

Untersuchungen zur Effizienz von Erdwärmesondenanlagen in Sachsen-Anhalt in Abhängigkeit von der Geologie des Untergrundes

THOMAS GRAUPNER¹, TATJANA HÄNTZE², CHRISTOF LEMPP¹

¹INSTITUT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN & GEOGRAFIE, MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT, VON-SECKENDORFF-PLATZ 3-4, 06120 HALLE (SAALE)

²LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGWESSEN SACHSEN-ANHALT, KÖTHENER STRASSE 34, 06118 HALLE (SAALE)

Schlüsselworte: Oberflächennahe Geothermieanlagen, geologische Erkundung des Untergrundes, Sachsen-Anhalt, Wärmeentzugsleistung, Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen, VDI 4060

Keywords: Subsurface geothermal equipment, geological underground investigation, Saxony Anhalt, specific heat loss capacity, VDI 4060

Zusammenfassung

Die vorliegenden Ergebnisse und Auswertungen sollen einen Beitrag zum Verständnis der Dimensionierungsgrundlagen für Erdwärmesondenanlagen darstellen und am Beispiel von Sachsen-Anhalt zeigen, dass es systematische Wechselwirkungen zwischen geologischer Untergrundsituation und den bundesweit eingeführten Richtwerten nach VDI 4640 gibt.

Die gesamte Thematik bietet aufgrund der Varianz in den Berechnungsgrundlagen bei einer Anlagendimensionierung, auch bedingt durch die am Markt vorhandenen, verschiedenen technischen Anlagensysteme, sowie wegen der Vielzahl maßgeblicher interner und externer Eingabeparameter einen großen Diskussionsbedarf und erhebliche Spielräume bei der Bearbeitung. Dennoch konnte durch die eingesetzte Arbeitsmethodik ein Ansatz geboten werden, mit dessen Hilfe Berechnungen zu Dimensionierungen von Erdwärmesondenanlagen mit einfachen Mitteln durchgeführt werden können. Diesem Ansatz folgend wurde eine Auswertung auf statistischer Grundlage versucht, um die Einwirkungen aus der geologischen Untergrundsituation abzuleiten und Schlussfolgerungen für die Praxis ziehen zu können. Die in die Berechnung einbezogenen 110 Anlagenstandorte wurden, zugeordnet zu regionalen Flächeneinheiten, mit ähnlichen geologischen Bedingungen, in einer Übersichtskarte dargestellt. Diese verdeutlicht, welche Gebiete eher unkomplizierte Planungs- und Dimensionierungsbedingungen aufweisen und in welchen Regionen erschwerte Planungsbedingungen in Sachsen-Anhalt herrschen. Es können somit für die Gebiete, die durch eine hohe Varianz der spezifischen Wärmeentzugsleistung gekennzeichnet sind, Einschätzungen und Empfehlungen gegeben werden, wie dort mit erhöhtem Erkundungsaufwand die Eignung für eine geothermischen Nutzung zu prüfen ist. Bei kritischen Standortbedingungen sollte die bestehende geologische Situation in der Planung und der technischen Umsetzung auf jeden Fall sorgfältig berücksichtigt werden.

Abstract

The results presented and evaluations made contribute to a better understanding of the basic relations for design of terrestrial heat probes. Examples from Saxony Anhalt demonstrate that there are systematic interchanges between the geological underground and the calculation rules that were established by technical standards in VDI 4060 and that are valid throughout Germany.

Intensive discussion and causes for variable decisions during the planning and the installation of geothermal equipments are influenced by: the varying basics for calculation of the technical geothermal borehole installations; the different market options with technically different systems; and the large number of internal or external parameters that must be chosen for calculation of any subsurface geothermal system.

Nevertheless, an evaluation method was developed in order to create a relative simple scale and suitable tools for calculation of geothermal equipments in compliance with VDI 4060. On this basis an attempt was made to evaluate the differences of numerous geothermal settings as established in Saxony Anhalt and to combine the data statistically with the knowledge of the local geological underground situation. This statistical evaluation allows one to demonstrate some consequences for practical applications. About 110 geothermal locations were incorporated in the evaluation and linked with the characteristic regional geological units. Accordingly, an overview map displays this data combination. This map allows one to differentiate relatively easily locations where simple conditions arise for designing a geothermal equipment, and also where greater effort is needed to plan and to calculate the geothermal installations with success. Consequently, one can indicate regions with widely varying heat loss capacity in order to develop suggestions for successful designing of geothermal equipments by more intensive geological investigations. A crucial evaluation of the geological setting in distinct regions is a precondition for an acceptable calculation of the geothermal equipment.

1. Einleitung

In Zusammenarbeit der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg mit dem Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB) in Halle wurde eine Untersuchung zur Effizienz von Erdwärmesondenanlagen in bestimmten Regionen von Sachsen-Anhalt durchgeführt. Auf Grund des zunehmenden Interesses an der oberflächennahen Nutzung geothermischer Energie gilt es, systematische Abhängigkeiten zwischen den betriebstechnischen Parametern von Erdwärmesondenanlagen und den bestehenden Rahmenbedingungen der geologischen und hydrogeologischen Standorteigenschaften in ihrer gegenseitigen Beeinflussung besser zu verstehen. Die Bewertung der Ergebnisse dieser Untersuchung gründet sich auf einen Vergleich real existierender und theoretischer ermittelter Kennwerte konkreter Anlagenstandorte. Bei den am meisten verbreiteten Erdwärmesonden werden in der Regel eine oder mehrere, meist vertikal in den Untergrund eingebrachte Bohrungen hergestellt, in die paarweise gebündelte U-förmige Kunststoffroherschleifen eingelassen werden. Zur Wärmeübertragung zirkuliert in den hier betrachteten Fällen innerhalb der Sondenrohre eine Sole, meist ein Wasser/Glycol - Gemisch (Tholen, Walker-Hertkorn 2008).

