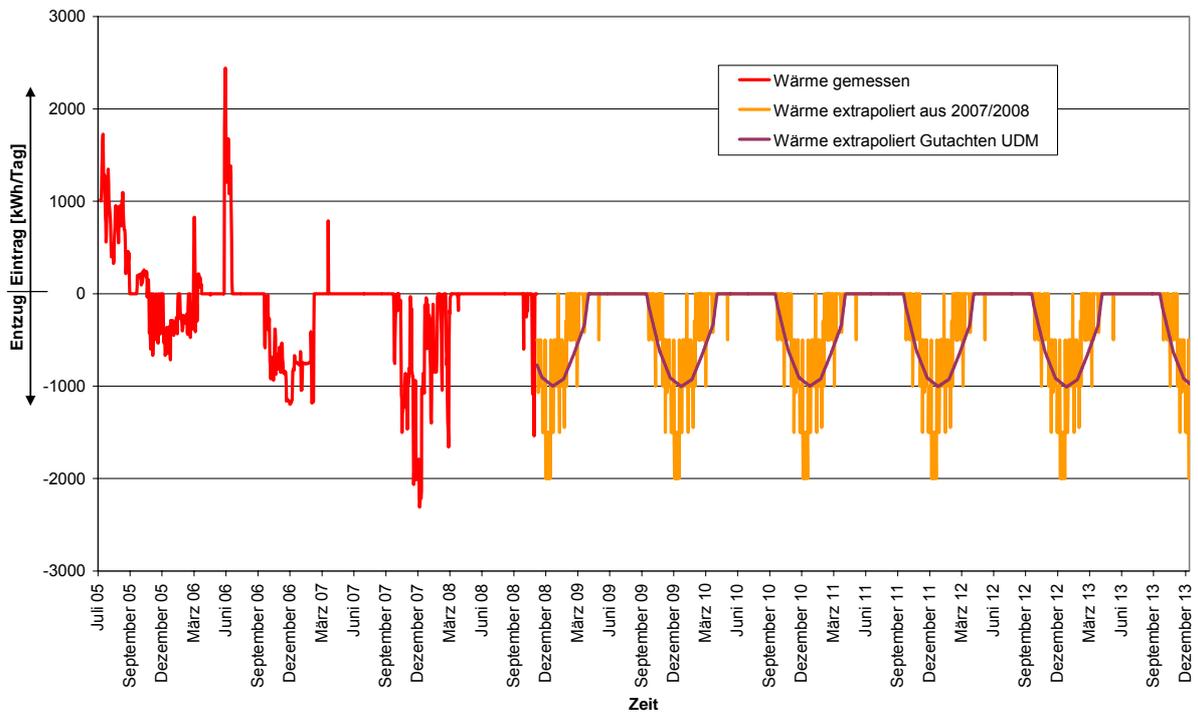


Abbildung 28: Zeitreihen der Extrapolierten Entzugsleistungen

In einer Prognose-Simulation wird für die Folgejahre nur ein Wärmeentzug aus dem Erdreich angenommen, um die Regenerationszeit des Erdreichs zu ermitteln. Es wird überprüft ab welchem Zeitpunkt der geplante freie Kühlbetrieb wieder realisiert werden kann bzw. die wasserbehördliche Erlaubnis wieder eingehalten wird. Die Varianten sind mit den Zahlen 1 bis 6 gekennzeichnet. Unterschiede lassen sich wie folgt dokumentieren:

Variante 1 bis 3: In den Varianten 1 bis 3 findet kein Wärmeeintrag ins Erdreich statt, der Wärmetzug richtet sich nach den Vorgaben von UDM. Einziger Unterschied der Varianten ist die Variation der Raumtemperatur im Untergeschoss. In Variante 1 werden die in 2005 bis 2008 gemessenen Raumtemperaturen angenommen. Variante 2 bezieht sich auf die gemessenen Werte abzüglich 2 K und Variante 3 geht von einer konstanten Raumtemperatur von 18 °C aus.

