

## **Pflichtenheft**

### **zur Methodik und Dokumentation thermohydrodynamischer Modellierungen**

### **im Rahmen des wasserrechtlichen Erlaubnisverfahrens zum Betrieb von Erdwärmesondenanlagen mit einer Heizleistung von >30 kW**

Das Pflichtenheft wurde von der Arbeitsgruppe Landesgeologie der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz in Anlehnung an die VDI Richtlinie 4640 und das DVGW-Arbeitsblatt W 107 erarbeitet. Es soll Antragstellende als Orientierungshilfe beim Aufbau, der Anwendung und Dokumentation von numerischen Wärmetransportmodellen zur Erlangung einer wasserbehördlichen Erlaubnis für oberflächennahe Erdwärmesondenanlagen in Berlin mit einer Heizleistung >30 kW dienen.

Bei Erdwärmeeinrichtungen >30 kW Heizleistung ist zunächst immer ein Geothermal Response Test (GRT) bei der Wasserbehörde II D 3 zu beantragen und durchzuführen. Zwischen 30 und 50 kW Heizleistung erfolgt im Rahmen des wasserrechtlichen Antragsverfahrens eine Einzelfallentscheidung über die Durchführung einer thermohydrodynamischen Modellierung. Bei Erdwärmeeinrichtungen >50 kW Heizleistung ist immer eine thermohydrodynamische Modellierung durchzuführen.

Das Modellgebiet, das geologisch-hydrogeologische Schichtenmodell sowie die Parametrisierung und Diskretisierung sind im Vorfeld der Modellierung mit der Arbeitsgruppe Landesgeologie (Ansprechpersonen siehe unten) abzustimmen. Für die Übergabe des vertikalen Schichtaufbaus und der Parametrisierung ist die Vorlage

„[Modellaufbau.xlsx](#)“ zu verwenden.

Der fachliche Umfang und die Mindestanforderungen an die Qualität der numerischen Modelle sind nachfolgender Mustergliederung zu entnehmen.

---

Ansprechpersonen:

**Geologie**

Ulrike Hörmann

Tel.: 030 9025-2006

ulrike.hoermann@senuvk.berlin.de

**Modellierung**

Dr. Johannes Birner

Tel.: 030 9025-2035

johannes.birner@senuvk.berlin.de

# Berichtsinhalte thermohydrodynamischer Modellierungen

## 1. Veranlassung und Aufgabenstellung

Beschreibung des Projektes und der mit der Wasserbehörde abgestimmten Aufgabenstellung sowie des Modellierungskonzepts mit den betrachteten Szenarien.

## 2. Verwendete Unterlagen und Methodik

Das Quellenverzeichnis ist in Anlehnung an die Richtlinie für die Verfasser geowissenschaftlicher Veröffentlichungen von HORATSCHKE & SCHUBERT (1998) zu erstellen.

Auflistung der Datengrundlagen (Geothermal Response Test, Bohrungen, hydraulische Daten, Temperaturdaten, Kartenwerke, etc.) mit Angabe der Herkunft der Daten.

Erläuterung eventueller Datenaufbereitungsprozesse.

Methodik inklusive verwendeter Modellierungssoftware (Version) mit Angabe und Begründung der Modelldimension. Erläuterung der Festlegung des zeitlichen Regimes (stationär / instationär) mit Begründung.

## 3. Geologisches und Hydrogeologisches Modell

### 3.1. Lage des Untersuchungsgebiets

Dokumentation der Lage der Geothermieanlage mit Angabe der genauen Adresse und möglichen Besonderheiten hinsichtlich der Flächen- und Untergrundnutzung.

Geographischer Überblick in Form

- einer Übersichtskarte im Maßstab M 1:10 000 bis 1:25 000 mit Lage des Bilanz- und Modellgebiets, des Grundstücks und aller relevanter Informationen (Aufschlussbohrungen, Verlauf der geologischen Profilschnitte, Brunnen, Grundwassermessstellen, Erdwärmesonden, benachbarte Nutzungen);
- eines Detailplans des Sondenfeldes auf Basis einer Flurkarte und mit Kennzeichnung der Lage des Grundstücks im Maßstab M 1:500 bis 1:1 000.

