



DIPLOMARBEIT
Master Thesis

**Thermische Simulation von Flächenabsorbern bei
Erdwärmegewinnung**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.
Dietmar ADAM

und als verantwortlich mitwirkende Assistentin

Univ.Ass. Dipl.-Ing.
Viktoria OSTERMANN

Institut für Geotechnik
Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik

E220

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von
Kalin Mirchev
0927935

Wien, Januar 2013

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir beim Erstellen dieser Arbeit durch ihre Unterstützung zur Seite gestanden sind.

Allen voran bei dem Leiter des Instituts für Grundbau, Boden- und Felsmechanik Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam, der mir erlaubte und ermöglichte, diese Arbeit am Institut für Geotechnik verfassen zu können, sowie bei meiner Betreuerin Univ. Ass. Dipl.-Ing Viktoria Ostermann für ihre Betreuung und besonders für ihre Geduld, Toleranz und außerordentliches Engagement.

Bedanken möchte ich mich auch bei Univ. Ass. Dipl.Ing Nikolay Kerenchev für seine Hilfsbereitschaft und die fachliche Beratung während des ganzen Schreibens der Diplomarbeit.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern, die mein Studium erst ermöglicht haben, mich all die Jahre hinweg tatkräftig unterstützt haben und meinen Plänen und Wünschen gegenüber immer offen waren.

Bester Dank gilt auch meinen Kollegen, die mich durch einen spannenden Lebensabschnitt begleitet haben.

KURZFASSUNG

Diese Studie untersucht die Möglichkeit den Wärmebedarf eines Haushalts, mit von Flächenkollektoren entzogener Erdwärmenergie, zu besorgen. Die Flächenabsorber werden in den obersten Schichten des Erdreichs verlegt. Sie nutzen die oberflächennahe Geothermie, die wesentlich von den Bodeneigenschaften als auch von den Klimaparametern beeinflusst wird. Untersucht wird einerseits der Einfluss der klimatischen Umständen, wie der Klimaregion und der damit zusammenhängenden Außenlufttemperatur sowie Sonnenstrahlung, und andererseits der Bodenarten mit deren geotechnischen Parametern auf die Entzugsleistung einer Erdwärmeanlage. Das Rohrsystem, das den Gewinnungskreislauf darstellt, besteht überwiegend aus PVC Röhren mit den entsprechenden Materialeigenschaften, Geometrie und Verlegungsarten. Es wird zudem ein Überblick über die verschiedenen Arten von Wärmepumpen und deren Funktionsweise gegeben.

Die numerische Modelluntersuchung hat das Ziel zu ermitteln, wie viel thermische Energie aus dem Modellboden gewonnen werden kann, die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten, sowie ob diese thermische Energie für die teilweise oder volle Straßen- bzw. Gebäudeheizung ausreichend ist. Die wärmetechnischen Bodenparameter sind schon aus bisherigen Untersuchungen bekannt und können übernommen werden. Im Modell werden dann die Modellparameter des Rohres wie Rohrtemperatur, Wärmedurchlasskoeffizient und Rohrdurchmesser untersucht. Basierend darauf wird danach die Variation verschiedener Modellgeometrie und Kollektoranzahl untersucht. Dabei liefern diese Untersuchungen wichtige qualitative und quantitative Zusammenhänge bei der geothermischen Nutzung von Flächenabsorbern.

ABSTRACT

This study examines the possibility of the heating needs of a household to be procured with the area collectors using the geothermal energy. The absorber surface should be situated in the uppermost layers of the soil. They are using the shallow geothermal energy, which is significantly influenced by the soil properties as well as of the climate parameters. On the one hand the study is exploring the influence of climate conditions, such as climate region and related outdoor air temperature and solar radiation, and on the other hand the types of soil with their geotechnical parameters on the extraction rate of a geothermal system. The pipe system, which is the recovery loop, consists mainly of PVC pipes with the corresponding material properties, geometry, and transfer types. It also provides an overview of the different types of heat pumps and their functions and way of working.

The numerical model examinations have the aim to determine the target how much thermal energy can be obtained from the model base, the various applications, as well as whether this thermal energy is sufficient and can be used for the partial or full road heating and building heating. The thermal soil parameters are already known from previous studies, and can be adopted. In the research are investigated the parameters of the pipe as pipe temperature, thermal conductivity coefficient and tube diameter. Based upon the previous the variation of different model geometry and number of collectors is examined. These investigations deduce important qualitative and quantitative relationships in the area of geothermal energy absorbers.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	GRUNDLAGEN DER GEOTHERMIE.....	3
2.1	Erdwärme als Energiequelle.....	3
2.2	Geotechnische Parameter	6
2.3	Thermische Eigenschaften.....	8
2.3.1	Wärme	8
2.3.2	Temperatur	8
2.3.3	Formen der Wärmeübertragung	8
2.3.4	Differenzialgleichung für das Temperaturfeld	15
2.3.5	Temperaturleitfähigkeit	16
2.3.6	Wärmeleitfähigkeit	16
2.3.7	Wärmekapazität.....	18
3	TYPEN VON KOLLEKTOREN	20
3.1	Flächenkollektor	21
3.2	Grabenkollektor.....	22
3.3	Kompaktkollektoren.....	23
4	WÄRMEPUMPEN.....	26
4.1	Funktionsweise	27
4.2	Kältemittel	28
4.3	Wärmepumpentypen	29
4.4	Energieeffizienz.....	29
4.4.1	Leistungszahl, COP (Coefficient of performance)	29
4.4.2	Jahresarbeitszahl β (JAZ)	30
4.4.3	Heizzahl (ζ)	30
4.4.4	Nutzungsgrad.....	30
4.4.5	Wirkungsgrad	31
4.5	Wärmepumpensysteme.....	31
4.6	Betriebsarten und Einsatzgebieten	32

5	SIMULATIONEN	33
5.1	Comsol – mechanische und mathematische Grundlagen	33
5.2	Modellierung des Simulationsbereiches.....	35
5.2.1	Geometrie	36
5.2.2	Boden.....	38
5.2.3	Klima	38
5.2.4	Randbedingungen an den Rändern des Modells.....	42
5.2.5	Modellierung des Rohrsystems	43
5.2.6	Betrieb des Systems.....	44
5.2.7	Rand- und Anfangsbedingungen	45
5.2.8	Netz	46
5.3	Parameterstudie	47
5.3.1	Basismodell	47
5.3.2	Variation Rohrparameter	52
5.3.3	Variation Modelgeometrie Flächenkollektoren.....	54
5.3.4	Variation Hangausrichtung und Hangsneigung.....	55
5.3.5	Grabenkollektoren – Basismodell	56
5.3.6	Variation Modellgeometrie Grabenkollektoren.....	59
5.3.7	Basismodell Steilkollektoren.....	61
5.3.8	Variation der Bodenparameter	65
5.3.9	Variation Klimazonen	67
5.3.10	Variation Heizen und Kühlen.....	70
5.4	Vergleich der Kollektortypen nach Wärmezugsleistung für 1 m ³ Aushub und Wärmestrom durch 1 lfm Kollektorrohr	72
6	ANWENDUNGSBEREICHE.....	73
6.1	Wohngebäude.....	73
6.2	Bürogebäude.....	74
6.3	Straßen- und Schienenheizung	76
7	ZUSAMMENFASSUNG.....	78
8	LITERATURVERZEICHNIS	79
9	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	82
10	TABELLENVERZEICHNIS	85

