



**AKOTEC**  
**SOLARTHERMIE**

Produktionsgesellschaft mbH  
Grundmühlenweg 3  
16278 Angermünde

# **Frostfreihaltung einer wassergeführten thermischen Solaranlage**

**FroWaSo**

Abschlussbericht für das von der deutschen Bundesstiftung  
Umwelt geförderte Projekt mit dem Aktenkennzeichen

35365/01

Autoren

Herbert Menhart

Uwe Sonnenfeld

Angermünde, den 17.02.2022

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az 35365/01

Referat 24/2

Fördersumme

**62.416,00 €**

**Antragstitel** Frostfreihaltung einer wassergeführten thermischen Solaranlage

**Stichworte** Solarthermie, Geothermie, Frostschutz

Laufzeit

**12 Monate**

Projektbeginn

**30.11.2020**

Projektende

**29.11.2021**

Projektphase(n)

Zwischenberichte

Kurzbericht 17.06.2021

**Bewilligungsempfänger** AKOTEC Produktionsgesellschaft mbh  
Grundmühlenweg 3  
16278 Angermünde

Tel: 03331 2571643

Fax

Projektleitung

Herbert Menhart

Bearbeiter

Uwe Sonnenfeld

**Kooperationspartner** /

### ***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Die Nutzung von großtechnischen thermischen Solaranlagen steigt in den letzten Jahren stark an. Die Frostfreihaltung solcher Systeme wird marktüblich durch ein Wasser/Glykol Gemisch gewährleistet. Das Projekt sollte untersuchen, ob es alternative Ansätze gibt, die kostengünstig und ökologisch stattdessen zu verwenden sind. Idee der Untersuchung war die Frostfreihaltung einer großtechnischen thermischen Solaranlage, durch die Verwendung einer geothermischen Bohrung unter Nutzung freier Zirkulation.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Am Beginn des Projektes stand eine Übersicht des solarthermischen sowie des geothermischen Systems. Dafür wurden beide Technologien detailliert betrachtet. Für die Bearbeitung des Projektes wurde folgend lediglich die oberflächennahe Geothermie, speziell die Sondenbohrung bis maximal 100 m Tiefe, betrachtet. Weiterhin wurden rechtliche Anforderungen an beide Technologien ausführlich beschrieben. Zusätzlich wurde anhand von Internetrecherche eine Übersicht über die geothermische Landschaft in Deutschland anhand vier repräsentativer Bundesländer geschaffen. Eine Übersicht über derzeit marktverfügbare Frostfreihaltungssysteme wurde ebenso angefertigt wie eine Darstellung der Frostereignisse in Deutschland.

Final fanden Berechnungen statt, welche Wärmemengen für die Frostfreihaltung eines einzelnen MEGA-Kollektor Segments nötig sind. Später fanden Simulationen statt, die den Energiebedarf einer Großanlage im gesamten Jahresverlauf aufzeigten. Dies geschah mit Hilfe eines Simulationsprogramms. Mit diesen Ergebnissen konnte dann ebenso die mindestens benötigte Sondentiefe simuliert werden. Diese wurden in Bezug auf unterschiedliche Volumenströme durch das System simuliert.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Die Ergebnisse der vorgenommenen Untersuchungen zeigen, dass die Projektidee als nicht in der Praxis umsetzbar gewertet werden kann. Eine freie Zirkulation in einem geschlossenen Rohrleitungssystem ist nach unseren Erkenntnissen erst in einer sehr tiefen Tiefe zu erreichen. Zudem ist in einer theoretischen Betrachtung nur schwer zu analysieren, ob der hohe Anteil der vertikalen Rohrleitungen, wie sie in einer MEGA Kollektor Anlage existieren, eine freie Zirkulation überhaupt funktionieren würde. Wir haben in der Projektbearbeitung herausgefunden, dass die geothermischen Systeme grundsätzlich sehr kompatibel mit solarthermischen Anlagen sind. Dies bezieht sich auf die Anlagenhydraulik und die Nutzungsmöglichkeit derselben Sole im System. Eine geothermische Bohrung bis maximal 100m ist in Deutschland in der Regel sehr einfach zu bewerkstelligen und unterliegt nur einem geringen bürokratischem Aufwand. Insbesondere Wasserschutzgebiete gelten hier als limitierender Faktor.

Die Bewertung des CO<sub>2</sub>-Fußabdruck über eine Anlagenlaufzeit von 20 Jahren hat gezeigt, dass das bisher verwendete Wasser/Glykol Gemisch ebenso wie die Geothermie einen sehr geringen Ausstoß verursacht. Die Nutzung einer Heizung hat im Gegensatz dazu einen hohen Ausstoß bei Verwendung von konventionell produziertem Strom.

Die Kosten für eine geothermische Bohrung sind jedoch sehr hoch, was einen wirtschaftlichen Betrieb gegenüber herkömmlich verwendeten Technologien kaum möglich macht. Die Verwendung einer Systemheizung kann als ernstzunehmende Alternative gesehen werden, sofern der Strom „grün“ erzeugt wird. Nach wie vor sind wir von der Kombination von Solarthermie und Geothermie überzeugt. Zwar hat sich diese Idee als nicht umsetzbar respektive nicht wirtschaftlich erwiesen, aber wir werden weiter Ideen entwickeln. Wir sind nach wie vor davon überzeugt, dass die Kombination von Technologien der erneuerbaren Energien einen deutlichen Vorteil gegenüber der Einzelnutzung bietet.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Es fand während der Projektlaufzeit eine Veröffentlichung auf der AKOTEC Internetpräsenz statt.

## ***Fazit***

Das Projekt war ein wertvolles Instrument, die entwickelte Idee umfassend zu beleuchten und zu bearbeiten. Die theoretische Grundlagenanalyse zeigte, dass eine Nutzung natürlicher Zirkulation in einer geothermischen Sondenbohrung nicht wirtschaftlich betrieben werden kann und damit keine echte Alternative zur Frostfreihaltung gegenüber marktverfügbaren Systemen darstellt. Nach allen Abwägungen ist die Verwendung der Wasser/Glykol Mischung, welche standardmäßig genutzt wird, unter den betrachteten Technologien die sinnvollste. Dies stellt sich in der Abwägung der Kosten und der Umwelteinflüsse dar.

Eine sinnvolle Alternative kann die Verwendung einer Beheizung sein. Allerdings nur, wenn regenerativ erzeugter Strom dafür verwendet wird.

Das Projekt ist für die AKOTEC Produktions GmbH damit beendet und wird nicht in einem Folgeprojekt münden.

# Projektbericht FroWaSo

---

## Inhalt

1	Abstract .....	4
2	Einleitung.....	5
3	Pflichtenheft .....	6
4	Möglichkeiten und Eigenschaften solarthermischer Großanlagen .....	6
4.1	Anlagenbeschreibung .....	6
4.2	Anforderungen .....	7
5	Anforderungen und Eigenschaften geothermischer Wärmeversorgung .....	10
5.1	Oberflächennahe Geothermie.....	12
5.2	Allgemeine Anforderungen an das System .....	14
5.3	Anforderungen bezogen auf den MEGA Kollektor .....	18
6	Übersicht der geothermischen Landschaft für Deutschland.....	21
6.1	Bayern.....	23
6.2	Hessen .....	26
6.3	Sachsen-Anhalt .....	29
6.4	Mecklenburg-Vorpommern.....	31
7	Frostereignisse in Deutschland.....	32
7.1	Frosttage.....	32
7.2	Zielbereich für solarthermische Anlagen.....	34
8	Berechnung zur Frostfreihaltung eines realistischen MEGA-Kollektor Systems .....	34
8.1	$\eta_0$ Konversionsfaktor oder auch optischer Wirkungsgrad.....	35
8.2	Wärmedurchgangskoeffizient $a_1$ .....	36
8.3	Temperaturabhängige Wärmedurchgangskoeffizienten $a_2$ .....	36
8.4	Mittlere Kollektortemperatur $T_m$ .....	37
8.5	Wärmeleistung bzw. Kollektorverlustleistung .....	37
8.6	Ermittlung der Wärmeverlustleistung.....	39
9	Übersicht über verfügbare Frostfreihaltssysteme .....	44
9.1	Wasser-Glycol Gemisch .....	44
9.2	Drain Back.....	44
9.3	Beheizung .....	45
9.4	Umwälzsysteme/Frostschutz durch Technik.....	45
10	Kombinationsmöglichkeiten von Solar- und Geothermie .....	46

11	Verwendung natürlicher Zirkulation zur Frostfreihaltung .....	47
11.1	Bedingungen für eine natürliche Zirkulation.....	47
11.2	Massenstrom Durchflussmenge bei einer natürlichen Zirkulation .....	48
11.3	Natürlichen Zirkulation in einer MEGA-Kollektoranlage mit Frostfreihaltung durch Erdwärme... ..	48
11.4	Jahressimulation des Frostfreihaltebedarfs .....	50
12	Rechtliche Grundlagen .....	53
12.1	Solarthermie .....	53
12.2	Geothermie.....	55
13	Übersicht und Charakterisierung der ökologischen Anforderungen .....	60
14	Übersicht und Charakterisierung der finanziellen Anforderungen .....	60
14.1	Geothermie.....	61
14.2	Wasser-Glykol Gemisch .....	61
14.3	Heizung.....	61
14.4	Drain Back.....	62
14.5	Kostenvergleich .....	62
15	Fazit .....	64

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Temperaturverlauf mit der Tiefe im ungestörten Erdreich .....	10
Abbildung 2:	Schema oberflächennahe Geothermie .....	12
Abbildung 3:	Schema Erdkollektor .....	12
Abbildung 4:	Schema Erdwärmesonde .....	13
Abbildung 5:	Schema Schluckbrunnen .....	13
Abbildung 6:	Wärmeleitfähigkeiten des Bodens im Bundesland Bayern in 100 m Tiefe.....	24
Abbildung 7:	Vom Bayrischen Staatsministerium empfohlene geothermische Nutzungsmöglichkeiten.....	25
Abbildung 8:	Wärmeleitfähigkeiten des Bodens im Bundesland Hessen in 100 m Tiefe .....	26
Abbildung 9:	geothermische Eignungsgebiete und Verbotszonen .....	28
Abbildung 10:	Rasterdatensatz des Bundesland Sachsen-Anhalt .....	29
Abbildung 11:	Beispiel an Bohrdatensätzen für definiertes Gebiet.....	30
Abbildung 12:	Aufschlüsselung der Bodenstruktur.....	30
Abbildung 13:	Wärmeleitfähigkeiten des Bodens im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern bis 100 m Tiefe .....	31
Abbildung 14:	Übersicht der Wasserschutzgebiete gleichbedeutend mit geothermischen Eignungsgebiete und Verbotszonen .....	32
Abbildung 15:	mittlere Frosttage in Deutschland .....	33

Abbildung 16: Darstellung Frosttage gegenüber Anzahl der Zieltemperaturereignisse ..... 34

Abbildung 17: Wärmeverlustkurve eines MEGA Kollektor Segments..... 36

Abbildung 18: Schnee, der das gesamte Kollektorsegment bedeckt..... 39

Abbildung 19: Wärmeverlustberechnung ohne den Einfluss der globalen Strahlung für den Standort Garmisch-Partenkirchen..... 40

Abbildung 20: Wärmeverlustberechnung mit Einfluss der globalen Strahlung für den Standort Garmisch-Partenkirchen ..... 41

Abbildung 21: Gesamtüberblick der Verlustrechnungen ..... 42

Abbildung 22: Schemata von Sondenbohrung und Flächenkollektor kombiniert mit einer solarthermischen Anlage ..... 46

Abbildung 23: Hydraulikschema einer Tiefensondenanlage ..... 46

Abbildung 24: Kollektoranlage mit Erdwärmesonde ..... 49

Abbildung 25: Übersicht Kostenentwicklung bei Hochskalierung – links 13, rechts 180 MEGA-Kollektor Segmente..... 63

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Temperaturen in Bezug auf die jahreszeitlich niedrigsten mittleren Kollektortemperaturen bei definierten Volumenströmen..... 21

Tabelle 2: Entzugsleistung der Sonde bei definiertem Volumenstrom und Variation der der Sondenlänge 43

Tabelle 3: Jahressimulation der Sondenlängen für die freie Zirkulation..... 52

## 1 Abstract

The aim was to create the scientific and technical conditions for a water-powered large-scale thermal solar system to make a significantly greater ecological and economic contribution to climate protection in the future by means of a pilot and demonstration project accompanying the research. The greatest challenge lies in the ecological frost-free maintenance of a large-scale thermal solar plant as well as in the ideal system integration into a heating network, if the common heat transfer medium is water. Experience values in the field of water-driven large-scale solar systems, which are used in regions where the outside temperature is below 0°C for months at a time, are obviously not available at present. At the same time, the aim is to identify system deficiencies in such large-scale thermal solar systems and to point out technical and economic optimizations. This applies to the entire system as well as to individual components.

A system operation with water offers various advantages. For example, no separation of the heating circuit by a heat exchanger is required. In the case of stagnation, which often occurs in summer and the system is sometimes exposed to high temperatures, water changes into steam more quickly than water-glycol. This can be discharged with less system pressure and load on the system. There is no risk of the water decomposing, cracking and damaging the system as it is chemically stable even at high temperatures. However, the water must meet high requirements for operation. Above all, it must not contain any salts or minerals that could damage the system. However, it is also possible that the regional drinking water meets the manufacturer's specifications. If this is the case, there are only very low acquisition costs for the use in the plant.

## 2 Einleitung

Grundlegende Idee des Projektes war die Verbindung einer wassergeführten Solarkollektoranlage mit einer geothermischen Anlage, welche in freier Zirkulation Erdwärme zur Frostfreihaltung des Gesamtsystems nutzt. Ziel war es, durch ein theoretisches Rechercheprojekt die wissenschaftlich-technischen Voraussetzungen für weitere Überlegungen zu schaffen. Durch eine mit Wasser betriebene thermische Großsolaranlage wollen wir künftig einen deutlich höheren ökologischen und wirtschaftlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Dabei liegt die größte Herausforderung in der ökologischen Frostfreihaltung einer thermischen Großsolaranlage, als auch in der idealen Systemintegration in ein Wärmenetz, wenn das gemeinsame Wärmeträgermedium Wasser ist. Erfahrungswerte im Bereich von wasserbetriebenen Großsolaranlagen, die in Regionen zum Einsatz kommen, in denen die Außentemperatur monatsweise unter 0°C liegt, liegen derzeit offenkundig nicht vor. Zugleich ist das Ziel, Systemmängel bei derartigen thermischen Großsolaranlagen zu erkennen und technische sowie wirtschaftliche Optimierungen aufzuzeigen. Dies gilt für das gesamte System ebenso wie für einzelne Komponenten.

Das Projekt FroWaSo bezieht sich auf die Verwendung von Großkollektoren, spezifischer dem von AKOTEC entwickelten MEGA-Kollektor. Dieser weist in Hinblick auf den Betrieb besondere Ansprüche, wie Rohrdurchmesser und eine erhöhte Wärmeträgerflüssigkeitsmenge auf, liefert aber auch einen erhöhten Ertrag gegenüber Standardkollektoren. Laut einer Veröffentlichung auf [solar-district-heating.eu](http://solar-district-heating.eu) besteht derzeit eine jährliche Marktzuwachsrate von über 35 % in den letzten fünf Jahren im Ausbau solarer Wärmenetze. Aus diesem Grund wird es immer wichtiger, intelligente Lösungen für den Betrieb solcher Anlagen zu entwickeln.

Ein Anlagenbetrieb mit Wasser bietet verschiedene Vorteile. Es wird zum Beispiel keine Trennung des Heizkreislaufs durch einen Wärmetauscher benötigt. Im Falle der Stagnation, welche häufig im Sommer auftritt und die Anlage mitunter hohen Temperaturen aussetzt, geht Wasser schneller als Wasser-Glykol in Dampf über. Dieser kann mit weniger Anlagendruck und Belastung für die Anlage ausgeleitet werden. Es besteht keine Gefahr, dass sich das Wasser zersetzt, crackt und die Anlage beschädigt, da es auch bei hohen Temperaturen chemisch stabil ist. Für den Betrieb wird allerdings eine hohe Anforderung an das Wasser gestellt. Vor allem dürfen keine Salze oder Mineralien enthalten sein, die die Anlage beschädigen können.

Die Nutzung von Erdwärme zur Frostfreihaltung ist eine ökologisch interessante Möglichkeit alternative Technologien zu ersetzen. Sie steht nach menschlichem Ermessen für einen unendlich langen Zeitraum zur Verfügung. Im Zuge dieser Projektarbeit soll die Machbarkeit sowie die Sinnhaftigkeit einer solchen Frostfreihaltung bezogen auf den MEGA Kollektor untersucht werden. Die Grundsätze der Projektidee sind eine freie Zirkulation im System ohne weiteren Energieaufwand. Ebenso sollen Vorteile gegenüber herkömmlich verwendeten Systemen in Umweltfaktoren, Kosten und Betrieb geprüft werden. Hierbei wird lediglich die oberflächennahe Geothermie und explizit eine Sondenbohrung bis maximal 100m in Betracht gezogen.

### 3 Pflichtenheft

Für die Bearbeitung des Projektes wurde am Beginn ein Pflichtenheft erstellt, welches im Anhang zu finden ist. Das Pflichtenheft gab uns einen Leitfaden und rundete die Projektbearbeitung ab. In einer kurzen Übersicht enthält es:

- Allgemeine Beschreibung der Technologie
- Definition einer theoretischen MEGA Kollektor Anlage in Größe, Leistung, Flächenbedarf
  - Bestimmung von Parametern und Spezifikation
  - Abbildung der Leistungswerte
  - Ermittlung des Frostfreihaltebedarfs – bezogen auf Segmente
  - Bedingungen für Frostgefahr definieren
- Rückschlüsse auf benötigte Energie zur Frostfreihaltung

### 4 Möglichkeiten und Eigenschaften solarthermischer Großanlagen

Im folgenden Kapitel werden die Anforderungen sowie die Eigenschaften einer solarthermischen Großanlage beschrieben. Bezogen wird sich auf eine allgemeine Übersicht, die einzelnen Komponenten sowie nötige Berechnungen für eine beispielhafte Anlage folgen in Kapitel 8.

#### 4.1 Anlagenbeschreibung

Im Projekt wird eine thermische Großsolaranlage mit spezifischen Systemeigenschaften auf Basis geltender Normen betrachtet. Es kommt ein Großflächen-Vollvakuumröhrenkollektor, der MEGA-Kollektor, zum Einsatz, mit dem sich große zusammenhängende Kollektorfelder realisieren lassen ohne dabei Trassenleitungen verwenden zu müssen. **Die ideale Positionierung und Ausrichtung der Kollektoren** wird durch geeignete Kollektortragekonstruktionen realisiert und **richtet sich nach den örtlichen Gegebenheiten vor Ort, jedoch vorrangig nach dem optimalen Ertrag**. Die Kollektoranlage besteht mindestens aus einem kompakten Kollektorfeld. Wobei ein Kollektorfeld aus einer Aneinanderreihung einzelnen MEGA-Kollektor-Segmente besteht, deren Feldgröße unterschiedlich groß sein kann und die zueinander eine geschlossene Einheit bilden. Das Kollektorfeld (Energiequelle) ist dabei hydraulisch mit einem Wärmenetz (Energiesenke) gekoppelt. Der Wärmeaustausch erfolgt vorsorglich über einen Wärmetauscher, da die Wärmeträgermedien beider Systembereiche nicht immer den gleichen physikalischen Bedingungen entsprechen. Das bedeutet, dass der Wärmetransport im Kollektorkreis über ein geschlossenes Kreislaufsystem realisiert wird, das mit dem umweltfreundlichen Wärmeträgermedium "Wasser" befüllt ist. Damit das Wasser im kompletten Kollektorkreislauf bei Außentemperaturen unter 0°C nicht einfriert, muss der Kollektorkreislauf zwingend zu diesen Zeiten beheizt werden!

Die dafür benötigte Wärmeenergie kann dabei von einer entsprechenden geothermischen Anlage bereitgestellt und direkt in den Kollektorkreislauf eingespeist werden. Um die benötigte Wärmemenge bestmöglich von der geothermischen Anlage in den Kollektorkreislauf transportieren zu können, wird der Ausführung der Versorgungsleitung eine besondere Bedeutung beigemessen. Das bedeutet, dass die Versorgungsleitungen so ausgeführt werden müssen, dass die Erdwärme durch die Funktion einer Schwerkraftzirkulation in den Kollektorkreislauf eingebracht werden kann. Da Naturereignisse, wie plötzlicher Kälteeinbruch unter Normalwert, stets unerwartet auftreten und nicht vorhersehbar sind, wird im Frostfreihaltungskreislauf zur Notallabsicherung ein Zirkulationspumpe installiert.

Eine aktive Unterstützung (kurzzeitig) der Kollektorkreislaufzirkulation ist auch dann gegeben, wenn:

- durch die Gegebenheiten vor Ort die Ausführung der Rohrleitung so eingeschränkt wird, dass eine dauerhaft sichere Schwerkraftzirkulation nicht gewährleistet werden kann.
- durch die Temperaturüberwachung im Kollektorkreislauf festgestellt wird, dass die Temperatur am Wärmeträgermedium auf einen kritischen Wert absinkt.

Für die Bearbeitung der genannten Fragestellung wurde ein MEGA Kollektor entworfen, wie er in realen Projekten umgesetzt wird und aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften wie Druckverlust und Volumenstrom einem Optimum entspricht (Kapitel 8). Zusätzlich ist der Kollektor auf ein in der echten Anwendung ausgelegtes  $\Delta T$  zwischen Kollektoreingang und Austritt berechnet. Aus diesem Grund wird im weiteren ein MEGA Kollektor behandelt, welcher aus 14 MEGA Kollektor Segmenten zusammengesetzt ist.

## 4.2 Anforderungen

Die nachfolgenden Anforderungen beziehen sich auf eine thermische Großsolaranlage, die auf einem Freilandgelände steht und mit dem Wärmeträgermedium "Wasser" im Kollektorkreis ganzjährig betrieben wird. Um die Frostfreihaltung der Kollektoranlage sicher und dauerhaft gewährleisten zu können, wird die Solaranlage ab einer mittleren Kollektortemperatur  $T_m$  der Wärmeträgerflüssigkeit (Wasser) von 5°C selbsttätig beheizt. Die dabei benötigte Wärmemenge, wird von einer entsprechenden geothermischen Anlage (Energiequelle) bereitgestellt. Der Wärmeaustausch zwischen der Energiequelle und -senke funktioniert dabei nach dem Prinzip der Schwerkraftzirkulation. Dementsprechend müssen die Versorgungsleitungen darauf funktionell abgestimmt werden.

### 4.2.1 Kollektor und Kollektorgruppe

Alle Kollektoren müssen die in der DIN EN 12975-1 und DIN EN ISO 9806 angegebenen Anforderungen erfüllen. Hinsichtlich der Teile und Verbindungen der Kollektorgruppe sollte besonders darauf geachtet werden, dass die Langzeitbeständigkeit und Dichtheit der Kollektorverbindungen sichergestellt ist. Bei parallel verschalteten Kollektorfeldern, sollte ein ausgeglichener Durchfluss erreicht werden, indem die Kollektoren mit den Rohrleitungen strömungstechnisch aufeinander abgeglichen werden.

### 4.2.2 Kollektortragekonstruktion

Die Kollektortragekonstruktion muss die Beständigkeit gegen Korrosionen, Schnee- und Windlasten nach ENV 1991-2-3 und ENV 1991-2-4 mit Bezug auf die örtlichen Bedingungen entsprechen.

### 4.2.3 Versorgungsleitungen

Die Rohrleitungen und Anschlusswege der Solaranlage müssen so kurz wie möglich realisiert werden. Die für Rohrleitung und Anschlussstücke gewählten Werkstoffe müssen mit dem verwendeten Wärmeträgerfluid Wasser verträglich sein. Die Ausführung der Rohrleitung und die verwendeten Werkstoffe müssen Verstopfungen in den Kreisläufen generell ausschließen und höchster Betriebstemperatur (Stagnationsbedingungen) und Betriebsdruck standhalten. Die Rohrleitungsführung zwischen der Geothermie- und Solaranlage muss so ausgeführt werden, dass der Wärmetransport über freie Konvektion bzw. Schwerkraftzirkulation erfolgen kann. Des Weiteren müssen Rohrleitungen den fortwährenden thermischen Wechselwirkungen standhalten, ohne Schaden zu nehmen oder sich nachteilig zu verformen. Eine Entlüftung der Solaranlage muss stets möglich sein. Vorzugsweise an den Stellen des Kollektorkreislaufs,

wo Rohrleitungsabsenkungen (Siphonleitungen) sich nicht vermeiden lassen, am höchsten Punkt der Solaranlage und dort wo Dampf auftreten kann. Es dürfen keine automatischen Entlüftungseinrichtungen eingebaut werden, außer wenn zwischen der Rohrleitung und der automatischen Entlüftung ein manuelles Ventil angebracht wurde, das während des allgemeinen Anlagebetriebes geschlossen ist.

#### 4.2.4 Wärmedämmung nach EnEV/GEG

Die EnEV schreibt die Mindestanforderungen für Dämmdicke an Rohrleitungen und Armaturen im Außenbereich vor<sup>1</sup>. Im Außenbereich stellt der Regelfall eine sogenannte 200%-Dämmung dar. Das heißt, alle Rohrleitungen mit einer Dämmstärke zu ummanteln, die mindestens dem zweifachen Innendurchmesser der Rohrleitung entspricht! Dies gilt bei Verwendung von Dämmstoffen mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$ . Die Wärmedämmung aller Verbindungsrohre und anderen Bauteilen der Anlage muss diese Anforderungen erfüllen. Wärmebrücken, wie z.B. falsch installierte Befestigungsklemmen, sollten vermieden werden. Die Wärmedämmung der Rohrleitungen muss aus Werkstoffen bestehen, die gegen höchste und niedrigste im Kreislauf auftretende Temperaturen sowie gegen Verformung beständig sind und betriebsfähig bleiben. Gedämmte Rohrleitungen im Freien müssen zudem vor Sonnenstrahlung, Wittereinwirkung und Schlägeinwirkung dauerhaft geschützt sein.

#### 4.2.5 Pumpenstation

Die Pumpenstation, die den Wärmetransport von der Solaranlage zum Wärmenetz realisiert, muss den spezifischen Anlagenanforderungen und geltenden Normen entsprechen. Die Zirkulationspumpe, die zwischen der geothermischen Anlage und der Solaranlage zum Einsatz kommt, muss den spezifischen Anlagenanforderungen und geltenden Normen entsprechen.

#### 4.2.6 Membran-Ausdehnungsgefäße (MAG)

Die Auslegung des Membran-Ausdehnungsgefäße im Kollektorkreislauf erfolgt nach den geltenden Normen, EN12828 sowie VDI 6002. Dabei muss das MAG so bemessen sein, dass bei einem Ausfall der Umwälzpumpe (z.B. Stromausfall) und max. Sonneneinstrahlung die komplette Volumenausdehnung vom Wärmeträgermedium aufgenommen werden kann. Dabei darf das Sicherheitsventil nicht ansprechen.

#### 4.2.7 Regler

Der Regler sollte nach DIN ENV 12977-2 geprüft sein und allen anderen Anlagenanforderungen entsprechen. Der Regler muss über eine Kollektor- und Wärmetauscher-Frostschutzfunktion verfügen. Wenn die im Regler einstellbare Frostschutztemperatur am externen Sensor unterschritten wird, schaltet der Regler die Zirkulationspumpe für die aktive Frostfreihaltung mit 100 % Drehzahl ein. Dabei findet ein Wärmeaustausch zwischen der Geothermieanlage und dem Kollektorkreislauf statt, der das Wärmeträgermedium (Wasser) gegen Einfrieren und Eindicken schützt. Wenn die Temperatur am externen Sensor die Frostschutztemperatur um 1 K überschreitet, wird die Zirkulationspumpe ausgeschaltet. Dabei arbeitet die Frostschutzfunktion unabhängig von allen anderen Funktionen im Regler.

#### 4.2.8 Temperaturfühler

Temperaturfühler und Fühlerkabel müssen den an der Messstelle maximal auftretenden Temperaturen

---

<sup>1</sup> Energieeinsparverordnung, Anlage 5, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2009

dauerhaft standhalten. Dabei dürfen Fühlerkabel nicht mit den heißen Rohrleitungen in Verbindung kommen. Fühlertauchhülsen werden grundsätzlich so ausgeführt werden, dass im Inneren einer Fühlertauchhülse sich bildendes Kondenswasser stets abfließen kann. Der Ort der Messstelle und die Anordnung der Temperaturfühler müssen sicherstellen, dass ein guter thermischer Kontakt zu der Messstelle besteht, deren Temperatur gemessen werden soll. Die Temperaturfühler müssen gegen die Umgebung wärmegeämmt sein.