Dieses führt die aufgenommene Wärmeenergie aus dem Untergrund an die Oberfläche, wo die Übergabe an eine Wärmepumpe stattfindet. Durch den technischen Prozess in der Wärmepumpe erfolgt die Umwandlung von einem niedrigen zu einem höher energetischen Niveau. Die resultierende Wärmeenergie steht abschließend der Verbrauchereinheit zur Nutzung zur Verfügung. Dabei muss die Sondenanlage ausreichend dimensioniert werden, um die erforderliche Betriebssicherheit zu gewährleisten. Die Dimensionierung erfolgt in Abhängigkeit von den jeweiligen spezifischen Wärmeentzugsleistungen, die im Untergrund durch die Sonden selbst sowie durch die lithologischen und die hydrogeologischen Bedingungen bestimmt sind.

2. Arbeitsmethodik

Das Ziel der durchgeführten Untersuchung bestand darin, nach einfachen Kriterien bereits bestehende Anlagen auf Grundlage von Kenntnissen zur geologischen Situation entsprechend den Dimensionierungsansätzen der Richtlinie der VDI 4640 in ihrer Effizienz zu überprüfen und anschließend zu bewerten. Nach einer Erfassung der an den Standorten der Anlagen im Untersuchungsgebiet anstehenden Gesteinstypen wurden diesen die jeweils spezifischen Wärmeentzugsleistungen zugeordnet.

Tabelle 1. Auswahl einzelner spezifischer Wärmeentzugsleistungen für bestimmte Gesteinsarten in Locker- und Festgesteinsfolgen

Bezeichnung einzelner zur Berechnung einbezogener Locker- und Festgesteine	Spezifische Wärmeentzugsleistung in [W/m] für 2400 h/a (in Anlehnung an Vorgaben der VDI 4640 unter wassergesättigtem Milieu)
Lockergestein	
Lockersedimente (trocken)	20
Ton, Schluff, Mergel, Geschiebemergel,	40
Feinsand, Sand (schluffig)	50
Mittelsand, Grobsand, Feinkies, Mittelkies, Grobkies	55
Festgestein	
Braunkohle	20
Mergelstein	45
Tonstein, Tonschiefer	50
Grauwacke, Konglomerat, Sandstein, Schluffstein,	55
Brekzie, Dolomit, Hornstein, Kalkstein (dolomitisch) Rhyolith	60
Anhydrit	65