1 Einleitung

Die Notwendigkeit des Klimaschutzes aus umweltpolitischen Gründen und durch internationale Verpflichtungen erfordert eine zügige Umsetzung von Maßnahmen zur Energieeinsparung, zum verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien sowie energieeffizienter Systemlösungen. [47] Fossile Brennstoffe werden immer knapper und damit das Heizen mit Öl und Gas immer teurer. Unsere Erde bietet viele Möglichkeiten erneuerbare Energien zu nutzen. Bis eine Tiefe von 5 m speichert das Erdreich Sonnenenergie und ist damit eine ergiebige Wärmequelle. Die Durchschnittstemperatur in dieser Tiefe liegt bei 7 bis 13 °C (Abbildung 2.3). Diese Temperatur reicht mit dem entsprechenden System von Erdwärmekollektoren und Erdwärmepumpen aus, um ein Haus zu heizen und mit Warmwasser zu versorgen. Dies entspricht 2/3 des Energieverbrauchs eines privaten Haushalts (Abbildung 1.1). Wärmepumpen-Heizungen sind hinsichtlich Primärenergieverbrauch und CO₂-Ausstoß Gas- und Ölheizungen heute schon deutlich überlegen. Gesamtwirtschaftlich leisten sie einen wichtigen Beitrag zur Einsparung von Energie und zur CO₂-Minderung.

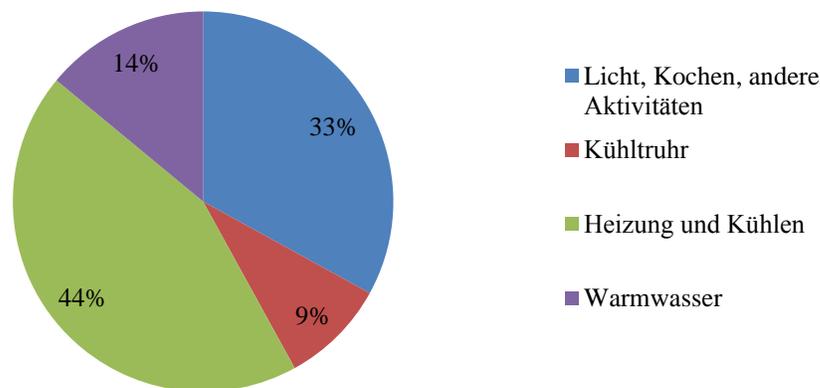


Abb. 1. 1: Energieverbrauch im privaten Haushalt [45]

Das Ziel der Diplomarbeit ist die numerische Simulation horizontal verlegter Flächenabsorber. Daher wird im Weiteren nur die Wärmeenergie, die in den obersten Schichten der Erde, bis zu einer Tiefe von ca. 5 m, die im Wesentlichen von der Sonneneinstrahlung in das Erdreich eingebracht wird, als Erdwärmequelle behandelt. Die aus tieferen Schichten nach oben strömende Wärme, resultierend hauptsächlich aus der geothermischen Äquilibrierung zwischen Erdmantel und Erdkruste, beträgt nur 0,063 bis 0,1 W/m² und kann als Wärmequelle für die oberen Schichten vernachlässigt werden (Abbildung 1.2). Die Gewinnung der Wärme erfolgt über großflächig verlegte Kunststoffrohre (Wärmetauscher) im Erdreich, die in einer unbebauten Fläche in der Nähe des zu beheizenden Gebäudes verlegt werden. Der Erdreichkollektor wird durch Sonneneinstrahlung, Regen, Tauwasser etc. regeneriert bzw. nutzt die Energie aus diesen Umwelteinflüssen. Über horizontal verlegte Erdkollektoren wird die gespeicherte Wärme mit einem Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel (Sole) zum Verdampfer der so genannten Sole/ Wasser-Wärmepumpe (Sole im Primärkreislauf, Wasser im Sekundär-(Heizungs-)kreislauf) gefördert. [7, 36, 28]

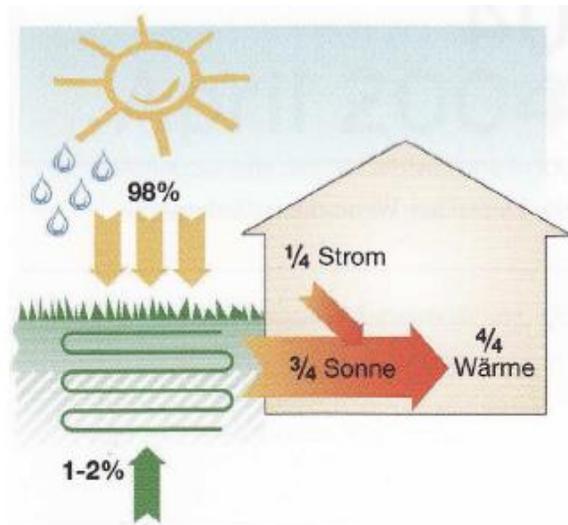


Abb. 1. 2: Energieschema einer geothermisch betriebenen Wärmepumpenanlage. Der Energiefluss ist bei einer Leistungszahl 4 der Wärmepumpe dargestellt [28]

Die Entwicklung der Wärmepumpen ermöglicht die entzogene oberflächennahe Erdwärme auf das Temperaturniveau anzuheben, das für Heizzwecke genutzt werden kann. Erdwärme kann selbstverständlich auch zum Kühlen verwendet werden. Der grundsätzliche Aufbau einer geothermischen Anlage, sowie eine Funktionsbeschreibung wird im Kapitel 4 - Wärmepumpe näher erläutert. [17]

Im Vergleich zu anderen Energieformen hat Erdwärme folgende Vorteile: [22]

- Anders als beispielsweise Sonnen- und Windenergie ist Erdwärme immer verfügbar. Sie kann rund um die Uhr und an jedem Ort genutzt werden,
- Bei ihrer Nutzung entstehen keine umweltgefährdenden Stoffe, die die Umwelt schädigen,
- Nutzt gespeicherte Sonnenwärme in Form von Umweltwärme,
- Vermeidet Kohlendioxid-Emissionen,
- Einsparung von Betriebs- und Energiekosten,
- Erschließung von für andere Heizungssysteme nicht nutzbaren regenerativen Energiequellen,
- Nutzt Energie, die frei zu Verfügung steht,
- Bedarf keiner regelmäßigen Wartung,
- Verfügt über eine weltweit verbreitete Technologie.