### 3.2. Geologischer Überblick

Abriss der im Vorfeld mit der Landesgeologie abgestimmten und freigegebenen geologischen Situation inklusive der Erfassung räumlicher Geometrien und geologischer Strukturen anhand von

- veröffentlichten geologischen Karten und Profilschnitten des Untersuchungsgebietes;
- mindestens zwei orthogonal verlaufenden Profilschnitten durch das Modellgebiet.

Beschreibung bestehender Informationsdefizite und Unsicherheiten.

Als Grundlagen dient u.a. die hydrostratigraphische Gliederung von Berlin (vgl. Tabelle 3).

### **3.3. Hydrogeologische Charakterisierung**

Ableitung der hydrostratigraphischen Einheiten (Grundwasserleiter, Grundwassergeringleiter) mit Angabe der Schichtmächtigkeit aus der geologischen Schichtenfolge und stratigraphische Zuordnung.

Erläuterung der Grundwasserdynamik in Form von Grundwassergleichenplänen inklusive Lage der Grundwassermessstellen mit Standrohrspiegelhöhe ( $h_{GW}$ ) und ggf. Einbindung von hydraulisch gekoppelten Oberflächengewässern.

Beschreibung bestehender Informationsdefizite, Unsicherheiten bzw. Bandbreiten einzelner Parameter.

## **4. Energetisches Nutzungskonzept**

Angabe der geplanten Nutzung inklusive des gebäudeseitigen Energiebedarfs.

Beschreibung des Aufbaus des Erdwärmesondenfeldes (Anzahl, Art, Abstände, Tiefe).

Darstellung des Erdwärmesonden Designs.

Angabe des Jahresgangs der Nutzlastverteilung im Sondenfeld auf Basis einer Wärme- und Kältebedarfsanalyse in Form einer Tabelle mit Angabe des erdseitigen Wärmeentzugs (und/oder) Wärmeeinbringung in kW sowie der erdseitigen Jahresheizarbeit (und / oder) Jahreskühlarbeit in MWh/a.

Dokumentation der Auslegungsberechnung der Anlage mit verwendeten Eingangsparametern und Angabe der verwendeten Software (z.B. EED, EWS, GeoSim).

Definition der Randbedingungen des Sondenbetriebes (Zeitreihen Energieentzug/-eintrag) als Eingangsparameter der Modellierung. Sollte die Last nicht gleichmäßig auf alle Erdwärmesonden eines Feldes verteilt werden, muss dies zuvor mit der Landesgeologie abgestimmt werden).

Beschreibung bestehender Informationsdefizite und Unsicherheiten.

## **5. Numerisches Modell**

### **5.1. Modellaufbau**

Darstellung und Begründung des im Vorfeld mit der Landesgeologie abgestimmten und freigegebenen Bilanz- und Modellraums sowie der Randbedingungen an den Modellgrenzen. Zusammenstellung der im Modell verwendeten Anfangsbedingungen und zeitabhängigen Randbedingungen für die Szenarien. Dokumentation der Methode zur Implementierung der Wärmequellen und deren zeitliches Verhalten (z.B. Festtemperaturen, Wärmestrom).

Das Modellgebiet ist auf der Grundlage der aktuellen Grundwassergleichenkarte von Berlin an der Fließrichtung des Hauptgrundwasserleiters auszurichten.

#### **5.1.1. Vertikale Diskretisierung**

Tabellarische Auflistung der Modellschichten mit Angabe der Mächtigkeit, Zuordnung der Stratigraphie und Petrographie sowie der hydrostratigraphischen Einheit mit Angabe der geohydraulischen Parametrisierung ( $k_f$ -Wert vertikal/horizontal, effektive Porosität) und der thermischen Stoffeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, volumenbezogene Wärmekapazität).

## 5.1.2. Horizontale Diskretisierung

Beschreibung der Modellnetzgeometrie inklusive Hintergrundkarte, Lage und Art der Randbedingungen, Sonden und eventuell benachbarten Nutzungen, ggf. in verschiedenen Maßstäben, um die feine Diskretisierung im Umfeld der Sonden abbilden zu können.

## 5.1.3. Zeitliche Diskretisierung bei instationären Modellen

Darstellung der zeitlichen Diskretisierung, ggf. mit einer Beschreibung von Besonderheiten bei der Diskretisierung.