Variante 4 bis 6: In den Varianten 4 bis 6 findet ebenfalls kein Wärmeeintrag ins Erdreich statt, der Wärmetzug richtet sich hier nach den Messwerten der Heizperiode 2007/2008. Analog zu den vorherigen Varianten wird die Raumtemperatur im Untergeschoss verändert. In Variante 4 werden die in 2005 bis 2008 gemessenen Raumtemperaturen angenommen. Variante 5 bezieht sich auf die gemessenen Werte abzüglich 2K und Variante 6 geht von einer konstanten Raumtemperatur von 18 °C aus.

Tabelle 21: Matrix der untersuchten Prognosevarianten

	Kellertemperatur unverändert	Kellertemperatur um 2 K reduziert	Kellertemperatur auf 18°C festgesetzt
Entzug extrapoliert aus Planung (UDM-Gutachten)	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Entzug extrapoliert als Mittelwert von 2007/2008	Variante 4	Variante 5	Variante 6

Sowohl für die Varianten 1 bis 3 als auch für die Varianten 4 bis 6 sinken die Untergrundtemperaturen mit Reduzierung der Kellertemperatur. Die Verläufe unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Entzugsleistung. Die Größenordnungen sind dabei vergleichbar, siehe Abbildung 29 bis Abbildung 34.