2 Grundlagen der Geothermie

2.1 Erdwärme als Energiequelle

Eine Wärmequelle ist ein Wärmeträger, dem eine Wärmepumpe einen Wärmestrom entziehen kann. Somit ist die eingesetzte Wärmequelle die maßgebliche Größe für den Betrieb einer Wärmepumpenheizung. Die Effektivität einer Wärmepumpenanlage hängt entscheidend von der Qualität der Wärmequelle ab. Eine gute Wärmequelle soll zu jeder Zeit die erforderliche Wärmemenge mit einer möglichst hohen Temperatur liefern. Bei den thermischen Zusammenhängen zeigt es sich, dass die Effektivität der Wärmepumpe insbesondere von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und –senke abhängt. Je höher die Wärmequellentemperatur ist, desto positiver wirkt sich dies auf die Leistung und den Wirkungsgrad einer Anlage aus. Ein solcher Zusammenhang (Kohärenz) zwischen Wärmebedarf und Wärmeangebot der Wärmequelle wird in Abbildung 2.1 dargestellt. [20, 14]

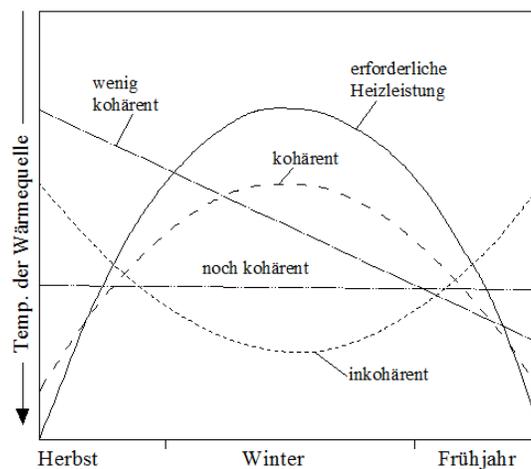


Abb. 2. 1: Zeitlicher Zusammenhang zwischen Wärmebedarf und Wärmeangebot der Wärmequelle[14]

Das Erdreich ist ein Speicher für Sonnenenergie und bietet eine sinnvolle Nutzung der Umweltwärme, wobei die Sonnenstrahlung indirekt genutzt wird. Bei der Nutzung von Erdreich als Wärmequelle unterscheidet man horizontal verlegte Wärmetauscherrohre und vertikale Erdwärmesonden. Die Ergiebigkeit horizontaler bzw. oberflächennaher Erdreichwärmequellen hängt in erster Linie von der außerhalb und während der Heizperiode eingestrahelten Sonnenenergie ab. Der Wärmestrom aus dem Erdinneren kann mit ca. 0,063 bis 0,1 W/m² vernachlässigt werden. [4]

Für die praktische Nutzung der Energiequelle Erdreich sind die nachstehenden Kriterien von Bedeutung:

- ausreichende Verfügbarkeit,
- möglichst hohe Wärmespeicherfähigkeit,
- möglichst hohes Temperaturniveau,
- ausreichende Regeneration,
- kostengünstige Erschließung,
- geringer Wartungsaufwand.

Eine Übersicht über die Möglichkeiten das Erdreich als Energiequelle zu nutzen, zeigt Tabelle 2.1:

Tabelle 2. 1: Erdreich als Wärmequelle [14]

Eigenschaften	Erdreich als Wärmequelle für Flächen- und Grabenkollektor	
	Flächenkollektor	Grabenkollektor
spez. Entzugsleistung	15-40 W/m ²	10-15 W/m
Verfügbarkeit (örtlich)	fast überall	fast überall
Verfügbarkeit (zeitlich)	immer	immer
Zeitgang von Wärmebedarf und -angebot	wenig kohärent	noch kohärent
Temperatur und Temperaturschwankungen (ungefähre Werte)	von -5 bis + 15 °C relativ konstant, nur saisonal schwankend	von -2 bis + 10 °C relativ konstant, nur saisonal schwankend
Instalationskosten	mittel	klein
chem./phys. Schwierigkeiten	Eisbildung	Eisbildung
örtliche Verfügbarkeit	nahezu überall	nahezu überall
Indirekte Kühlung	ja	ja
Platzbedarf	hoch	gering
besondere Merkmale	Wärmeentzugsleistung stark von den Bodenverhältnissen abhängig.	

Je nach Boden lassen sich zwischen 10 W/m² (trockener, sandiger Boden) und 40 W/m² (grundwasserführender Boden) Wärmestromdichte entziehen. Da auch im Winter das Erdreich ab einer Tiefe von 1,2 m nicht wesentlich abkühlt, sollten die horizontal verlegten Wärmetauscherrohre innerhalb dieser Verlegetiefe eingebracht werden. Der Wärmeentzug sollte nicht wesentlich über 20 W/m² im Jahresdurchschnitt betragen, d.h. 40 W/m² in der Spitzenentnahmezeit, um permanente Frostbildung im Erdreich sowie Vegetationsstörungen und Frosthebungen zu vermeiden. [20]

Bei der Dimensionierung der Wärmequelle Erdreich spielen außer der physikalischen Bodeneigenschaften folgende Bedingungen eine weitere Rolle:

- die zeitliche und räumliche Änderung der thermischen Eigenschaften des Erdreichs,
- die Variation des Feuchtigkeitsgehalts,
- die Verlegetiefe,
- der Verlegeabstand,
- die Art der Grabenherstellung ,
- die Geometrie der Gräben,
- die Gesamtlänge der Rohrschlange,
- das Einbettungsverfahren der Rohre (Sandeinbettung),
- die Solareinstrahlung bzw. Schattenfreiheit des Gartengrundstücks,
- die entzogene Wärmemenge.