## 5.2. Kalibrierung

### 5.2.1. Hydraulische Kalibrierung

Die hydraulische Kalibrierung erfolgt über eine räumliche Variation der hydraulischen Durchlässigkeit oder von Transferrandbedingungen bis das vordefinierte Qualitätskriterium (maximale Abweichung der modellierten Standrohrspiegelhöhen von den Messwerten 5 cm) erreicht wird.

Der Wertebereich der hydraulischen Durchlässigkeit nach der Kalibrierung in den einzelnen hydrostratigraphischen Einheiten ist anzugeben und zu begründen. Darstellung der Kalibrierungsergebnisse in Form von Korrelationsplots ( $h_{GW}$  gemessen/berechnet) und als Karte der  $k_f$ -Wert Verteilung für alle Modellschichten mit inhomogener hydraulischer Durchlässigkeit. Darüber hinaus muss eine Darstellung einer wasserhaushaltlichen Plausibilitäts- und Bilanzkontrolle erfolgen.

### 5.2.2. Thermische Kalibrierung

Die thermische Kalibrierung erfolgt auf Basis der mit der Landesgeologie abgestimmten Ergebnisse des Geothermal Response Tests (GRT). Daher müssen an dieser Stelle die wichtigsten Ergebnisse des vorangegangenen GRT aufgeführt werden. Gegebenenfalls muss aus den ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeiten des GRT der Effekt der Grundwasserströmung herausgerechnet werden. Die Korrektur ist zu dokumentieren. Darstellung der Kalibrierungsergebnisse in Temperaturverläufen (Vor- und Rücklauf) und durch Angabe der abgeleiteten thermischen Stoffparameter/effektive Porosität der Modellschichten. Diskussion möglicher Unstimmigkeiten zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen. Der Wertebereich der zur Kalibrierung verwendeten Parameter ist darzustellen und zu begründen.

## 5.3. Validierung & Sensitivitätsanalyse

Validierung und Sensitivitätsanalyse erfolgen nach Absprache mit der Landesgeologie.

## 6. Simulationsergebnisse

Detaillierte Beschreibung der betrachteten Szenarien und Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich der thermischen Beeinflussung des Untergrunds durch die Erdwärmenutzung insbesondere im Hinblick auf wasserrechtliche Aspekte. Wichtig ist dabei die Beschreibung der Temperaturen im Sondenfeld und an den Grundstücksgrenzen, der thermischen Beeinflussung von benachbarten Erdwärmeeinrichtungen, Bauwerken (z.B. U-Bahntunnel), Oberflächen- und Ökosystemen.

Als Prognosezeitraum für die Auswirkungen der thermischen Beeinflussung des Untergrundes ist von einem Betriebszeitraum von 25 Jahren auszugehen.

## **6.1. Darstellung der Wasser- und Wärmebilanzen**

Graphische Darstellung der Modellierungsergebnisse der einzelnen Szenarien anhand

- 1 K- und 3 K- Isolinien (Veränderung gegenüber der Hintergrundtemperatur);
- der Temperaturverteilung in den Schichten mit der größten lateralen thermischen Beeinflussung mit Angabe des Modellgebiets und der Lage von Sonden, Grundstücksgrenzen und Beobachtungspunkten;
- relevanter Profilschnitte (z.B. entlang von thermisch beeinflussten Grundstücksgrenzen);
- von Temperaturverläufen an relevanten Beobachtungspunkten (z.B. geplante Temperaturmessstellen zur Überwachung der Untergrundtemperatur im An- und Abstrombereich des Sondenfeldes).

Diskussion des Einflusses der Hydraulik und Wärmetransportparameter auf das Ergebnis inklusive der Benennung von Unsicherheiten.

## **7. Monitoring**

Beschreibung des geplanten Überwachungskonzeptes mit Lage/Tiefe der Beobachtungsmessstellen im An- und Abstrom der Anlage. Aufstellung eines spezifischen Temperaturmessprogramms in den Messstellen mit Angabe des geplanten Messintervalls und des Messzyklus. Die Temperaturmessungen müssen mit geeigneten Geräten mit einer Messgenauigkeit von 0,1 K erfolgen. Für die eingesetzten Messgeräte muss ein aktueller Kalibrierungsnachweis (nicht älter als 1 Jahr) vorliegen.