Berechnete Erdreichtemperaturen

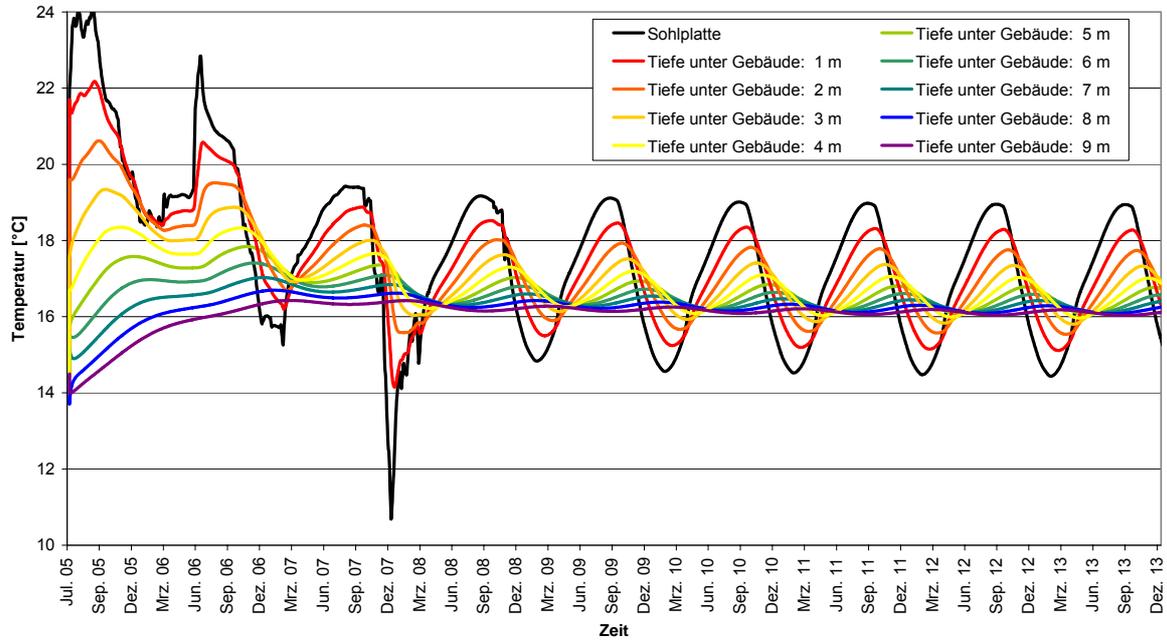


Abbildung 29: Variante 1 der extrapolierten Untergrundtemperaturen

Berechnete Erdreichtemperaturen

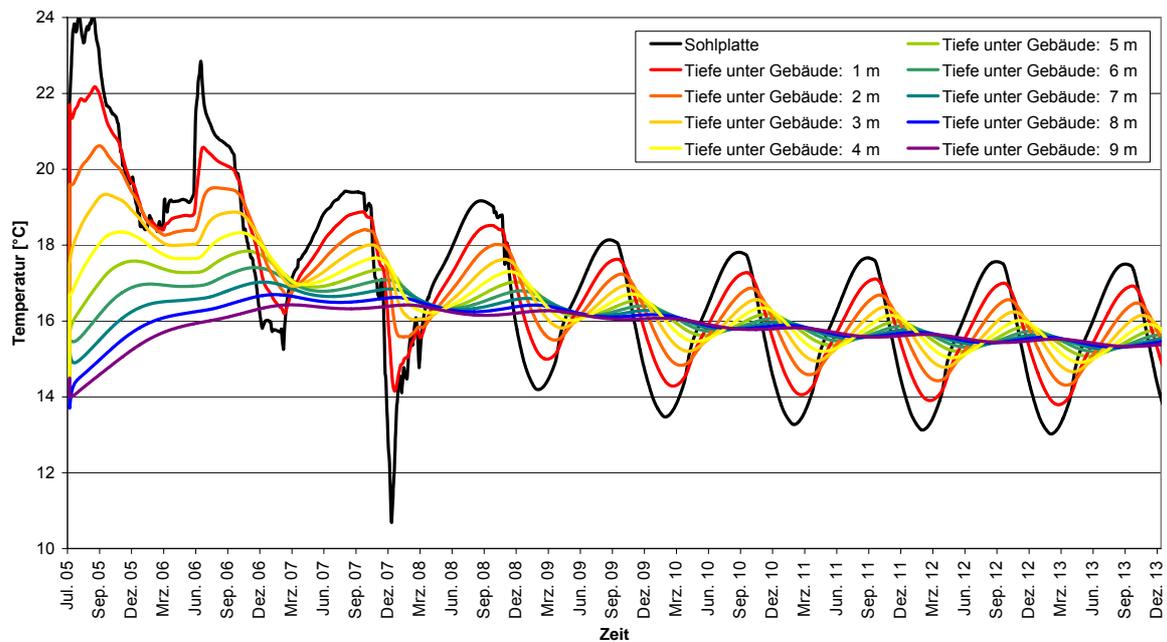


Abbildung 30: Variante 2 der extrapolierten Untergrundtemperaturen

Berechnete Erdreichtemperaturen

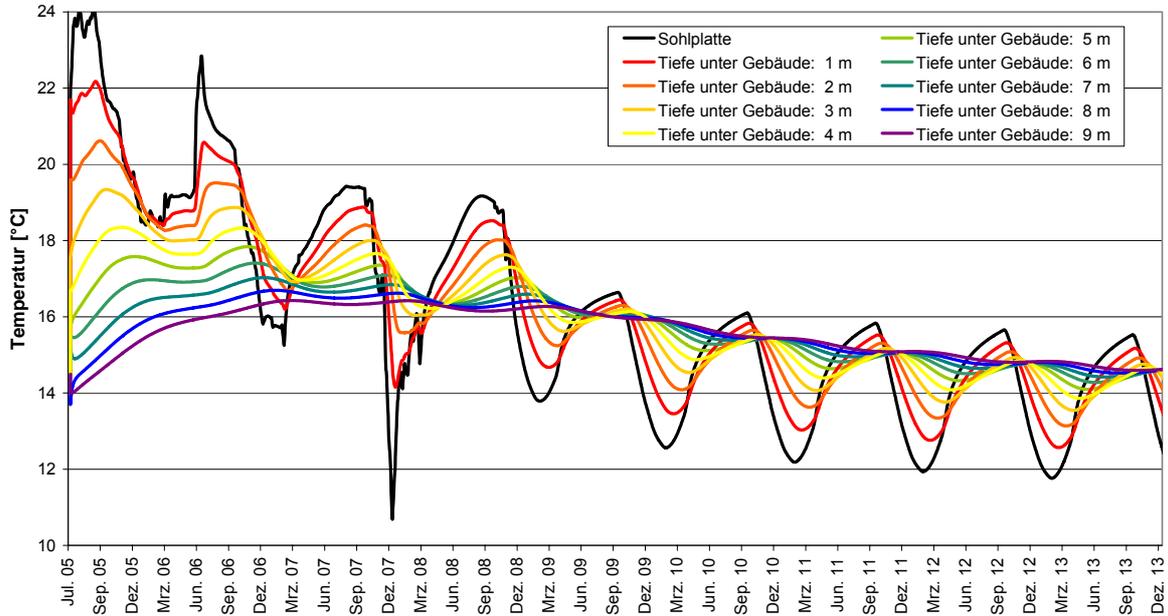


Abbildung 31: Variante 3 der extrapolierten Untergrundtemperaturen

Berechnete Erdreichtemperaturen

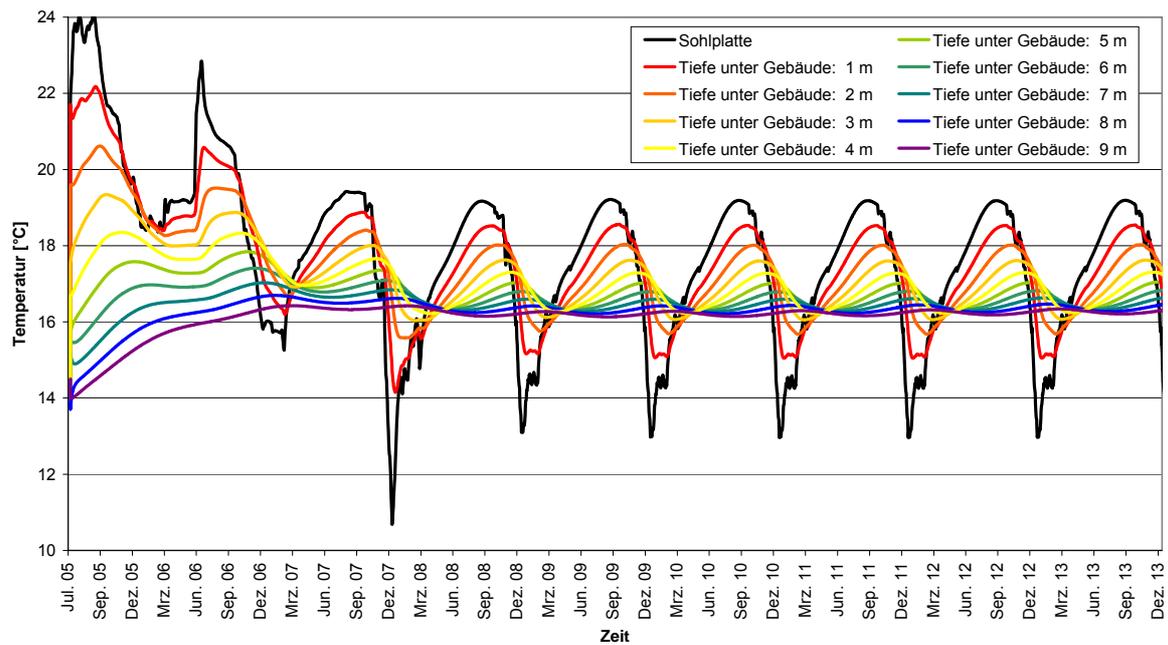