#### **4.2.9 Sicherheitsventile**

Jeder Abschnitt einer abschaltbaren Baugruppe muss mit mindestens einem geeigneten und ausreichend dimensionierten Sicherheitsventil ausgestattet sein. Das Sicherheitsventil gewährleistet eine Anlagenabsicherung und richtet sich nach dem schwächsten Bauteil, das in der Anlage verbaut wurde. Das Sicherheitsventil unterliegt der Druckgeräterichtlinie und muss den max. auftretenden Temperaturen standhalten und für den Wärmeträger geeignet sein. Es muss so bemessen sein, dass es die höchste Durchflussmenge von heißem Wasser und Dampf hindurchlässt, die auftreten kann.

#### **4.2.10 Sicherheits- und Ausdehnungsleitungen**

Die Sicherheitsleitung darf nicht abgestellt werden können. Die Dimensionierung der Sicherheits- und der Ausdehnungsleitung müssen nach den derzeit gelten Richtlinien ausgeführt werden. Die Sicherheitsleitung und die Ausdehnungsleitung müssen so verlegt und miteinander verbunden werden, dass jede Ansammlung von Schmutz oder ähnlichen Verunreinigungen verhindert wird.

#### **4.2.11 Abblaseleitungen**

Die Abblaseleitungen vom Sicherheitsventil müssen so ausgeführt werden, dass sie nicht einfrieren und sich innerhalb dieser Leitungen kein Wasser ansammeln kann. Die Öffnungen der Abblaseleitungen müssen so angeordnet sein, dass aus den Sicherheitsventilen austretender Dampf oder austretender Wärmeträger für Menschen, Werkstoffe und Umwelt keine Gefahr darstellt. Die Abblaseleitungen sollte nie in geschlossenen Räumen enden.

#### **4.2.12 Anzeigeeinrichtung für den Durchfluss im Kollektorkreislauf**

Die Anlage sollte mit einer geeigneten Anzeigeeinrichtung für den Durchfluss im Kollektorkreislauf ausgerüstet sein.

#### **4.2.13 Druckmessgerät**

Die Anlage muss im Kollektorkreislauf über eine geeignetes Druckmessgerät verfügen, um den wirkenden Überdruck in der Anlage klar erkennbar ablesen zu können. Der Bereich des Betriebsüberdrucks muss dabei klar ersichtlich gekennzeichnet werden.

#### **4.2.14 Wärmezähler**

Der Kollektorkreislauf sollte mit einem geeigneten Wärmemengenzähler ausgerüstet sein.

#### **4.2.15 Anlagenerdung und Blitzschlag**

Die komplette Anlage muss die Anforderungen nach ENV 61024-1 erfüllen.

#### 4.2.16 Schnee- und Windlasten

Anlagenteile, die im Freien installiert sind, müssen gegen Schnee- und Windlasten nach ENV 1991-2-3 und ENV 1991-2-4 beständig sein.

#### 4.2.17 Wärmeträgermedium

Die Wasserqualität in der Anlage richtet sich an den Anforderungen der VDI 3035. Somit ist die Anlage mit vollentsalztem Wasser unter Verwendung eines Wasserfiltersystems und Ionenaustauscher zu betreiben.

#### 4.2.18 Werkstoffe

Sämtliche Teile der Anlage, die im Freien verbaut werden, müssen gegen UV-Strahlung und andere Wetterbedingungen beständig sein. Um Korrosion zu vermeiden, sollten alle im Kollektorkreislauf verwendeten Werkstoffe die ISO/TR 10217 erfüllen. Sämtliche Bauteile und Baugruppe die in der Anlage zum Einsatz kommen, müssen den min. und max. auftretenden Temperaturen standhalten. Vorsicht ist in Fällen geboten, wo unter Stagnationsbedingungen Dampf oder heißes Wasser in Baugruppen, Rohrleitungen oder Wärmetauscher eintreten kann.

#### 4.2.19 Druckbeständigkeit

Alle anlagenspezifische Komponenten müssen die Anforderungen nach EN 12897 und nach EN 12975-1 erfüllen. Alle Bauteile innerhalb der Anlagen, die von EN 12897 oder EN 12975-1 nicht erfasst werden, müssen für den Teil der Anlage, in dem sie verwendet werden, den 1,5-fachen des vom Hersteller angegebenen maximalen Betriebsdruckes entsprechen. Dabei sollten alle Anlagenkomponenten so ausgeführt sein, dass sie auch kurzzeitigen hohen Druckspitzen standhalten, falls auf Grund von Stagnation größere Mengen des Wärmeträgeres in der Kollektorgruppe verdampfen und Druckspitzen verursachen.

## 5 Anforderungen und Eigenschaften geothermischer Wärmeversorgung

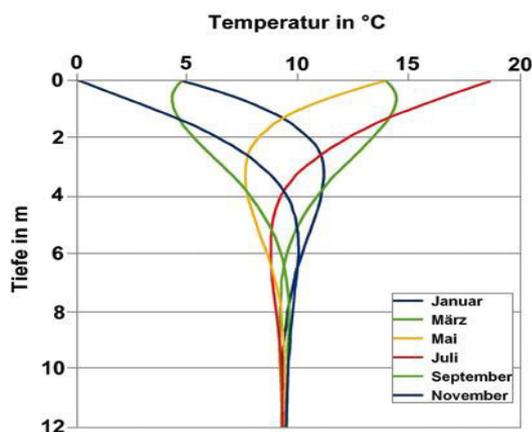


Abbildung 1: Temperaturverlauf mit der Tiefe im ungestörten Erdreich

um einen sensiblen Bodenbereich, der stark von saisonalen Klimaeinflüssen wie Sonneneinstrahlung,

Geothermie wird als die Wärmeenergie bezeichnet, welche in der Erdkruste gespeichert ist und ingenieurtechnisch genutzt wird<sup>2</sup>. Dabei wird der Bereich bis zu einer Tiefe von 400 m als oberflächennahe Geothermie bezeichnet. Für die Erschließung der oberflächennahen Geothermie gibt es unterschiedliche erprobte geothermische Systeme, die zur Gewinnung von Erdwärme genutzt werden. Dabei kann es sich um ein großflächiges Rohrleitungssystem (Erdwärmekollektoren) handeln, das bis zu einer Tiefe von 5 m im Boden vergraben wird, oder um eine Erdwärmesonde die bis zu einer Standardtiefe von 100 m vertikal im Boden eingebracht wird. Ein besonderes Augenmerk sollte jedoch auf die Bodentemperatur bis zu einer Tiefe von 20 m gelegt werden. Es handelt sich hierbei

<sup>2</sup> Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/geothermie#oberflachennahe-geothermie>, 2021

Wärmeaustausch mit der Luft und Versickerung von Regenwasser beeinflusst wird. Erst ab einer Tiefe von etwa 20 m stabilisiert sich die Erdwärme auf ca. 10 °C. Je tiefer man jetzt in den Untergrund vordringt, desto wärmer wird es. In Mitteleuropa steigt die Bodentemperatur kontinuierlich um durchschnittlich 3 °C ± 0,5 pro 100 m Tiefe an. Dies kann jedoch von Region zu Region stark variieren, da nicht überall die gleichen Gesteinseigenschaften oder Gesteinsformationen vorherrschen.

Ab einer Tiefe von ca. 20 Metern kann der Einfluss der Sonne sowie der Oberflächenverhältnisse ausgeschlossen werden. Bei sachgerechter Bewirtschaftung ist diese Wärme praktisch unerschöpflich. Deshalb zählt Erdwärme zu den erneuerbaren Energien. Im Gegensatz zu den meisten anderen erneuerbaren Energien ist Erdwärme eine Energie, die krisensicher und unabhängig von Witterung und Tageszeit immer und praktisch überall zur Verfügung steht.

Bodentemperaturen bei Tiefen von:

- 1 m                                    5 °C bis 15 °C
- 2 m                                    7 °C bis 13 °C
- 5 m                                    8 °C bis 12 °C
- 10 m                                   9 °C bis 11 °C
- 15 m                                   9,5 °C bis 10,5 °C
- 20 m                                   10 °C ± 0,2
- **Ab 20 m                            10 °C+ 3 °C je 100 m Bodentiefe**
- 100 m                                13 °C ± 0,5
- 400 m                                22 °C ± 0,5

Bodentemperaturen je Monat bis zu einer Tiefe von 20m:

- Jan. / Feb. / März                0 °C bis 11 °C
- April / Mai / Juni                 7 °C bis 10 °C
- Juli / Aug. / Sep.                 10 °C bis 19 °C
- Okt. / Nov. / Dez.                10 °C bis 13 °C

Die wesentlichen Parameter für den Wärmeentzug sind die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität des Untergrundes. Beide Faktoren sind abhängig von der Wassersättigung und steigen mit zunehmendem Wassergehalt. Bei der Gewinnung ist grundsätzlich eine hohe Leitfähigkeit sowie Kapazität von Vorteil. Aus diesem Grund ist ebenso eine hohe Wassersättigung von Vorteil. Für die Auslegung von Erdwärmequellen ist die spezifische Entzugsleistung der relevante Kennwert. Die Entzugsleistung gibt die pro Dimensionseinheit zur Verfügung stehende Wärmeleistung an. Für Erdwärmesonden wird sie somit in W/m Sondenlänge angegeben und für Erdwärmekollektoren in W/m<sup>2</sup>. Die Entzugsleistung ist ein errechneter Wert, der sich aus verschiedenen Parametern zusammensetzt. Die Wärmeleitfähigkeit bildet einen Faktor dafür.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Vgl. Oberflächennahe Geothermie, Heizen und Kühlen mit Energie aus dem Untergrund, Bayrisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMGUV), 2005, S.6

## 5.1 Oberflächennahe Geothermie

### 5.1.1 Definition Oberflächennah

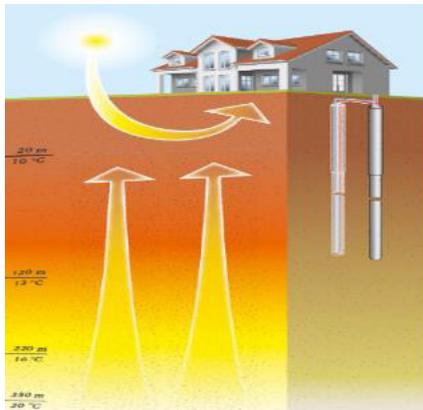


Abbildung 2: Schema oberflächennahe Geothermie

Betrachtet man nur die oberflächennahe Geothermie, so handelt es sich um geothermische Energie, die unterhalb der Erdoberfläche bis zu einer Tiefe von 400 m genutzt wird. Die Tiefengrenze der oberflächennahen Geothermie von 400 m ist in der VDI-Richtlinie 4640 erläutert. Für die Erschließung der oberflächennahen Geothermie gibt es verschiedene Anwendungssysteme, die zur Gewinnung der geothermischen Energie dabei eingesetzt werden. Dies kann über einen Erdwärmekollektor, einer Erdwärmesonde oder einen Wärmebrunnen realisiert werden. Diese werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

### 5.1.2 Erdwärmekollektor

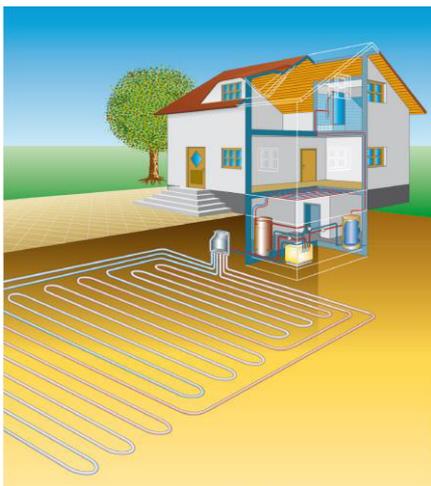


Abbildung 3: Schema Erdkollektor

Erdwärmekollektoren nutzen hauptsächlich die durch die Sonne eingestrahelte Wärmeenergie des Erdreichs. Sie sind Wärmetauscher und werden in der Regel horizontal in einer Tiefe von 1 bis 2 m unter der Geländeoberkante und oberhalb des Grundwasserstandes entweder direkt in den Boden oder in die Fundamente (unterhalb der Frostgrenze) verlegt. Das Rohrmaterial ist ein hochtemperaturbeständiger Polymer-Kunststoff. Das Wärmeträgermedium ist hier in der Regel ein Wasser/Frostschutzmittel Gemisch. Eine Regeneration der entzogenen Wärme geschieht hier durch die Jahreszyklen. Dies bedarf jedoch einer genauen Dimensionierung der Anlage. Bei dieser Art der Kollektoren ist nicht ausgeschlossen, dass in einem harten Winter der umliegende Boden gefriert. Dadurch wird mitunter die Versickerungsmöglichkeit des Oberflächenwassers beeinträchtigt.

Aufgrund des enormen Flächenbedarfs, der das Doppelte der zu beheizenden Fläche betragen kann, wird diese Art der Kollektoren kaum angewendet. Außerdem darf die Fläche über den Kollektoren nicht versiegelt werden und sollte nur mit flachwurzelnenden Pflanzen begrünt sein<sup>4</sup>.

In der Praxis existieren verschiedene Arten von Flächenkollektoren mit teils abweichenden Eigenschaften, die im folgendem aufgelistet werden:

- |   |                 |     |           |
|---|-----------------|-----|-----------|
| - Flächen- Flachkollektor                     | L >20m x B >20m | bis | 2m Tiefe  |
| - Flächen-Grabenkollektor                     | Länge > 80m     | bis | 2m Tiefe  |
| - Flächen-Spiralkollektor                     | Ø 0,5m x 3m     | bis | 4m Tiefe  |
| - Erdberührte Betonbauteile und Energiepfähle |                 | bis | 12m Tiefe |

<sup>4</sup> UmweltWissen – Klima & Energie - Oberflächennahe Geothermie, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2010, S.4

### 5.1.3 Erdwärmesonden

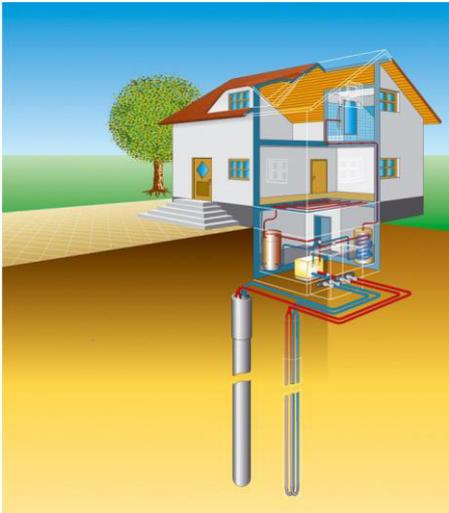


Abbildung 4: Schema Erdwärmesonde

Die häufigste Bauform von Erdwärmesonden bestehen aus einem oder zwei U-Rohren, die in einem vertikalen Bohrloch versenkt werden. Die Bohrungen sind meistens bis Tiefen unter 100 m eingebracht. Es gibt jedoch auch Ausnahmen bis Tiefen von über 200 m. Mit Erdwärmesonden kann dem Untergrund durch das Wärmetauscherprinzip über eine Wärmeträgerflüssigkeit die Wärme entzogen werden. Seltener werden ebenso einfache U-Sonden sowie Koaxialsonden aus einem Innen- und Außenrohr angewendet. Das Material der Sonden ist in der Regel ein Kunststoff. Erdwärmesonden entziehen zumeist dem grundwassergefüllten Gesteinsbereich die Wärme. Die Regeneration im Erdreich geschieht durch allmählich nachströmende Wärme. Für kleine Anlagen, zum Beispiel für die Beheizung eines Einfamilienhauses, wird eine Leistung von max. 30 kW und eine Bohrlochtiefe von bis zu 100 m benötigt. Da die Temperatur in den angewendeten Tiefen nicht für

den Betrieb einer Heizung ausreicht, wird eine Erdwärmesonde in der Praxis nahezu immer in Kombination mit einer Wärmepumpe betrieben<sup>5</sup>.

Bei der Installation einer Erdsonde entsteht zwischen der Sonde und der Wand des Bohrlochs ein Ringspalt. Um zu verhindern, dass hierdurch eine hydraulische Verbindung zwischen Grundwasserstockwerken entsteht oder Oberflächenwasser eindringt, wird der Ringspalt mit einer Mischung aus Zement und Bentonit gefüllt. Dies dient als Dichtung und Stabilisierung, aber auch als direkter Wärmeüberträger. Die Lebensdauer, die Effizienz und die Unschädlichkeit hängen wesentlich von der korrekt eingebrachten Zementation ab<sup>6</sup>.

### 5.1.4 Grundwasser-Wärmepumpe/Schluckbrunnen

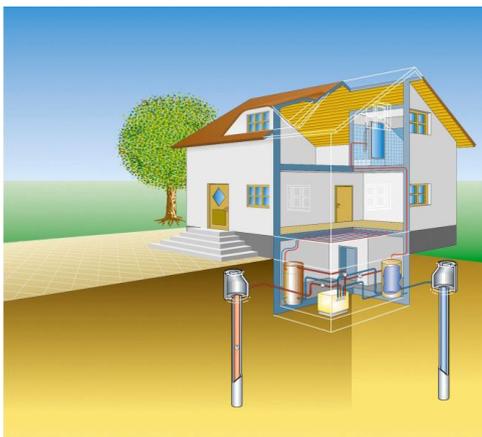


Abbildung 5: Schema Schluckbrunnen

Ebenfalls zur Gewinnung von Erdwärme genutzt werden kann das Grundwasser. Sofern es in konstant ausreichender Menge verfügbar ist, ist eine direkte Verwendung möglich. Das Grundwasser wird über einen extra dafür errichteten Brunnen, direkt zur Wärmepumpe gefördert und über einen Schluckbrunnen dem genutzten Grundwasserleiter wieder zugeführt. Die Entnahme- und Einleitmengen richten sich nach dem Energiebedarf (Anlagengröße) und den hydrogeologischen Gegebenheiten. Ein Vorteil dieser Technologie ist die über das gesamte Jahr konstante Temperatur. Vor der Errichtung ist jedoch zu prüfen, ob ein ausreichender Wasserkörper zur Verfügung steht. Außerdem ist beim Bau der Brunnen die Fließrichtung des Grundwassers zu beachten.<sup>7</sup>

<sup>5</sup> UmweltWissen – Klima & Energie - Oberflächennahe Geothermie, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2010, S.5

<sup>6</sup> VDI 4640, Blatt2 – Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt 2019

<sup>7</sup> UmweltWissen – Klima & Energie - Oberflächennahe Geothermie, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2010, S.6

## 5.2 Allgemeine Anforderungen an das System

Die nachfolgenden Anforderungen beziehen sich auf eine Erdwärme-Sonden-Anlage, die mit dem Wärmeträgermedium "Wasser" gefüllt ist. Die Anlage muss eine thermische Großsolaranlage in der Zeit mit Wärmeenergie versorgen, in der die durchschnittliche Kollektortemperatur unter 5 °C fallen kann. Dabei soll der Wärmeaustausch zwischen der Wärmequelle (Geothermie) und der Wärmesenke (Solaranlage) autark funktionieren.

Bei der Auslegung von Erdwärmesonden sind die Vorgaben aus der VDI 4640 Blatt 2 zu beachten. Hier wird u.a. die Wärmeentzugsleistung zu den verschiedensten Gesteinsformationen übersichtlich dargestellt. Erfahrungsgemäß kann hingegen bei einer benötigten Wärmeleistung von  $\leq 30$  kW eine vom Untergrund unabhängige Wärmeentzugsleistung von **50 W/m** angenommen werden und das bei 1.800 Volllaststunden. Dabei sollte die jährliche Entzugsenergie zwischen 100 und 150 kWh/m liegen. Für Anlagen mit einer benötigten Wärmeleistung von  $>30$  kW muss eine separate Berechnung mit einem Simulationsprogramm durchgeführt werden. Entscheidend für einen kontinuierlichen Wärmeentzug aus dem Untergrund sind jedoch die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und die spezifische Wärmekapazität  $C_p$  der jeweiligen Bodenformation.

### 5.2.1 Betriebstemperatur der Erdwärmesonde

Die in die Erdwärmesonde einströmende Wärmeträgerflüssigkeit sollte die Temperatur von 0 °C nicht unterschreiten.

Bei Temperaturunterschreitung entstehen folgende Situationen:

- Frost-Tau-Wechsel in verfülltem Ringraum der Erdwärmesonde
- Einfrieren der Wärmeträgerflüssigkeit (Wasser)

### 5.2.2 Spezifische Wärmeleitfähigkeit $\lambda$

Die Wärmeleitfähigkeit [W/mK] gibt an, wie gut der Wärmestrom durch einen Stoff aufgrund der Wärmeleitung ist. Dabei gibt der Wärmestrom [W] an, in welcher Zeit eine Wärmeenergie übertragen werden kann und die Wärmeleitung definiert die Richtung. Die Wärmeleitfähigkeit gibt somit an, wie gut eine Gesteinsformation Wärme leiten kann. Es handelt sich also um eine gesteinspezifische Eigenschaft, die vom Mineralgehalt, der Porosität und der Porenfüllung abhängt. Luft ist ein schlechter Wärmeleiter, daher haben trockene Sedimente eine geringere Wärmeleitfähigkeit. Wasser hat hingegen eine gute Wärmeleitfähigkeit, daher besitzen wassergesättigte Sedimente eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Deshalb werden in den Karten der VDI-Richtlinie 4640 zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit die Grundwasserverhältnisse (Bodenfestigkeit) mitberücksichtigt. Je größer dieser Wert ist, desto besser ist die Wärmeleitung der Gesteinsformation und gibt an, wie schnell eine aus einer Gesteinsformation entzogene Wärmemenge wieder nachfließen kann.

### 5.2.3 Spezifische Entzugsleistung

In der Geothermie versteht man unter Entzugsleistung die Wärmemenge, die einer Gesteinsformation pro Sekunde entzogen wird. Üblicherweise wird die Entzugsleistung auch auf die Bohrlochtiefe bezogen, wobei dann dieser Wert tiefenabhängig ist und somit eine spezifische Entzugsleistung definiert und in [W/m] angegeben wird. Im Gegensatz zur spezifischen Wärmeleitfähigkeit ist die spezifische Wärmeentzugsleistung eine Größe, die von zahlreichen speziellen Randbedingungen abhängt:

- gesteinspezifisches Wärmetransportvermögen
- technische Größen der Erdwärmesonde

- Anzahl der Betriebsstunden
- gegenseitige Beeinflussung benachbarter Erdwärmesonden
- Bohrlochgröße (Tiefe, Breite, Durchmesser)
- Mächtigkeit der Schichtpakete
- Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials

In der VDI 4640 Blatt 2 werden die spezifischen Entnahmeraten für unterschiedliche Untergründe, geologische Profile und Mächtigkeiten angegeben.

Allgemeine Richtwerte<sup>8</sup>

Volllaststunden:		1.800 – 2.400
Untergrund	Wärmeleitfähigkeit	spez. Entzugsleistung
Schlechter Untergrund	1,5 – 1,6 W/mK	25 - 20 W/m
Wassergesättigtes Sediment u. Festgestein	1,5 - 3,0 W/mK	60 -50 W/m
Festgestein	3,0 – 3,1 W/mK	80 - 70 W/m

Einzelne Gesteine

Volllaststunden:		1.800 – 2.400
Untergrund	Wärmeleitfähigkeit	spez. Entzugsleistung
Kies, Sand trocken	0,3 - 0,9 W/mK	< 20 W/m
Kies, Sand wasserführend	2,0 - 3,0 W/mK	65 - 55 W/m
Ton, Lehm feucht	1,1 - 3,1 W/mK	40 - 30 W/m
Kalkstein (massiv)	2,0 - 3,9 W/mK	60 - 45 W/m
Sandstein	1,9 - 4,6 W/mK	65 - 55 W/m
Granit (Saure Magmatite)	2,1 - 4,1 W/mK	70 - 55 W/m
Basalt (Basische Magmatite)	1,3 - 2,3 W/mK	55 - 35 W/m
Gneis	1,9 - 4,0 W/mK	70 - 60 W/m
Starker Grundwasserfluss, Sand & Kies	2,0 - 3,0 W/mK	100 - 80 W/m

Beispiel:

Geologisches Profil Kassel bei 1.800 Volllaststunden

1.	Schicht	11,5 m	Kies trocken	20 W/m	230,0 W
2.	Schicht	24,0 m	Sand wasserführend	65 W/m	1.560,0 W
3.	Schicht	5,8 m	Ton feucht	40 W/m	232,0 W
4.	Schicht	16,7 m	Sand wasserführend	65 W/m	1.085,5 W
5.	Schicht	55,3 m	Ton feucht	40 W/m	2.212,0 W
Entzugsleistung		<b>113,3 m</b>	Sonden-Länge bzw. -Tiefe		<b>5.319,5 W</b>

<sup>8</sup> Oberflächennahe Geothermie, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, [www.umweltministerium.bayern.de](http://www.umweltministerium.bayern.de), 2021

Wenn das genaue Untergrundprofil bekannt ist, kann die geothermische Entzugsleistung recht genau bestimmt werden. So ergibt das Untergrundprofil bei Kassel eine Entzugsleistung von 5.319,5 W über der Bodentiefe von 113,3 m. Liegen jedoch keine genauen Informationen über das Untergrundprofil vor, so kann die geothermische Entzugsleistung auch mit dem Erfahrungswert von 50 W/m (spezifische Entzugsleistung) berechnet werden. So ergibt sich bei einer Bodentiefe von 113,3 m eine Entzugsleistung von 5.665 W ( $113,3 \text{ m} \times 50 \text{ W/m} = 5.665 \text{ W}$ ). Vergleicht man die beiden Ergebnisse (5.319,5 W - 5.665 W) miteinander, so stellt man fest, dass der Erfahrungswert von 50 W/m (spez. Entzugsleistung) ein sehr guter Rechenwert zur Bestimmung der Entzugsleistung vom Untergrund ist.

#### 5.2.4 Wärmedämmung nach EnEV/GEG

Alle Rohrleitungen müssen den Richtlinien der aktuell gültigen EnEV entsprechen (siehe Kapitel 4.2.4.). Rohrleitungen, die sich bis zu einer Tiefe von 0,8 m im Erdreich befinden, sollten eine sogenannte 100%-Dämmung haben. -

#### 5.2.5 Werkstoff und Eigenschaften von Erdwärmesonde

Für den Bau der Erdwärmesonden wird Kunststoff aus Polyethylen verwendet. Dieser kann jedoch in seinen Eigenschaften je nach zu erwartenden Systemanforderungen variieren. Im Folgendem werden die drei hauptsächlich verwendeten Varianten vorgestellt<sup>9</sup>.

In der Regel wird Polyethylen als bewährter Werkstoff für Erdwärmesonden eingesetzt, vorwiegend **PE 100 / SDR 11**.

- PE lässt sich sehr gut und leicht verarbeiten.
- PE ist gegenüber Chemikalien sehr gut beständig, selbst gegenüber Säuren und Laugen
- PE ist gegenüber Punktlasten sehr gut geeignet.
- Die Durchlässigkeit von Wasserdampf ist minimal - eine Eigenschaft, die bei Erdwärmesonden eine wichtige Rolle spielt.
- PE erfüllt die Anforderungen des Lebensmittelgesetzes.
- PE ist ein ausgezeichneter elektrischer Isolator.

Erdwärmesonden aus dem Werkstoff **PE 100-RC** sind besonders beständig gegenüber Punktlasten und langsamem Risswachstum.

Erdwärmesonden aus dem Werkstoff **PE-Xa** haben eine sehr gute mechanische Festigkeit und bieten einen optimalen Schutz gegenüber Punktlasten, langsamen Risswachstum und äußeren Beschädigungen.

Vor allem hat der Werkstoff PE-Xa eine hohe Temperaturbeständigkeit bis zu 95 °C und kurzzeitig bis zu 100 °C. Deshalb sind Erdwärmesonden aus dem Werkstoff PE-Xa perfekt für den Einsatz mit Solarthermieanlagen geeignet. Demzufolge kommt in diesem Anlagenkonzept eine Erdwärmesonde mit dem Werkstoff PE-Xa zum Einsatz.