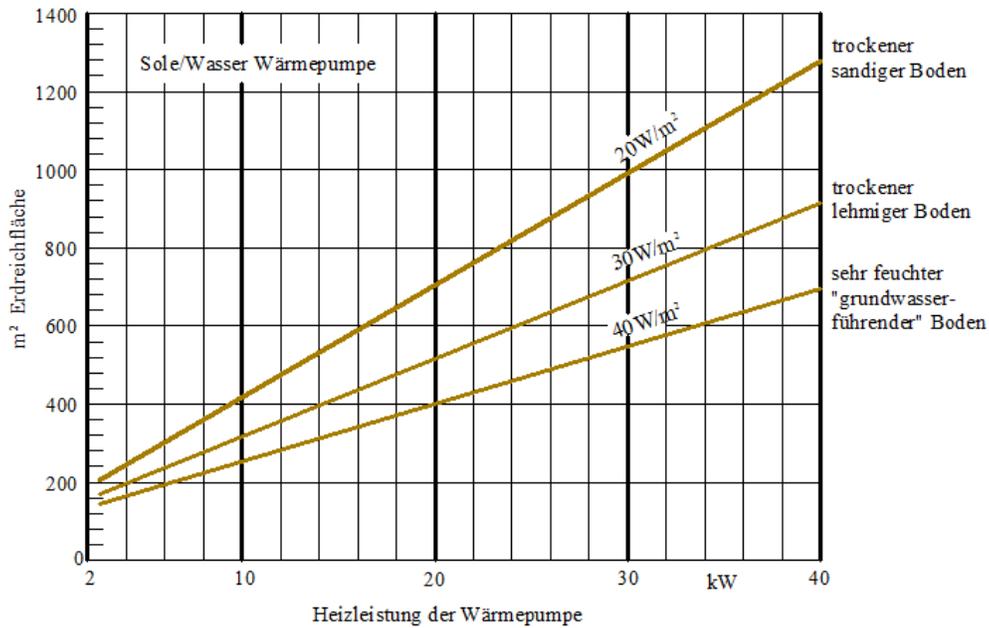


Abb. 2. 2: Bestimmung der erforderlichen Größen einer Erdreichwärmequelle [8]

In Abbildung 2.3 werden die ungestörten Bodentemperaturen in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der Tiefe dargestellt. Die Kurven A, B, C und D (links) zeigen die Temperatur in einer Tiefe von 0, 120, 150 und 180 cm. Bis ca. 10 m ist der Temperaturverlauf im Boden durch die Außentemperatur geprägt (Abbildung 2.3 rechts). Ab ca. 10 m Tiefe ist der Temperaturverlauf dann nahezu konstant über das Jahr. [14]

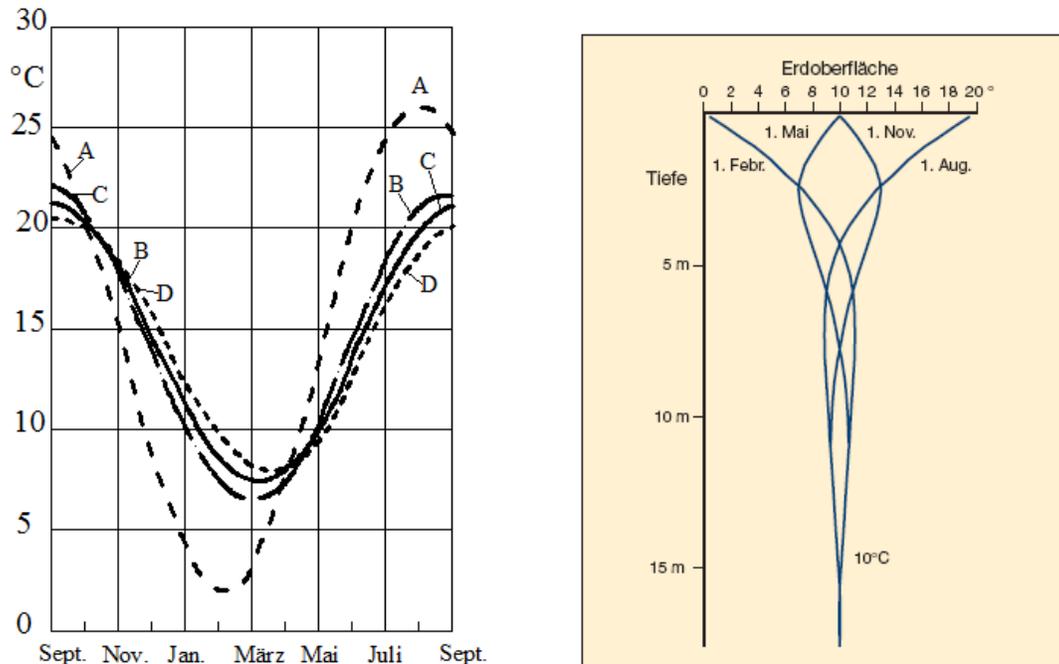


Abb. 2. 3: Oberflächennahe Temperaturverteilung im Boden im Jahresverlauf (links) [14] und ungestörte Temperaturen im Erdreich (rechts) [46]

2.2 Geotechnische Parameter

Die thermischen Eigenschaften des Bodens stehen im unmittelbaren Zusammenhang mit der Dichte, dem Porenanteil, sowie dem Wasser- und Mineralgehalt. Der Wassergehalt hat einen entscheidenden Einfluss auf die Wärmekapazität C_p , die Wärmeleitfähigkeit K und die Dichte ρ . Durch diese drei Größen wird das Verhalten des Bodens bei Wärmeentzug bestimmt. Die Art des Bodens hat ganz erheblichen Einfluss auf die Wärmequellenqualität. Je größer die Wärmeleitfähigkeit bzw. je kleiner die Dichte und die Wärmekapazität des Bodens ist, desto tiefer dringt die Temperaturwelle in den Untergrund ein. Die hohe spez. Wärmekapazität des Wassers schlägt sich in der Berechnung der spez. Wärmekapazität des Bodens nieder. Die maximale Wärmeentzugsleistung variiert zwischen 10 bis 40 W/m². Die verschiedenen Böden sind schwer zu klassifizieren. Nach bisher vorliegenden Erkenntnissen eignet sich ein stark mit Wasser angereicherter Boden besonders gut als Wärmequelle, im Gegensatz zu trockenen Böden. [16, 17]

Einflussfaktoren auf die Wärmeentzugsleistung eines Bodens sind: [28]

- Wassergehalt – der höhere Wassergehalt ermöglicht einen größeren Wärmeentzug,
- Porenanteil – bei wassergesättigten Böden ist der hohe Porenanteil von Vorteil, weil die Poren mit Wasser gefüllt sind. Bei trockenen Böden hat die Luft in den Poren eine negative Auswirkung,
- Lagerungsdichte – hat eine Auswirkung auf den Porenanteil,
- Wärmeleitfähigkeit – die höhere Wärmeleitfähigkeit verbessert die geotechnischen Bodenparameter und erleichtert den Wärmeentzug aus dem Boden,
- Grundwasser – grundwasserführenden Schichten sind vom konstanten hohen Temperaturniveau des Grundwassers positiv beeinflusst.