Abbildung 32: Variante 4 der extrapolierten Untergrundtemperaturen

Berechnete Erdreichtemperaturen

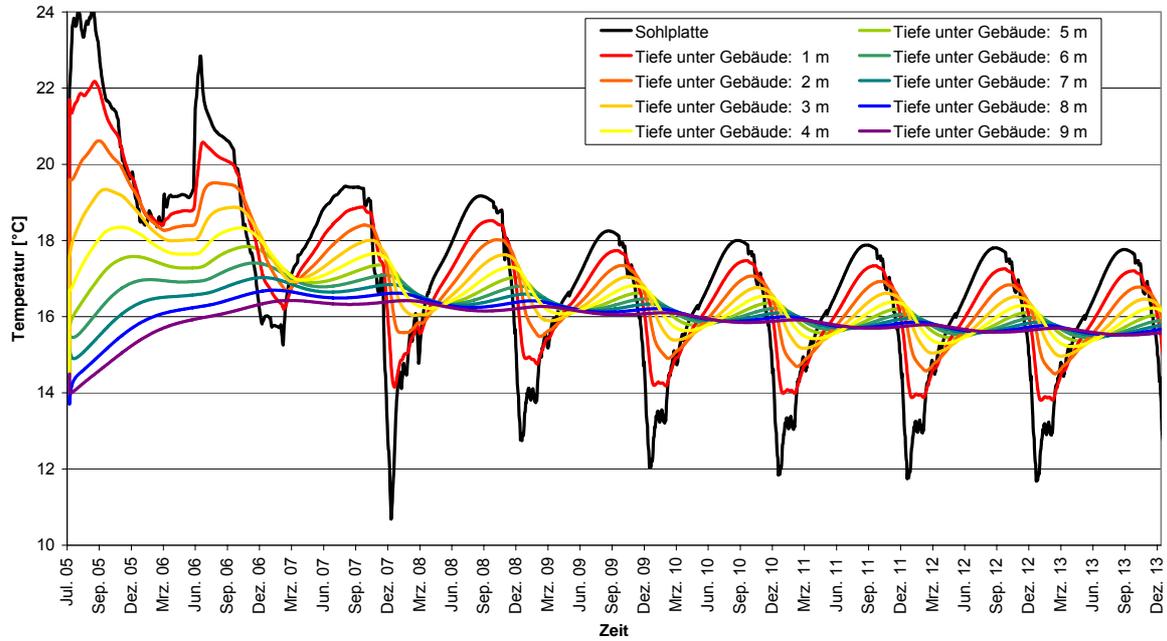


Abbildung 33: Variante 5 der extrapolierten Untergrundtemperaturen

Berechnete Erdreichtemperaturen

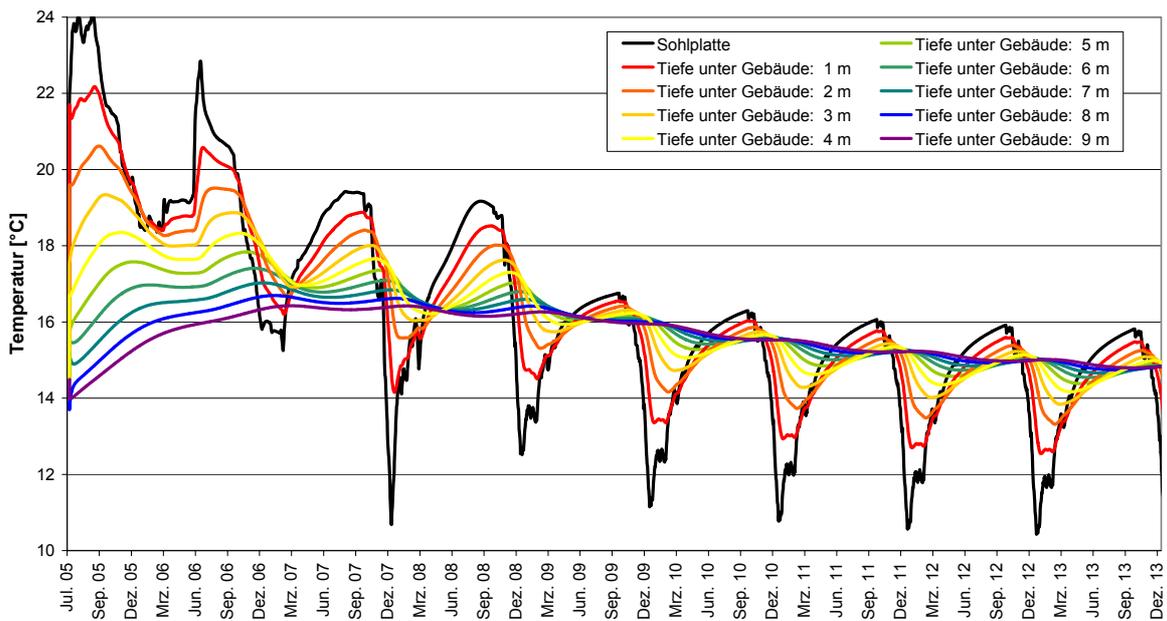


Abbildung 34: Variante 6 der extrapolierten Untergrundtemperaturen

Auf Grundlage von Variante 6 wird eine weitere Prognose bis zum Jahr 2017 erstellt. Dabei weist die Simulation ab 2014 ein fast