---

<sup>9</sup>Produktinformationen, FRANK GmbH, [www.frank-gmbh.de](http://www.frank-gmbh.de), 2021

Eigenschaft	Norm	Einheit	PE 100	PE 100-RC	PE-Xa
<b>ALLGEMEIN</b>					
MFR 190/5 (°C/kg)	DIN EN ISO 1133-1	g/10 min	0,2 ... 0,7	0,2 ... 0,4	k. A.
MFI-Gruppe	DIN EN ISO 1872-1	-	T003 - T005	T003	k. A.
Dichte (bei 23°C)	DIN EN ISO 1183-1/-2	g/cm <sup>3</sup>	0,96	0,96	0,94
MRS-Klassifizierung (bei 20°C)	DIN EN ISO 9080	N/mm <sup>2</sup>	10	10	9,5
Rauhigkeitsbeiwert	---	-	0,01	0,01	0,01
Betriebsdruck		bar	15	15	15
Min. Betriebstemperatur	---	°C	- 40	- 40	- 50
Max. Betriebstemperatur		°C	60	60	95
Kurzzeitige max. Temperatur		°C	70	70	100

#### MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

E-Modul (Zugversuch)	EN ISO 527-1	N/mm <sup>2</sup>	1000 - 1200	1000 - 1200	600 - 900
Streckspannung	EN ISO 527-1	N/mm <sup>2</sup>	≥ 23	≥ 23	19 - 26
Bruchdehnung (bei 20°C)	EN ISO 527-1	%	~ 350	≥ 350	> 350
Kugeldruckhärte	DIN EN ISO 2039-1	MPa	60	60	-
Kerbschlagzähigkeit (bei 20°C)	DIN ISO 179-1/180	kJ/m <sup>2</sup>	≥ 13	≥ 13	kein Bruch
Spannungsrisssbeständigkeit	DIN EN 12814-3	h	≥ 300	≥ 8760	> 8760

#### THERMISCHE EIGENSCHAFTEN

Längenausdehnungskoeffizient (bei 20°C)	---	k <sup>-1</sup> x 10 <sup>-4</sup>	1,8	1,8	1,4
	---	mm/mK	0,18	0,18	0,14
Vicat-Erweichungstemperatur VST/B/50	ISO 306	°C	77	77	133
Brandklasse	UL94	-	94-HB	94-HB	-
	DIN 4102	-	B2	B2	B2
Wärmeleitfähigkeit (bei 20°C)	DIN 52612-2/-3	W/mK	0,42	0,42	0,38

#### ELEKTRISCHE EIGENSCHAFTEN

Spez. Durchgangswiderstand	DIN IEC 60093	Ω cm	> 1016	> 1016	> 1015
Oberflächenwiderstand	DIN IEC 60093	Ω	> 1013	> 1013	> 1013
Durchschlagfestigkeit	DIN EN 60243-1	kV/mm	70	70	60 – 90

### 5.2.6 Prüfung der Erdwärmesonden

Eine Erdwärmesonde sollte unmittelbar vor dem Einbringen in das Bohrloch auf äußerliche Schäden untersucht und mit einem geeigneten Drucktest auf Unversehrtheit geprüft werden. Eine Erdwärmesonde darf nur nach bestandem Drucktest und Unversehrtheit ins Erdreich eingebaut werden. Dabei sollten die Prüfbedingungen als auch das Prüfergebnis in einem Prüfprotokoll festgehalten werden.

### 5.2.7 Einbringung der Erdwärmesonde

Das Errichten einer Erdwärmesondenanlage kann nur durch ein Bauunternehmen erfolgen, das eine Zulassung nach DVGW W120 besitzt. Um das Einbringen der Erdwärmesonde in ein Bohrloch zu erleichtern, sollte die Erdwärmesonde vorzugsweise mit einem geeigneten Sondengewicht versehen werden. Sollte das Bohrloch mit Wasser gefüllt sein, empfiehlt es sich die Sonde zusätzlich mit Wasser zu befüllen, um den

Auftrieb der Sonde im wassergefüllten Bohrloch entgegen zu wirken. Bei trockenen Bohrlöchern ist die Sonde spätestens vor dem Verpressen des Bohrlochs mit Wasser zu füllen. Die Erdwärmesonde wird üblicherweise über eine Abrollvorrichtung zusammen mit dem Verfüllrohr in das Bohrloch eingebracht. Die Verpressung der Sonden muss gemäß der VDI 4640 Teil 2 so erfolgen, dass eine dauerhafte physikalisch und chemisch stabile Einbindung der Sonde an das Gestein gewährleistet wird und sich in der Verpressung keine Lufteinschlüsse oder Hohlräume befinden. Nur bei dieser gemäß der VDI 4640 durchgeführten ordnungsgemäßen Verpressung des Ringraums eines Bohrlochs kann die Betriebssicherheit, insbesondere von tieferen Sonden sichergestellt werden. Das Verfüllmaterial, das zur vollständigen Verfüllung des Ringraums vom Bohrloch benötigt wird, muss den geforderten Eigenschaften von Wärmeleitfähigkeit, Umweltverträglichkeit, Dichte und Wasserdurchlässigkeit entsprechen.

### 5.2.8 Anschluss der Sonde und Druckprüfung

Nach Verfüllen des Bohrlochs wird die Abschlussprüfung nach VDI 4640 an der befüllten und entlüfteten Sonde durchgeführt. Dabei sollten die Prüfbedingungen als auch das Prüfergebnis in einem Prüfprotokoll festgehalten werden. Die Vor- und Rücklaufleitung der Erdwärmesonde wird an den jeweiligen Verteiler parallel angeschlossen. Der Verteiler sollte zusammen mit einer geeigneten Entgasungseinrichtung an der höchsten Stelle der Anlage installiert werden. Vor Inbetriebnahme der Anlage ist eine geeignete Druckprüfung, z.B. nach EN 805, durchzuführen. Hierbei ist die korrekte Durchströmung aller Anlagenteile zu prüfen und ein Prüfprotokoll zu erstellen.

### 5.3 Anforderungen bezogen auf den MEGA Kollektor

Die Längenberechnung einer Erdwärmesonde bezieht sich in diesem Fall auf **ein** MEGA-Kollektorsegment ohne Rohrleitungen in Bezug auf den jeweiligen Muster-Standort. Die Zahlen für die max. Wärmeleistung wurden rechnerisch ermittelt und entsprechen der Kollektorverlustleistung. Eine ausführliche Erklärung erfolgt in Kapitel 8.6.

$$\text{max. Wärmeleitung / spez. Entzugsleistung} = \text{Sondenlänge}$$

Muster-Standort	max. Wärmeleistung	spez. Entzugsleistung	Sonden-Länge
Garmisch-Partenkirchen	145,60 W	50W/m	2,91 m
Kassel	132,44 W	50W/m	2,65 m
Magdeburg	147,24 W	50W/m	2,94 m
Rostock	125,03 W	50W/m	2,50 m

Da der Untergrund bis zu einer Tiefe von 20 m einen sensiblen Bereich aufweist (siehe Abschnitt 3.) - insbesondere in den Monaten, in denen die Erdwärmesonde ausreichend konstante Wärmeenergie für einen frostfreien Betrieb liefern soll - kann deshalb eine Bodentiefe bis 20m nicht real genutzt werden. Deshalb stellt der Untergrund bis zu einer Tiefe von 20 m einen instabilen Bodenbereich für einen kalkulierbaren Wärmeentzug dar. Um die Funktionalität dennoch aufrecht erhalten zu können, muss der sensible Bodenbereich bis zu einer Tiefe von 20m umgangen werden. Das bedeutet, dass eine Erdwärmesonde für solche Fälle erst ab einer Bodentiefe von 20m eingesetzt werden kann. Demzufolge werden zu dem ermittelten Sondenlängen die Tiefe des sensiblen Bereichs von 20m zum Ergebnis dazu addiert. Somit ergeben sich für diesen Fall die nachfolgenden angepassten Sondenlängen:

Muster-Standort	Längenkalibrierung	Sonden-Länge
Garmisch-Partenkirchen	2,91m + 20m =	min. 22,91 m
Kassel	2,65m + 20m =	min. 22,65 m
Magdeburg	2,94m + 20m =	min. 22,94 m
Rostock	2,50m + 20m =	min. 22,50 m

### 5.3.1 Sondenlänge für eine MEGA-Kollektor-Anlage mit 14 Stück MEGA-Kollektor-Segmenten ohne Rohrleitung.

Sobald mehrere MEGA-Kollektorsegmente zu einer Großanlage zusammengefasst werden, steigt demgemäß der Wärmebedarf an, der erforderlich ist, um eine solche Großanlage frostfrei zu halten. Am Beispielstandort Garmisch-Partenkirchen benötigt ein MEGA-Kollektorsegment zunächst eine Heizleistung von 145,6 W und dies ohne Berücksichtigung von Rohrleitungen und Systemkomponenten. Für eine Kollektoranlage mit 14 MEGA-Kollektorsegmenten wird mindestens der 14-fache Wärmebedarf benötigt. Somit ergibt sich hierfür eine Mindestwärmeleistung von 2.038,4 W (14 x 145,6 W = 2.038,4 W). Dividiert man diese Wärmeleistung von 2.038,4 W durch den Erfahrungswert der spez. Erdwärmeentzugsleistung von 50 W/m, so erhält man eine min. Sondenlänge von 40,77m.

Da die ermittelte Sondenlänge von 40,77 m tiefer liegt als der sensible Bodenbereich von 20 m, kann auf eine Tiefenanpassung vorerst verzichtet werden.

$$\text{max. Wärmeleistung} / \text{spez. Entzugsleistung} = \text{Sondenlänge}$$

Muster-Standort	max. Wärmeleistung	spez. Entzugsleistung	Sonden-Länge
Garmisch-Partenkirchen	2.038,4 W	50W/m	40,77 m
Kassel	1.854,16 W	50W/m	37,08 m
Magdeburg	2.061,36 W	50W/m	41,23 m
Rostock	1.750,42 W	50W/m	35,01 m

Diese Ergebnisse der ermittelten Sondenlängen basieren ausschließlich auf dem Wärmebedarf der MEGA-Kollektoranlage ohne Berücksichtigung von Rohrleitungen und Anlagenteilen! Um eine exakte Sondenlänge für die Frostfreihaltung einer **14 Segmente umfassende MEGA-Kollektoranlage** zu erhalten, müssen zudem alle Systemkomponenten und Rohrleitungen, die sich in einer Anlage befinden, in die Wärmeverlustleistungsrechnung mit einbezogen werden.

### 5.3.2 Sondenlänge für eine MEGA-Kollektor-Anlage mit 14 Stück MEGA-Kollektor-Segmenten, Rohrleitungen, Anlagenkomponenten sowie saisonalen Klimaeinflüssen

Um eine wasserführende Freiflächensolaranlage mit ihren Kollektoren, horizontalen und vertikalen Rohrleitungen und ihren zahlreichen Anlagenkomponenten sicher frostfrei zu halten, muss demensprechend ausreichend Wärme zur Verfügung gestellt werden. Um diese Wärmemenge über eine Erdwärmesondenanlage bereitstellen zu können, muss eine geeignete Sondenlänge ermittelt werden, deren Wärmeleistung für diesen Zweck ausreichend ist. Aufgrund einer komplexen Rohrleitungsgeometrie und der zahlreichen Anlagenkomponenten, die in einer solaren Großanlage verbaut werden, sowie deren standortabhängigen jahreszeitlichen Klimaeinflüssen, kann eine reale Bestimmung der Länge einer Erdwärmesonde nur mit Hilfe eines Simulationsprogramms durchgeführt werden. Die in Abschnitt 5.3.2

ermittelten Sondenlängen sind Längenabschätzungen und werden als Ausgangswerte in das Simulationsprogramm eingegeben.

### 5.3.3 Simulation und Sondenlänge

Für die Ermittlung geeigneter Sondenlängen wurde das Simulationsprogramm Polysun mit der Version 2021.14 verwendet. Polysun ist ein Programm zur Auslegung und Simulation thermischer Solaranlagen. Dieses Simulationsprogramm ermöglicht es, das Betriebsverhalten einer solarthermischen Anlage durch Variation einzelner Anlagenkomponenten zu untersuchen. Alle Systemparameter lassen sich über die benutzerfreundliche Oberfläche schnell verändern und die Ergebnisse können sowohl tabellarisch als auch grafisch ausgewertet werden. In diesem Simulationsprogramm ist es auch möglich, individuelle Anlagenhydrauliken zu erstellen und zu integrieren. Dadurch war es möglich, wie in diesem Fall, eine Anlagenhydraulik in der Funktion einer Freilandsolaranlage in Verbindung mit einer Erdwärmesondenanlage in Polysun abzubilden und zu simulieren. Dabei war es aber nicht möglich, eine gezielte Simulation auf eine Sondenlänge durchzuführen. Zunächst wurden alle bekannten Anlagenparameter wie z.B. Dämmung, Rohrleitungen, Rohrleitungsgeometrie, Werkstoffe und Regelungsparameter in das Simulationsprogramm eingegeben. Diese Anlagenparameter werden während der gesamten Simulationsphase nicht mehr verändert und als konstante Werte betrachtet. Anschließend wurden angenommene Werte für die Sondenlänge und den Durchfluss in das Simulationsprogramm eingegeben und die Simulation gestartet. Danach wurden die Simulationsergebnisse in Bezug auf die durchschnittliche Kollektortemperatur ausgewertet. Lag die durchschnittliche Kollektortemperatur zu irgendeinem Zeitpunkt im Jahr unter  $5^{\circ}\text{C}$ , so wurde das eigentliche Ziel, die Anlage dauerhaft frostfrei zu halten, nicht erreicht. Daher wurde die Simulation mit geänderter Sondenlänge und bei gleichem Durchfluss erneut durchgeführt. Dieser Vorgang wurde solange mit veränderter Sondenlänge wiederholt, bis das Simulationsergebnis zu jedem Zeitpunkt des Jahres konstante  $+5^{\circ}\text{C}$  oder höher lag. Da auch der Durchfluss einen wesentlichen Einfluss darauf hat, wie schnell eine bestimmte Energiemenge von einer Wärmequelle zur Wärmesenke transportiert werden kann, muss auch dieser mit unterschiedlichen Mengen simuliert werden. So wurde auch der Durchfluss mit den nun bekannten Sondenlängen kaskadiert um jeweils eine Stufe (Durchflussmenge) simuliert, bis das Simulationsergebnis zu jeder Jahreszeit konstant  $+5^{\circ}\text{C}$  oder höher war. Entsprechend können die so ermittelten Sondenlängen für diesen Anlagenbetrieb verwendet werden.

Bei der Anlagensimulation konzentrierte man sich zunächst auf einen Muster-Standort mit den am häufigsten auftretenden niedrigsten Außentemperaturen, das den Standort Garmisch-Partenkirchen entsprach. Nachdem in Abschnitt 6.4.2 bereits Mindestlängen für eine Erdwärmesonde von 40,77 m ermittelt wurden, begann man mit der ersten Anlagensimulation bei einer Sondenlänge von 50 m zu starten. Nach einem abgeschlossenem Simulationsvorgang wurde dann die Länge der Erdwärmesonde um 10 m verlängert und der Simulationsvorgang erneut gestartet. Dieser Simulationsvorgang wurde bis zu einer Sondenlänge von 100m wiederholt und dies bei einem konstanten Volumenstrom. Es wurden also Anlagensimulationen mit Sondenlängen von 50m, 60m, 70m, 80m, 90m und 100m durchgeführt, Es wurde ein erster Satz an Simulationen mit einem konstanten Volumenstrom von 50l/h durchgeführt. Danach wurde der Volumenstrom für jeden weiteren Simulationsblock kaskadenartig erhöht (50l/h - 3.500l/h) und mit den schrittweisen Längenänderungen wiederholt durchgeführt. Das grundlegende Ziel der zahlreichen Simulationen lag darin, die Länge einer Erdwärmesonde herauszufiltern, bei der die mittlere Kollektortemperatur ganzjährig  $\geq 5^{\circ}\text{C}$  liegt.

Eine ausführliche Beschreibung der Simulation befindet sich im Anhang des Berichts.

Tabelle 1: Temperaturen in Bezug auf die jahreszeitlich niedrigsten mittleren Kollektortemperaturen bei definierten Volumenströmen

Volumenstrom	Sondenlänge	mittlere
500l/h	90m	5,0°C
500l/h	100m	5,4°C
1.000l/h	80m	5,1°C
1.000l/h	90m	5,5°C
1.000l/h	100m	5,7°C
1.500l/h	80m	5,4°C
1.500l/h	90m	5,3°C
1.500l/h	100m	5,4°C
2.000l/h	80m	5,4°C
2.000l/h	90m	5,3°C
2.000l/h	100m	5,6°C
2.500l/h	70m	5,0°C
2.500l/h	80m	5,5°C
2.500l/h	90m	5,7°C
2.500l/h	100m	5,7°C
3.000l/h	70m	5,0°C
3.000l/h	80m	5,6°C
3.000l/h	90m	5,7°C
3.000l/h	1000m	5,7°C
3.500l/h	80m	5,6°C
3.500l/h	90m	5,7°C
3.500l/h	1000m	5,7°C

Nach Auswertung aller Simulationsergebnisse kann abschließend festgestellt werden, dass eine geeignete Erdwärmesonde zur Frostfreihaltung einer 14 MEGA-Kollektoranlage erst ab einer Länge von 80 m und bei entsprechendem Volumenstrom eingesetzt werden kann.

## 6 Übersicht der geothermischen Landschaft für Deutschland

Für die Planung und den Bau einer geothermischen Anlage mittels Erdwärmesonde ist die genaue Kenntnis der Bodenbeschaffenheit, der Schichtenfolge und der Grundwasserverhältnisse Grundvoraussetzung. Der höchste Informationsstand in diesem Zusammenhang ist von den staatlichen geologischen Diensten zu bekommen. Allerdings geben die verfügbaren Karten nur einen ersten Anhaltspunkt für die Bodenbeschaffenheiten. Am Standort selber bedarf es einer eingehenden Identifizierung. Die Entwicklung auf Bundesländerebene hat zu sehr unterschiedlichen Kartenvarianten und auch qualitativ sehr unterschiedlichen Geodaten geführt. Der Bundesverband für Geothermie berichtet auf Anfrage, dass es keine einheitliche Übersichtskarte über oberflächennahe Geothermie für Gesamtdeutschland gibt. Es werden jährlich bis zu 20.000 neue Anlagen installiert und die Aktualität einer solchen Karte ist nicht leistbar. Einige Bundesländer wie Baden-Württemberg haben mit ihrem Geodaten Portal ISONG eine Vielzahl von

Auswahlmöglichkeiten geschaffen. Hier kann man sich bereits installierte Erdsondenanlagen im gesamten Gebiet ansehen. Zusätzlich dazu die maximalen Tiefenbeschränkungen für Erdsondenbohrungen in verschiedenen Abstufungen. Mit einer Anzeige der Untergrundtemperaturen in Bereichen von 300 bis 2500 m und einem 3d Modell bis zu 400 m Tiefe ist dieses Portal sehr umfangreich aufgestellt. Die meisten Bundesländer und deren Portale beschränken sich allerdings auf die Darstellung der Wärmeleitfähigkeit in verschiedenen Tiefen. Neben dem Vorkommen von Grundwasser sowie dessen Volumenstrom über die Sondenlänge ist die Wärmeleitfähigkeit des Bodens der wichtigste Faktor in der Planung einer Erdwärmesondenanlage. Sie gilt in der Planung und Dimensionierung als Schlüsselparameter, durch die der Wärmetransport aus den umgebenden Gesteinsschichten quantifiziert wird<sup>10</sup>. Die Wärmekapazität ihrerseits quantifiziert das Speichervermögen der Gesteine oder Gesteinsschichten. In der Planung und Auslegung von Erdwärmesonden hat sie nur eine untergeordnete Rolle und wird im Allgemeinen nur bei großen Anlagen mit mehr als 30 kW Heizleistung herangezogen. Die Dimensionierung erfolgt in diesen Fällen mit Hilfe von Computerprogrammen.

In den letzten Jahren wurde eine deutschlandweite Übersicht geschaffen, bei der über tatsächliche Bohrungen Messungen durchgeführt wurden aber auch Abschätzungen mittels des Mineralbestandes getroffen wurden. Nach unseren Recherchen bieten heute alle Bundesländer dementsprechende Karten an. Durch die Bewertung der Karten sowie Rücksprachen mit einzelnen Landesbehörden ist aber abzuleiten, dass grundsätzlich im gesamten Bundesgebiet eine oberflächennahe Bohrung von maximal 100 m Tiefe theoretisch möglich ist. Davon ausgeschlossen sind Wasserschutzgebiete, Heilquellenschutzgebiete oder Zustromgebiete. Hier bestehen entweder grundsätzlich Verbote oder Beschränkungen, die im Einzelfall geprüft werden müssen. Im Weiteren sind kritische oder verbotene Bereiche für die geothermische Nutzung aufgelistet:

#### **Kritische Bereiche**

- Wasserschutzgebiete & Heilquellenschutzgebiete
- verkarstungsfähige und stark geklüftete Gesteine
- quellfähige Gesteine
- Gebiete mit CO<sub>2</sub> / CH<sub>4</sub> im Grundwasser
- Bereiche mit Salzwasseraufstieg
- artesisch gespannte Verhältnisse
- nachteilige Druckpotenzialunterschiede
- ungünstiger Stockwerksbau
- tektonisch aktive Bereiche

Für Wasserschutzgebiete existieren noch weitere Abstufungen, die im Einzelfall kompletten Verbote aber auch Sondergenehmigungen zur Folge haben können<sup>11</sup>.

#### **1. In Trinkwasserschutzzone I oder II:**

Erdwärmesonden (EWS) oder Erdwärmekollektoren (EWK) sind nicht genehmigungsfähig!

---

<sup>10</sup> Sachstandsbericht für einen bundeseinheitlichen Produktkatalog zur wirtschaftlichen Anwendung oberflächennaher geothermischer Daten, Seite 7, 2008

<sup>11</sup> Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie, <https://www.lung.mv-regierung.de/>, 2021

2. **In Trinkwasserschutzzone III oder IV:**

EWS und EWK müssen bei der zuständigen unteren Wasserbehörde beantragt bzw. angezeigt werden. Die Vorhaben sind in Ausnahmefällen mit Auflagen genehmigungsfähig.

3. **Außerhalb von Trinkwasserschutzgebieten:**

EWS und EWK müssen bei der zuständigen unteren Wasserbehörde beantragt bzw. angezeigt werden. Die Vorhaben werden geprüft und sind in der Regel ohne Auflagen genehmigungsfähig.

Da die einzelne Vorstellung aller Bundesländer den Rahmen sprengen würde, wird sich im folgenden Kapitel auf die vier Bundesländer bezogen, in denen die Standorte der Simulation in Kapitel 8 liegen, beschränkt. Diese sind Bayern, Hessen, Sachsen-Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern.

### 6.1 Bayern

Das Bundesland Bayern bietet mit seinem Geoportal Umweltatlas eine sehr breite und vielfältige Möglichkeit sich über das Thema Geothermie zu informieren. Neben der Übersicht der Wärmeleitfähigkeit im Landesgebiet ist es hier ebenso möglich Eignungsgebiete für Erdsonden zu filtern. Ebenso ist eine Übersicht über bereits vorhandene Sonden zu finden sowie Bohrrisiken bis zu einer Tiefe von 100 m. **Die Wärmeleitfähigkeit wird hier in 20m Abstufungen von 20-100 m in verschiedenen Karten dargestellt.** Für unsere Fragestellung haben wir die Karte mit der Leitfähigkeit in 100 m Tiefe gewählt.

Die Karte in Abbildung 6 bietet eine Übersicht über die spezifische Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsschichten bis zu einer Tiefe von 100 m. Die Einteilung der Legende wurde vom Landesamt für Umwelt (LfU) in Bayern sehr fein strukturiert und bietet 17 Stufen im Bereich von  $\leq 1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  bis  $> 4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . **Das LfU hat die Karte anhand repräsentativer Bohrungen sowie aus der lithographischen Beschreibung charakterisiert und bestimmt.** Im Folgenden wurde für die jeweiligen Tiefenstufen ein Mittelwert gebildet und interpoliert. Aber auch das Landesamt für Umwelt in Bayern verweist ausdrücklich auf eine spezifische Prüfung vor Ort bevor eine Sonde gebohrt werden kann.

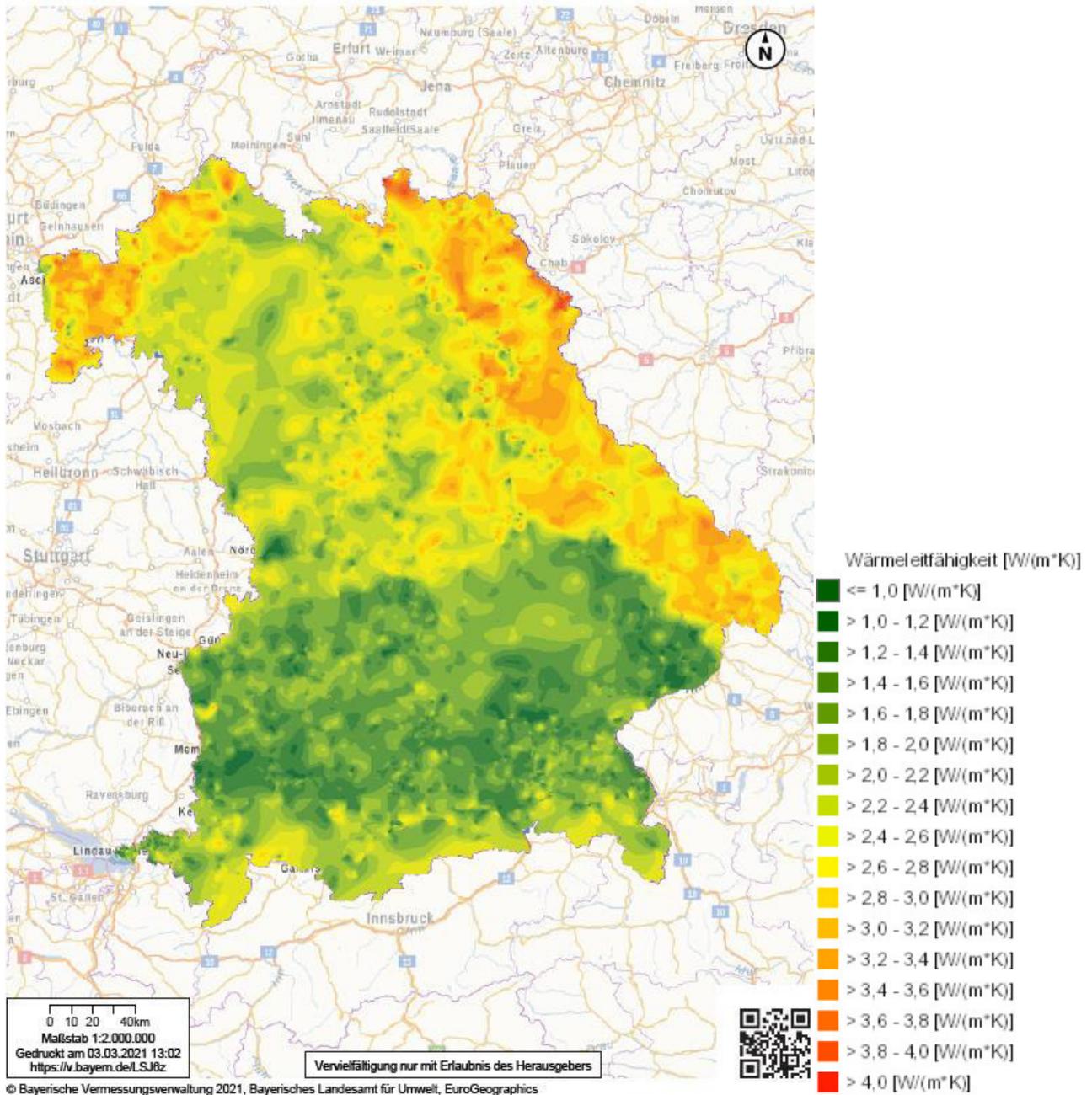


Abbildung 6: Wärmeleitfähigkeiten des Bodens im Bundesland Bayern in 100 m Tiefe

Wie bereits erwähnt ist auf dem Geoportal ebenso die Darstellung von Eignungsgebieten für Erdwärmesonden visualisierbar. In Abbildung 7 ist die die Übersicht von Bayern dargestellt.