Tabelle 2. 2: Wärmetechnische Bodenparameter typischer Böden, basierend auf den Angaben der EN ISO 13370:1998 [17]

		Trocken dichte	Wasser gehalt	Feucht dichte	Wärmeleit fähigkeit		spez. Wärme kapazität	vol. Wärme kapazität	Temperaturleit fähigkeit (Diffusivität)	
		$\rho_{B,d}$	w	$\rho_{B,f}$	$K_{B,min}$	$K_{B,max}$	C_B	$C_{v,B}=\rho \cdot c$	$a_{B,min}$	$a_{B,max}$
		[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[W/(mK)]		[Ws/(kgK)]	[Ws/(m ³ KJ)]	[m ² /s]	[m ² /s]
Ton	von	1200	20	1440	0.9	1.4	1836	2203200	3.40E-07	5.30E-07
	bis	1600	40	2240	0.9	1.4	2672	4275200	1.50E-07	2.34E-07
Schluff	von	1400	10	1540	1.0	2.0	1418	1985200	4.58E-07	9.16E-07
	bis	1800	30	2340	1.0	2.0	2254	4057200	1.90E-07	3.79E-05
tr. Sand	von	1700	4	1768	1.1	2.2	1167	1984240	5.33E-07	1.07E-06
	bis	2000	12	2240	1.1	2.2	1502	3003200	3.27E-07	6.54E-07
nasser Sand	von	1700	10	1870	1.5	2.7	1418	2410600	5.66E-07	1.02E-06
	bis	2100	18	2478	1.5	2.7	1,752	3680040	3.45E-07	6.22E-07
Torf	von	400	5	420	0.2	0.5	1209	483600	3.94E-07	9.85E-07
	bis	1100	200	3300	0.2	0.5	9360	10296000	6.48E-09	1.62E-08

Aufgrund der Wetterumständen in Österreich, ist mit größeren Niederschlagsmengen im Sommer und niedrigeren im Winter zu rechnen. Das Erdreich im Winter ist daher in der Regel feucht. Legte man den für einen trockenen Boden geltenden Wärmeleitkoeffizienten der Dimensionierung zugrunde, sind die Wärmeüberträgerflächen zu groß. Die tatsächlichen Werte können um mehr als das dreifache höher liegen. Die Anlage wird dadurch unnötig überdimensioniert, was zu unnötigen Kosten führt. Hinzu kommt, dass während des Betriebs durch das zum Wärmeüberträger hin gerichtete Temperaturgefälle eine durch Diffusionsvorgänge bedingte Feuchtigkeitswanderung stattfindet, die eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs in unmittelbarer Umgebung des Wärmeüberträgers verursacht und einen zusätzlichen Wärmetransport darstellt. Die Wärmeleitfähigkeit und die Dichte steigen bei wassergesättigtem Boden um 30 bis 50% gegenüber trockenem. Die Werte sind natürlich, wegen des veränderlichen Wassergehalts, über die Betriebsdauer während des Winters nicht konstant (zum intensiven Wärmeentzug kommt der Einfluss von Eisbildung am Wärmeaustauscher hinzu) und streuen beträchtlich in Abhängigkeit von der Bodenart. [4]

Folgende Richtwerte lassen sich aus der VDI 4640 für Flächenkollektoren ablesen. Sie stellen die zu erwartende Entzugsleistung je nach der Bodenbeschaffenheit dar. Aus den Daten kann man schließen, dass bei lehmigen, feuchten Böden aus einer kleineren Fläche dieselbe Wärmemenge entzogen werden kann wie aus einer großen Fläche bei trockenen, schottrigen Böden, die für die Erdwärmenutzung nicht gut geeignet sind. Auch Torf (ein organisches Sediment das meist in Mooren durch die unvollständige Zersetzung pflanzlicher Substanzen gebildet wird) ist wegen seiner schlechten Wärmeleitfähigkeit für die Erdwärmenutzung schlecht bis gar nicht geeignet.

Tabelle 2. 3: Wärmeentzugsleistung für einen Flächenkollektor bei 1800 Jahresbetriebsstunden [28]

Untergrund	Spezifische Entzugsleistung	
	bei 1800 h/a	bei 2400 h/a
Trockener, nichtbindiger Boden	10 W/m ²	8 W/m ²
Bindiger Boden, feucht	20-30 W/m ²	16-24 W/m ²
Wassergesättigter Sand/Kies	40 W/m ²	32 W/m ²

Tabelle 2. 4: Benötigte Kollektorfläche für 1800 bis 2400 Jahresarbeitsstunden in Abhängigkeit von der Jahresarbeitszahl [28]

Untergrund	Benötigte Fläche pro kW Heizleistung in Abhängigkeit von der Jahresarbeitszahl (β)					
	bei 1800 h/a			bei 2400 h/a		
	β = 3,5	β = 4,0	β = 4,5	β = 3,5	β = 4,0	β = 4,5
Trockener, nichtbindiger Boden	71,4m ²	75,0 m ²	77,8 m ²	89,3 m ²	93,8 m ²	97,2 m ²
Bindiger Boden, feucht	23,8 m ² bis 35,7 m ²	25,0 m ² bis 37,5 m ²	25,9 m ² bis 38,9 m ²	29,8 m ² bis 44,6 m ²	31,3 m ² bis 46,9 m ²	32,4 m ² bis 48,6 m ²
Wassergestöttigter Sand/Kies	17,9 m ²	18,8 m ²	19,4 m ²	22,3 m ²	23,4 m ²	24,3 m ²

2.3 Thermische Eigenschaften

2.3.1 Wärme

Betrachtet man einen Körper im mikroskopischen Maßstab, dann bewegen sich die einzelnen Moleküle zufällig und unabhängig voneinander. Wärme ist die kinetische Energie infolge dieser Molekülbewegung. Die mittlere kinetische Energie, die für alle Moleküle gleich ist, beträgt:

$$\bar{W} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \bar{v}^2 \quad \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} \right] \quad (2.1)$$

mit \bar{W} mittlere kinetische Energie $\left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} \right]$
 m Masse [kg]
 \bar{v}^2 Mittelwert der Geschwindigkeitsquadrate der Moleküle [m^2/s^2]

Nach dem Energieerhaltungssatz, der auch für die Wärme gültig ist, bleibt der gesamte Energieinhalt eines abgeschlossenen Systems immer konstant. Dieser Gesamtbetrag der Energie wird nach Kelvin als innere Energie U bezeichnet, die nur geändert werden kann, wenn über die Systemgrenzen Energie mit der Umgebung ausgetauscht wird. Die Änderung der inneren Energie ΔU eines geschlossenen Systems entspricht der Summe der übertragenen Wärmemenge ΔQ und der mechanischen Arbeit ΔW (1. Hauptsatz der Thermodynamik). [11]

2.3.2 Temperatur

Temperatur ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie der Moleküle. [27]

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot \bar{v}^2 = \frac{3}{2} k \cdot T \quad (2.2)$$

mit: k Boltzmannkonstante $k=1,381 \cdot 10^{-23}$ [J/K]
 T Temperatur in [K]

Aus der Formel ist ersichtlich, dass mit Erhöhung der Geschwindigkeit der einzelnen Moleküle die Temperatur steigt. Der Zustand, bei dem sich alle Moleküle in Ruhe befinden, ist der absolute Nullpunkt mit dem Wert 0 K. 0 K entsprechen $-273,15^\circ\text{C}$.