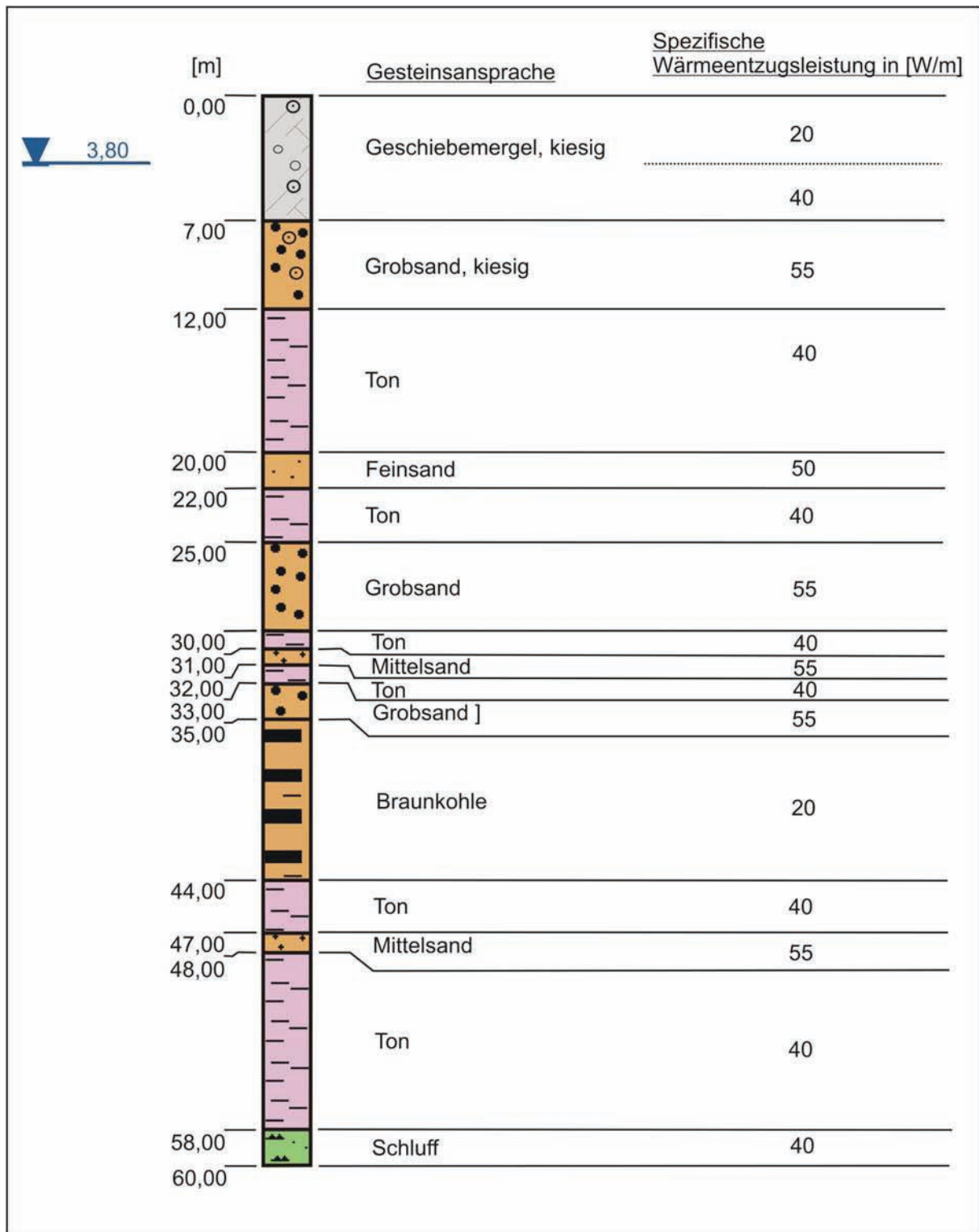


Abb. 1 Darstellungsbeispiel eines charakteristischen Bohrprofils in der Einheit der tertiären Grundwasserleiter mit Kennwerten der spezifischen Wärmeentzugsleistung für jede Gesteinsschicht (für Anlagen mit Heizung, einschließlich Warmwasser). Die Angaben erfolgen in Anlehnung an gesteinspezifische Richtlinien der VDI 4640. Vergleiche auch Tabelle 1.

Entsprechend der Tabelle 1 wurde damit für jeden einzelnen Standort, in Abhängigkeit der Lithologien und der realisierten Bohrtiefen (Abb. 1), die Summe der theoretisch möglichen Wärmeentzugsleistung ermittelt.

Durch den Vergleich der bei der Einrichtung real geplanten Sondenmetern mit den durch Berechnung nach VDI 4640 ermittelten Werten, konnte die Dimensionierung jeder Erdwärmesondenanlage beurteilt und klassifizierend bewertet werden.

Die flächenhafte Aufteilung der Standorte der zu vergleichenden Erdwärmesondenanlagen erfolgte in Abhängigkeit der geologischen und hydrogeologischen Standorteigenschaften in vier Einheiten. Dabei handelt es sich im Bereich der Festgesteine um die Einheiten des Grundgebirges und des Tafeldeckgebirges. Im Falle einer Standortwahl im Lockergestein erfolgte die Zuordnung entweder in die Einheit der tertiären Grundwasserleiter oder in die Einheit von quartären Ablagerungen als pleistozäne Terrassen (zur Geologie des Untersuchungsgebietes vgl. Bachmann et al. 2008).

Das Grundgebirge mit dem überlagernden Schiefergebirgs- und Übergangsstockwerk ist durch paläozoische, metamorphe Gesteine geprägt. Bei Standorten in der Einheit des Tafeldeckgebirges dominieren wechselnde Lagen von mesozoischen Sandsteinen und Tonsteinen. Charakteristisch für diese Einheit sind außerdem Sandsteine und Konglomerate aus dem Karbon und Perm, mächtige Grauwacken des Devon und Kalkstein und Anhydrit als Bildungen aus der Zeit des Zechstein. Typisch für die lithologische Schichtenfolge der tertiären Grundwasserleiter sind Wechsellagen von Tonen, Schluffen und Sanden mit teilweise mächtigen zwischenlagernden Kohleflözen. Dagegen werden die quartären Ablagerungen der Einheit der Pleistozänen Terrassen durch sandige, kiesige Schotterkörper und durch Geschiebemergel bestimmt sowie durch teilweise hohe Flurabstände des Grundwassers.

Die Bewertung der einzelnen Standorte erfolgte im Vergleich zu deren planerischen Umsetzung in „gut dimensionierte“, „überdimensionierte“ und „unterdimensionierte“ Erdwärmesondenanlagen. Die Auswahl der Erdwärmesondenanlagen begründete sich zum einen nach der Qualität der geologischen Informationen über den Standortuntergrund und zum anderen im Bemühen, eine repräsentative Verteilung der Gesamtheit der Daten auf der Landesfläche zu gewährleisten. Zur Recherche der geologischen Situation dienten die Landesbohrdatenbank des Landesamts für Geologie und Bergwesen von Sachsen-Anhalt sowie öffentlich zugängliches geologisches und hydrogeologisches Kartenmaterial.

3. Beschreibung des verwendeten Datensatzes an Erdwärmesondenanlagen

Bei den in der Analyse verwendeten Anlagendaten handelt es sich um konkrete Erdwärmesondenanlagen, welche in verschiedenen Landkreisen von Sachsen-Anhalt geplant und baulich umgesetzt wurden. Die Bereitstellung des Datensatzes erfolgte durch das Landesamt für Geologie und Bergwesen in Halle. Der Datensatz umfasste 500 Standorte, von denen eine Auswahl von 110 Anlagen in die weiteren Bewertungen einbezogen wurde. Die bereitstehenden Informationen beschreiben den genauen Standort mit Ortsnamen und einer Lagekennzeichnung durch den Hoch- und Rechtswert.