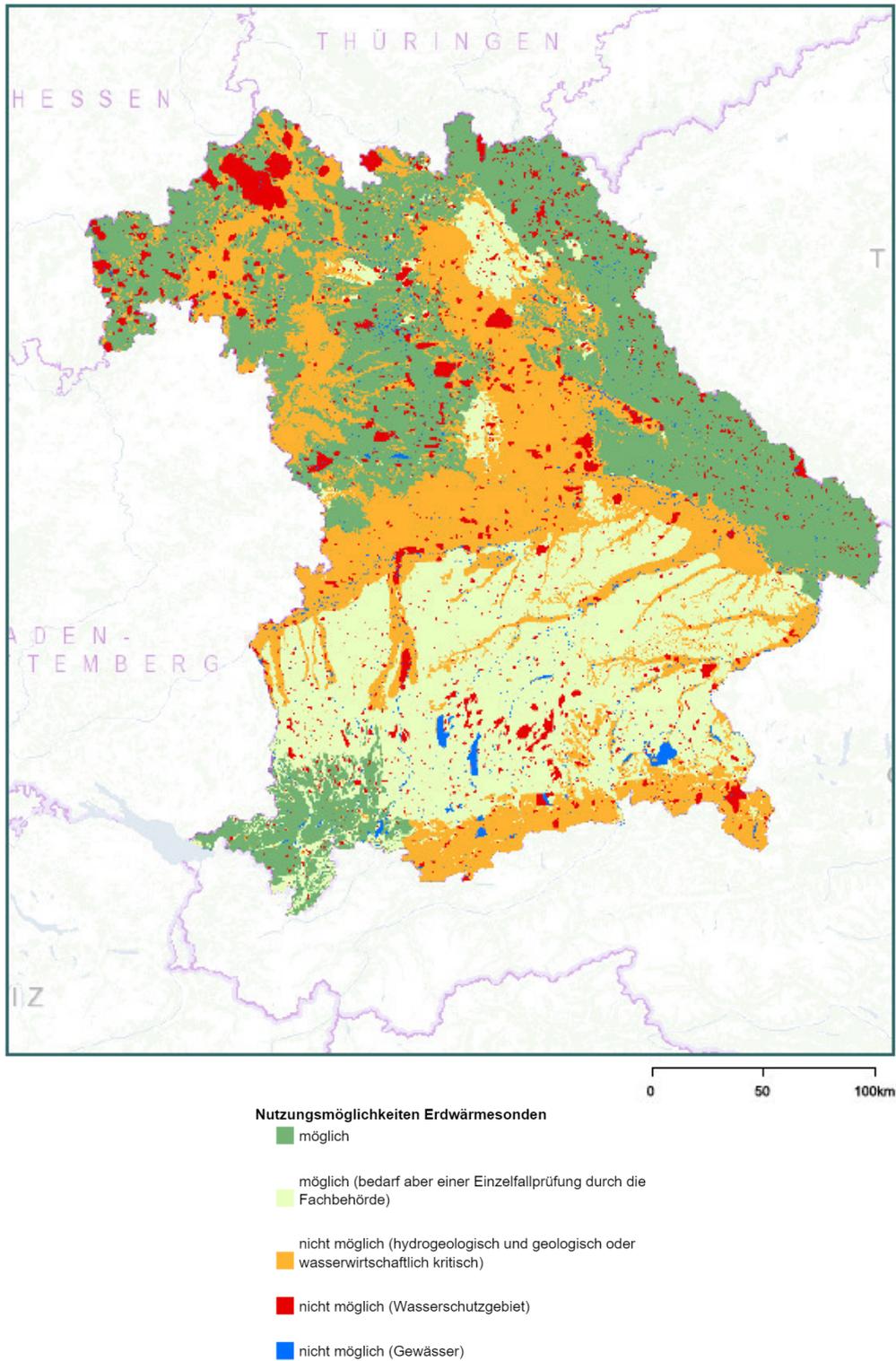


Abbildung 7: Vom Bayerischen Staatsministerium empfohlene geothermische Nutzungsmöglichkeiten

## 6.2 Hessen

Auf dem Geothermie Viewer des Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) werden Karten für die oberflächennahe Geothermie bereitgestellt. Diese umfassen die Wärmeleitfähigkeiten in einer Gesamtübersicht wie in Abbildung 8 zu sehen. Aber auch Abstufungen in 20 m Schritten bis zu einer Tiefe von 200 m sind möglich. Die dargestellten Daten sind aus Literatur sowie eigenen Messungen des Landes Hessen ermittelt und stellen einen Minimal-, Median- und Maximalwert dar. Jedoch liegt auch hier die Verantwortung bei dem beauftragten Planer, da die Werte Angaben sind, die geringer aber auch höher ausfallen können. Die Werte, die vom Landesamt angegeben werden beziehen sich auf trockenes Gestein und fallen somit eher niedrig aus. Abweichungen können sich also aufgrund unterschiedlicher Feuchtigkeitsgrade in den Gesteinsschichten ergeben.

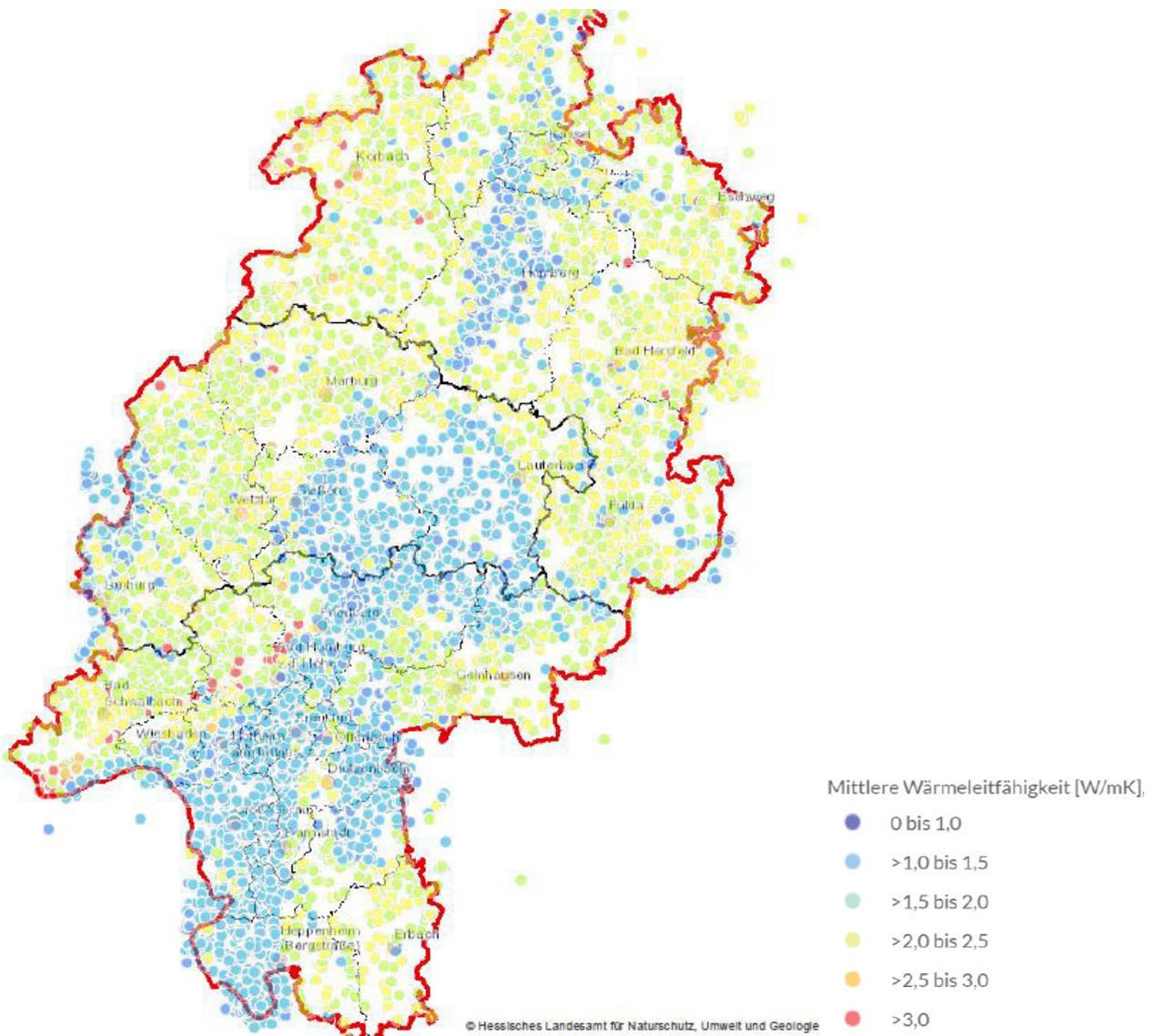


Abbildung 8: Wärmeleitfähigkeiten des Bodens im Bundesland Hessen in 100 m Tiefe

Laut Aussage vom HLNUG existiert keine landesweite Übersicht über Bohrtiefenbeschränkungen. Weder für die Tiefe von 100 m noch für andere Tiefen<sup>12</sup>. Jedoch ist auf dem Geoportal des Landes eine Übersicht über die Eignungsgebiete für die oberflächennahe geothermische Nutzung zu finden. In Hinblick auf die Genehmigungsverfahren werden Standorte als günstig, ungünstig oder unzulässig beurteilt. Als Grundlage dafür dient der Schutz des Grundwassers. Nach der Angabe des HLNUG unterliegt die Beurteilung der Mindestanforderung für Bauausführung und Betrieb von Erdwärmesonden.

---

<sup>12</sup> Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Dezernat G4 Rohstoffgeologie, 2021



Die wasserwirtschaftlichen Charakterisierungen beziehen sich auf die Lage in Wasser- und Heilquellenschutzgebieten. Die hydrogeologische Einstufung stellt z.B. Gebiete mit artesischen Druckverhältnissen, weiträumiger Grundwasserstocktrennung, Mineralwasser- und CO<sub>2</sub>-Aufstiegen, hohen Wasserdurchlässigkeiten, Verkarstung, quellfähigen oder wasserlöslichen Gesteinen etc. dar, die hinsichtlich Bohrvorgang und Ausbau von Erdwärmesonden besonders zu berücksichtigen sind (Abb.:9).

### 6.3 Sachsen-Anhalt

In Sachsen-Anhalt planen die Baufirmen wie in jedem anderen Bundesland mit Hilfe der VDI Richtlinien sowie vorhandenen Daten. Die Baufirmen planen für kleinere Objekte anhand von Wärmeleitfähigkeiten, die sie in einigen Ländern direkt aus den Landesämtern beziehen und da, wo nicht verfügbar aus der VDI oder Literatur. Die Wärmeleitfähigkeiten oder aber auch Entzugsleistungen werden festgelegt in Abhängigkeit von den im Untergrund voraussichtlich zu erwartenden Gesteinsschichten und Wasserführung. Viele Bohrfirmen verfügen über regionale Kenntnisse zur Geologie. Andererseits können sie diese geologischen Angaben grundstückskonkret entweder über die im Internet veröffentlichte Bohrdatenbank (Abb.:10) oder über eine grundstücksbezogene Anfrage beziehen wie in Abbildung 11 zu sehen. Für größere Bauvorhaben werden in der Regel zusätzlich Thermalresponse-Tests durchgeführt (Abb.:12).

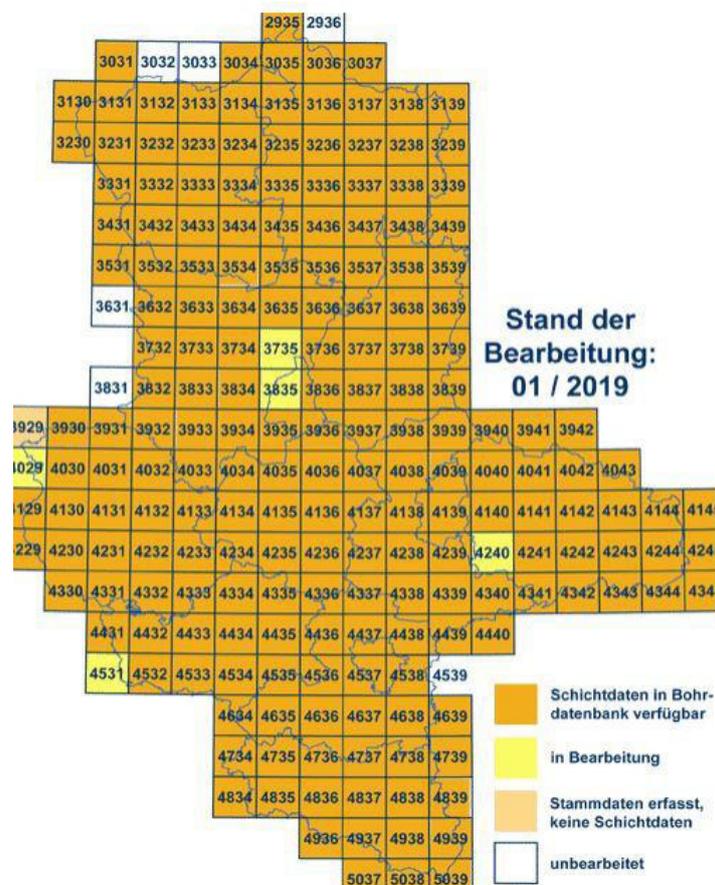


Abbildung 10: Rasterdatensatz des Bundesland Sachsen-Anhalt

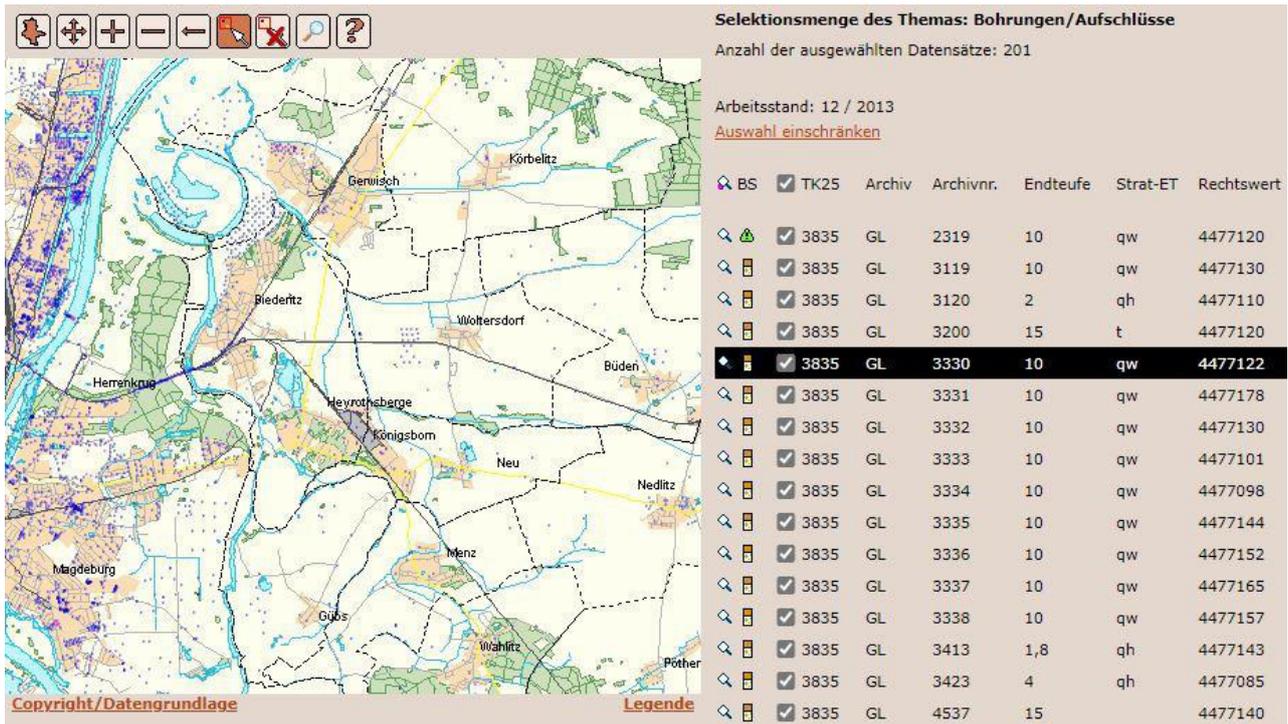


Abbildung 11: Beispiel an Bohrdatensätzen für definiertes Gebiet

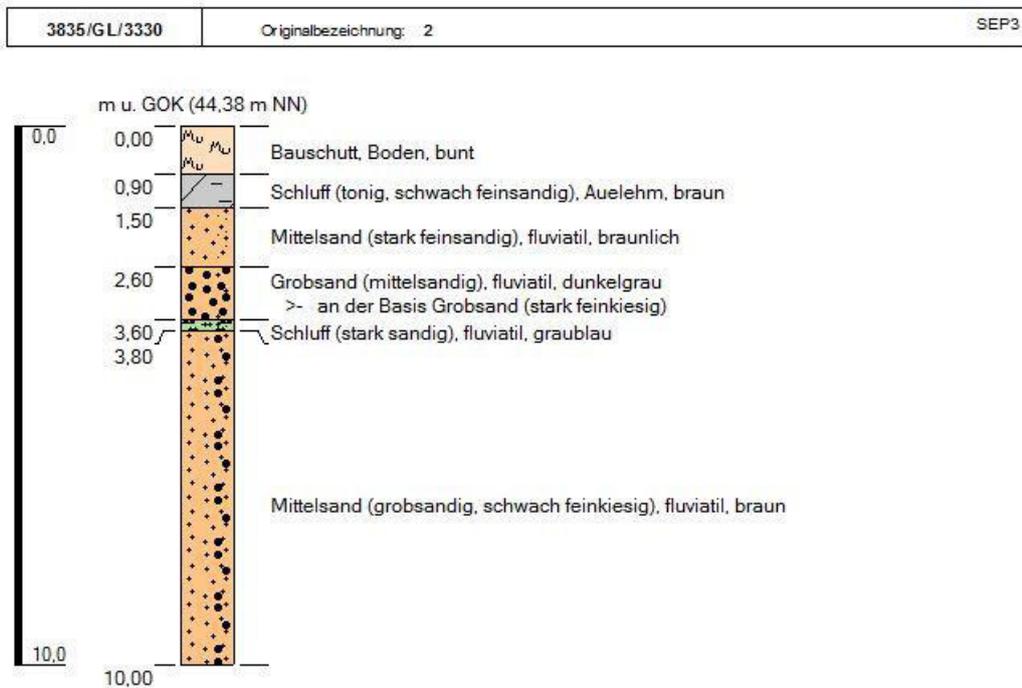


Abbildung 12: Aufschlüsselung der Bodenstruktur

Nach Aussage des Landesamtes für Geologie und Bergwesen existiert keine gesetzlich festgelegte Tiefenbegrenzung in Sachsen-Anhalt. Im Geothermieportal werden lediglich Flächen ausgewiesen, für die eine erhöhte Anforderung an die Bauausführung gestellt werden. Das sind z.B. die in Sachsen-Anhalt häufig

vorkommenden Sulfat- und Salzgesteine oder Bereiche mit Altbergbau. Für diese wird dringend zur Einholung eines geologischen bzw. bergbaulichen Gutachtens geraten. Aus diesem Ergebnis werden die konkreten Anforderungen an den Bau bzw. die konkreten Maximalteufen festgelegt.

Außerdem verfügt das LAGB über keinen entsprechenden Datensatz für Wärmeleitfähigkeiten in Tiefen bis 100 m<sup>13</sup>.

#### 6.4 Mecklenburg-Vorpommern

Das durch das Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) angebotene Portal ist Teil des GeotIS-Projektes welches als gesamtdeutsches Informationssystem für die Geothermie in den letzten Jahren aufgebaut wurde. Die Daten stützen sich demnach auf über 750 Bohrungen des Landes und verschiedene geophysikalische Untersuchungen. Die Datenbank dient als erste Prüfung, ob am geplanten Standort eine Bohrung oder das Abteufen einer Sonde überhaupt gestattet ist. Zusätzlich sind hier Informationen hinterlegt, welche Dokumente den Behörden vorzulegen sind bei einer Anzeige.

Für die Landesfläche von Mecklenburg-Vorpommern ist es ebenfalls möglich, sich die Wärmeleitfähigkeit in Abstufungen von 20 Meter Schritten anzeigen zu lassen. Die in Abbildung 13 dargestellte Karte zeigt die WLF bis zu einer Tiefe von 100m.

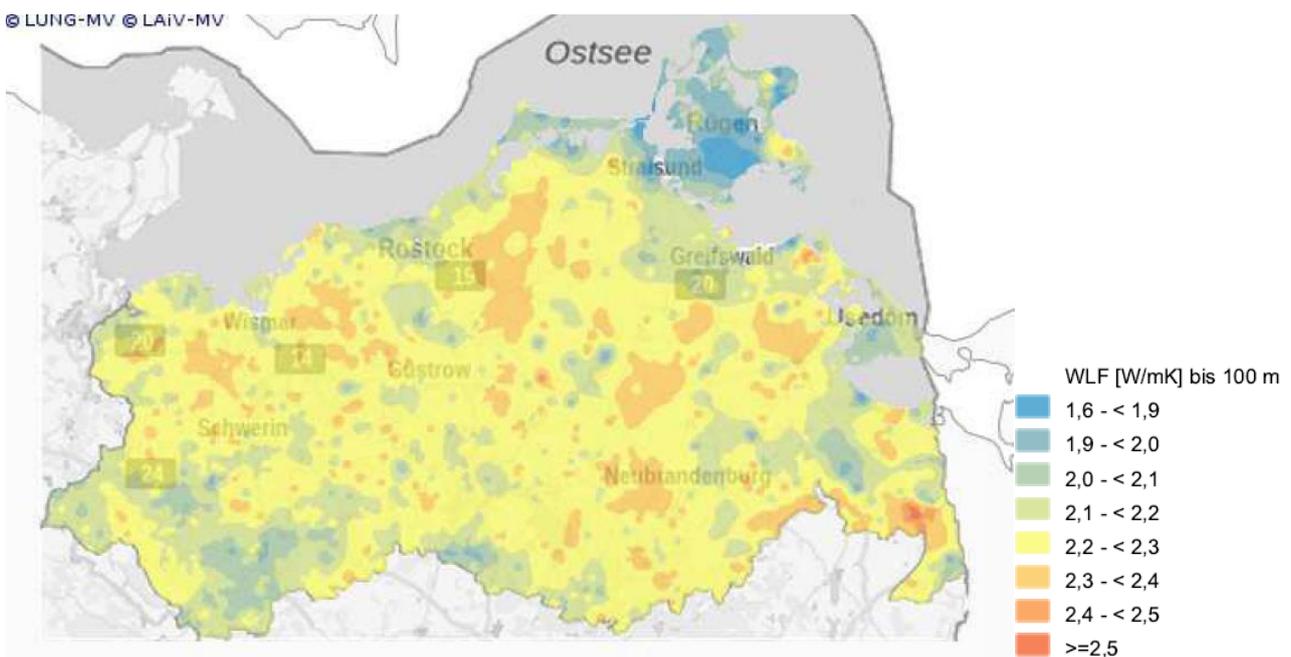


Abbildung 13: Wärmeleitfähigkeiten des Bodens im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern bis 100 m Tiefe

Zusätzlich zu den Wärmeleitfähigkeiten ist es weiterhin möglich sich eine Übersichtskarte aller Gewässerschutzgebiete anzeigen zu lassen. In Abbildung 14 ist die Gesamtübersicht des Landes zu sehen. Im Portal selber ist es möglich in die einzelnen Gebiete zu zoomen um den genauen Standort zu finden.

<sup>13</sup> Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, Dezernat 23, 2021

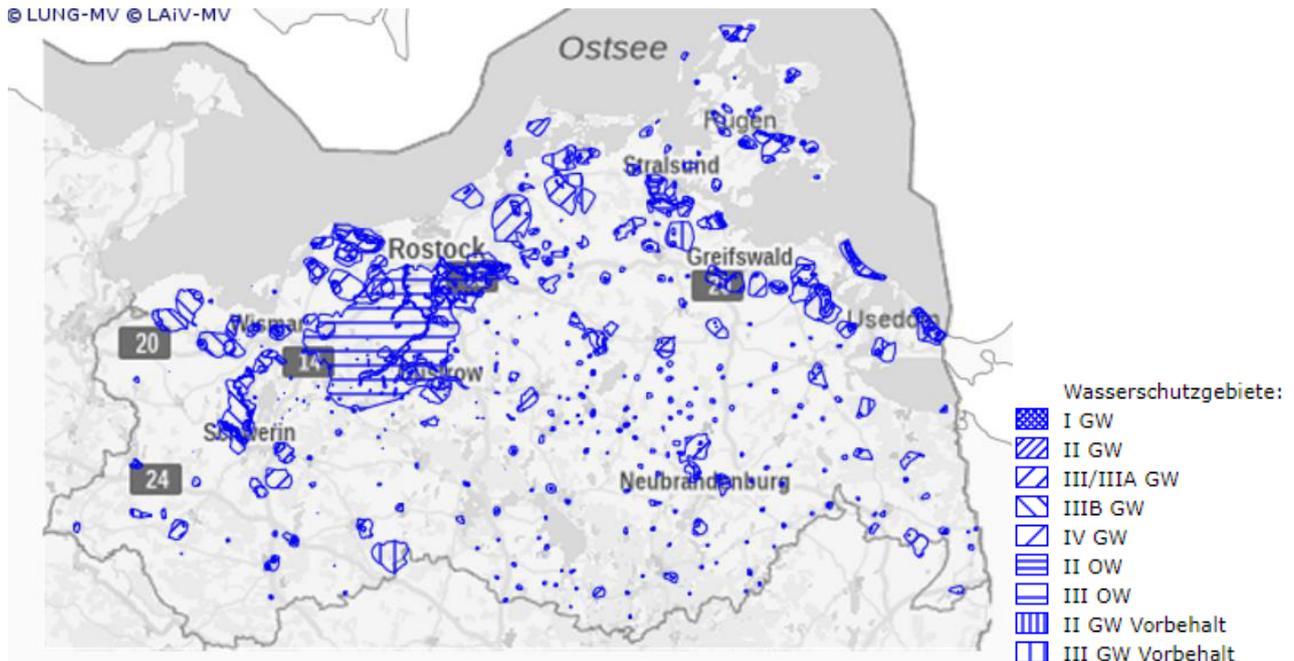


Abbildung 14: Übersicht der Wasserschutzgebiete gleichbedeutend mit geothermischen Eignungsgebiete und Verbotszonen

## 7 Frostereignisse in Deutschland

### 7.1 Frosttage

Nach der Definition des Deutschen Wetterdienstes handelt es sich um einen Frosttag wenn das Minimum der Lufttemperatur unterhalb des Gefrierpunktes fällt<sup>14</sup>. Dies wird ohne die Beachtung der Tageshöchsttemperatur betrachtet. Eine zweite Definition existiert für die sogenannten Eistage. Diese stellen sich durch das durchgehende Vorkommen von Frost im Tagesverlauf dar. Das bedeutet, dass auch die Tageshöchsttemperatur nicht über 0 °C steigt<sup>15</sup>.

Aufzeichnungen und Statistiken werden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) über einen langen Zeitraum geführt und ausgewertet. Die folgende Abbildung 15 zeigt die mittlere Anzahl der Frosttage im Zeitraum von 1981 bis 2010. Es wurden keine Auflistungen gefunden, um einen Trend der Anzahl der Frosttage in den Einzeljahren in ableiten zu können Aktuelle Zahlen der letzten zehn Jahre sind in einer Gesamtzusammenfassung des DWD noch nicht erhältlich.

<sup>14</sup> Deutscher Wetter Dienst, Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie, 2021

<sup>15</sup> Deutscher Wetter Dienst, Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie, 2021

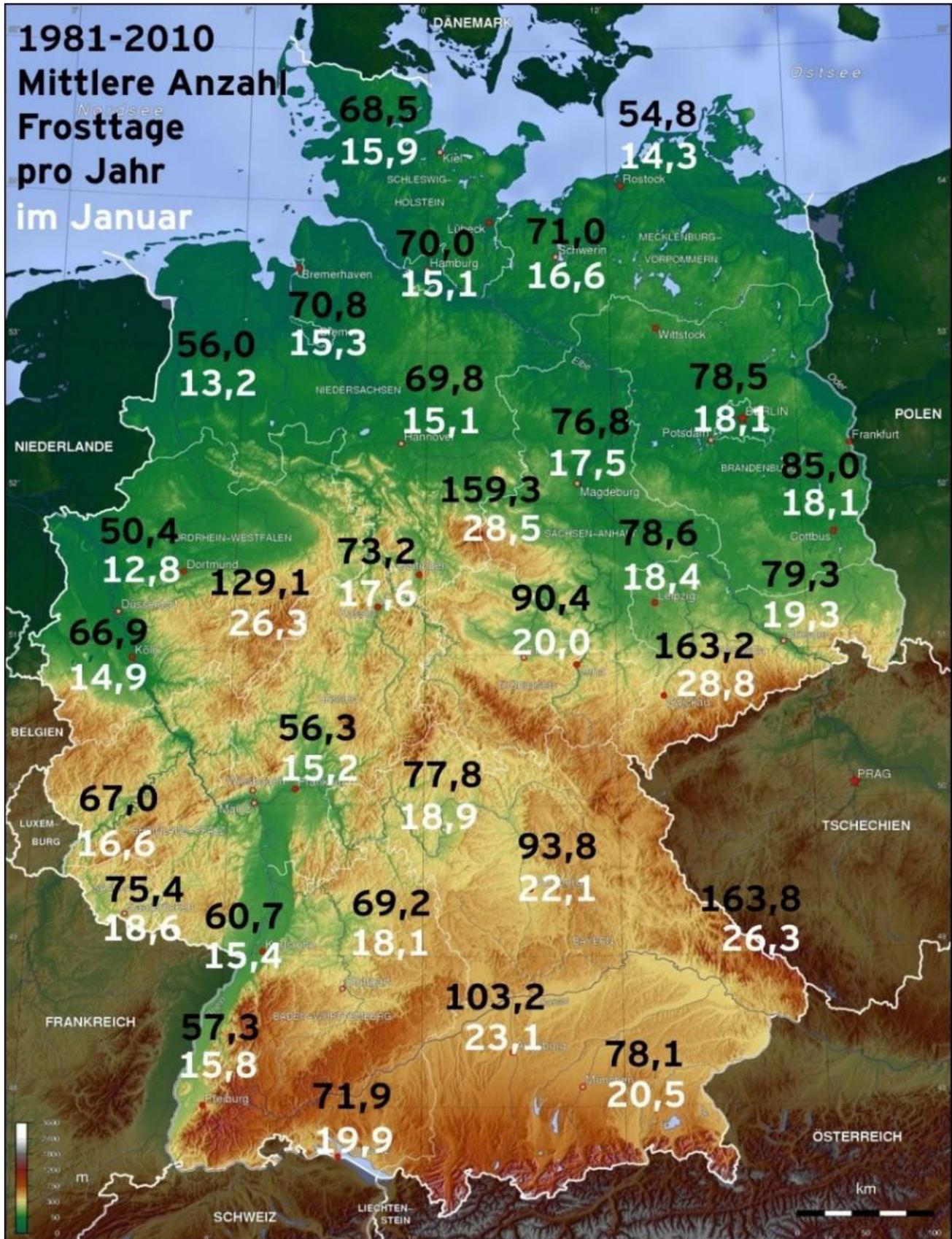


Abbildung 15: mittlere Frosttage in Deutschland

Die geringste Anzahl von Frosttagen zeigte Nordrhein-Westfalen mit 50,4 Tagen. Unabhängig von der Anzahl würde allerdings bereits schon ein Tag ausreichen, um Schäden an einer wassergeführten Anlage hervorzurufen.