ausgeglichenes Verhältnis zwischen Eintrag und Entzug auf, siehe Tabelle 22. Der reguläre Betrieb des Speichers mit Wärmeeintrag und Wärmeentzug in den Jahren 2014 bis 2017 führt dabei zu einem erneuten deutlichem Anstieg der Untergrundtemperatur aufgrund der oben beschriebenen Randbedingungen (Umgebungstemperatur Keller; Dämmung zum Erdreich), siehe Abbildung 35. Am Ende des Jahres 2017 erreichen die Temperaturen im unteren Bereich des Speichers bereits wieder die Größenordnung von 2010.

Tabelle 22: Angaben zu Prognosevariante 7

	Kellertemperatur auf 18°C festgesetzt
Wärmeeintrag bis Sommer 2014 = 0 MWh/a Wärmeentzug bis Frühjahr 2014 = 110,0 MWh/a gemäß Messungen Wärmeeintrag ab Sommer 2014 = 133,8 MWh/a gemäß UDM Wärmeentzug ab Herbst 2014 = 110,0 MWh/a gemäß Messungen	7

Berechnete Erdreichtemperaturen

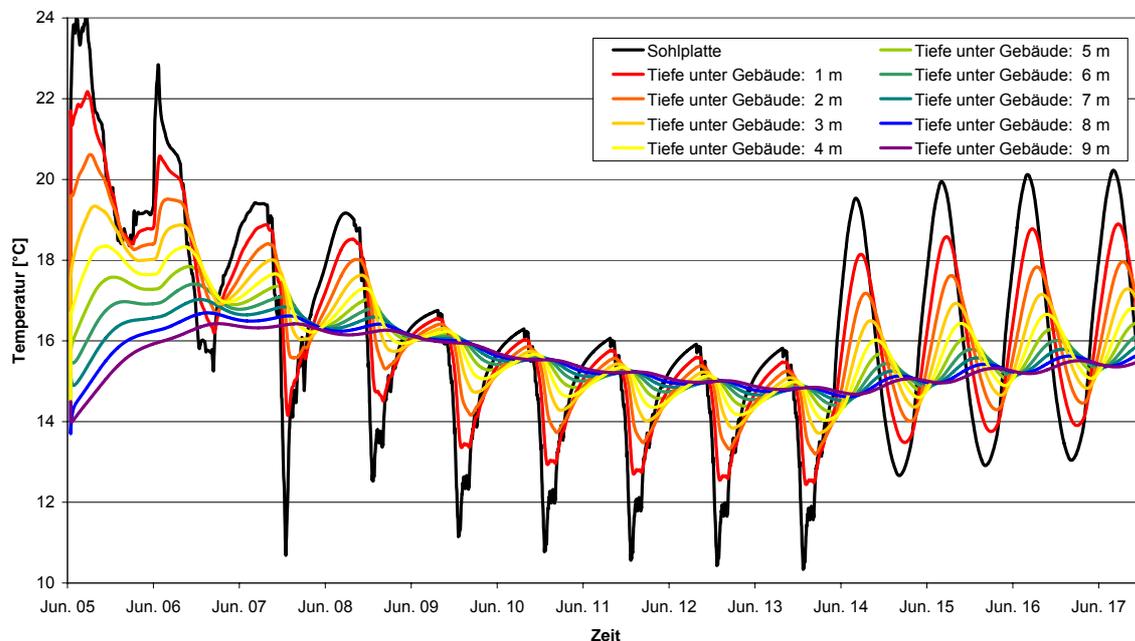


Abbildung 35: Variante 7: Extrapolierte Erdreichtemperatur der Variante 6 mit anschließendem regulärem Betrieb des Speichers