Des Weiteren bestanden Angaben zur Bohrtiefe und Anzahl der Bohrungen. Hinzu kommen die für eine Dimensionierungsberechnung notwendigen Werte zum Wärmebedarf und die Leistungszahl der Pumpe. Die zur Verwendung ausgewählten Daten betrafen im wesentlichen Standorte in den Landkreisen Harz, Saalekreis, Mansfeld-Südharz, Anhalt-Bitterfeld, Wittenberg sowie den kreisfreien Städten Halle und Magdeburg. Im nördlichen Gebiet von Sachsen-Anhalt wurden keine Standorte in die Berechnung und Bewertung einbezogen, da bei den zuständigen Behörden andere Meldeformalitäten bestehen und daher bei der Datenerfassung für eine geplante Erdwärmesondenanlage die hier zur Berechnung notwendigen Kennwerte nicht aufgenommen werden.

4. Dimensionierungsansatz nach Vorgaben der Richtlinie VDI 4640

Um eine derartige Untersuchung durchzuführen, musste ein Dimensionierungsansatz erarbeitet werden, der in gleicher Weise für alle gewählten Standorte verwendet werden konnte. Dabei richteten sich die gewählten Werte der spezifischen Wärmeentzugsleistungen für die einzelnen Gesteine nach Vorgaben der VDI 4640. Diese Richtlinie gibt Beispiele für eine Anzahl von Locker- und Festgesteinen mit Angaben zur Wärmeleitfähigkeit und volumenbezogenen spezifischen Wärmekapazität.

Daraus ergeben sich empfohlene mittlere Richtwerte der einzelnen spezifischen Wärmeentzugsleistungen. Diese stellen keine festen, messbaren Größen dar, sondern werden durch technische Randbedingungen der Sonden sowie eine Vielzahl von Eigenschaften des Untergrundes beeinflusst und variiert, weil z.B. Struktur, Aufbau, Poren- und Kluftfüllung sowie die bestehenden hydrogeologischen Gegebenheiten ebenfalls maßgebend sind.

Die in dieser Studie ausgewählten jeweiligen Entzugsleistungen entsprachen in der Festlegung

immer solchen Werten, die innerhalb des angegebenen Schwankungsbereiches der Richtlinie VDI 4640 lagen. Dabei wurde bei der Auswertung eine zu große Streuung der gesamten Entzugsleistung eines Standortes durch den Ausschluss von minimalen und maximalen Werten (Extremwerten) vermieden.

5. Ergebnisse der Standortauswertungen

Nach Bewertung aller 110 einbezogenen Erdwärmesondenanlagen ließ sich ein Trend hinsichtlich der Summe der jeweiligen spezifischen Wärmeentzugsleistungen in Abhängigkeit der Standorteigenschaften erkennen. Die Auswertung der Gesamtheit der Anlagen zeigt eine deutliche Differenzierung der Ergebnisse. Zusammenfassend konnten etwas weniger als die Hälfte der Anlagenstandorte als „gut dimensioniert“ eingestuft werden. Die Sondenanlagen, welche als „überdimensioniert“ eingestuft wurden, gelten hinsichtlich der Anlageneffizienz ebenfalls als „gut dimensionierte“ Anlagen, da zwar die Sondenstrecke nach der theoretischen Summe der Wärmeentzugsleistung zu lang angesetzt wurde, die Funktions- und Betriebssicherheit der Wärmepumpe jedoch jederzeit gewährleistet ist. Nachteil einer Überdimensionierung ist der erhöhte Kostenbedarf beim Bohren der Sondenstrecken und bei Installation der Erdwärmesonden. Im Hinblick auf die Effizienz der Nutzung geothermischer Energie sind daher alle die Anlagen, welche als „unterdimensioniert“ bewertet wurden, von maßgeblicher Bedeutung, um die gegebenen Standortkriterien einzuschätzen.

Von den 110 Standorten gelten 34 Anlagen nach den vorgenommenen theoretischen Berechnungen als „unterdimensioniert“. Bei diesen Anlagen könnte die Aussage getroffen werden, dass zum einen die Betriebssicherheit nicht gegeben ist, und neben höheren Kosten durch größeren Stromverbrauch auch ein erhöhtes Risiko einer Gefährdung der Umwelt besteht (vgl. Tabelle 2).

Im Folgenden soll nun die Verteilung der Bewertungsergebnisse für die vier klassifizierten geologischen Einheiten im Einzelnen erörtert werden. Dabei sind die Standorte, welche mehrheitlich der Einheit des Tafeldeckgebirges zugeordnet worden sind, entsprechend der Berechnung den realen Anlagendaten am nächsten. Aus der Tabelle 3 und der Abb. 1 ist ersichtlich, dass von den im Tafeldeckgebirge positionierten 35 Sondenanlagen 23 als „gut dimensioniert“ eingestuft und 9 der Standorte als „überdimensioniert“ bewertet wurden.

Das bedeutet, dass über 90 % der Anlagen einer effizienten Nutzung geothermischer Energie entsprechen

und nur 8 % bei der Planung „unterdimensioniert“ worden sind.

Ein ähnliches Ergebnis bietet die Einheit des Grundgebirges und des Schiefergebirgs- und Übergangsstockwerks. Von den 17 dort berechneten Erdwärmesondenanlagen wurden 10 Anlagen als „gut dimensioniert“ und 6 als „überdimensioniert“ bewertet. Nur einer (1) der Standorte galt im Vergleich zu der theoretischen Wärmeentzugssumme als „unterdimensioniert“. Somit ist die Nutzung in über 90 % der Anlagen in diesem Festgesteinsbereich als effizient einzuschätzen. Auffällig ist jedoch der erhöhte Anteil von „überdimensionierten“ Standorten in der Grundgebirgseinheit im Vergleich zur Einheit des Tafeldeckgebirges. Eine Ursache hierfür ist wahrscheinlich eine pauschale Belegung von Entzugsleistungen von meist 50 W/m.