2.3.3 Formen der Wärmeübertragung

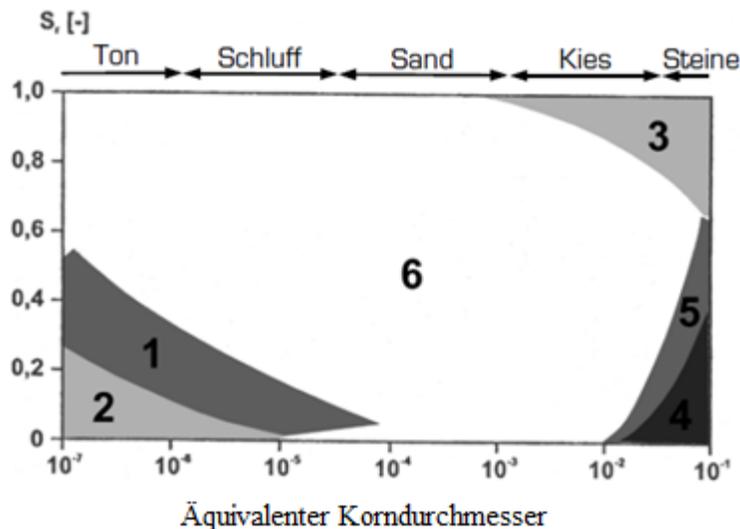
Zu den Grundgrößen, die den physikalischen Zustand eines Körpers beschreiben, gehört die Temperatur. Wenn zwischen verschiedenen Teilen eines Körpers oder zwischen zwei benachbarten Körpern

Temperaturunterschiede auftreten, entsteht ein Temperaturfluss, bis zu dem Moment, zu dem die Ursache für den Temperaturunterschied entfällt und auf das System keine anderen Einflüsse wirken. Ein solcher Ausgleichsprozess benötigt Zeit, da pro Zeiteinheit nur eine beschränkte Wärmemenge die definierte Systemgrenzen passieren kann. Für den irreversiblen Transport dieser Wärmeenergie vom wärmeren auf den kühleren Körper gibt es mehrere Möglichkeiten: [1]

- Konduktion (Wärmeleitung),
- Dispersion,
- Wärmestrahlung (Radiation),
- Konvektion,
- Wärmeübergang,
- Verdampfungs- und Kondensationsprozesse,
- Ionentausch,
- Frost-Tau-Vorgänge.

Die obengenannten Wärmeübertragungsmechanismen sind in Abhängigkeit vom Korndurchmesser und Sättigungsgrad des Bodens in Abbildung 2.4 abgebildet. Der Boden, der als ein Gefüge betrachtet werden kann, besteht aus mehreren Phasen. Die feste Phase, mineralische beziehungsweise organische Körnern, bildet das poröse Korngefüge. In den Poren befindet sich im ungesättigten Zustand Luft und Poren- bzw. Grundwasser. Diese bilden die gasförmige und flüssige Phase. Zusammen mit dem im Wasser erhaltenen Salzen und Ionen stehen diese Phasen in einer chemisch-physikalischen und biologischen Wechselwirkung, die auch die Wärmetransportprozesse beeinflussen. An diesem Wärmetransport nehmen mehr oder weniger alle Arten der angeführten Wärmetransportmechanismen teil. Definiert man die Systemgrenze so, dass die Korngröße und der Porendurchmesser im Vergleich zum betrachteten Körper vernachlässigbar klein sind und wenn der Massentransport verhindert wird, dann kann der inhomogene Erdkörper als quasihomogenes und isotropes Kontinuum angenähert werden. In Abbildung 2.4 sind die vorherrschenden Wärmeübertragungsmechanismen zu sehen. [1, 17]

Abb. 2. 4: Dominierende Wärmeübertragungsmechanismen in Abhängigkeit vom Korndurchmesser und Sättigungsgrad. [1]



- 1 – Thermische Neuverteilung der Feuchtigkeit
- 2 – Wasserdampfdiffusion infolge Feuchtigkeitsunterschied
- 3 – Freie Konvektion im Wasser
- 4 – Freie Konvektion in der Luft
- 5 – Wärmestrahlung
- 6 – Wärmeleitung

Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Wärmeleitung den wichtigsten Wärmeübertragungsmechanismus darstellt.

2.3.3.1 Wärmeleitung

Wärmeleitung oder Konduktion erfolgt entlang der Temperaturgefälle, innerhalb eines Körpers infolge eines räumlichen Temperaturunterschiedes, oder zwischen 2 Körper, die sich berühren und unterschiedlich temperiert sind. Der physikalische Prozess der Konduktion passiert sich im molekularen Bereich, wobei die Energie sich von hochenergetischen Molekülen auf solche mit einem niedrigeren Energieniveau überträgt. In der Erdkruste, wenn der Gestein kompakt und ungeklüftet ist, ist die Konduktion der vorherrschenden thermischen Transportmechanismus. Das gegebene *Fourier'sche* Grundgesetz (Formel 2.3) beschreibt den Zusammenhang zwischen der Wärmestromdichte q , welche der durch eine Fläche A in der Zeiteinheit t transportierten Wärmemenge Q entspricht, und dem Temperaturgradienten. [50]

$$\dot{q}_{kond} = \frac{Q}{At} = \frac{\dot{Q}}{A} = -K \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \quad (2.3)$$

mit: K Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
 T Temperaturgradient