## **8. Zusammenfassung und Diskussion**

Zusammenfassung aller relevanten Anlagenparameter und Ergebnisse der Modellierung inklusive einer tabellarischen Aufstellung der Änderung der Grundwassertemperaturen nach 25 Jahren Betrieb in den einzelnen hydrostratographischen Einheiten an den Grundstücksgrenzen.

## **9. Anlage**

Als digitale Anlage sind alle verwendeten Karten (ETRS 89, mit ArcGIS lesbar) und Daten bereit zu stellen. Des Weiteren müssen der Aufbau des numerischen Modells und alle Ergebnisse des Modellierungsprozesses übergeben werden. Die Datenübergabe muss in einem Dateiformat erfolgen, welches mit der jeweils aktuellen Version der Programme FEFLOW oder MODFLOW lesbar und ausführbar ist. Darüber hinaus muss die Excel Tabelle mit dem Titel „Modellaufbau“ vollständig ausgefüllt übergeben werden. Ist geplant, anderweitige Modellierungssoftware einzusetzen, ist dies mit der Landesgeologie abzustimmen.

## 10 Hintergrundwerte Berliner Untergrund

Die Wärmeleitfähigkeit der Sedimente des Berliner Untergrunds sind in Tabelle 1 aufgeführt. Für die spezifische Wärmekapazität sind die Werte nach VDI Richtlinie 4640 zu verwenden.

**Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeitswerte in W/(m\*K) des Berliner Untergrunds. Der Rechenwert entspricht dem Medianwert. Die Spannweite wird über die 2-fache mittlere absolute Abweichung vom Median (MAD) bestimmt; \*bei Schluffen entspricht die Spannweite der MAD; n= Anzahl der Proben.**

	Stratigraphie	Petrographie	n	Wärmeleitfähigkeit (W/(m*s))		
				empfohlen	min.	max.
Quartär	qw,qs, qe//Mg	Geschiebemergel	50	3,0	2,6	3,4
		Grobsand/Feinkies	6	3,0	2,6	3,5
	qw,qs,qe//gf	Mittelsand	45	3,0	2,6	3,5
		Feinsand	5	2,7	2,1	3,2
	qhol//l; qe//gl	Schluff	16	2,0	1,5	2,5
	qhol//l	Ton	4	1,8	1,4	2,3
Tertiär	tmi	Mittelsand	26	2,7	2,2	3,2
	tolCO	Feinsand	51	2,5	2,2	2,8
	tmi, tol, teo	Schluff	22	1,8	1,3	2,2
	tolR	Ton	46	1,4	1,0	1,9
Lias	jupl, jusi, juhe	Schluffstein	6	1,9	1,4	2,4
	jupl, juhe	Tonstein	14	2,1	0,8	3,5
K		Tonstein	11	1,4	1,1	1,7

Die nachfolgenden Tabellen (Tabelle 2 & Tabelle 3) sollen als eine Orientierungshilfe für den Aufbau und die Parametrisierung des Modells entsprechend der Hydrostratigraphie von Berlin nach LIMBERG & THIERBACH (2002) dienen.

**Tabelle 2: Durchlässigkeitsbereiche nach Limberg & Thierbach (2002)**

Durchlässigkeitsklasse	Grundwasserhemmer			Grundwasserleiter			
	7	6	5	4	3	2	1
Durchlässigkeit	sehr schwach durchlässig	schwach durchlässig	gering durchlässig	durchlässig	mittel durchlässig	stark durchlässig	sehr stark durchlässig
k <sub>r</sub> -Werte (m/s)	≤10 <sup>-9</sup>	>10 <sup>-9</sup> -10 <sup>-7</sup>	>10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-5</sup>	>10 <sup>-5</sup> -10 <sup>-4</sup>	>10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-3</sup>	>10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-2</sup>	>10 <sup>-2</sup>

Tabelle 3: Hydrostratigraphie des Berliner Untergrunds (kf-Wert Klasse nach Tab. 2)