Zusammenfassend erscheint es jedoch so, dass die realen Anlagendaten in ihrer Effizienz in Abhängigkeit zur Geologie des Untergrundes fast überall gut mit den theoretisch ermittelten Entzugsleistungen im Festgestein übereinstimmen.

Die Einheit der pleistozänen Terrassen zeichnet sich im Gegensatz zu den Einheiten im Festgestein durch eine große Mächtigkeit der Lockergesteinsfolge aus. Von den ausgewählten 25 Standorten dieser Einheit konnten 11 Anlagen als „gut dimensioniert“ und 7 Anlagen als „überdimensioniert“ bewertet werden. Mit den verbleibenden 7 „unterdimensionierten“ Anlagen weist diese Einheit daher im Vergleich zu den Festgesteinseinheiten des Tafeldeckgebirges und des Grundgebirges eine deutlich größere Unsicherheit in der Anlagendimensionierung auf. Nach Tabelle 1 sind mittlere bis hohe Wärmeentzugswerte von Sand und Kies zu erwarten. Schwierigkeiten in der planerischen Auslegung könnten durch niedrige Grundwasserstände und größere Schichtmächtigkeiten von Ton, Mergel und Geschiebemergel zu erklären sein. Prinzipiell entspricht dieses Ergebnis aus den pleistozänen Terrassen der ungefähren Situation der Gesamtverteilung.

In der prozentualen Verteilung (vgl. Tabelle 1) werden die Unterschiede zwischen der zugrundeliegenden Planung und der Dimensionierung der jeweiligen Standorte durch eine breite Streuung der Bewertungen deutlich. Bei der Beurteilung der Anlageneffizienz dieser Einheit ist mit 72 % „gut dimensionierter“ bzw. „überdimensionierter“ Anlagen und

28 % „unterdimensionierter“ Anlagen das Ergebnis im Vergleich zum Festgestein als relativ schlechter einzustufen.

In der Einheit der tertiären Grundwasserleiter ist allerdings die Bewertung der Anlagen bezüglich ihrer

Tabelle 2. Auswertung der Ergebnisse der Gesamtheit der Anlagenstandorte

Bewertung - Gesamtheit der Anlagendaten	Anzahl der Anlagen:	Anteil in [%]:
gut dimensioniert:	50	45
unterdimensioniert:	37	34
überdimensioniert:	23	21
Gesamtsumme:	110	100

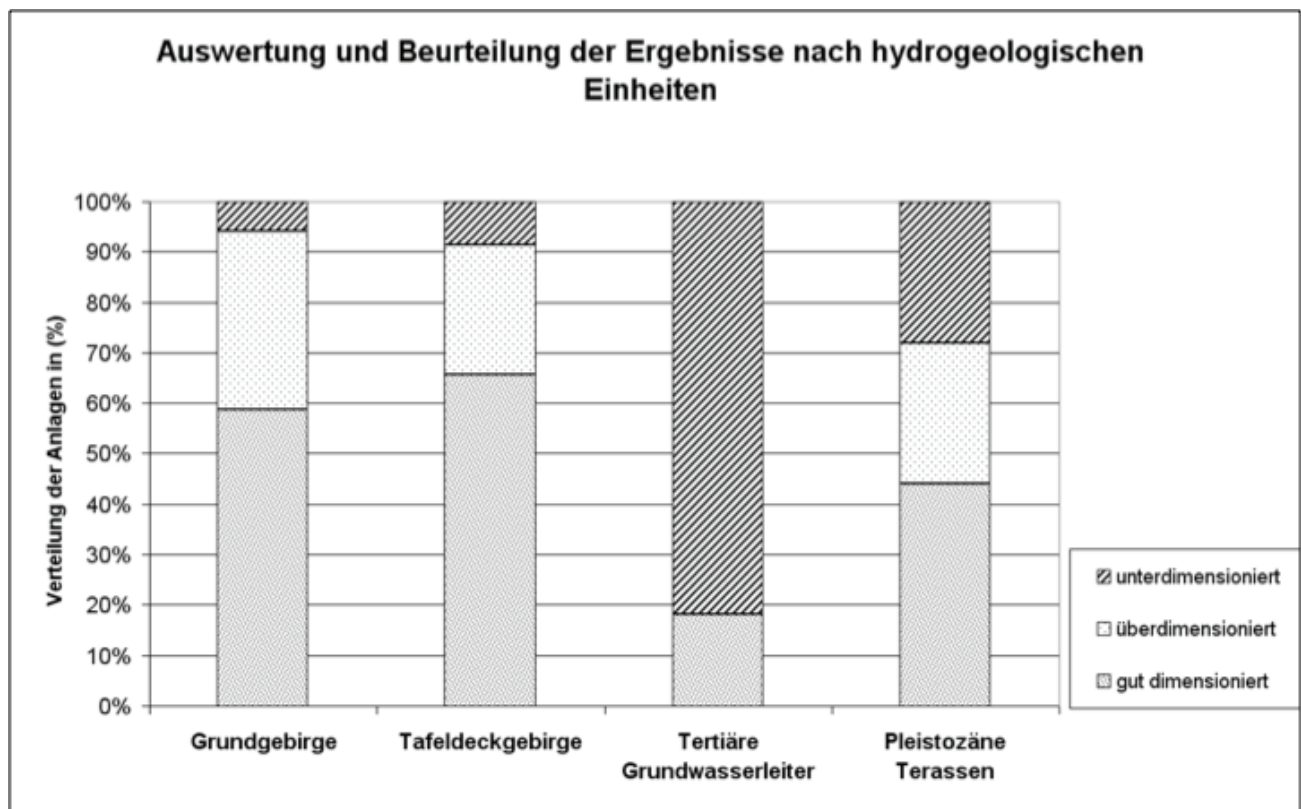


Abb. 2 Grafische Darstellung der Dimensionierungsergebnisse für die vier klassifizierten Einheiten Grundgebirge, Tafeldeckgebirge, tertiäre Grundwasserleiter und pleistozäne Terrasse