Wobei \vec{n} die aktuelle Strömungsrichtung kennzeichnet. Die als Wärmeleitfähigkeit bezeichnete Proportionalitätskonstante K ist eine materialspezifische Größe. Weil der Boden als ein isotropes Medium betrachtet wird, nimmt die Wärmeleitfähigkeit einen konstanten Wert an. Das negative Vorzeichen in Formel 2.3 zeigt, dass die Übertragung der Wärme in Richtung des Temperaturgradientens erfolgt. Für ein räumliches System, wo es zu einem dreidimensionalen Wärmeflussvorgang kommt, kann man das Fourier Gesetz allgemeiner formulieren. [50]

$$\dot{q}_{kond} = -K \nabla T \quad (2.4)$$

Wobei ∇ für den dreidimensionalen Laplace-Operator steht.

$$\nabla := \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

Nach dem Energieerhaltungssatz beschreibt die Wärmeleitungsgleichung die zeitliche Änderung an thermischer Energie, die zur Störung eines Systems, das sich im Gleichgewicht befindet, aufgebracht werden muss. Diese Energie muss der Änderung des Wärmeflusses durch ein Volumen entsprechen. [51]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla(K \nabla T) \quad (2.5)$$

Häufig wird auch die Temperaturleitfähigkeit (Diffusivität) a [m^2/s] benutzt, die als Quotient aus der Wärmeleitfähigkeit zu der Wärmekapazität definiert ist. [51]

$$a = \frac{K}{\rho c} [m^2 / s] \quad (2.6)$$

2.3.3.2 Dispersion

Die Bewegung der Flüssigkeit in porösen oder klüftigen Medien führt zu einer makroskopischen Vermischung, die als mechanische Dispersion bezeichnet wird. Diese Vermischung ist die Folge der räumlichen, von Inhomogenität im Gestein hervorgerufenen Geschwindigkeitsunterschiede der Wasserpartikel. Die dadurch hervorgerufene Teilstromdichte ist proportional zu einem Dispersionskoeffizienten und Konzentrationsgradienten und wird mit dem Fick'schen Gesetz beschrieben. [51]

$$\bar{\psi} = D_m \cdot \nabla C = \lambda_{ijkl} \cdot \frac{v_k \cdot v_l}{\sqrt{v_k^2 + v_l^2}} \cdot \nabla C \quad (2.7)$$

mit: Ψ Teilchenstromdichte
 C Konzentration
 D_m mechanischer Dispersionstensor
 λ_{ijkl} Dispersivitätskomponenten (Dispersivitätstensor vierter Ordnung)
 v_k, v_l Komponenten der Partikelgeschwindigkeit

Man kann bei der Übertragung dieser Anwendung auf den Bereich der Thermik, einen entsprechenden Effekt finden. „Doch sollte dieser nur abgeschwächt wahrnehmbar sein, denn es findet durch die Wärmeleitung ein starker Energieaustausch zwischen benachbarten Poren-Strömungslinien statt, der sich in einer Erhöhung der Transversalkoeffizienten zulasten der Longitudinalkoeffizienten bemerkbar machen sollte.“ Der aus der thermischen Dispersion resultierende Wärmefluss wird analog zur mechanischen Dispersion gegeben. [51]

$$\dot{q}_{Disp.} = D_t \cdot \rho c \cdot \nabla T = \lambda_{ijkl} \cdot \frac{v_k \cdot v_l}{\sqrt{v_k^2 + v_l^2}} \cdot \rho c \cdot \nabla T \quad (2.8)$$

mit: D_t therm. Dispersionstensor
 λ_{ijkl} therm. Dispersivitätskomponenten (Dispersivitätstensor vierter Ordnung)

Zwischen dem thermischen Dispersionskoeffizient und dem Massendispersionskoeffizient sind zwei Hauptunterschiede zu bemerken: [50]

- Bei der thermischen Dispersion ist ein Wärmetransport in porösen Medien über die Gesteinsmatrix möglich, während dies beim Massentransport unmöglich ist,
- Der thermische Diffusionskoeffizient ist etwa dreimal höher als den Massendiffusionskoeffizient.

$$\lambda_{ijkl} = \lambda_{tr} \delta_{ij} \delta_{kl} + \frac{\lambda_{lo} - \lambda_{tr}}{2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (2.9)$$

Wobei λ_{lo} und λ_{tr} die longitudinale Dispersivität [m] und transversale Dispersivität [m] sind und δ_{ij} ein Kronecker Symbol ist. Unter der Berücksichtigung der anisotropen Natur des Dispersionsvorgangs liegt die longitudinale Dispersivität λ_{lo} meist ein bis zwei Größenordnungen über die transversale Dispersivität λ_{tr} .

$$K_d = D_t \cdot \rho c \quad (2.10)$$

mit: K_d Tensor des dispersiven Wärmeübergangs (Tensor of dispersive thermal conductivity)

Im Unterschied zur Massendispersion spielt die kleine Partikelgeschwindigkeit bei thermischer Dispersion keine Rolle. Deswegen wird diesen Vorgang vernachlässigt. [50]

2.3.3.3 Wärmestrahlung

„Die Wärmeübertragung durch Strahlung ist nicht an das Vorhandensein von Materie als Transportmedium oder die Berührung der Körper gebunden und findet durch elektromagnetische Schwingung statt“ [11]. Die Strahlung ist im Vakuum die einzige Wärmeübertragungsmöglichkeit zwischen zwei Körpern. Dabei strömt die thermische Energie in beide Richtungen: sowohl von der Wärmequelle zur Wärmesenke als auch umgekehrt. Die von den Körpern abgestrahlte Energie ist von seiner Eigentemperatur abhängig und wird durch das Boltzmann-Gesetz geschrieben: [9]

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [W / m^2] \quad (2.11)$$

mit: E Strahlungsenergie [W/m²]
 ε Emissionskoeffizient [%]
 σ Stefan-Boltzmannkonstante $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)]
 T Temperatur [K]

Die von der Sonne eingestrahelte Wärme wirkt auf die Temperatur an der Bodenoberfläche besonders positiv. Wichtig ist auch die Abstrahlung an der Oberfläche in der Nacht. Einen starken Einfluss auf die abgestrahlte Energie hat auch die Oberflächenbeschaffenheit des Körpers, die in den Emissionskoeffizient eingeht. Die Abstrahlungswärmestromdichte kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$\dot{q} = \alpha_s \cdot \Delta T \quad [W / m^2] \quad (2.12)$$

mit: $\alpha_s = C \cdot b$ [W/(m².K)]
 $C = \sigma \cdot \varepsilon = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon$ [W/(m².K⁴)]

$$b = \frac{T_1^4 - T_2^4}{\Delta T}$$

2.3.3.4 Wärmekonvektion

Weil Fluide und Gase niedriger Wärmeleitfähigkeiten besitzen, erfolgt der Wärmetransport in der fluiden und gasförmigen Phasen überwiegend durch Wärmekonvektion. Man unterscheidet freie und erzwungene Konvektion. Bei der freien Konvektion ist die Bewegung der Massen bzw. auch der Wärme folge unterschiedlicher Dichten und Ausgangstemperaturen. Wenn auf das Fluid keine äußere Kräfte wirken (nur das Gravitationsfeld), bewegen sich die wärmeren und daher leichteren Teilchen des Fluids nach oben, während die kälteren und schwereren nach unten sinken. Dieser Prozess der molekularen Wärmebewegung bezeichnet man als Diffusion. Bei der erzwungenen Konvektion wirken auf das Fluid äußere Kräfte (zum Beispiel eine Pumpe), die eine Druckdifferenz verursachen [9]. Nimmt man ein Einphasensystem eines strömenden Fluids (homogenes Medium) an, das keine Wärmeleitfähigkeit besitzt, sieht die reine konvektive Wärmetransportgleichung folgendermaßen aus.