### 7.2 Zielbereich für solarthermische Anlagen

Für den Betrieb einer solarthermischen Anlage ist jedoch das Erreichen der 0 °C Grenze nicht erstrebenswert. Aus diesem Grund haben wir für den sicheren Betrieb eine Minimaltemperatur von 5 °C definiert, welche im Kollektor nicht unterschritten werden darf. Diese Temperatur wurde unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen so gewählt, dass ein Einfrieren der Wärmeträgerflüssigkeit im Kollektor nicht auftritt. Einflussgrößen wie die Intensität der Außentemperatur, die informative Reaktionszeit, die Aktionszeit, der Sicherheitsabstand zum Stockpunkt und die Massenträgheit.

In Abbildung 16 ist die Anzahl der Tage zu sehen, an denen diese Temperatur unterschritten wurde.

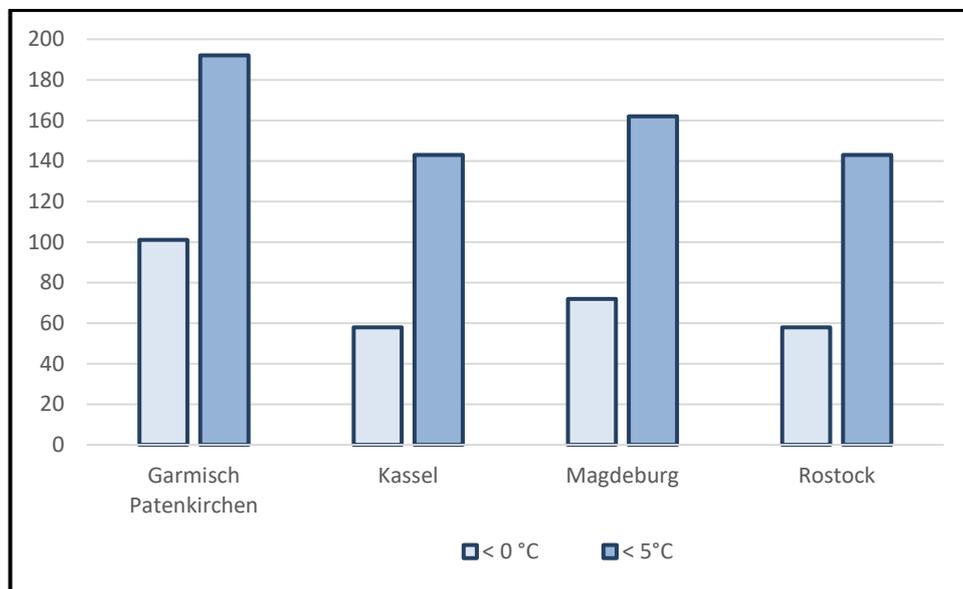


Abbildung 16: Darstellung Frosttage gegenüber Anzahl der Zieltemperaturereignisse

Diese Auswertung stammt aus den Wetterdaten die die Grundlage der Energiebedarfsberechnung sowie der Simulationen der solarthermischen Anlagen aus Kapitel 8.5.2 bilden. Anders als die Auswertung in Kapitel 10.1 entstammen diese Werte einem Mittel aus den Jahren 2010 bis heute. Bereits durch diesen Vergleich ist zu sehen, dass die Anzahl der betreffenden Tage in einigen Fällen mehr als doppelt so häufig auftritt als ein Frosttag. Wie bereits erwähnt liegt für uns die Zieltemperatur der Anlage im Winter bei mindestens 5 °C. Dies bedeutet noch immer einen ausreichenden Puffer zum Beginn von Frostschäden im System.

## 8 Berechnung zur Frostfreihaltung eines realistischen MEGA-Kollektor Systems

Um einen mit Wasser befüllten MEGA-Kollektor im Freien sicher betreiben zu können, muss dieser bei Umgebungslufttemperaturen unter 0 °C frostfrei gehalten werden. Wie bereits vorher beschrieben, streben wir jedoch eine Minimaltemperatur von 5 °C an. Dafür wird eine gewisse Menge an Wärmeenergie benötigt. Um die zu diesem Zweck erforderliche Wärmeleistung berechnen zu können, wird hierfür die allgemeine

Formel zur Ermittlung der Kollektornutzleistung zu Grunde gelegt. Zuerst wird eine Darstellung für ein einzelnes MEGA-Kollektor Segment getätigt. Folgend wird eine Simulation eines realistischen MEGA-Kollektor Feldes aus 13 Einzelsegmenten durchgeführt. Dies entspricht einer Feldgröße, wie sie als Einzelstrang in einer Großanlage verbaut werden würde.

$$\dot{Q} = A_G ( \eta_{0,hem} G_{hem} - a_1(T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2 )$$

$\dot{Q}$	Nutzleistung des Kollektors	W
$A_G$	Bruttofläche	m <sup>2</sup>
$\eta_{0,hem}$	Optischer Wirkungsgrad (Konversionsfaktor)	Faktor
$a_1$	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m <sup>2</sup> K)
$a_2$	Temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )
$G_{hem}$	Hemisphärische solare Bestrahlungsstärke	W/m <sup>2</sup>
$T_m$	mittlere Wärmeträgertemperatur im Kollektor $T_m = (T_{in}-T_{out})/2$	°C
$T_{in}$	Eintrittstemperatur des Wärmeträgers	°C
$T_{out}$	Austrittstemperatur des Wärmeträgers	°C
$T_a$	Umgebungslufttemperatur	°C

#### Erläuterungen zu den spezifischen Kollektorkennwerten

$\eta_{0,hem}$	Optischer Wirkungsgrad (Konversionsfaktor)
$a_1$	Wärmedurchgangskoeffizient
$a_2$	Temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient

Der **optische Wirkungsgrad**  $\eta_0$  und die sogenannten **thermischen Verluste**  $a_1$  und  $a_2$  sind spezifische Kollektorkennwerte, werden in aufwendigen Messmethoden ermittelt und stehen im Solar Keymark Datenblatt "MEGA-Kollektor-Segment\_78". Die einzelnen Leistungskennwerte des MEGA-Kollektor-Segment werden ausschließlich durch seine Konstruktionseigenschaften bestimmt.

### 8.1 $\eta_0$ Konversionsfaktor oder auch optischer Wirkungsgrad

Der Konversionsfaktor beschreibt im Wesentlichen den maximalen Wirkungsgrad des Kollektors und gibt an, wieviel Prozent des eingestrahnten Sonnenlichts in Wärme umgewandelt wird, wenn keine Wärmeverluste an die Umgebung auftreten. Somit ist der Konversionsfaktor das Produkt aus der Lichtdurchlässigkeit vom Glaskörper und dem Absorptionsvermögen des Absorbers. Optische Verluste treten am Glaskörper auf, dort wird ein gewisser Teil der einfallenden Strahlung absorbiert oder reflektiert. Auch am Absorber treten optische Verluste auf, weil dieser die einfallende Strahlung nicht vollständig absorbiert.

Der Konversionsfaktor ist dann am höchsten, wenn die mittlere Kollektortemperatur  $T_m$  genauso groß ist wie die Umgebungstemperatur  $T_a$ . Zu dieser Zeit hat der Kollektor keine thermischen Verluste.

Einflussgrößen:

- Absorberschicht
- Absorbermaterial
- Absorberdicke
- Verbindung zwischen Absorberblech und Thermoausleitrohr
- Transmission vom Glas
- Durchströmung des Thermoausleitrohrs

## 8.2 Wärmedurchgangskoeffizient $a_1$

Dieser Wert beschreibt die Wärmeverluste. Sind der Absorber und das Sammlerrohr deutlich wärmer als die Umgebungslufttemperatur, finden Wärmeverluste statt. Diese Wärmeverluste sind proportional zur Temperaturdifferenz zwischen den wärmeren Absorbern sowie Sammlerrohr und der Umgebungslufttemperatur. Je größer der Wärmedurchgangskoeffizient ist, desto mehr thermische Verluste hat der Kollektor.

Einflussgrößen:

- Wärmedämmung Sammlerrohr
- Wärmedämmung Vakuumröhre
- Abstand zwischen Absorberblech und Glaszylinder
- Wärmebrücken Absorberbefestigung (Ultra-Schweißnaht)
- Wärmebrücken Glas-Metall-Verbindung (GMV)
- Wärmebrücken zwischen HeatPipe und Sammlerrohr
- Aufbau Absorberbefestigung
- Anschlüsse

## 8.3 Temperaturabhängige Wärmedurchgangskoeffizienten $a_2$

Dieser Wert beschreibt im Wesentlichen die Krümmung der Wärmeverlustkurve.

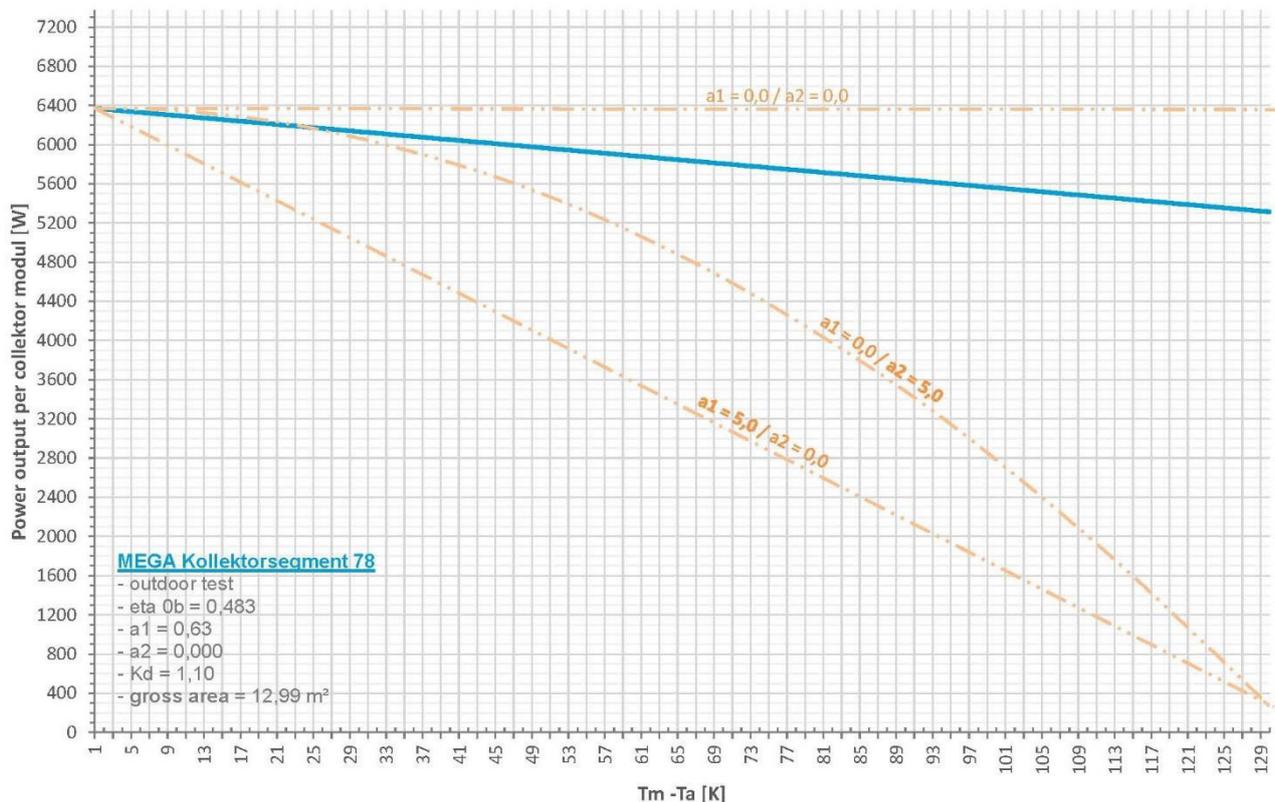


Abbildung 17: Wärmeverlustkurve eines MEGA Kollektor Segments

Je größer dieser Wert ist, desto stärker ist die Kurvenkrümmung der Wärmeverlustkurve.

Einflussgrößen:

- Thermische Strahlung des Absorbers bei höheren Temperaturen (langwellige Strahlung)
- Verformung des Absorbers bei höheren Temperaturen

Um einen mit Wasser befüllten MEGA-Kollektor sicher frostfrei halten zu können, muss dieser mit einer geeigneten mittleren Kollektortemperatur  $T_m$  betrieben werden. Deshalb gilt es zunächst zu klären, mit welcher mittleren **Mindest**-Kollektortemperatur  $T_m$  der MEGA-Kollektor eigentlich betrieben werden soll. Im Weiterem werden die Verlustleistungen des MEGA-Kollektors sowie die Sondenlänge der geothermischen Anlage berechnet.

### 8.4 Mittlere Kollektortemperatur $T_m$

Betrachtet man Wasser unter Normalbedingungen gefriert es bei unter 0 °C bzw. hier beginnt der Stockpunkt einzusetzen. Demzufolge sollte die mittlere Kollektortemperatur  $T_m$  so gewählt werden, dass sie einen respektablen Temperaturabstand zum Gefrierpunkt einnimmt.

Hierfür werden folgende Ausgangspunkte zur Definition von  $T_m$  näher betrachtet:

- in Anbetracht der Wirtschaftlichkeit wäre  $T_m$  zwischen > 0 °C und < 2 °C festzulegen
- in Anbetracht der Sicherheit wäre  $T_m$  > 5°C und < 9°C zuzuordnen
- in Anbetracht der Dichte von Wasser wäre  $T_m$  bei 4°C zuzuordnen
- in Anbetracht der Anomalie von Wasser wäre  $T_m$  > 1°C und < 3°C zuzuordnen
- in Anbetracht der Reaktionszeit wäre  $T_m$  > 5°C und < 7°C zuzuordnen

Nach Abwägung aller Punkte wird die mittlere Kollektortemperatur  $T_m$  auf 5°C festgelegt.

**Mittlere Kollektortemperatur  $T_m = 5^\circ\text{C}$**

### 8.5 Wärmeleistung bzw. Kollektorverlustleistung

Setzt man in der nachstehenden Formel den Wert für die Bestrahlungsstärke  $G_{hem}$  gegen Null (0,0000001) und weist der mittleren Kollektortemperatur  $T_m$  den konstanten Temperaturwert von 5 °C zu, dann erhält man zu der definierten Umgebungslufttemperatur von  $T_a = < 5^\circ\text{C}$  die spezifische Kollektorverlustleistung. *Nur wenn der Wert von  $T_a$  kleiner ist als der von  $T_m$  spricht man von Verlusten!* Da es sich hier um Verluste handelt, wird dieser Rechenwert immer mit einem negativen Vorzeichen dargestellt.

Diese Kollektorverlustleistung entspricht genau der Wärmeleistung, die für die Kollektorfrosthaltung benötigt wird.

**Kollektorverlustleistung  $\hat{=}$  Wärmeleistung für die Kollektorfrosthaltung**

$$\dot{Q} = A_G ( \eta_{0,hem} G_{hem} - a_1(T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2 )$$

$\dot{Q}$	Wärmeleistung zur Kollektorfrosthaltung	W
$A_G$	Bruttofläche	12,99 m <sup>2</sup>
$\eta_{0,hem}$	Optischer Wirkungsgrad	0,490 *
$a_1$	Wärmedurchgangskoeffizient	0,633 W/(m <sup>2</sup> K) *
$a_2$	Temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient	0,000 W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> ) *

$G_{hem}$	Bestrahlungsstärke, gegen Null	0,0000000001 W/m <sup>2</sup>
$T_m$	mittlere Wärmeträgertemperatur im Kollektor	konstant 5 °C
$T_a$	Umgebungslufttemperatur (<5 °C)	Wetterdatensatz vom Standort

\* Leistungskennwerte vom MEGA-Kollektor-Segment

Beispiel:

$T_m$	Mittlere Wärmeträgertemperatur im Kollektor	5 °C
$T_a$	Umgebungslufttemperatur (<5°C)	2 °C

$$12,99 \cdot ( 0,49 \cdot 0,0000001 - 0,633 \cdot (5 - 2) - 0,00 \cdot (5 - 2)^2 ) = -24,66$$

Verlustleistung pro MEGA-Kollektor-Segment -24,66 W

Wärmeleistung zur Kollektorfrosthaltung eines MEGA-Kollektor-Segments 24,66 W

Dies ist der Leistungswert (Verlustleistung) eines MEGA-Kollektor-Segments, der nur von der Umgebungslufttemperatur beeinflusst wurde.

Nachdem sich ein MEGA-Kollektor größtenteils im Freien befindet, werden die Kollektorverluste nicht nur durch die maßgebliche Umgebungslufttemperatur verursacht, sondern ebenso von vielen anderen physikalischen Umweltfaktoren wie Wind, Regen und Schnee. Es gibt aber auch physikalische Umweltfaktoren, die invertiert auf die Kollektorverluste wirken, wie zum Beispiel die Sonne und die spezifische Wärmekapazität des Kollektors. Deshalb müssen auch diese relevanten Umweltfaktoren näher beleuchtet und ergebnisorientiert ermittelt werden.

Da diese physikalischen Umweltfaktoren jedoch sehr komplex auf den Kollektor einwirken, kann eine detaillierte Auswertung der Ergebnisse nur mit Hilfe eines Simulationsprogramms erfolgen.

a) Sonne

Die Sonne hat einen nicht zu unterschätzenden positiven Einfluss auf die Kollektorverlustleistung während der Frosthaltung! Dies findet allerdings nur während der Tageszeit statt und zu den Zeiten, zu denen der Himmel nicht vollkommen von Wolkenfeldern bedeckt ist.

b) effektive Wärmekapazität

Die effektive Wärmekapazität des Kollektors ist ebenso eine positive Einflussgröße und gibt an, welche Wärmemenge je Kelvin Temperaturänderung zur mittleren Kollektortemperatur vom gesamten Kollektor aufgenommen bzw. abgegeben werden kann. Dies bedeutet, dass der Kollektor eine Wärmespeicherfähigkeit hat und somit für eine gewisse Zeit den Kollektorverlusten entgegenwirkt.

c) Wind und Regen

Wind und Regen haben einen negativen Einfluss auf die Kollektorverlustleistung und sind zeitlich (Tag, Nacht) nicht begrenzt. Über ein Simulationsprogramm lassen sich derartige Umwelteinflüsse einigermaßen transparent darstellen.

d) Schnee, Verschmutzung der Glasoberflächen und Staub

Diese Umweltfaktoren haben in Verbindung mit der in Punkt a) aufgeführten fehlenden oder geringen Sonneneinstrahlung einen zusätzlich negativen Einfluss. Schnee, Verschmutzung und Staubablagerungen auf der Glasoberfläche beeinflussen die Lichttransmission.<sup>16</sup>



Abbildung 18: Schnee, der das gesamte Kollektorsegment bedeckt.

## 8.6 Ermittlung der Wärmeverlustleistung

Inwieweit sich all diese Umwelteinflüsse auf die Kollektorverlustleistung auswirken, lässt sich mathematisch nur schwer darstellen. Dies kann nur experimentell mit einem Testsystem ermittelt werden. Im Weiterem wird allerdings eine Wärmeverlustleistung berechnet, die der benötigten Energie zur Frostfreihaltung gleich zu setzen ist. Um einen Querschnitt geben zu können, haben wir uns für das weitere Vorgehen für vier repräsentative über ganz Deutschland verteilte Standorte entschieden. Damit sollen alle Wetterereignisse, die das Kollektorfeld beeinflussen sowie die Anforderungen zur Frostfreihaltung bestmöglich abgedeckt werden. Alle Berechnungen und daraus resultierende Simulationen wurden für folgende Standorte durchgeführt:

- Garmisch-Partenkirchen
- Kassel
- Magdeburg
- Rostock

Es folgt die Ermittlung der Wärmeverlustleistung **eines MEGA-Kollektor-Segments** bezogen auf vier Standorte. Dafür wird die mittlere Kollektortemperatur auf 5 °C definiert. Zwischen dem Kollektorrücklauf und dem Kollektorvorlauf liegt der Kollektor und damit auch die mittlere Kollektortemperatur  $T_m$ . Das heißt, wenn der Kollektor eine Breite von 6m hat (MEGA Kollektor), dann bezieht sich die mittlere Kollektortemperatur  $T_m$  auf den Punkt in der Mitte des Kollektors, also nach 3m.

<sup>16</sup> Bildnachweis, AKOTEC Produktions GmbH, 2021

Vorgaben:

- Mittlere Kolleortemperatur  $T_m$  konstant bei 5°C
- Formel  $\dot{Q} = A_G ( \eta_{0,hem} G_{hem} - a_1(T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2 )$
- ohne Globalstrahlung  $G_{hem}$  0 W/m<sup>2</sup>
- mit Globalstrahlung  $G_{hem}$  Ortsbezogen ...W/m<sup>2</sup>
- Außentemperatur  $T_a$  Ortsbezogen ...°C
- Datensatz Außentemperaturen Meteonorm Version 8

Ergebnisse der Verlustleistung auf einen Blick:

Standort	max. Verlustleistung eines MEGA-Kollektor-Segment
Garmisch-Partenkirchen	max. 145,60 W
Kassel	max. 132,44 W
Magdeburg	max. 147,24 W
Rostock	max. 125,03 W

Im folgenden Diagramm ist die Verlustleistung eines MEGA-Kollektor-Segments in Abhängigkeit von der ortsbezogenen Umgebungslufttemperatur über den gesamten Jahresverlauf grafisch dargestellt. Beispielhaft wird hier die Darstellung für den Standort Garmisch-Partenkirchen gewählt. Alle weiteren Diagramme sind im Anhang zu finden.

Zu sehen sind über den Verlauf der einzelnen Monate die Kurve des benötigten Energiebedarfs zur Frostfreihaltung eines MEGA-Kollektor Segments. Eine erste Berechnung erfolgte ohne den Einfluss der globalen Strahlung, um sozusagen einen Nullpunkt darzustellen. Dies stellt den Bedarf an Energie dar, der ohne äußere Einflüsse auf das System benötigt werden würde (Abbildung 19). Hierbei handelt es sich lediglich um die Leistung, die bei bestimmten Temperaturen zur Frostfreihaltung benötigt wird.

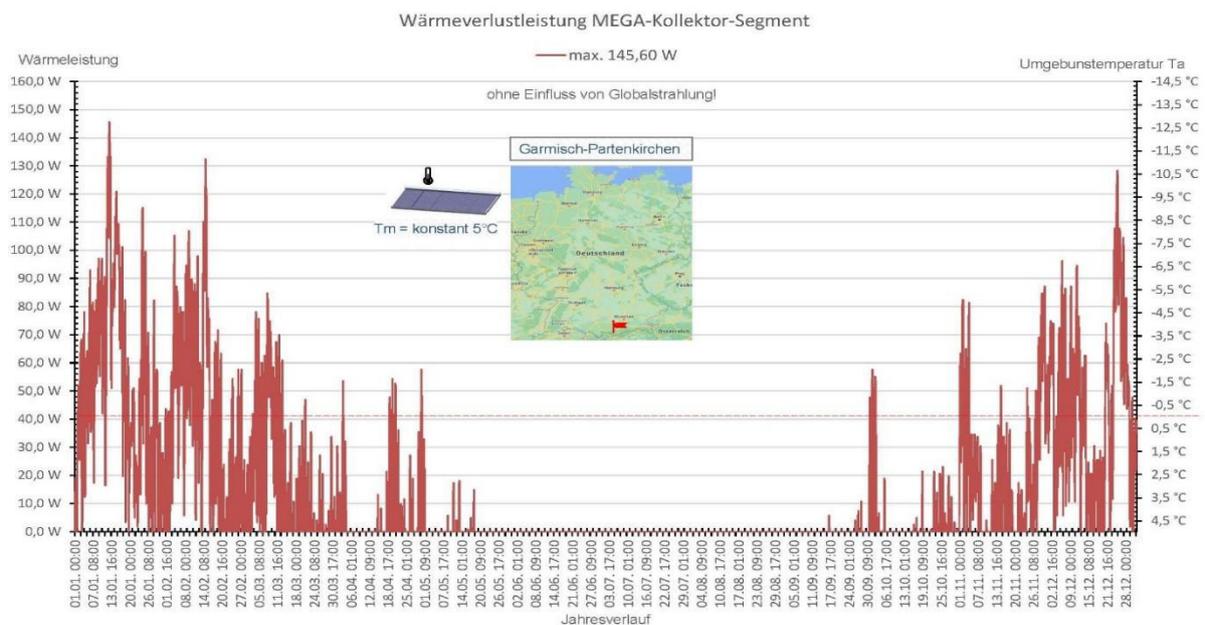


Abbildung 19: Wärmeverlustberechnung ohne den Einfluss der globalen Strahlung für den Standort Garmisch-Partenkirchen

Natürlich liegt auch im Winter respektive Frostmonaten eine globale solare Strahlung vor, die einen Einfluss auf die Temperaturen im Kollektorkreislauf haben wird. Aus diesem Grund wurden die Simulationen erneut durchgeführt mit den vorhandenen Strahlungsdaten. In Abbildung 20 ist die Verlustleistung eines MEGA-Kollektor-Segments in Abhängigkeit von der ortsbezogenen Umgebungslufttemperatur und unter Berücksichtigung der Globalstrahlung grafisch dargestellt.

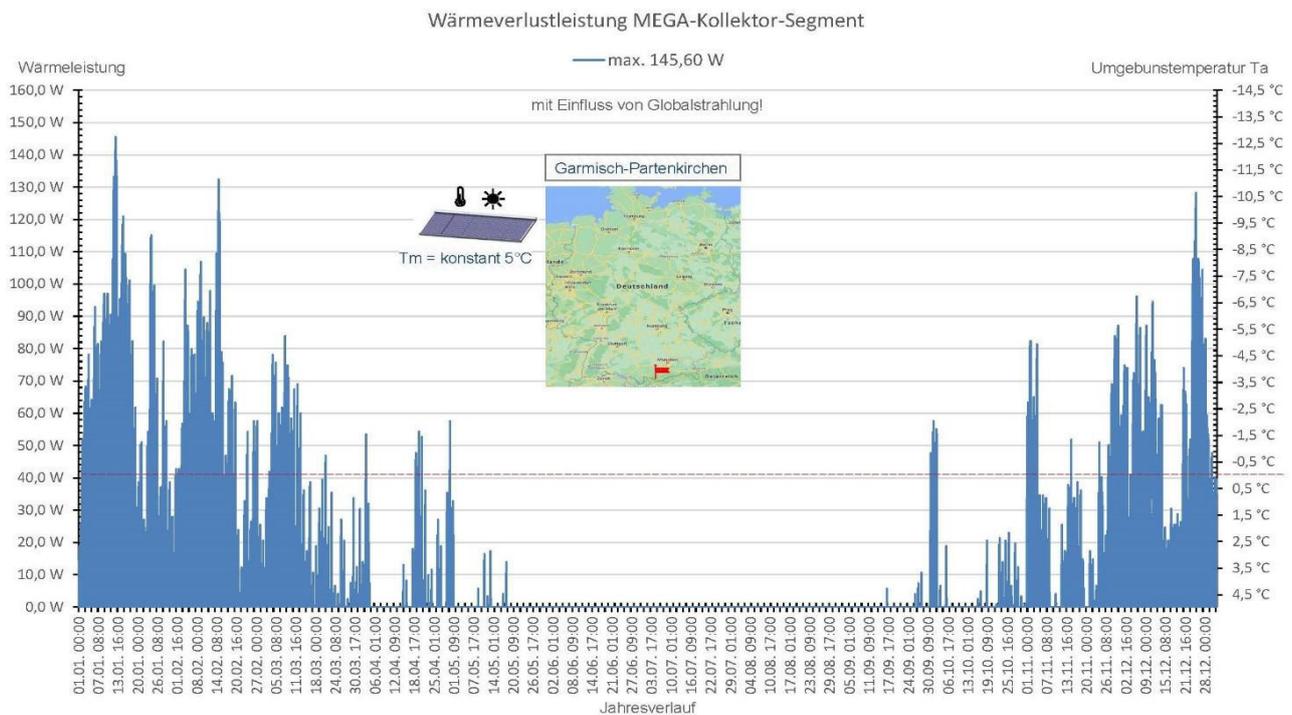


Abbildung 20: Wärmeverlustberechnung mit Einfluss der globalen Strahlung für den Standort Garmisch-Partenkirchen

Für alle in Betracht gezogenen Standorte sind die Ergebnisse in Abbildung 21 zusammengefasst. Zu sehen ist ein deutlich höherer Energiebedarf in Garmisch-Partenkirchen. Durch die gute Konstruktionsweise und eine hohe Isolationsleistung des Kollektors ist die Verlustleistung gering. Ebenfalls angegeben wird die prozentuale Abweichung zum Standardwert „Würzburg 50°C“. Dieser Wert wurde im Zuge einer einheitlichen Kollektorzertifizierung festgelegt und findet sich in allen offiziellen Zertifikaten wieder. Es bietet die Möglichkeit alle auf dem Markt verfügbaren Kollektoren auf einen Blick vergleichen zu können.