Tabelle 3. Statistische Auswertung der Ergebnisse für die klassifizierten geologischen Einheiten Grundgebirge, Tafeldeckgebirge, tertiäre Grundwasserleiter und pleistozäne Terrassen

Bewertung der Erdwärmesondenanlagen	Grundgebirge		Tafeldeckgebirge		Tertiäre Grundwasserleiter		Pleistozäne Terrassen	
	Anzahl	[%]	Anzahl	[%]	Anzahl	[%]	Anzahl	[%]
gut dimensioniert	10	59	23	66	6	18	11	44
unter dimensioniert	1	6	3	8	27	82	7	28
überdimensioniert	6	35	9	26	0	0	7	28
Summe	17	100	35	100	33	100	25	100

Effizienz noch kritischer. Aus Abb. 1 wird sofort deutlich, dass in diesem Fall über 80 % der Erdwärmesondenanlagen als „unterdimensioniert“ gelten müssen. Von den insgesamt 33 Standorten dieser Einheit sind nur 6 Anlagen als „gut dimensioniert“ und alle verbleibenden 27 Anlagen als „unterdimensioniert“ eingeschätzt worden. Nach diesem Ergebnis ist eine klare Abhängigkeit von Dimensionierungskriterien und geologischer Situation im

Untergrund zu erkennen (Abb. 2). Aufgrund der Dominanz bindiger Lockersedimente wie Ton und Schluff und dem häufigen Vorkommen von Braunkohleflözen im Untergrund sind die spezifischen Wärmeentzugswerte in dieser Einheit selten über 40 W/m anzusetzen (siehe Abb. 3). Um in diesem Fall die Betriebssicherheit der Anlagen in dieser geologischen Einheit zu gewährleisten, muss die Situation im Untergrund standortbezogen erkundet