In der Praxis kann sich eine Verlängerung oder Verkürzung der simulierten Regenerationszeit bei Abweichungen der tatsächlichen klimatischen Randbedingungen vom angenommenen Außenlufttemperaturverlauf ergeben.

Entscheidend für die Dauer der thermischen Regeneration des Erdreichs ist darüber hinaus die durch die Wärmepumpe dem Erdreich entzogenen Wärmemenge. Diese ist beschränkt durch die Wärmeabnahme des Gebäudes. Wird im Vergleich zur Simulation weniger Erdwärme vom Gebäude genutzt, verlängert sich auch die Regenerationszeit des Speichers.

Die Ergebnisse der Simulation sind:

- Ein freier Kühlbetrieb ist bei dem derzeitigen Temperaturniveau (2009) des Erdwärmespeichers nicht möglich. Zur Kühlung des Gebäudes über die Betonkernaktivierung wird daher weiterhin die nachgerüstete Kältemaschine notwendig sein.
- Bei einer Fortsetzung des Wärmeeintrags in das Erdreich, entsprechend Prognosevariante 7, erreicht der Erdwärmespeicher bereits nach einer Kühlperiode wieder ein zu hohes Temperaturniveau von 2004/05. Ein dauerhafter Wärmeeintrag in den Erdspeicher wird daher nicht empfohlen.
- Ein Betrieb des Bodenabsorbers zur Kühlung, unter Einhaltung der wasserbehördlichen Erlaubnis, wird in den nächsten 5-6 Jahren aufgrund der Regenerationsphase des Erdreichs nicht umsetzbar sein.

Ein freier Kühlbetrieb wie in der Planung vorgesehen konnte nur auf Basis der fehlerhaften Annahme der Erdreichtemperaturen im ungestörten Zustand angesetzt werden. Die tatsächlichen Erdreichtemperaturen liegen im Durchschnitt um ca. 5 K über den Planungswerten. Zusätzlich wurde der Wärmeeintrag durch das Untergeschoss unterschätzt.

Erdreichtemperaturen, wie sie in der Planung für den Wärmespeicher veranschlagt wurden (s. Abbildung 10), konnten nachweislich nicht umgesetzt werden und lassen sich auch zukünftig nicht realisieren.

Zur weiteren Regeneration des Erdreichs wird empfohlen, den bisherigen kontrollierten Wärmeentzug fortzuführen, die Raumtemperaturen im Untergeschoss soweit wie möglich zu senken und den Wärmeeintrag weiterhin auszusetzen. Nach einer Regeneration des Erdreichs auf ein Temperaturniveau von rund 14 – 15°C kann ein kontrollierter Wärmeeintrag unter dauerhafter Kontrolle der Erdreichtemperaturen erwogen werden. Zum Ende einer Phase des Wärmeeintrags sollte eine Temperatur direkt unter dem Bodenabsorber von 18°C nicht überschritten werden. Im Jahresverlauf ist auf eine ausgeglichene Temperaturbilanz im Erdreich zu achten.

7.9. Zusammenfassung und Bewertung

Für den zuverlässigen Betrieb von Flächenabsorbern unter Gebäuden zur saisonalen Wärmespeicherung ist neben der mittleren Untergrundtemperatur und der geothermischen Parameter auch die Kellertemperatur des Gebäudes sowie die Dämmqualität der Kellerbauteile zu berücksichtigen. Die durch mögliche, unter normalen Innenraumtemperaturen genutzten Kellerräume, eingeleitete Wärme in den Untergrund ist daher im Planungsstadium nicht zu vernachlässigen, um eine ausgeglichene Temperaturbilanz über das Jahr im Untergrund zu erzielen.