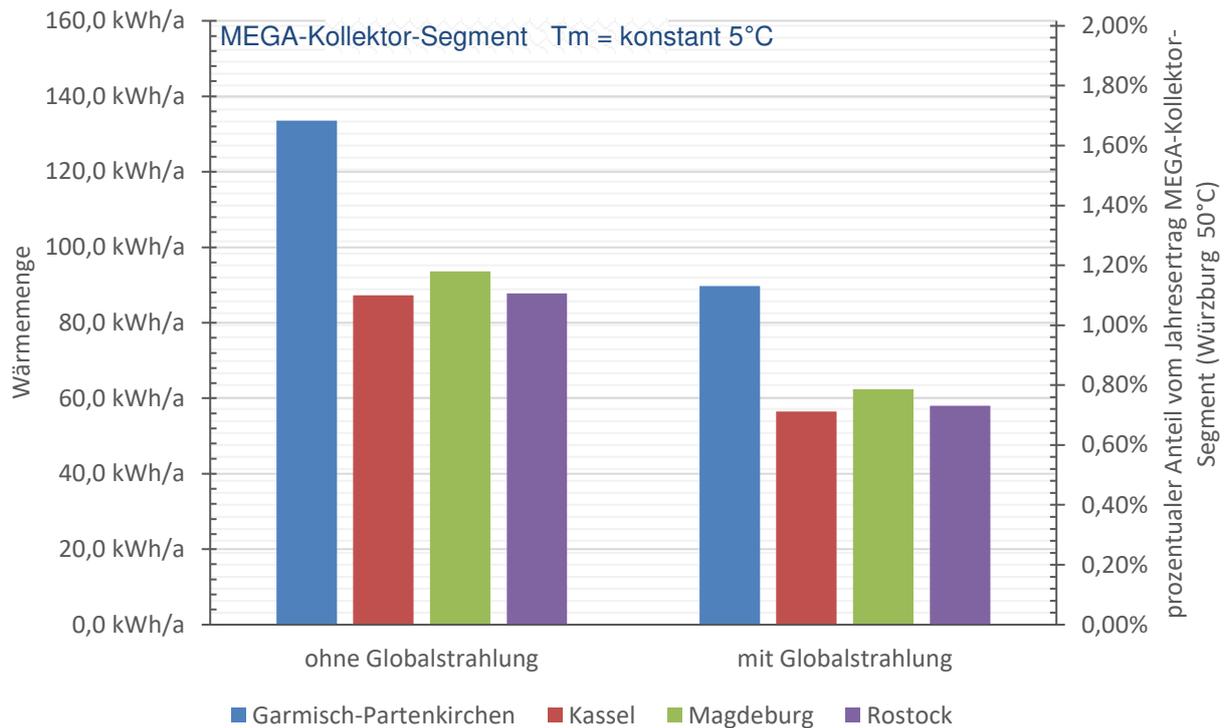


Abbildung 21: Gesamtüberblick der Verlustrechnungen

### 8.6.1 Jahresenergiebedarf am Beispiel Garmisch-Partenkirchen

Für die folgende Berechnung wurde ein MEGA-Kollektorfeld aus 13 Einzelsegmenten herangezogen. Dies entspricht einer realistischen Feldgröße, wie sie als Einzelstrang in einem Großfeld verbaut werden würde. Um eine Frostfreihaltung in einem solchen System gewährleisten zu können, spielt neben der verfügbaren Wärmemenge auch der Volumenstrom des Fluids im System eine entscheidende Rolle. Ein in der Praxis verwendeter Volumenstrom bewegt sich im Bereich von circa 400 l/h pro MEGA Kollektor Segment. Anhand dieser Annahme wurde eine Simulation mit dem Programm T-Sol durchgeführt.

Als Ergebnis der Simulation erhalten wir eine Übersicht über eine Bandbreite an Volumenströmen und Sondenlängen, welche die benötigte Wärmemenge zur Frostfreihaltung zur Verfügung stellen können. Die Wärmemenge wird als Teil der Simulation ebenfalls ermittelt. Die benötigten Daten wie Temperaturen oder Einstrahlung sind Teil des Simulationsprogramms. Beispielhaft wird in Tabelle 2 die Simulation für einen Volumenstrom von 500 l/h gezeigt. Die gesamte Übersicht befindet sich im Anhang. Es ergibt sich eine maximale Entzugsleistung von 272 kWh bei einer Sondentiefe von 100m. Aus der Tabelle zu entnehmen ist, dass es eine Sondentiefe von mindestens 80 m benötigt, um ganzjährig die Frostfreihaltung mit der vorhandenen Wärme aus dem Erdreich zu gewährleisten.

Tabelle 2: Entzugsleistung der Sonde bei definiertem Volumenstrom und Variation der der Sondenlänge

Garmisch-Partenkirchen (GAP)																
		Jahr	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez		
tiefste Außentemperatur		min. Ta	-12,7°C	-12,7°C	-11,1°C	-5,3°C	-2,0°C	1,4°C	6,3°C	8,1°C	7,4°C	3,7°C	-2,0°C	-5,6°C	10,6°C	
Soll Kollektortemperatur		min. Tm	5,0°C													
Volumenstrom Primärkreislauf	Sondenlänge															
		Jahr	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez		
500 l/h	50m	Kollektortemperatur	2,9°C	2,9°C	3,8°C	6,0°C	9,4°C	15,6°C	19,9°C	23,3°C	22,6°C	14,9°C	8,2°C	5,4°C	3,5°C	
		Stromverbrauch Pumpe	9,90 kWh	4,60 kWh	1,50 kWh	0,04 kWh	0,00 kWh	0,70 kWh	3,10 kWh							
		Entzugsenergie der Sonde	196,00 kWh	94,30 kWh	29,10 kWh	0,50 kWh	0,00 kWh	12,20 kWh	59,70 kWh							
	60m	Kollektortemperatur	3,5°C	3,5°C	4,4°C	6,0°C	9,4°C	15,6°C	19,9°C	23,3°C	22,6°C	14,9°C	8,2°C	5,8°C	4,1°C	
		Stromverbrauch Pumpe	9,60 kWh	4,50 kWh	1,40 kWh	0,04 kWh	0,00 kWh	0,60 kWh	3,00 kWh							
		Entzugsenergie der Sonde	217,00 kWh	104,00 kWh	32,50 kWh	0,60 kWh	0,00 kWh	13,70 kWh	66,30 kWh							
	70m	Kollektortemperatur	4,1°C	4,1°C	4,9°C	6,0°C	9,4°C	15,6°C	19,9°C	23,3°C	22,6°C	14,9°C	8,2°C	5,8°C	4,5°C	
		Stromverbrauch Pumpe	9,40 kWh	4,40 kWh	1,40 kWh	0,03 kWh	0,00 kWh	0,60 kWh	2,90 kWh							
		Entzugsenergie der Sonde	236,00 kWh	112,00 kWh	35,80 kWh	0,90 kWh	0,00 kWh	14,90 kWh	71,70 kWh							
	80m	Kollektortemperatur	4,6°C	4,6°C	5,3°C	6,0°C	9,4°C	15,6°C	19,9°C	23,3°C	22,6°C	14,9°C	8,2°C	5,8°C	4,9°C	
		Stromverbrauch Pumpe	9,10 kWh	4,20 kWh	1,40 kWh	0,03 kWh	0,00 kWh	0,60 kWh	2,90 kWh							
		Entzugsenergie der Sonde	250,00 kWh	118,00 kWh	38,80 kWh	1,00 kWh	0,00 kWh	15,60 kWh	76,70 kWh							
	90m	Kollektortemperatur	5,0°C	5,0°C	5,7°C	6,0°C	9,4°C	15,6°C	19,9°C	23,3°C	22,6°C	14,9°C	8,2°C	5,8°C	5,3°C	
		Stromverbrauch Pumpe	8,80 kWh	4,00 kWh	1,40 kWh	0,02 kWh	0,00 kWh	0,50 kWh	2,80 kWh							
		Entzugsenergie der Sonde	263,00 kWh	122,00 kWh	41,80 kWh	1,00 kWh	0,00 kWh	16,20 kWh	81,40 kWh							
	100m	Kollektortemperatur	5,4°C	5,4°C	5,7°C	6,0°C	9,4°C	15,6°C	19,9°C	23,3°C	22,6°C	14,9°C	8,2°C	5,8°C	5,6°C	
		Stromverbrauch Pumpe	8,40 kWh	3,90 kWh	1,30 kWh	0,02 kWh	0,00 kWh	0,50 kWh	2,70 kWh							
		Entzugsenergie der Sonde	272,00 kWh	125,00 kWh	43,90 kWh	1,10 kWh	0,00 kWh	16,70 kWh	84,50 kWh							

## 9 Übersicht über verfügbare Frostfreihaltensysteme

Alternativ zu dem im Projekt FroWaSo untersuchten Konzept der Frostfreihaltung existieren bereits marktverfügbare Technologien. Diese werden im Folgendem einzeln erläutert.

### 9.1 Wasser-Glycol Gemisch

Die wohl am Markt verbreitetste Variante der Frostfreihaltung ist ein Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel. Diese fungiert gleichzeitig als Frostschutz und als Wärmeträgermedium. Hierfür wird entweder ein Ethylenglykol oder ein Propylenglykol verwendet. Dieses Gemisch wird bis zu einem Gefrierpunkt von minus 60 °C angeboten. Das Verhältnis von Frostschutzmittel zu Wasser bestimmt den Gefrierpunkt. Das Mischungsverhältnis hat jedoch einen Einfluss auf die Viskosität sowie auf die Wärmeaufnahme der Wärmeträgerflüssigkeit. Diese Technologie findet einen Mittelweg zwischen der hohen Wärmekapazität, die Wasser mitbringt und einem sicheren Betrieb bei niedrigen und hohen Temperaturen. Das Gemisch hat die Eigenschaft langsamer zu gefrieren und zu verdampfen als reines Wasser. Bei niedrigen Temperaturen entsteht jedoch ein sogenannter Eisbrei, also eine höher viskose Flüssigkeit. Dies hat jedoch keine negative Auswirkung auf die Anlage, da dadurch keine „Sprengwirkung“ entsteht. Zusätzlich werden Korrosionsinhibitoren beigemischt, um die Anlage und vor allem die metallischen Bauteile zu schützen. Die Zusammensetzung des Frostschutzmischung darf nach DIN 4757 Teil 3 weder giftig noch ätzend oder reizend sein. Als Teil der Anlagenwartung sollte einmal im Jahr die Qualität der Wärmeträgerflüssigkeit kontrolliert werden. Dies kann mit einfachem PH-Papier geschehen, aber auch mit einem Frostschutzprüfer oder einem Refraktometer. Bei einigen Solarkollektoren werden im Sommer leicht Temperaturen von 300 °C oder mehr erreicht. Das kann zum sogenannten cracken der Wärmeträgerflüssigkeit führen, wobei sich das Glykol zersetzt. Das hat nicht nur Einfluss auf die Frostschutzeigenschaften, sondern damit verbunden auch auf die Anlagensicherheit. Zudem kann die Anlage durch die Zersetzungsprodukte verschmutzen, was zu hohen Folgekosten bis hin zur Außerbetriebnahme führen kann.

Bei Verwendung eines Wasser-Glykol Gemisches handelt es sich bei der Anlage um ein sogenanntes druckhaltendes System. Das bedeutet, dass ein permanenter Betriebsdruck in der Anlage herrscht und dieser durch Temperaturen kaum beeinflusst wird.

### 9.2 Drain Back

Eine weitere Technik, die mit Wasser als Wärmeträgerflüssigkeit arbeiten kann, ist das Drain-Back-System. Bei diesen Systemen wird das Wasser bei einer definierten Temperatur aus dem System in einen dafür vorgesehenen Auffangbehälter abgelassen, um den Frostschutz zu gewährleisten. Wenn die Anlage nicht in Betrieb ist, das kann also ebenso den Fall der Stagnation betreffen, wird die Wärmeträgerflüssigkeit ebenso abgelassen. Das System kann somit weder im Sommer überhitzen, wenn eine Stagnation eintritt, noch kann es im Winter bei Minustemperaturen einfrieren. Dafür sind jedoch besondere Anforderungen an die Konstruktion der Anlage nötig, da gewährleistet sein muss, dass die Flüssigkeit durch die Schwerkraft komplett aus dem System laufen kann. Die Rohrleitungen müssen somit fallend vom Kollektor wegführend gebaut werden. Sobald die Pumpe ausgeschaltet wird, läuft die Wärmeträgerflüssigkeit von selbst in den Auffangbehälter.

Um etwaigen Schäden im System vorzubeugen, wird aber auch hier manchmal Glykol in das Solarfluid beigemischt, um in den Rohren verbleibendes Restwasser nicht einfrieren zu lassen. Dadurch, dass die Anlage nach einem Stillstand jedes Mal wieder erst neu befüllt wird, führt diese Art der

Frostfreihaltung jedoch zu Effizienzverlusten. Die Pumpe ist zunächst damit beschäftigt, das Wasser in das System zurück zu pumpen, bevor das Ernten der Energie beginnen kann. Es werden ebenso zusätzliche Komponenten wie ein Auffangbehälter benötigt. Das Ausdehnungsgefäß, die Solarstation oder Überdruckventile werden gegebenenfalls nicht benötigt.

### 9.3 Beheizung

Ein Weg der Frostfreihaltung ist die Verwendung von Rohrbegleitheizungen. Hierbei handelt es sich um ein elektrisches Heizband. Dieses kann an der Außenseite aber auch im Rohr verlegt werden. Zudem ist eine Frostfreihaltung unterhalb und oberhalb des Bodenniveaus möglich. Diese Beheizung dient zum einen der Frostfreihaltung aber auch der Temperaturhaltung der Flüssigkeit in der Rohrleitung.

Für den Betrieb der Heizung ist allerdings die Zufuhr elektrischen Stroms nötig. Die Elektrizität wird dann in Wärme gewandelt, die die Frostfreihaltung garantiert. Ein Vorteil in den Rohrbegleitheizungen liegt darin, dass sie im normalen Betrieb nicht gewartet werden müssen. Dies spart nach den Anschaffungs- und laufenden Stromkosten weitere monetäre Aufwendungen. Der Stromverbrauch und damit die Kosten sind jedoch abhängig von der Länge des verlegten Kabels und können je nach Länge der zu schützenden Rohrleitung stark steigen. Die Standardauslegung ist die Nutzung für Trinkwasserleitungen mit einem Durchmesser von maximal 19 mm. Die Rohrleitung der MEGA-Kollektoranlage hat jedoch einen Durchmesser von 65mm. Diese würde im Zweifel bedeuten, dass eine doppelte Belegung mit Heizbändern nötig wäre oder die Rohrleitungen umwickelt werden müssten, was ebenfalls die Länge des benötigten Heizbandes verlängert.

Eine weitere Beheizungsmethode ist es, einen Heizstab in den Vorratsspeicher oder die Zuleitung zu verbauen. Bei einer kritischen Temperatur beheizt dieser das Wasser, welches durch den Kreislauf gepumpt wird. Je nach Größe des Kreislaufs und ausgleichender Temperatur muss hier ein geeigneter Stab gewählt werden. Ebenso wie bei den vorher beschriebenen Heizbändern steigen die Leistungsaufnahme und damit die Kosten bei niedrigen Temperaturen.

### 9.4 Umwälzsysteme/Frostschutz durch Technik

Eine weitere Möglichkeit besteht darin Energie aus dem System zu nutzen. Dazu wird beim Erreichen der frostgefährdenden Temperatur durch eine Pumpe warmes Wasser aus dem Solarpufferspeicher durch den Kreislauf gepumpt. Dadurch wird der Solarkreis in einem definierten Temperaturrahmen gehalten. Hier kann die Pumpe entweder kurzzeitig bzw. regelmäßig angehen, um den Kreis einmal kurz aufzuwärmen oder bei sehr niedrigen Temperaturen angeschaltet bleiben. Das sorgt für eine sichere Frostfreihaltung.

Die Grundlage für dieses System ist jedoch, dass der Pufferspeicher selber entweder an einem beheizten Ort stehen muss oder zusätzlich durch ein Hezelement gesichert wird (siehe 9.3 Heizung). Nur so ist gewährleistet, dass im Speicher immer ausreichend Wärme vorhanden ist um das System frostfrei halten zu können.

## 10 Kombinationsmöglichkeiten von Solar- und Geothermie

Für die geothermische Anwendung wurden bereits verschiedene Möglichkeiten beschrieben. Grundsätzlich sind uns aus anlagentechnischer Sicht wie hydraulischen Bedingungen, Verwendung von Wärmeträgerflüssigkeiten etc. keine Einschränkungen bekannt, die eine Kombination beider Technologien verhindern würden.

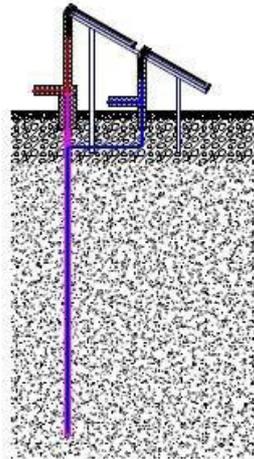


Abbildung 22: Schemata von Sondenbohrung und Flächenkollektor kombiniert mit einer solarthermischen Anlage

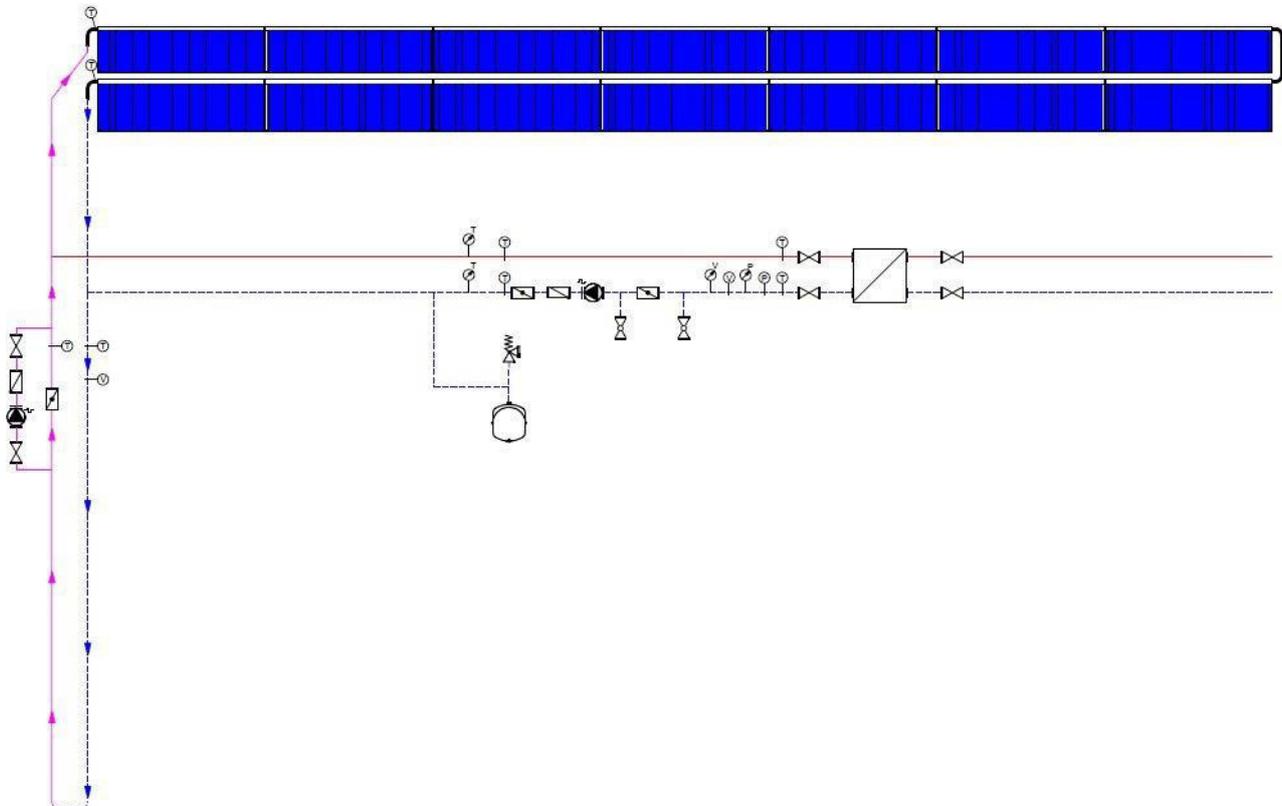


Abbildung 23: Hydraulikschema einer Tiefensondenanlage

In der Geothermie ist die Verwendung von speziellen Kunststoffen lange üblich und diese wurden zum Teil auf die Solarthermie angepasst. Auch in Praxisbeispielen existiert bereits mehrfach der Nachweis, dass die Kombination funktioniert<sup>17</sup>. Nach unseren Erkenntnissen ist es möglich den gesamten Kreislauf mit einer Pumpe zu betreiben, die je nach Bedarf durch ein Umschaltventil auch lediglich den Solarkreis bedienen kann. Da die von uns verwendeten MEGA-Kollektoren über einen deutlich größeren Rohrdurchmesser verfügen als Standardanlagen ist die hydraulische Verbindung beider Anlagen kein Problem. Im Einzelfall zu klären wäre die Verwendung von Wasser als Wärmeträgermedium in der geothermischen Anlage. Im Normalfall wird auch diese mit einer Sole, also einem Wasser/Glykol Gemisch betrieben, um die Frostgefahr auszuschließen. Da unser Ansatz jedoch ein Gesamtsystem und keine Systemtrennung vorgesehen hat, wäre der Betrieb mit Wasser zwingend nötig. Die Pumpe ist so auszulegen, dass das gesamte Medium in Solar- sowie geothermischer Anlage ohne weiteres bewegt werden kann. Falls dies aus bestimmten Gründen nicht möglich wäre, ist eine genaue Berechnung eines Wärmetauschers erforderlich.

Nach unseren Erkenntnissen würde eine Verbindung beider Technologien einwandfrei funktionieren, wenn die Gesamtanlage dementsprechend geplant und ausgelegt wird. Außerdem wäre für die Projektanwendung eine ausgereifte Steuerung notwendig.

## 11 Verwendung natürlicher Zirkulation zur Frostfreihaltung

Unter einer natürlichen Zirkulation versteht man die Zirkulation einer Flüssigkeit in einem geschlossenem Rohrleitungskreis, die auf Dichteänderungen zurückzuführen ist und durch Temperaturunterschiede verursacht wird. Bei diesem Prozess wird Wärme von einer Wärmequelle zu einer Wärmesenke transportiert. Für den Kreislaufbetrieb einer natürlichen Zirkulation sind keine mechanischen Anlagenkomponenten wie z. B. eine Pumpe erforderlich, um die zirkulierende Bewegung einer Flüssigkeit aufrechtzuerhalten. Eine natürliche **Konvektion** ähnelt gewissermaßen einer natürlichen **Zirkulation**, ist jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchung, da ihr Schwerpunkt bei der Wärmeübertragung (Wärmeübergangskoeffizient) in einem Fluid liegt. In unserem Fall liegt der Schwerpunkt beim Volumenstrom beziehungsweise der Zirkulationsbewegung einer Flüssigkeit in einem geschlossenem Rohrleitungskreis, der durch eine natürliche Zirkulation herbeigeführt wird.

Eine natürliche Zirkulation wird zentral durch eine Änderung der Dichte hervorgerufen. In diesem Zusammenhang kommt der Dichte eine wichtige Rolle zu. Die Dichte gibt an, welche Masse [kg] ein Stoff (Flüssigkeit) pro Kubikdezimeter [dm<sup>3</sup>] hat.

### 11.1 Bedingungen für eine natürliche Zirkulation

#### a) Wärmequelle und Wärmesenke

Bei einer natürlichen Zirkulation müssen stets eine Wärmequelle sowie eine Wärmesenke vorhanden sein.

- Wird eine Flüssigkeit von einer Wärmequelle (Erdwärme) erwärmt, dehnt sich diese aus, die Dichte nimmt ab und steigt nach oben.
- Wird eine Flüssigkeit von einer Wärmesenke (MEGA-Kollektoranlage) abgekühlt, zieht sich diese zusammen, die Dichte nimmt zu und fällt nach unten.

---

<sup>17</sup> Solar- und Geothermie ideal kombiniert, IKZ Fachplaner, Chistoph Rosinski, 2007

- b) **Gravitationskraft**  
Eine natürliche Kreislaufzirkulation kann nur in einer Gravitationskraft stattfinden, die je nach Standort unterschiedlich sein kann.
- c) **Geometrie**  
Eine natürliche Zirkulation in einem geschlossenen, mit Flüssigkeit gefüllten Rohrkreislauf wird dadurch erreicht, dass die Wärmesenke in diesem Kreislauf höher liegt als die Wärmequelle.
- d) **Rohrleitung**  
Eine natürliche Zirkulation wird dadurch begünstigt, wenn die Rohrleitungsführung zwischen der Wärmequelle und Wärmesenke idealer Weise vertikal verläuft. Horizontal verlaufende Rohrleitungen erschweren hingegen den Prozess einer natürlichen Zirkulationsströmung. Zudem sollten Rohrleitungen so dimensioniert werden, dass diese geringe Rohrreibungsverluste (Druckverluste) aufweisen. Ansonsten würde eine natürliche Zirkulation nur unzureichend bis gar nicht funktionieren.
- e) **Kontaktflächen**  
An der Wärmequelle als auch an der Wärmesenke müssen gute Eigenschaften der Wärmeübertragung zur Flüssigkeit gegeben sein.

### 11.2 Massenstrom Durchflussmenge bei einer natürlichen Zirkulation

Bei einer natürlichen Zirkulationsströmung wird die Durchflussmenge durch das Gleichgewicht zwischen **Antriebs-** und **Widerstandskräften** bestimmt. Die Antriebskraft ergibt sich aus dem Dichteunterschied zwischen der Wärmequelle „Erdwärmesonde“ und der Wärmesenke „MEGA-Kollektoranlage“. Die ausgleichende Widerstandskraft ergibt sich durch den Dichtegradienten und den Höhenunterschied zwischen der Wärmequelle „Erdwärmesonde“ und der Wärmesenke „MEGA-Kollektoranlage“. Je größer der Temperaturunterschied zwischen der Wärmequelle „Erdwärmesonde“ und der Wärmesenke „MEGA-Kollektoranlage“ ist, desto größer ist die thermische Förderhöhe und die daraus resultierende Durchflussmenge.

### 11.3 Natürlichen Zirkulation in einer MEGA-Kollektoranlage mit Frostfreihaltung durch Erdwärme

Um eine MEGA-Kollektoranlage mit Geothermie frostfrei halten zu können - wobei der Wärmetransport über einen natürlichen Zirkulationskreislauf erfolgen soll - wurden folgende Punkte im Hinblick auf den Warentransport näher untersucht:

- a. Zwischen der Erdwärmesonde und der MEGA-Kollektoranlage muss ein stabiler und großer Temperaturunterschied bestehen. Dies wird über die Länge der Erdwärmesonde realisiert.
- b. Die Rohre der Erdwärmesonde sollten vorzugsweise senkrecht zur Wärmesenke (MEGA-Kollektoranlage) im Erdreich verlegt sein. Dies dürfte in der Realisierung kein Problem darstellen.
- c. Die Rohre der Erdwärmesonde sollten einen großen Durchmesser haben, um einen geringen Rohrreibungswiderstand zu haben. Dies dürfte in der Realisierung kein Problem darstellen.