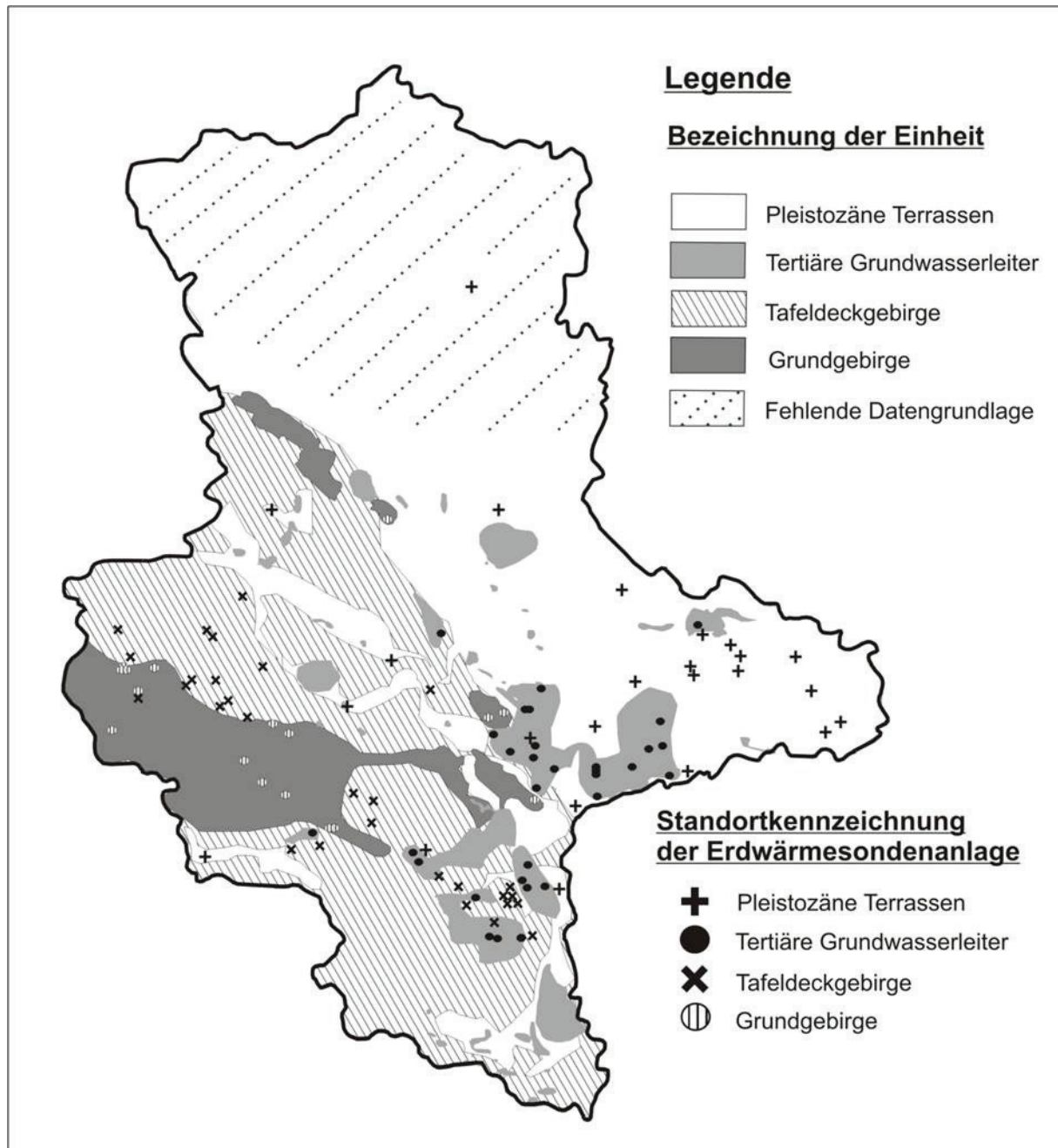


Abb. 3 : Schematische Darstellung der klassifizierten geologischen Einheiten und Lagekennzeichnung der einzelnen in die Untersuchung einbezogenen Standorte von Erdwärmesondenanlagen in Sachsen-Anhalt.

Tabelle 4. Berechnungsbeispiel für die Summe der spezifischen Wärmeentzugsleistung eines Anlagenstandortes in der Einheit des Tafeldeckgebirges (Festgestein)

Sondenstrecke (Bohrprofil) von x [m] unter Gelände	Bezeichnung der Fest- bzw. Lockergesteine	Berechnung nach Vorgabe der VDI 4640 [W/m] pro Gesteinsschicht	Spezifische Wärmeentzugsleistung pro Gesteinsschicht in [W] (pro Summe Meter Sondenlänge) für 2400 h/a	Spezifische Wärmeentzugsleistung der jeweiligen Sondenstrecke in [W]
0 bis 4	Ton, Schluff (trocken)	20	80	
4 bis 65	Sandstein	55	3355	3435

Tabelle 5. Berechnungsbeispiel für die Summe der spezifischen Wärmeentzugsleistung eines Anlagenstandortes in der Einheit der tertiären Grundwasserleiter (überwiegend bindiges Lockergestein)

Sondenstrecke (Bohrprofil) in [m] unter Gelände	Bezeichnung der Fest- bzw. Lockergesteine	Berechnung nach Vorgabe der VDI 4640 [W/m] pro Gesteinsschicht	Spezifische Wärmeentzugsleistung pro Gesteinsschicht in [W] (pro Summe Meter Sondenlänge) für 2400 h/a	Spezifische Wärmeentzugsleistung der jeweiligen Sondenstrecke in [W]
0 bis 1,5	Schluff, Sand, trocken	20	30	
1,5 bis 4	Schluff, trocken	20	50	
4 bis 20	Ton	40	640	
20 bis 30	Braunkohle	20	200	
30 bis 50	Ton, Schluff	40	800	
50 bis 60	Braunkohle	20	200	
60 bis 65	Ton	40	200	2120

Tabelle 6. Berechnungsbeispiel für die Summe der spezifischen Wärmeentzugsleistung mit einer Entzugsleistung von 50 W/m für einen Tonstein

Sondenstrecke (Bohrprofil) von x [m] unter Gelände	Bezeichnung der Fest- bzw. Lockergesteine	Berechnung nach Vorgabe der VDI 4640 [W/m] pro Gesteinsschicht	Spezifische Wärmeentzugsleistung pro Gesteinsschicht in [W] (pro Summe Meter Sondenlänge) für 2400 h/a	Spezifische Wärmeentzugsleistung der jeweiligen Sondenstrecke in [W]
0 bis 4	Ton, Schluff, trocken	20	80	
4 bis 65	Tonstein	50	3355	3130

Tabelle 7. Berechnungsbeispiel für die Summe der spezifischen Wärmeentzugsleistung mit einer Entzugsleistung von 60 W/m für einen Sandstein

Sondenstrecke (Bohrprofil) von x [m] unter Gelände	Bezeichnung der Fest- bzw. Lockergesteine	Berechnung nach Vorgabe der VDI 4640 [W/m] pro Gesteinschicht	Spezifische Wärmeentzugsleistung pro Gesteinschicht in [W] (pro Summe Meter Sondenlänge) für 2400 h/a	Spezifische Wärmeentzugsleistung der jeweiligen Sondenstrecke in [W]
0 bis 4	Ton, Schluff, trocken	20	80	
4 bis 65	Sandstein	60	3660	3740

und in der Planung mit ausreichenden Bohrungslängen entsprechend berücksichtigt werden.

Die in dieser Untersuchung angenommenen jeweiligen Entzugsleistungen entsprachen in der Festlegung immer nur solchen Werten, die innerhalb des angegebenen Schwankungsbereiches aus der Richtlinie der VDI 4640 lagen. Dabei sollte in der Auswertung auch eine zu große Streuung der gesamten Entzugsleistungen eines Standortes durch den Ausschluss von minimalen und maximalen Werten verhindert werden.