Hydrostratigraphische Einheiten H: Grundwasserhemmer L: Grundwasserleiter		$k_f$ -Wert Klasse	Petrografie	Lithologie	Kürzel	Stratigraphie
GWL 1 qw – qh	0	2 - 7	Abraum, Erdaushub Bauschutt, Müll	Künstliche Aufschüttung oder Auffüllung	y	Holozän
	H 1	5 - 6	Torf, Schluff	Niedermoortorf, Anmoor, Limnische Bildungen	qh	Holozän
	L 1.1	2 - 3	Sand, Kies	Nachschüttsande der Weichsel-Kaltzeit, Niederungssande, Dünen-sande	qw, qh	Pleistozän, Weichsel-Kaltzeit bis Holozän
	L 1.2	2 - 3	Sand, Kies	Talsande des Panketals, Niederungssande	qw, qh	
	L 1.3	2 - 3	Sand, Kies	Talsande des Warschau-Berliner Urstromtals, Niederungssande	qw	
H 2	5	Geschiebemergel	Grundmoräne der Weichsel-Kaltzeit	qw	Pleistozän, Weichsel-Kaltzeit	
GWL 2 qhol – qw	L 2	3	Sand, Kies	Schmelzwasserablagerungen der Nachschüttphase Saale (Warthe)- bis Vorschüttphase Weichsel-Kaltzeit	qsWA – qw	Pleistozän, Saale- bis Weichsel-Kaltzeit
	H 3.1	5-6	Geschiebemergel	Grundmoräne der Saale-Kaltzeit, Warthe-Stadium	qsWA	Pleistozän, Saale-Kaltzeit
	L H 3	2 - 3	Sand, Kies	Schmelzwasserablagerungen der Saale-Kaltzeit, Nachschüttphase Drenthe- bis Vorschüttphase Warthe-Stadium	qsD – qsWA	Pleistozän, Saale-Kaltzeit
	H 3.2	5 - 6	Geschiebemergel Schluff, Ton	Grundmoräne der Saale-Kaltzeit, Drenthe-Stadium / Beckenschluffe	qsD	Pleistozän, Saale-Kaltzeit
	L 3.1	2 - 3	Sand, Kies	Schmelzwasserablagerungen der Vorschüttphase Saale-Kaltzeit, Drenthe- Stadium, bis Flussschotter der Holstein-Warmzeit	qhol – qsD	Pleistozän, Holstein- Warmzeit bis Saale-Kaltzeit
H L 3	5 – 6	Ton, Schluff	Limnische Tone und Schluffe der Holstein-Warmzeit	qhol	Pleistozän, Holstein- Warmzeit	
GWL 3 tmi – qhol	L 3.2	2 - 3	Sand, Kies	Schmelzwasserablagerungen der Nachschüttphase Elster-Kaltzeit bis Flussschotter der Holstein-Warmzeit	qe – qhol	Pleistozän, Elster-Kaltzeit bis Holstein-Warmzeit
	H 4	5 - 6	Geschiebemergel Schluff, Ton	Grundmoräne der Elster-Kaltzeit, Beckenschluff	qe	Pleistozän, Elster-Kaltzeit
	L 4.1	2 – 3	Sand, Kies	Schmelzwasserablagerungen der Elster-Kaltzeit außerhalb der Rinnen	qe	Pleistozän, Elster-Kaltzeit
	L 4.2	2 - 4	Sand, Kies	Sandige Schmelzwasserablagerungen der Elster-Kaltzeit in tiefen Rinnen	qe	Pleistozän, Elster-Kaltzeit
	L 4.3	3 – 4	Sand	Sande der Oberen Briesker Schichten	tmiBRo	Tertiär, Miozän
H 5	5 - 6	Ton, Schluff	Schluffe der Unteren Briesker Schichten	tmiBRu	Tertiär, Miozän	
GWL 4 toICO – tmi	L 5	3 – 4	Sand	Sande der Unteren Briesker Schichten	tmiBRu	Tertiär, Miozän
	H 6	5 - 6	Ton, Schluff	Schluffe der Unteren Mittenwalder Schichten	tmiMlu	Tertiär, Miozän
	L 6	3 - 4	Sand	Mölliner Schichten (Quarzsandhorizont), Sande der Mittenwalder Schichten	tmiMO, tmiMI	Tertiär, Miozän
	L 7	4	Sand	Chatt-Sande, Cottbuser Schichten, Glimmersande	tolo, toICO,	Tertiär, Oligozän
H 8	5 - 7	Ton, Schluff	Rupelton, Chatt-Schluffe	toIRT, tolo	Tertiär, Oligozän	
GWL 5 teo - toIRa	L8	3 - 4	Sand	Rupelbasissand, Obere Schönewalder Schichten, Sande des Eozäns	toIRa, toISWo, teo	Tertiär, Oligozän, Eozän