- d. Die Rohre der Erdwärmesonde sollte mit einem gutem wärmeleitenden Verfüllungsmaterial verpresst werden. Dies dürfte in der Realisierung kein Problem darstellen.
- e. Das Sammlerrohr der MEGA-Kollektoranlage verläuft über eine Länge von 42 m horizontal und kann nicht verändert werden. Dies erschwert die Funktion einer natürlichen Zirkulationsströmung

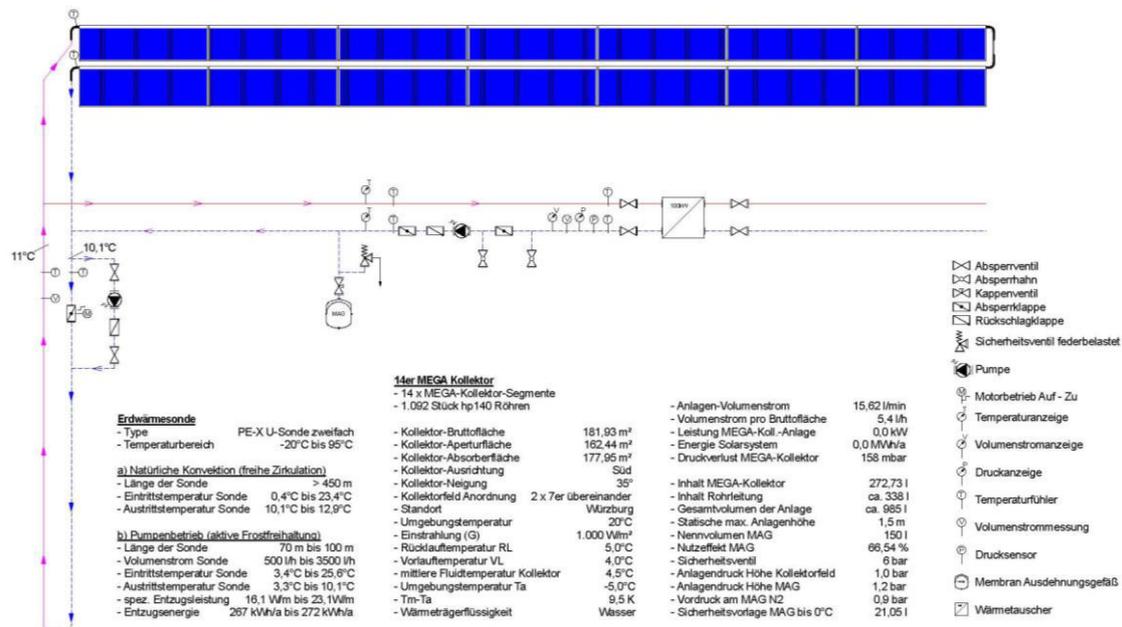


Abbildung 24: Kollektoranlage mit Erdwärmesonde

Nachdem die Rohrleitungsgeometrie in Abbildung 1 für die Funktionsbestimmung einer natürlichen Kreislaufzirkulation sehr komplex ist und durch das 42 m lange horizontale Sammlerrohr der MEGA-Kollektoranlage erheblich negativ beeinflusst wird, wurde daher auf eine manuelle Berechnung nicht näher eingegangen. Stattdessen wurde die Anlagenhydraulik in Abbildung 1 in einem Simulationsprogramm nachgebildet und simuliert.

Um eine Anlagensimulation überhaupt durchführen zu können, musste zunächst ein geeigneter Volumenstrom dargelegt werden, der einer natürlichen Kreislaufzirkulation nahekommt, um eine 14 MEGA-Kollektoranlage durchgehend frostfrei zu halten. Daher orientierte man sich zunächst an den nachstehenden Punkten:

- a) Anhand vorrangiger Simulationen die auf einer erzwungenen Kreislaufzirkulation basierten, konnte ein Mindestvolumenstrom von 500l/h bei einer Sondenlänge von 90m ermittelt werden, um die MEGA-Kollektoranlage frostfrei zu halten.
- b) Die Grashof-Zahl ist ein guter Indikator und Anhaltspunkt für die Einschätzung eines Mindestmassenstrom. Dabei definiert sie das Verhältnis von **Auftriebskraft** zu **viskoser Kraft**, die auf eine Flüssigkeit in der Strömungsgrenzschicht (laminar zu turbulent) einwirkt. Die Grashof-Zahl entspricht in der *natürlichen Konvektion* in etwa der Reynolds-Zahl bei der *erzwungenen Konvektion*. Eine natürliche Konvektion entsteht dann, wenn in einer Flüssigkeit Bewegung und Vermengung durch Dichteschwankungen verursacht wird. In der Regel nimmt die Dichte durch Temperaturanstieg ab und

die Flüssigkeit steigt nach oben. Diese Aufwärtsbewegung wird durch die Auftriebskraft herbeigeführt und wird von der **viskosen Kraft** (entgegengesetzten Kraft) negativ beeinflusst.

Die Grashof-Zahl ist ein Weg, um die entgegengesetzten Kräfte zur Funktion einer natürlichen Zirkulation zu verifizieren.

Dimensionslose Grashof-Zahl

$$Gr = \frac{\text{Auftriebskraft}}{\text{viskose Kraft}} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot L^3}{\nu^2}$$

g	Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
β	Wärmeausdehnungskoeffizient	1/K
Δt	mittel. Temperaturdifferenz	K
L	vertikale Länge	m
ν	kinematische Viskosität	m <sup>2</sup> /s

- Wenn in einer *vertikalen Rohrleitung* die Reynoldszahl  $Re < 2320$  beträgt, spricht man von einer **laminaren Strömung**
- Wenn in einer *vertikalen Rohrleitung*  $Gr / Re^2 > 1$  herrscht, spricht man von einer **freien Konvektion**

Diese Angaben sind nur in Anbetracht einer vertikalen Rohrleitung zu sehen und nicht für eine horizontale Rohrleitung. Diese Angaben sind lediglich für die Bewertung vertikaler Rohrleitungen zu bewerten. Eine horizontale Bewertung kann nach unseren Erkenntnissen kaum berechnet werden und würden einem realen Versuch bedürfen.

#### 11.4 Jahressimulation des Frostfreihaltebedarfs

Im Simulationsprogramm von Polysun konnte die Anlagenhydraulik in Abbildung 1 abgebildet werden. Dabei bestand aber keine Möglichkeit, eine gezielte Simulation auf eine Sondenlänge durchzuführen, die wiederum einen Aufschluss darüber gibt, ob einer natürliche Kreislaufzirkulation im gesamten System überhaupt funktioniert. Dies kann nach unserem Wissen auch mit keiner anderen Software bewerkstelligt werden. Mit diesem Simulationsprogramm besteht somit keine Möglichkeit - weder über direkte noch über eine indirekte Simulation - ein Ergebnis abzuleiten, ob eine natürliche Kreislaufzirkulation im gesamten System überhaupt stattfindet. Demzufolge besteht auch keine Möglichkeit, einen Volumenstrom zu simulieren, der eine natürliche Kreislaufzirkulation wiedergibt. Die einzige Möglichkeit plausible Sondenlängen zu erhalten, für die Frage, ob eine natürliche Kreislaufzirkulation funktionieren könnte, ist die Annahme eines Volumenstroms, der einer natürlichen Kreislaufzirkulation nahekommt. Somit wurde ein Volumenstrom nach Abwägungen aller Kenntnisse auf 200l/h festgelegt. Alles andere muss dann durch die Temperaturdifferenz, die in einer Anlage vorkommt, bewerkstelligt werden.

Bei der Anlagensimulation konzentrierte man sich zunächst auf einen Muster-Standort mit den niedrigsten Außentemperaturen, der dem Standort Garmisch-Partenkirchen entsprach und in das Simulationsprogramm eingegeben wurde. Anschließend wurde der zuvor festgelegte Volumenstrom von 200 l/h als Konstante und eine Sondenlänge von 250 m als Variable in das Simulationsprogramm eingegeben, um damit die erste Simulation zu starten. Alle anderen Einflussgrößen wie z.B.: Dämmung, Rohrleitung, Rohrleitungsgeometrie,

Werkstoffe sowie die Grundparameter im Regler wurden gezielt vordefiniert und in das Simulationsprogramm als weitere Konstante eingegeben.

Nachdem der erste Simulationsvorgang abgeschlossen war, wurde die Länge der Erdwärmesonde um 50 m verlängert und der Simulationsvorgang erneut gestartet. Dieser Simulationsvorgang wurde bis auf einer Sondenlänge von 600m wiederholt und dies bei einem konstanten Volumenstrom von 200l/h. Anschließend wurden die Simulationsergebnisse in Bezug auf die mittlere Kollektortemperatur ausgewertet. Betrug die mittlere Kollektortemperatur zu jedem Zeitpunkt des Jahres konstante  $+5^{\circ}\text{C}$  oder höher, wurde das eigentliche Ziel erreicht, die Anlage dauerhaft frostfrei zu halten. In der nachfolgenden Tabelle 5 (Simulationen) kann man in der Spalte "Jahr" und bei der Zeile "mittlere Kollektortemperatur" rote ( $<5^{\circ}\text{C}$ ) und grüne ( $\geq 5^{\circ}\text{C}$ ) Temperaturangaben ablesen. Die rot markierten Temperaturangaben weisen auf Sondenlängen hin, die nicht für einen frostfreien Anlagenbetrieb geeignet sind. Die grün markierten Temperaturangaben sind für einen ganzjährigen frostfreien Anlagenbetrieb durchaus geeignet.

Tabelle 3 zeigt, dass die mittlere Kollektortemperatur  $T_m$  über den gesamten Jahreszeitraum erst ab einer Sondenlänge von  $>450\text{m}$  konstante  $+5^{\circ}\text{C}$  oder höher beträgt. Rein rechnerisch könnte der Wärmetransport durchaus über die natürliche Zirkulation funktionieren. Abschließend lässt sich jedoch sagen, dass die Funktion einer natürlichen Kreislaufzirkulation in der Anlagenabbildung 1 nur durch eine experimentelle Untersuchung ermittelt werden kann.

Tabelle 3: Jahressimulation der Sondenlängen für die freie Zirkulation

Garmisch-Partenkirchen (GAP)														
		Jahr	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
tiefste Außentemperatur	min. Ta	-12,7°C	-12,7°C	-11,1°C	-5,3°C	-2,0°C	1,4°C	6,3°C	8,1°C	7,4°C	3,7°C	-2,0°C	-5,6°C	-10,6°C
Soll Kollektortemperatur	min. Tm	5,0°C												

Volumenstrom Primärkreislauf	Sondenlänge		Jahr	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
200 l/h	250m	mittlere Kollektortemperatur	4,7°C	4,7°C	5,3°C	6,0°C	9,4°C	15,6°C	19,9°C	23,3°C	22,6°C	14,9°C	8,2°C	5,8°C	4,9°C	
		Stromverbrauch Pumpe	8,90 kWh	4,10 kWh	1,40 kWh	0,03 kWh	0,00 kWh	0,60 kWh	2,80 kWh							
		Entzugsenergie der Sonde	258,00 kWh	121,00 kWh	40,70 kWh	0,70 kWh	0,00 kWh	16,10 kWh	79,80 kWh							
	300m	mittlere Kollektortemperatur	4,8°C	4,8°C	5,4°C	6,0°C	9,4°C	15,6°C	19,9°C	23,3°C	22,6°C	14,9°C	8,2°C	5,8°C	5,0°C	
		Stromverbrauch Pumpe	8,90 kWh	4,00 kWh	1,40 kWh	0,03 kWh	0,00 kWh	0,60 kWh	2,80 kWh							
		Entzugsenergie der Sonde	260,00 kWh	121,00 kWh	40,90 kWh	0,70 kWh	0,00 kWh	16,40 kWh	81,00 kWh							
	350m	mittlere Kollektortemperatur	4,9°C	4,9°C	5,4°C	6,0°C	9,4°C	15,6°C	19,9°C	23,3°C	22,6°C	14,9°C	8,2°C	5,8°C	5,1°C	
		Stromverbrauch Pumpe	8,80 kWh	4,00 kWh	1,40 kWh	0,03 kWh	0,00 kWh	0,60 kWh	2,80 kWh							
		Entzugsenergie der Sonde	263,00 kWh	122,00 kWh	41,30 kWh	0,70 kWh	0,00 kWh	16,50 kWh	82,20 kWh							
	400m	mittlere Kollektortemperatur	4,9°C	4,9°C	5,5°C	6,0°C	9,4°C	15,6°C	19,9°C	23,3°C	22,6°C	14,9°C	8,2°C	5,8°C	5,2°C	
		Stromverbrauch Pumpe	8,70 kWh	4,00 kWh	1,40 kWh	0,03 kWh	0,00 kWh	0,60 kWh	2,80 kWh							
		Entzugsenergie der Sonde	264,00 kWh	123,00 kWh	41,00 kWh	0,70 kWh	0,00 kWh	16,60 kWh	82,60 kWh							
	450m	mittlere Kollektortemperatur	5,0°C	5,0°C	5,5°C	6,0°C	9,4°C	15,6°C	19,9°C	23,3°C	22,6°C	14,9°C	8,2°C	5,8°C	5,2°C	
		Stromverbrauch Pumpe	8,70 kWh	4,00 kWh	1,40 kWh	0,03 kWh	0,00 kWh	0,60 kWh	2,80 kWh							
		Entzugsenergie der Sonde	266,00 kWh	123,00 kWh	42,20 kWh	0,70 kWh	0,00 kWh	16,70 kWh	83,20 kWh							
	500m	mittlere Kollektortemperatur	5,1°C	5,1°C	5,6°C	6,0°C	9,4°C	15,6°C	19,9°C	23,3°C	22,6°C	14,9°C	8,2°C	5,8°C	5,3°C	
		Stromverbrauch Pumpe	8,70 kWh	3,90 kWh	1,40 kWh	0,03 kWh	0,00 kWh	0,60 kWh	2,70 kWh							
		Entzugsenergie der Sonde	267,00 kWh	123,00 kWh	42,60 kWh	0,70 kWh	0,00 kWh	16,90 kWh	83,30 kWh							
	550m	mittlere Kollektortemperatur	5,0°C	5,0°C	5,5°C	6,0°C	9,4°C	15,6°C	19,9°C	23,3°C	22,6°C	14,9°C	8,2°C	5,8°C	5,2°C	
		Stromverbrauch Pumpe	8,70 kWh	4,00 kWh	1,40 kWh	0,03 kWh	0,00 kWh	0,60 kWh	2,80 kWh							
		Entzugsenergie der Sonde	266,00 kWh	123,00 kWh	42,20 kWh	0,70 kWh	0,00 kWh	16,70 kWh	83,20 kWh							
	600m	mittlere Kollektortemperatur	5,1°C	5,1°C	5,6°C	6,0°C	9,4°C	15,6°C	19,9°C	23,3°C	22,6°C	14,9°C	8,2°C	5,8°C	5,3°C	
		Stromverbrauch Pumpe	8,70 kWh	3,90 kWh	1,40 kWh	0,03 kWh	0,00 kWh	0,60 kWh	2,70 kWh							
		Entzugsenergie der Sonde	267,00 kWh	123,00 kWh	42,60 kWh	0,70 kWh	0,00 kWh	16,90 kWh	83,30 kWh							

## 12 Rechtliche Grundlagen

Für die Installation und den Betrieb von solarthermischen sowie geothermischen Anlagen ist es in Deutschland zwingend erforderlich, gesetzliche Bestimmungen einzuhalten. Diese werden für beide Technologien unabhängig voneinander im folgenden Kapitel erläutert.

### 12.1 Solarthermie

Für Photovoltaik aber auch thermische Solaranlagen gilt die Definition einer baulichen Anlage im Sinne des Baurechts. Ob hierfür eine Genehmigung zum Bau einer Standard-Solaranlage beider Technologien auf einem Dach oder einer Fassade bzw. auf einer Freifläche erforderlich ist, entscheidet sich nach dem Landesbaurecht jedes einzelnen Bundeslandes. Dem jeweiligen Landesbauordnungen der Bundesländer übergeordnet ist das Baugesetzbuch (BauGB). Grundsätzlich gilt, dass die Errichtung einer Solaranlage nach Bundes- bzw. Landesbaugesetzen genehmigungsfrei ist, wenn auf einer oder in eine Dachfläche installiert wird. Anlagen jedoch, die an Fassaden, auf Freiflächen oder als sogenannte Überkopfanlagen errichtet werden sind genehmigungspflichtig. Für Freiflächenanlagen wie zum Beispiel Solarparkanlagen auf unbebauten Grundstücken gilt eine Baugenehmigungspflicht immer, wenn sie eine bestimmte Größe überschreiten. Neubauten von Solaranlagen im Außenbereich stellen nach der Landesbauordnung einen Eingriff in Natur und Landschaft dar. Es findet hier eine teilweise dauerhafte Versiegelung statt. Zusätzlich gehen Lebensraum für Pflanzen und Tiere verloren. Außerdem wird die Fläche für die Versickerung von Regenwasser verringert und Abflüsse bei Starkregen nehmen zu. Eine Veränderung bzw. Beeinträchtigung des Landschaftsbildes mit Folgen für den Erholungswert der offenen Landschaft für den Menschen wird zudem mit angeführt.<sup>18</sup> Aus diesen Gründen ist laut dem deutschen Baugesetzbuch für die Errichtung einer solchen Anlage ein Bauleitplan zu erstellen.

#### 12.1.1 Baugesetzbuch

Das deutsche Baugesetzbuch ist für die Bauplanung das wichtigste Instrument und Gesetz. Hier sind die Parameter für alle städteplanerische Instrumente geregelt welche den Gemeinden zur Verfügung stehen. Das Baugesetzbuch ist für die Umsetzung folgender Richtlinien zuständig:

1. Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wild lebenden Tiere und Pflanzen (ABl. L 206 vom 22.7.1992, S. 7), die zuletzt durch die Richtlinie 2013/17/EU (ABl. L 158 vom 10.6.2013, S. 193) geändert worden ist,
2. Richtlinie 2001/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Juni 2001 über die Prüfung der Umweltauswirkungen bestimmter Pläne und Programme (ABl. L 197 vom 21.7.2001, S. 30),
3. Richtlinie 2009/147/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. November 2009 über die Erhaltung der wildlebenden Vogelarten (ABl. L 20 vom 26.1.2010, S. 7), die zuletzt durch die Richtlinie 2013/17/EU (ABl. L 158 vom 10.6.2013, S. 193) geändert worden ist,
4. Richtlinie 2011/92/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Dezember 2011 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten (ABl. L 26 vom 28.1.2012, S. 1), die zuletzt durch die Richtlinie 2014/52/EU (ABl. L 124 vom 25.4.2014, S. 1) geändert worden ist.

---

<sup>18</sup> Bauen im Außenbereich, Baugesetzbuch (BauGB), §35, Bundesrepublik Deutschland, 2021

Im BauGB wird eine Baunutzungsverordnung (BauNVO) festgeschrieben die eine Unterteilung der Flächen in Bauflächen definiert, wenn sie einer allgemeinen Art der baulichen Nutzung unterliegen (§ 1 Abs.1 Nr. 1-4 BauNVO). Aber auch die Festlegung als Baugebiete für eine besondere Art der Nutzung wird vorgeschrieben (§ 1 Abs.2 Nr. 1-11 BauNVO). Eine allgemeine bauliche Nutzung beschreibt hier zum Beispiel die Errichtung von Wohnbau, gemischten Flächen oder gewerblichen Flächen. Die besondere Art der baulichen Nutzung umschreibt unter anderem reine Wohngebiete, Dorfgebiete, Kerngebiete oder Industriegebiete. Die einzelnen Paragraphen der BauNVO geben damit an, welche Art der Nutzung in welchem Gebietstyp überhaupt zulässig ist.

Die Umsetzung der Richtlinien wird mit verschiedenen Instrumenten verfolgt, welche in den weiteren Kapiteln näher erläutert werden.

### 12.1.2 Bauleitplanung

Die im Baugesetzbuch verankerte Bauleitplanung dient als wichtigstes Planungswerkzeug der Gemeinden für eine Lenkung und Ordnung der städtebaulichen Entwicklung. Als Grundlage dient hier die festgeschriebene BauNVO. Die Bauleitplanung besteht aus einem zweistufigen System. Zuerst wird in einer vorbereitenden Bauleitplanung ein Flächennutzungsplan (FNP) für das gesamte Gemeindegebiet erstellt (§§ 5–7 BauGB). Als zweiter Schritt wird dieser FNP um eine verbindliche Bauleitplanung dem Baubauungsplan ergänzt. Dieser wird für räumliche Teilbereiche des Gemeindegebiets aufgestellt (§§ 8–10 BauGB). Die Bauleitplanung stellt die Grundlage aller Gemeinden dar, die Maßgaben des Baugesetzbuches vorzubereiten und umzusetzen. Unter anderem ist hier in § 1 Abs. 5 BauGB geregelt, das die Bauleitplanung dazu betragen soll eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den Klimaschutz und die Klimaanpassung zu erhalten und zu entwickeln. Da einige der Grundsätze des BauGB der Natur- und Umweltschutz aber auch der Schutz des Landschaftsbildes ist, gelten für den Außenbereich nach § 35 BauGB mitunter eigene Vorgaben. So darf hier unter anderem nur gebaut werden, wenn keine öffentlichen Belange entgegenstehen und eine ausreichende Erschließung gewährleistet ist. Eine öffentliche Versorgung mit Wärme wird laut § 35 Absatz 3 als zulässig erklärt, wenn die beschriebenen Grundsätze erfüllt sind. Eine klare Abgrenzung was als Außenbereich zu bezeichnen ist fehlt jedoch in der Gesetzgebung. Die Bauleitpläne sind laut BauGB selbstständig von den Gemeinden anzufertigen.

### 12.1.3 Flächennutzungsplan (vorbereitender Bauleitplan)

Die Gemeinde ist durch den Flächennutzungsplan (FNP) im Stande für das gesamte Gemeinde umfassende Gebiet die Art der Bodennutzung nach allen voraussehbaren Bedürfnissen klar zu regeln und darzustellen. Im FNP können Bauflächen sowie Baugebiet beschrieben werden. Zusätzlich werden bereits Nutzungs- und Ausstattungsmerkmale für Flächen festgelegt. Zum Beispiel für Anlagen mit besonderer Nutzung wie Versorgung, Sport- und Spiel aber auch Anlagen zur Energieerzeugung, die dem Klimawandel entgegenwirken.<sup>19</sup> Der Flächennutzungsplan ist allerdings keine Rechtsvorschrift und hat somit keine direkte rechtliche Wirkung gegenüber. Er bildet also keine rechtliche Grundlage für die Bebauung von Flächen oder Gebieten genauso wenig wie für bodenordnende Maßnahmen. Grundsätzlich hat der FNP eher gemeindeinterne Bedeutung. Erst der Bebauungsplan dient als rechtliche Grundlage gegenüber Dritten.

---

<sup>19</sup> Vorbereitender Bauleitplan – Flächennutzungsplan, Baugesetzbuch (BauGB) – Abschnitt 2, 2021

#### 12.1.4 Bebauungsplan (verbindlicher Bauleitplan)

Nach § 8 Abs. 2 BauGB sind Bebauungspläne die verbindlichen Bauleitpläne welche aus dem FNP als vorbereitenden Bauleitplan entwickelt werden. Im Bebauungsplan sind nur noch Baugebiete aufzuführen. Zu Beispiel einzelne Grundstücke oder ein Konglomerat von Grundstücken. Es sind hierfür klare Abgrenzungen zu definieren. Durch die Aufstellung von Bebauungsplänen werden die Darstellungen des FNP durch rechtsverbindliche Festsetzungen konkretisiert.<sup>20</sup> Er ist also die Festsetzung des Baurechts und bestimmt welche Art der Grundstücksnutzung und in welchem Ausmaß zugelassen ist. Allerdings ist es nach § 9 BauGB möglich einen Bebauungsplan auch ohne gültigen FNP zu veröffentlichen, wenn anzunehmen ist das der Bebauungsplan aus den entstehenden Darstellungen des FNP entwickelt wird. Damit gilt der Bebauungsplan als Grundlage zum Vollzug der im Gesetzbuch festgeschriebenen Maßnahmen.

Der § 2 Abs. 4 des Baugesetzbuches schreibt vor, dass bei der Erstellung von Bauplänen eine Umweltprüfung durchzuführen ist. Für diese sollen die voraussichtlich zu erwartenden Umweltauswirkungen ermittelt werden.<sup>21</sup> Der Grad der Detaillierung wird hier in jeder Bauleitplanung vorher festgesetzt. Das Ergebnis des Umweltberichtes muss in die Bewertung und Abwägung des Bebauungsplanes mit einfließen.

Zusätzlich ist im BauGB § 3 die Beteiligung der Öffentlichkeit vorgeschrieben. Dies soll möglichst frühzeitig geschehen um etwaige Unstimmigkeiten in Fragen der Bebauung und der Entwicklungsziele auszuräumen.<sup>22</sup>

#### 12.1.5 Landesbauordnung

Als ordnendes Instrument auf Länderebene fungiert die Bauordnung. Hier werden Regularien festgeschrieben, um Gefahren für Leib und Leben abzuwenden sowie die öffentliche Sicherheit und Ordnung zu gewährleisten. Qualitätsstandards werden festgelegt, um Schäden an fremden Sachen zu vermeiden. Zudem werden formale Regelungen getroffen, die den Ablauf von Genehmigungsverfahren und die Organisation innerhalb der Bauaufsichtsbehörden betreffen sowie die Grundvoraussetzungen für die Bauvorlageberechtigung schafft.

### 12.2 Geothermie

Für die zwei zu unterscheidenden Arten der Geothermie in der oberflächennahen sowie der tiefen Geothermie sind unterschiedliche Auflagen und Bestimmungen zu erfüllen. Da für unser Vorhaben lediglich die oberflächennahe Geothermie und das auch nur bis zu einer Tiefe von max. 100m in Betracht kommt, bezieht sich das folgende Kapitel ausschließlich auf die gesetzlichen Bestimmungen dafür. Die Definition von „oberflächennaher Geothermie“ wurde bereits ausreichend in Kapitel 5.1 beschrieben.

Für die Nutzung von Erdwärme mit vertikalen Kollektoren (Erdwärmesonden) bis zu einer Leistung von maximal 30 kW und einer Tiefe von maximal 100 m muss in der Regel keine Erlaubnis beantragt werden. Erdwärmesonden haben jedoch durch ihre Installation einen mittelbaren oder unmittelbaren Einfluss auf die Beschaffenheit des Grundwassers. Aus diesem Grund sind diese anzeigepflichtig. Mindestens vier Wochen vor Beginn der Arbeiten muss diese bei der zuständigen unteren Wasserbehörde eingehen. Die untere Wasserbehörde hat ihrerseits vier Wochen Zeit das angezeigte Vorhaben zu befristen, zu

<sup>20</sup> Information zur Außenwirkung des Flächennutzungsplans, Stadtplanungsamt Freiburg i. Br., 2009

<sup>21</sup> Aufstellung der Bauleitpläne, Baugesetzbuch (BauGB), §2, Bundesrepublik Deutschland, 2021

<sup>22</sup> Beteiligung der Öffentlichkeit, Baugesetzbuch (BauGB), §3, Bundesrepublik Deutschland, 2021

beschränken oder zu untersagen. Diese Maßnahmen werden zum Schutz des Grundwassers abgewogen.<sup>23</sup> Grundsätzlich gilt, dass bei der Erschließung und Gewinnung von Erdwärme immer wasserrechtliche und bergrechtliche Vorgaben zu beachten sind. Diese haben stets das Interesse und Ziel einen Schutz und eine nachhaltige Bewirtschaftung des Grundwassers zu gewährleisten. Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) bietet hierfür die Grundlagen und hat mit § 49 die Regelungen für Erdaufschlüsse zum Schutze des Grundwasserkörpers geregelt. Zusätzliche Bestimmungen werden durch die Landeswassergesetze festgeschrieben.

### 12.2.1 Wasserhaushaltsgesetz (WHG)

Das wasserrechtliche Ordnungsrecht in Deutschland umfasst die Gewässer, die der staatlichen Bewirtschaftung unterstellt sind. Bürger und Behörden werden zu schonendem Umgang mit der Ressource Wasser verpflichtet. Das Wasserhaushaltsgesetz stellt hierbei das wichtigste Bundesgesetz dar. Der Ursprung liegt im Jahr 1957. Im Jahr 2010 wurde jedoch eine grundlegend überarbeitete Neufassung veröffentlicht, welche die Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) miteinschließt. Damit wurden die europäischen Anforderungen in das Bundesrecht übernommen und das WHG dient den Bundesländern als Grundlage, die Landeswassergesetze anzupassen. Grundsätzlich gilt: Beeinträchtigungen und Schädigungen des Grundwassers, das eine unserer wichtigsten natürlichen Lebensgrundlagen darstellt, sind zu vermeiden.<sup>24</sup>

### 12.2.2 Anzeigeverfahren

Nach § 49 Abs. 1 Satz 1 WHG sind alle Arbeiten oder Bohrungen oberhalb des Grundwasserspiegels anzeigepflichtig. Nach Prüfung der Anzeige vom Landesamt für Umwelt (LfU) auf Vollständigkeit geschieht eine Charakterisierung in anzeigepflichtige oder erlaubnispflichtige Vorhaben. Es wird unterstellt, dass sie einen unmittelbaren oder mittelbaren Einfluss auf die Bewegung, die Höhe oder die Beschaffenheit des Grundwasserkörpers haben können. Das ausführende Unternehmen ist verpflichtet die Errichtung und Aufnahme eines Aufsuchungsbetriebes, eines Gewinnungsbetriebes und eines Aufbereitungsbetriebes fristgerecht vier Wochen vor Beginn der geplanten Arbeiten anzuzeigen. Die Kreisbehörde und das zuständige Bergamt gem. § 127 BBergG sind in allen Fällen ob oberflächennah (bis 100m) oder Tiefengeothermie (ab 100m) in Kenntnis zu setzen.<sup>25</sup>

Wenn vier Wochen nach der Anzeigenstellung vergangen sind ohne eine eingegangene Einstellungsanordnung, kann mit den Arbeiten begonnen werden. Diese können solange aufrechterhalten werden, bis auf das Grundwasser eingewirkt wird. Falls dies der Fall sein sollte, sind die Arbeiten unverzüglich einzustellen bis über die Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis (siehe Kapitel 8.2.3) entschieden ist

Besonders zu erwähnen ist, dass für den gewählten Standort ausreichend Informationen über die Untergrundverhältnisse vorliegen müssen. Beispielsweise durch bereits getätigte Aufschlüsse in der

---

<sup>23</sup> Erdwärmennutzung in Hessen Leitfaden für Erdwärmesondenanlagen zum Heizen und Kühlen, 6. Überarbeitete Auflage, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Wiesbaden, 2019, S.14

<sup>24</sup> Vgl. Allgemeine Sorgfaltspflichten, Wasserhaushaltsgesetz (WHG), § 5 Abs. 1, 2009

<sup>25</sup> Empfehlungen der LAWA für wasserwirtschaftliche Anforderungen an Erdwärmesonden und -kollektoren, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, 2019, S.8

Nachbarschaft. Somit kann eine hydrogeologische Prognose abgeleitet werden. Falls diese Informationen nicht oder nicht ausreichend vorliegen, muss ein hydrogeologisches Fachgutachten erstellt werden. Diese werden in der Regel von fachkundigen Ingenieurbüros für Hydrogeologie erstellt. Falls nicht genügend Informationen zur Erstellung eines Gutachtens zur Verfügung stehen ist eine Probebohrung anzuzeigen.