Fehlerabschätzung und Bewertung der Berechnungsgrundlage

Aufgrund der unterschiedlichen Bewertungen der geologischen Standorteigenschaften und der Komplexität beeinflussender Faktoren stellt sich die Frage, inwieweit die verwendeten Kennwerte zur jeweiligen spezifischen Wärmeentzugsleistung uneingeschränkt bei solchen Aufgaben angewendet werden können. Die Methode der Datenbearbeitung kann keinesfalls absolute Kennwerte als bestimmte Entzugsleistungen definieren. Vielmehr konnte mit Hilfe der statistischen Auswertung lediglich der systematische Trend aufgezeigt werden, dass sich in Abhängigkeit von der Geologie des Standortes die Kriterien für eine effiziente Dimensionierung der Sondenstrecke zum Teil stark unterscheiden. Dabei wird deutlich, dass in vielen Gebieten mit Festgesteinsuntergrund gleichmäßig mittlere bis hohe Wärmeentzugsleistungen erwartet werden können. Im Gegensatz dazu weisen bestimmte Standorte im Lockergestein, bedingt durch die geologische Untergrundsituation, oft nur niedrige bis mittlere Entzugsleistungen auf und es kann folglich leichter zur Unterdimensionierung der Anlagen kommen, wenn unzureichende Kenntnisse des geologischen Profils bestehen. Diese Aussage soll durch zwei Berechnungsbeispiele, gezeigt in den Tabelle 4 und 5, verdeutlicht werden.

In der Tabelle 4 wird eine Situation vorausgesetzt, die allgemein für eine Wärmeentzugsleistung im Festgestein angenommen werden kann. Die Bohrung

ist in einem Sandstein angelegt mit einer Sondenstrecke von 65 Metern. Es besteht eine 4 Meter mächtige Lockergesteinsbedeckung. In der Annahme, dass der Grundwasserstand unterhalb von 4 Metern liegt, wird die spezifische Wärmeentzugsleistung für diesen oberen Bereich im Lockersediment mit 20 W/m ausgelegt. Für die verbleibende Sondenstrecke von 61 Metern im Sandstein sind durchgängig mittlere bis hohe Wärmeentzugswerte zu erwarten.

Bei angesetzten 3 Bohrungen könnten dem Untergrund somit unter den gegenwärtigen technischen Anlagenbedingungen bis zu 10 kW entzogen werden.

In der Tabelle 5 wird eine Standortcharakteristik der Einheit der tertiären Grundwasserleiter beschrieben. Durch den Wechsel unterschiedlicher Schichtmächtigkeiten von Ton, Schluff, Sand und Braunkohle sind durchgängig nur niedrige bis mittlere spezifische Wärmeentzugsleistungen zu erwarten. Im Vergleich mit der Berechnung der Tabelle 4 sind bei gleichen technischen Bedingungen und einer benötigten Bedarfsleistung von 10 kW statt 3 Bohrungen nunmehr 5 Bohrungen notwendig, um eine äquivalente Summe der Entzugsleistung zu erreichen.

Da es sich bei den theoretisch ermittelten Summen der Entzugsleistungen um Näherungswerte handelt, wurde im Vergleich zu den real angegebenen Anlagendaten in der Auswertung der Gesamtentzugsleistung für jeden Standort eine Fehlertoleranz von 10 % Abweichung angesetzt und rechnerisch einbezogen. Aufgrund dieses tolerierten Schwankungsbereiches wurden in der abschließenden, klassifizierenden Beurteilung nur diejenigen Anlagen als „überdimensioniert“ bzw. „unterdimensioniert“ betrachtet, die bei der Dimensionierungsplanung durch den verantwortlichen Bauherrn entweder eine andere geologische Situation am Standort vorausgesetzt hatten, oder bei denen die angenommenen spezifischen Wärmeentzugsleistungen im Untergrund entgegen den Vorgaben der VDI 4640 als zu hoch oder zu niedrig angesetzt worden waren. Diese Aussage soll an den

Berechnungsbeispielen der Tabelle 6 und 7 anschaulich verdeutlicht werden.

Je nach den gegebenen Planungskriterien kann der gewählte Wert für eine spezifische Wärmeentzugsleistung im Festgestein variieren. Als Dimensionierungsgrundlage kann ein mittlerer Wert von 50 W/m wie im Falle eines Tonsteines für die gesamte Sondenstrecke angenommen werden.

In anderen Planungsansätzen wird die Entzugsleistung für einen Sandstein mit einem Wert von 60 W/m angesetzt. Im Vergleich zur ermittelten Summe der Entzugsleistung von 3435 W in der Berechnung der Tabelle 4, liegen jedoch die jeweiligen Gesamtsummen von 3130 W für einen Tonstein und 3740 W für einen Sandstein mit einer prozentualen Abweichung von 9 % innerhalb der Grenze der 10 % Fehlertoleranz (vgl. Tabelle 6 und 7).

Dadurch werden auch eventuelle Unterschiede in der Gesteinsansprache und Unsicherheiten im Bezug bestehender lithologischer Mächtigkeiten in der Auswertung berücksichtigt. Anders verhält es sich, wenn die gewählten jeweiligen Entzugswerte im Widerspruch zur geologischen Situation im Untergrund stehen (vgl. Tabelle 5).

In der Gesamtheit wird dieses Bewertungskonzept durch die gute Übereinstimmung der Wärmeentzugsleistungen im Festgestein und die häufig erkannten Schwierigkeiten einer Anlagendimensionierung im Lockergestein unterstützt.

6. Literaturquellen

/1/ Bachmann, G.H., Ehling, B.C., Eichner, R. & Schwab, M. (Hrsg. 2008): Geologie von Sachsen-Anhalt. 689 S., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

/2/ Tholen, M., Walker-Hertkorn, S. (2008): Arbeitshilfen Geothermie - Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.

/3/ VDI 4640 Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg. 2010): Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 1: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. Beuth Verlag, Berlin.

/4/ VDI 4640 Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg. 2001): Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 2: erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Beuth Verlag, Berlin.