Bei der VW-Bibliothek in Berlin lässt sich der Betrieb eines saisonalen Speichers nur unzureichend umsetzen. Der zusätzliche Wärmeeintrag durch das beheizte Kellergeschoss führt zu einer unausgeglichene Speicherbilanz mit einer entsprechenden Temperaturerhöhung im Erdreich. Aufgrund der limitierten Untergrundtemperaturen durch die untere Wasserbehörde kann die Anlage daher im Sommer nicht zur Kühlung des Gebäudes eingesetzt werden.

Um die geforderten Auflagen zu erfüllen, ist der Absorber bis zur endgültigen Regeneration des Erdreichs nur zur Beheizung des Gebäudes zu betreiben. Für die geplante Betriebsweise als saisonaler Erdwärmespeicher wird eine Absenkung der Kellerinnenraumtemperatur empfohlen. Der Wärmeeintrag kann nur kontrolliert erfolgen und sollte bei festgesetzten Randbedingungen für Erdreichtemperatur ausgesetzt werden, um die Speicherfähigkeit zu erhalten.

Da ein Fundamentabsorber eine wesentlich ungünstigere Möglichkeit der Wärmeeinleitung in die unteren Tiefenlagen bietet als z.B. Erdwärmesonden, werden diese Bereiche deutlich zeitverzögert aktiviert. Mögliche Überschreitungen von Temperaturgrenzwerten sind so nur schwer zu korrigieren. Im vorliegenden Beispiel wird der Untergrund primär als Wärmequelle zur Heizung des Gebäudes genutzt, indem die über das Jahr durch das Kellergeschoss eingeleitete Wärme wieder entzogen wird. Die generellen Unterschiede zwischen pfahlartigen Absorbern und Fundamentabsorbern ist abschließend in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Generelle Unterschiede zwischen pfahlartigen Absorbern und flächigen Fundamentabsorbern

Erdwärmesonden/Energiepfähle Aktivierung des Speichers über pfahlartige Absorberbauteile	Flächigen Fundamentabsorber Aktivierung des Erdspeichers über Fundamentplatte
Wärmespeicherung auch in größeren Tiefen <ul style="list-style-type: none"> • Geringe Wechselwirkung mit dem Gebäude • Relativ homogene Temperaturverteilung im Speichervolumen • Schnelle Temperaturlausgleichsprozesse • Wenige Be- / Entladezyklen bis zum Erreichen des vollen Speichernutzungsgrades 	Wärmespeicherung nur an der Oberfläche <ul style="list-style-type: none"> • Große Wechselwirkung mit dem Gebäude • Inhomogene Temperaturverteilung über die Tiefe • Langandauernde Temperaturlausgleichsprozesse • Mehrere Be- / Entladezyklen bis zum Erreichen des vollen Speichernutzungsgrades



8. ANHANG

8.1. Abkürzungsverzeichnis

GOK	Geländeoberkante
GW	Grundwasser
IGB	Institut für Grundbau und Bodenmechanik
OK	Oberkante
RLT	Raumlufttechnik
TRT	Thermal Response Test

8.2. Quellen und Literatur zum Projekt

- [01] ANSYS, Inc.. ANSYS (ANalysis SYStem) Finite-Elemente-Software, Canonsburg, Pennsylvania, USA
- [02] Hartge, K. H.; Horn, R.: Einführung in die Bodenphysik, 3. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1999
- [03] Kuhn, C.; Meyer, J. H.; C.; Stahlmann, J.: Numerische Modellierung eines Erdwärmesondenspeichers, 22. CAD-FEM User's meeting, Dresden, 2004
- [04] Schön, J.H.: Physical properties of rocks: fundamentals and principals of petrophysics, Pergamon Press, 1996
- [05] VDI 4640 Blatt 1 - Thermische Nutzung des Untergrundes, Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, Beuth-Verlag, Berlin, 2000
- [06] VDI-Wärmeatlas, 9. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2002