Bei Erdkollektoren, also bei horizontal verlegten Kollektoren, liegt in der Regel keine erlaubnispflichtige Gewässerbenutzung vor. Es ist hier davon auszugehen, dass keinerlei Auswirkungen auf das Grundwasser geschehen. Eine Anzeigepflicht besteht ebenfalls nur, wenn der erforderliche Erdaufschluss wie Bohrungen, Sondierungen oder Erdarbeiten nach § 49 Abs. 1 Satz 1 WHG eine unmittelbare oder mittelbare Beeinflussung auf die Bewegung oder die Beschaffenheit des Grundwassers bedeuten. Das kann zum Beispiel der Fall bei Grundwasserflurabständen kleiner als zwei Meter sein.<sup>26</sup>

### 12.2.3 Erlaubnisverfahren

Neben einer Anzeige bei der zuständigen unteren Wasserbehörde, sind der Betrieb und die Errichtung einer Erdsondenanlage grundsätzlich erlaubnispflichtig, wenn sie in den Grundwasserkörper ragen. Es wird angenommen, dass die Anlage dauernde oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß schädliche Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers nach § 49 Absatz 1 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) herbeiführen kann. Zudem wird die Erlaubnispflicht in § 9 Abs. 2 WHG bei der Verwendung von wassergefährdenden Wärmeträgermitteln bestimmt. Wenn eine negative Auswirkung auf die Grundwasserbeschaffenheit zu befürchten ist, kann die Behörde für bestimmte Gebiete engere Grenzen setzen.

Dies gilt ebenfalls wenn das Vorhaben in einem Wasserschutzgebiet geplant ist. In diesen Fällen darf ohne Erteilung der wasserrechtlichen Erlaubnis nicht mit den Arbeiten begonnen werden. Mit einer Novellierung aus dem Jahr 2010 wurden die Einschränkungen für die Errichtung von Erdwärmesonden in Wasserschutzgebieten erhöht. Dadurch besteht für Erdwärmesonden, die bis ins Grundwasser reichen, nunmehr grundsätzlich eine Erlaubnispflicht.

Nach § 12 Abs. 1 Nr. 1 WHG darf die wasserrechtliche Erlaubnis nicht erteilt werden, wenn schädliche, auch durch Nebenbestimmung nicht vermeidbare oder nicht ausgleichbare Gewässeränderungen erwartbar sind.

Bei sogenannten kleinen Anlagen die vom VDI in der Richtlinie 4640 definiert wurde ist unter folgenden Punkten eine vereinfachte und beschleunigte Bewilligung der Erlaubnis möglich.<sup>27</sup>

- Die Heizleistung der angeschlossenen Wärmepumpenanlage beträgt weniger als 30 kW
- Die maximale Tiefe der Bohrungen beträgt nicht mehr als 100 m
- Der Abstand der Anlage zur Grundstücksgrenze beträgt mehr als 5 m
- Der Standort der Anlage befindet sich in einem hydrogeologisch und wasserwirtschaftlich günstigen Gebiet
- Die in den Leitfäden aufgeführten „Anforderungen des Gewässerschutzes an Erdwärmepumpen“ werden eingehalten, d. h., die Ausführung und der Betrieb der Anlage entspricht diesen Anforderungen

---

<sup>26</sup> Erdwärmenutzung in Hessen Leitfaden für Erdwärmesondenanlagen zum Heizen und Kühlen, 6. Überarbeitete Auflage, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Wiesbaden, 2019, S.14

<sup>27</sup> Erdwärmenutzung in Hessen Leitfaden für Erdwärmesondenanlagen zum Heizen und Kühlen, 6. Überarbeitete Auflage, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Wiesbaden, 2019, S.15

Die Erlaubnis bedeutet eine widerrufbare Befugnis, ein Gewässer zu benutzen. Mit ihr kann eine Befristung einhergehen für einen bestimmten Zweck, die Art und das Maß der Nutzung. Sie kann ebenso unter Auflagen und/ oder Bedingungen erteilt werden. Zusätzlich können nachträglich bestimmte zusätzliche, dem Gewässerschutz dienende Anforderungen gestellt werden<sup>28</sup>.

Durch die Beantragung der Erlaubnis entfällt die vorher beschriebene Anzeigepflicht nach § 49 Abs. 1 Satz 1 WHG, da der Antrag auf Erlaubnis zugleich als Anzeige zur Bohrung gilt.

#### 12.2.4 Bundesberggesetz

Neben den wasserrechtlichen Bestimmungen greifen bei der Nutzung von Erdwärme zusätzlich bergrechtliche Anforderungen. Nach § 3 Abs. 3 Nr. 2b des Bundesberggesetzes (BbergG) gilt Erdwärme als ein „bergfreier Bodenschatz“.<sup>29</sup> Die Formulierung des bergfreien Bodenschatzes sagt aus, dass der Besitzer eines Grundstücks nicht automatisch der Besitzer der darunterliegenden Bodenschätze ist. Für die Nutzung der Erdwärme wird danach eine Erlaubnis nach § 7 BbergG und für die Gewinnung grundsätzlich eine Bewilligung nach § 8 BbergG benötigt.

#### 12.2.5 VDI Richtlinie 4640

Für die Errichtung von Wärmepumpenanlagen hat die Gesellschaft für Energie und Umwelt (VDI) eine Richtlinie erlassen die als Grundlage gilt. Diese fasst Punkte wie die Installation und Auslegung solcher Anlagen zusammen und betrachtet Anwendungsfälle. Für die zuständige untere Wasserbehörde dient die Richtlinie als Leitfaden. Folgende Anforderungen als Nebenbestimmungen sind gelistet:<sup>30</sup>

- Grundsätzlich hat die Nutzung der Erdwärme entsprechend den einschlägigen technischen Vorschriften und Regeln (insbesondere nach VDI-Richtlinie 4640) zu erfolgen. Mit den Bohrarbeiten sollen nur qualifizierte Bohrfirmen beauftragt werden, die nach dem DVGW-Arbeitsblatt W 120 in den Gruppen G1 oder G2 oder gleichwertig zertifiziert sind und den Sachkundenachweis für Bohrgeräteleiter gemäß DIN 4021 vorlegen können.
- Für Bohrungen sind die Anforderungen des DVGW-Regelwerkes zu beachten. So sind bei der Erstellung der Bohrungen und der Verwendung von Spülmittelzusätzen die DVGW Arbeitsblätter W 115 und W 116 einzuhalten.
- Der unteren Wasserbehörde ist mindestens zwei Wochen im Voraus der Termin des Abteufens der Bohrungen schriftlich mitzuteilen.
- Die bei der Bohrung angetroffene Schichtenfolge ist durch eine geologische Aufnahme zu dokumentieren und der unteren Wasserbehörde und dem Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie mitzuteilen. Bei Spülbohrungen ist an der Bohrung eine geophysikalische Bohrlochmessung zur Schichtenaufnahme vorzunehmen. Im Regelfall sind pro Anlage eine geophysikalische Bohrlochmessung und ein Schichtenverzeichnis ausreichend.

<sup>28</sup> Bundesverband Geothermie, <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/g/genehmigungspflicht-wasserrechtliche.html>, Januar 2020

<sup>29</sup> Erdwärmennutzung in Hessen Leitfaden für Erdwärmesondenanlagen zum Heizen und Kühlen, 6. Überarbeitete Auflage, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Wiesbaden, 2019, S.16

<sup>30</sup> VDI4640 Richtlinie zur thermischen Nutzung des Untergrundes – erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt 2019

- Bei Misserfolg einer Bohrung vor Einbau der Sonde oder Bau eines Brunnens ist das gesamte Bohrloch bis zur Geländeoberkante dauerhaft wasserdicht zu verpressen.
- Die Anlage ist nach der Inbetriebnahme alle 5 Jahre durch eine fachkundige Person zu warten. Hierbei sind eine visuelle und technische Funktionskontrolle der Sicherheitseinrichtungen vorzunehmen und zu dokumentieren. Festgestellte Mängel sind unverzüglich zu beseitigen. Beim Verdacht einer Grundwasserverunreinigung ist die untere Wasserbehörde zu informieren. Die Stilllegung der Anlage ist der unteren Wasserbehörde unter Nachweis der Verfüllung mindestens zwei Wochen im Voraus anzuzeigen.
- Für Erdwärmesonden und -kollektoren im Bereich der gewerblichen Wirtschaft oder im Bereich öffentlicher Einrichtungen gelten die Anforderungen der VAwS (Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe). Gemäß Anlage 1 (zu § 4) Nr. 2.1.2 VAwS dürfen diese Anlagen nur unter Einhaltung der in der VDI-Richtlinie 4640 Blatt 1 genannten Sicherheitsanforderungen und mit den dort aufgeführten wassergefährdenden Stoffen der WGK 1 (Wassergefährdungsklasse) betrieben werden.
- Es sind nur die in VDI-Richtlinie 4540 Blatt 1 genannten Frostschutzmittel zu verwenden.

### 12.2.6 Geologiedatengesetz (GeolDG)

Nach dem Geologiedatengesetz ist jedes Abteufen einer Bohrung mindestens zwei Wochen vor Beginn der Arbeiten der zuständigen Behörde anzuzeigen.<sup>31</sup> Nach Abschluss der Arbeiten und der Fertigstellung der Sonde ist das ausführende Unternehmen laut Gesetz verpflichtet der Behörde die Dokumentation und die Untersuchungsergebnisse mit folgenden Unterlagen mitzuteilen:<sup>32</sup>

- Lageplan
- Ausbauzeichnung mit erbohrtem Schichtenprofil nach DIN 4023
- Protokoll der Druckprüfungen

Eine Missachtung dieser Mitteilung stellt eine Ordnungswidrigkeit dar.

### 12.2.7 Verbote und Einzelfallprüfungen

Auf Länderebene sind außer dem WHG noch eigene Richtlinien, Erlasse oder Gesetze für die Nutzung von Erdwärme von Bedeutung. Hier wird zum Beispiel das grundsätzliche Verbot einer Errichtung von Erdwärmesonden Anlagen in Trinkwasserschutzgebieten geregelt. Diese Schutzgebiete haben ohnehin bereits eine große Bedeutung. Durch diese Regelungen wird aber zusätzlich der Schutz des Trinkwassers über alles gestellt. Jedoch können in bestimmten Zonen Ausnahmegenehmigungen getroffen werden. In Gebieten die zwar außerhalb von Wasserschutzgebieten liegen, aber eine hervorgehobene Bedeutung für die Wassergewinnung für die öffentlichen Wasserversorgung besitzen, können nach einer Einzelfallprüfung zusätzliche Auflagen erteilt werden. Falls diese Auflagen nicht genügen oder umgesetzt werden können kann eine Bohrung aufgrund von § 54 Abs. 3 WHG gänzlich untersagt werden.

Einen speziellen Fall stellen gespannte Grundwasservorkommen dar. Hier ist ein sehr vorsichtiges Vorgehen nötig, da durch eine unzureichende Abdichtung des Ringspaltes zwischen Sonde und Bohrlochwand eine

---

<sup>31</sup> Allgemeine Vorschriften – Kapitel 1, Geologiedatengesetz (GeolDG), Bundesrepublik Deutschland, 2020

<sup>32</sup> Übermittlung geologischer Daten an die zuständige Behörde – Kapitel 3, Geologiedatengesetz (GeolDG), Bundesrepublik Deutschland, 2020

nachhaltige Änderung der hydraulischen sowie der hydrochemischen Bedingung im Untergrund entstehen kann. Diese können sich bis an die Erdoberfläche auswirken. Hier muss zwingend eine Einzelfallprüfung geschehen.

In artesisch gespannten Quellen stellt sich die Sache noch fragiler dar. Es kann hier zum Beispiel zu einem dauerhaften Ausströmen von Grundwasser an die Erdoberfläche kommen.<sup>33</sup> Da in der Praxis davon ausgegangen wird, dass eine defekte Abdichtung nicht repariert oder wiederhergestellt werden kann, sind Erdsonden in solchen Gebieten nicht gestattet. Flächen, die eine Untergrundkontamination durch Altlasten oder ähnliches besitzen ist stets eine Einzelfallprüfung durchzuführen. Hier ist es möglich, dass eine Bohrung zu einer „Verschleppung“ der Kontamination in andere Erdschichten führt.<sup>34</sup>

### 13 Übersicht und Charakterisierung der ökologischen Anforderungen

Diese Aufgabe wurde an die auditcert Umweltgutachtenorganisation als Unterauftrag vergeben. Bewertet wurden die CO<sub>2</sub> Ausstöße während des laufenden Betriebs in einem Zeitraum von 20 Jahren. Das Gutachten befindet sich im Anhang. Als erste Einschätzung zeigt sich bei der Verwendung des Wasser/Glykol Gemisches eine geringfügige Auswirkung auf die Umwelt und ein hohes CO<sub>2</sub> Einsparpotenzial gegenüber der Verwendung eines Beheizungssystems.

Die Verwendung des Wasser/Glykol Gemisches erzeugt genauso wie die Nutzung einer Erdwärmesonde während des Betriebs kein CO<sub>2</sub>. Lediglich der Strom für die Pumpe, die für die Umwälzung im solarthermischen System benötigt wird, erzeugt 29,38kg Kohlenstoffdioxid. Im Betrieb der Erdwärmesonde würde sich der Verbrauch aufgrund der erweiterten Rohrleitung erhöhen. Für den Bericht wurde ein fiktiver zweiter Kreislauf dazu genommen für den der Strom der benötigten Pumpe 47,33kg CO<sub>2</sub> produzieren würde.

Die Verwendung einer Rohrheizung würde in den kalkulierten 20 Jahren zu einem CO<sub>2</sub> Aufwand von 7.507 kg führen. Zusätzlich zu den bereits erwähnten 29,38kg CO<sub>2</sub> für den Pumpenstrom. Im Verhältnis stellt sich somit die Verwendung des standardmäßig verwendeten Wasser/Glykol Gemisches als sparsamsten in Bezug auf den CO<sub>2</sub> Fußabdruck dar.

Einen negativen Einfluss auf die Umwelt wurde für alle drei Technologien nicht erkannt.

### 14 Übersicht und Charakterisierung der finanziellen Anforderungen

In der folgenden Bewertung werden ausschließlich die Technologiekosten aufgelistet. Für die Verwendung der einzelnen Technologien sind individuelle Zusatzanforderungen notwendig.

- Wasser zur Befüllung und Betrieb der Anlage
- Verlegung zusätzlicher Stromleitungen
- Bauliche Erweiterungen wie Wärmetauscher oder Rohrleitungen

Berechnet wurde am Beispiel der bereits definierten 14 MEGA Segmente, die zu einem MEGA Kollektor verbaut wurden. Abschließend wurden die Summen hochskaliert auf eine derzeit in Umsetzung realistische Anlage mit 180 Segmenten, welche zu insgesamt 13 Kollektoren parallelverschaltet erbaut wird. Der Betrieb und die Kosten sind alle auf eine Laufzeit von 20 Jahren gerechnet. Im Fazit des Kapitels werden die Kosten

<sup>33</sup> Lexikon der Geothermie Artesisch, <https://www.geothermie.de/>, Bundesverband Geothermie e.V., 2020

<sup>34</sup> Hintergrund Grundwasser – Altlasten, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, 2006, S.26

ebenso auf der Ebene der Jahresausgaben bewertet.

### 14.1 Geothermie

Durch eine standortbezogene Planung, die insbesondere die wasserwirtschaftlichen Anforderungen berücksichtigt, können die Herstellungskosten gut abgeschätzt werden. Ein großer Nachteil ist, dass nachträgliche Anpassungen oder die Reparatur von Schäden an Erdwärmesonden quasi nicht möglich sind. Die Gesamtkosten der geothermischen Wärmebereitstellung sind allerdings durch hohe Investitionskostenanteil charakterisiert. Für die theoretische Bearbeitung der Kostenzusammensetzung ist es uns jedoch nicht gelungen ein wirkliches Angebot für eine Beispielanlage zu erhalten. Alle angefragten Unternehmen sagten, dass dies ohne ein definiertes Anlagenprofil, inklusive Standort etc. nicht ohne weiteres machbar sei. Es ist uns jedoch gelungen eine pauschale Kostenübersicht der einzelnen Leistungen zu bekommen. Die Kosten für die Bohrung wurden uns mit 75 € pro Meter angegeben.<sup>35</sup> In Tabelle 1 ist eine Kostenaufstellung für eine beispielhafte Anlage mit einer Bohrtiefe von 90 m. Die Wartung wurde mit einem Satz von 75 € pro Jahr für 20 Jahre berechnet.

aufbauende Planung, Simulation, Berechnung	1.200,00 €
Planung gesamt	4.500,00 €
Response Test	3.000,00 €
Bohrkosten für 90 m Sonde	6.750,00 €
Wartung	1.500 €
	<b>16.950,00 €</b>

### 14.2 Wasser-Glykol Gemisch

Das bisher verwendete und seit Jahren bewährte System hat seine hohen Kosten bei der Anschaffung des Mediums. Die Kosten hierfür wurden auf Basis einer Internetrecherche zusammengestellt. Zudem ist eine jährliche Überprüfung durchzuführen, ob das Wärmeträgermedium noch ausreichende Qualität besitzt. Wir gehen von einem Austausch der Flüssigkeit nach 15 Jahren aus und schätzen die Kosten dafür aus eigener Erfahrung ab. Die Entsorgung ist zusätzlich Kostenpflichtig. Für die Beispielanlage in dieser Projektanlage wird ein Volumen von 420 l Wärmeträgermedium benötigt. Die Wartung wurde mit demselben Satz wie in 12.1 berechnet.

Wärmeträgermedium	1.220,00 €
Wartung	1.500,00 €
Wechsel des Mediums	500,00 €
Entsorgung altes Medium	540,00 €
neues Wärmeträgermedium	1.220,00 €
	<b>4.925,00 €</b>

### 14.3 Heizung

Die Recherche nach Rohrbegleitheizungen wurde ebenfalls durch Internet Recherche durchgeführt. So wurden Industrieanwendungen mit Kosten von 10 € pro laufenden Meter als Grundlage für die folgende Berechnung ausgewählt. Das für diese Projektarbeit zusammengestellte System verfügt neben den 13 MEGA Kollektor Segmenten über insgesamt 78 m Rohrleitung. Es wird angenommen, dass die Beheizung der

<sup>35</sup> Telefonischer Kontakt, <https://www.hsw-rostock.de/>, 2021

Rohrleitung ausreichend ist. Wie in 9.3 beschrieben, wird eine doppelte Belegung zur sicheren Frostfreihaltung gewählt. Die Stromkosten sind mit 30 Cent pro Kilowattstunde angesetzt. In der Theorie ist hier kein Umpumpen der Wärmeträgerflüssigkeit nötig.

Rohrbegleitheizung	780,00 €
Strom Kosten	1.800,00 €
	<b>2.580,00 €</b>

Die Nutzung von Heizstäben ist eine technisch einfach umzusetzende Technologie. Im Normalfall ebenso wartungsarm wie die Nutzung von Rohrbegleitheizungen. Es muss jedoch baulich in das System eingegriffen werden, was in Aufwand und Kosten momentan nicht abschätzbar ist. Für die Frostfreihaltung von insgesamt 78 m Rohrleitung und 14 MEGA Kollektorsegmenten, wird nach unseren Berechnungen ein Heizelement benötigt. Diese muss jedoch über eine hohe Leistung verfügen, um Temperaturspitzen auffangen zu können. Zusätzlich ist es bei dieser Art der Beheizung nötig die Wärmeträgerflüssigkeit im System umzuwälzen. Es werden also zusätzlich Kosten für den Pumpenstrom fällig. Die Stromkosten sind mit 30 Cent pro Kilowattstunde angesetzt.

Heizelement	500,00 €
Strom Kosten Heizung	1.800,00 €
Strom Kosten Pumpe	50,00 €
	<b>2.350,00 €</b>

#### 14.4 Drain Back

Für die Verwendung in einem MEGA Kollektor System stellt das System keine Alternative dar, da die Anlage nicht ohne weiteres abgelassen und wieder befüllt werden kann.

#### 14.5 Kostenvergleich

Die oben aufgelisteten Kosten sind wie bereits erwähnt auf einen MEGA Kollektor von 14 Segmenten bezogen. AKOTEC hat in der Zwischenzeit ein Projekt realisiert, bei dem 180 Segmente zu einem großen Kollektorfeld zusammengeschlossen wurden. Dies geschieht jedoch nicht in einer Reihenschaltung, sondern in Kollektorblöcken welche parallel verschaltet werden. In der Regel werden aus physikalischen Gründen maximal 14 Segmente zusammengeschlossen. In der Einzelkostendarstellung ergibt sich für die geothermische Frostfreihaltung ein massiv erhöhter Kostenaufwand. In einer Skalierung auf eine Großanlage gleichen sich die Zahlen jedoch stark an.

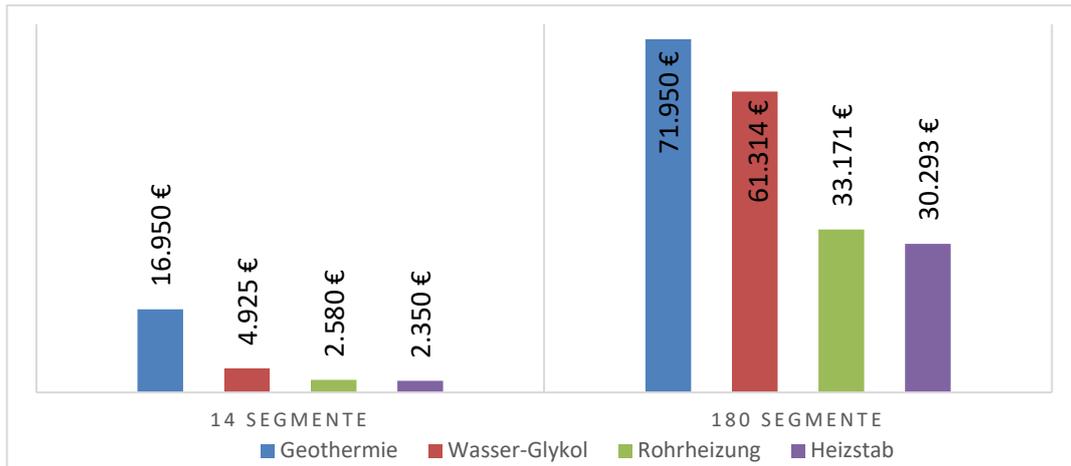


Abbildung 25: Übersicht Kostenentwicklung bei Hochskalierung – links 13, rechts 180 MEGA-Kollektor Segmente

In der Grundidee des Projektes war die Verwendung einer Wärmepumpe nicht vorgesehen. Unsere Berechnungen aus Kapitel 8 haben jedoch gezeigt, dass es einer Bohrtiefe von mindestens 80 m bedarf, um einen Kollektor aus 14 Segmenten mit der benötigten Wärmemenge zu versorgen, um diesen frostfrei halten zu können. Um eine Anlage mit 180 Segmenten (13 Kollektoren zu je 14 Segmenten parallelgeschaltet frostfrei halten zu können wäre der Einsatz einer Wärmepumpe notwendig, um die verfügbare Temperatur auf ein nötiges Level anzuheben. Diese wurde in Abbildung 25 mit 15 T € zu den in Kapitel 14.1 berechneten Kosten addiert. Zusätzlich kommen allerdings noch circa 40 T € Stromkosten für 20 Jahre Betrieb. Dies wurde mit den derzeitigen Stromkosten von 30 Cent pro kWh berechnet und einem Jahresverbrauch der Wärmepumpe von 6000 kWh. Es zeigt sich, dass vor allem bei der Verwendung von Wasser-Glykol eine hohe Kostensteigerung eintritt. Diese geschieht, wie in Kapitel 14.2 bereits beschrieben, durch die hohen Anschaffungs- und Entsorgungskosten. Die Nutzung von Heizelementen bietet im Vergleich die günstigste Alternative.

## 15 Fazit

Im Projekt FroWaSo konnten wir den ganzjährigen Energiebedarf zur Frostfreihaltung einer großtechnischen solarthermischen Anlage im Detail betrachten. Ziel war es, die Eignung einer geothermischen Quelle zu untersuchen. Eine grundsätzliche Kombination beider Technologien ist aus unserer Sicht ohne weiteres möglich. Hydraulisch wie auch anlagentechnisch konnten wir keine Hindernisse feststellen. Es wäre eine wartungsarme und langlebige Möglichkeit eine Frostfreihaltung zu gestalten. Wir reden in diesem Zusammenhang von der Verbindung zweier marktverfügbarer und ausgereifter Technologien.

Für unsere Berechnungen haben wir eine Frostschutzgrenze von 5°C definiert. Anhand dessen zeigte sich, dass an den ausgewählten Standorten teilweise bis zu 190 Tage eine externe Wärmezufuhr benötigt wird. Dies zeigt die große Wichtigkeit des Themas beim Anlagenbetrieb mit Wasser. Eine geothermische Nutzung bis zu einer Tiefe von 100 m ist auf dem gesamten Bundesgebiet ohne viel Aufwand und gesetzliche Beschränkungen möglich. Lediglich Wasserschutzgebiete oder besondere geologische Gebiete sind von einer Nutzung ausgenommen. Eine Bohrung muss lediglich angezeigt werden und fällt zwar unter das Wasserhaushaltsgesetz jedoch noch nicht unter das Bundesbergbaugesetz.

Die erreichten Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass der Faktor Kosten ein entscheidender sein wird bei der Verbindung beider Technologien. Aufgrund sehr hoher Kosten für die geothermische Bohrung finden wir in der Technologie weder eine Option ohne die Verwendung einer Wärmepumpe noch unter Verwendung einer Wärmepumpe. Nach der theoretischen Betrachtung scheint die Nutzung von Heizelementen die weitaus günstigste Variante zu sein. Hier stellt sich jedoch die Frage der Stromzufuhr und ihrer durchgängigen Gewährleistung. Gegenüber der standardmäßig verwendeten Verwendung eines Wasser/Glykol Gemisches konnten wir jedoch zeigen, dass der finanzielle Aufwand nahezu vergleichbar über eine lange Laufzeit der Anlage ist. Der Stromverbrauch der Wärmepumpe stellt pro Jahr einen enormen Posten dar. Wenn dieses Problem durch erneuerbare Technologie im Zusammenspiel mit einem Speicher gelöst werden könnte, wäre eine erneute Prüfung möglich.

Wir haben uns in dem Projekt auf eine geothermische Tiefe von maximal 100 m beschränkt. Unsere Idee, die Frostfreihaltung ohne zusätzlichen Aufwand und Kosten durch freie Konvektion gewährleisten zu können ist anhand unserer Ergebnisse auszuschließen. Hierfür wären wesentlich höhere Temperaturunterschiede in den Systemen notwendig. Es besteht somit noch ein Zweifel, ob die Zirkulation ebenso durch das gesamte Rohrsystem funktionieren würde. Da dies den Kernpunkt für unsere Idee der Energieautarkie in diesem Projekt darstellt, ist für uns ein Weiterführen der Projektidee in ein Praxisprojekt nicht sinnvoll.

Eine mögliche zielführende Verwendung wäre die grundsätzliche Nutzung verschiedener Technologien auf einer Fläche. Wenn eine solarthermische Großanlage erbaut wird, ist es durchaus möglich mehrere geothermische Bohrungen dort zu setzen, um die verbrauchte Fläche effektiver zu nutzen. In diesem Fall könnte im Falle von Frostgefahr Wärme aus dem geothermischen Kreislauf in den Solarkreis geführt werden. Keine der marktreif verfügbaren Technologien ist ohne Nebeneffekte wie bauliche Anpassungen, Entsorgungskosten oder Strombedarf zu verwenden. Wir werden in den kommenden Projekten eine Einzelfallanwendung prüfen sowie möglicherweise alternative Wege suchen um eine Frostfreihaltung sicher gewährleisten zu können.