$$\rho_w c_w \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho_w c_w v \nabla T \quad (2.13)$$

Darin ist c die spezifische Wärmekapazität des Wassers, ρ dessen Dichte und v die Abstandsgeschwindigkeit mit dem entsprechenden Koeffizient w für Wasser.

Analog zur Flüssigkeitskonvektion (Formel 2.13), sieht die Luftkonvektion (z.B. Porenluft beim trockenen Boden) mit dem entsprechenden Koeffizient l für Luft so aus.

$$\rho_l c_l \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho_l c_l v \nabla T \quad (2.14)$$

Betrachtet man den wassergesättigten Boden als ein nichtwärmeleitendes poröses Medium, in dem das Wasser mit Filtergeschwindigkeit v_f strömt, dann hat die konvektive Wärmetransportgleichung folgende Form. [50]

$$(\rho c)_{eq.} \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho_w c_w v_f \nabla T \quad (2.15)$$

$$(\rho c)_{eq.} = \rho_w n c_w + \rho_s (1-n) c_s \quad (2.16)$$

mit: n Porengehalt
 ρ_s Dichte des Feststoffgehalts
 c_s spez. Wärmekapazität des Feststoffgehalts

Formel 2.17 bietet einen Zusammenhang zwischen Abstands- und Filtergeschwindigkeit. Weil die Filtergeschwindigkeit in betrachteten Böden (Kapitel 5.2.2) sehr kleine Werte annimmt, kann sie vernachlässigt werden. Daraus ist ersichtlich, dass der Wärmetransport im Boden infolge Konvektion eine vernachlässigbar kleine Rolle spielt. [50]

$$t_o = t_i - \frac{1}{8}(t_i - t_f) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.21)$$

mit: t_o Temperatur der Wasseroberfläche [$^{\circ}\text{C}$]
 t_f Feuchtkugeltemperatur der Luft [$^{\circ}\text{C}$]
 t_i Temperatur im Wasserinneren [$^{\circ}\text{C}$]

Der Massestrom \dot{q}_v wird in die Wärmestromdichte umgerechnet mittels Verdampfungswärme:

$$\dot{q}_v = \frac{\dot{m}_w}{A} \cdot r_w \cdot \frac{1}{3,6} \quad [\text{W} / \text{m}^2] \quad (2.22)$$

mit: \dot{m}_w verdunstete Wassermasse pro Zeit [kg/h]
 A Wasseroberfläche [m^2]
 $r_w = 2256$ Verdampfungswärme [kJ/kg]

2.3.3.7 Frost-Tau-Vorgänge

Die Frost-Tau-Prozesse beschreiben den Phasenübergang des Wassers zu Eis und umgekehrt. Die latente Wärme eines solchen Übergangs beträgt ca. 334 kJ pro kg (Wasser zu Eis). Zu beachten ist, dass bei Temperaturen zwischen 0 und -2 Grad, welche die Kühlsysteme erreichen können, nicht das ganze Wasser im Boden gefriert. Mikrowasser braucht beispielweise Temperaturen von ca. -17°C um zu Eis überzugehen. [29]

2.3.4 Differenzialgleichung für das Temperaturfeld

Im Erduntergrund bilden die feste und fluide Phase ihre eigenen Systeme, die mit Hilfe der Wärmeübergangskoeffizienten aufeinander wirken. So werden zwei unterschiedliche Gleichungen für die fluide und feste Phase aufgestellt. [51]

Für die fluide Phase (Wasser):

$$\rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = -\rho_w c_w v \nabla T_w + \nabla(K_w \nabla T_w) + \Lambda(v_f) \cdot A \cdot (T_s - T_w) + \nabla(K_d \nabla T) + \frac{Q}{W. \text{Quelle/-senke}} \quad (2.23)$$

Für die feste Phase:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla(K_s \nabla T_s) + \Lambda(v_f) \cdot A \cdot (T_s - T_w) + \frac{Q}{W. \text{Quelle/-senke}} \quad (2.24)$$

Es wird angenommen, dass die Temperatur des Wassers gleich der Temperatur der festen Phasen ist. Daher ist der Wärmetransport infolge des Wärmeübergangs im Erduntergrund gleich null. Unter der Wärmequelle/ –senke Q [W/m^3] versteht man alle weitere mögliche Wärmequellen/ –senken, wie z.B. eine viskose Wärmedissipation im Fluid oder der radioaktiven Zerfall in der Matrix.

Mit gemittelten Materialwerten kann man das Zweiphasenmedium (wassergesättigter Boden) als ein Einphasensystem beschreiben.

$$(\rho c)_{eq.} \frac{\partial T}{\partial t} = -\underset{\text{Konvektion}}{\rho_w c_w v_f} \nabla T + \underset{\text{Konduktion}}{\nabla(K_{eq.} \nabla T)} + \underset{\text{Dispersion}}{\nabla(K_d \nabla T)} + \underset{\text{W. Quelle/– senke}}{Q} \quad (2.25)$$

$$K_{eq.} = K_s^{(1-n)} \cdot K_w^n \quad (2.26)$$

2.3.5 Temperaturleitfähigkeit

Die Temperaturleitfähigkeit umfasst die drei Größen (Wärmeleitfähigkeit K , spezifische Wärmekapazität c und Dichte ρ), die die Bodeneigenschaften bestimmen. Abhängig von Bodenaufbau, Bodenstruktur und Wassergehalt gibt die Temperaturleitfähigkeit eine Auskunft über die Tiefe und die Geschwindigkeit des Eindringens einer Temperaturwelle in den Boden. Mittels der Temperaturleitfähigkeit kann bei konstanten Randbedingungen die zum Temperatenausgleich erforderliche Zeit berechnet werden. Je größere Werte die Leitfähigkeit, desto schneller pflanzt sich eine Temperaturänderung in einem Material fort. Die Bodenstruktur und –mineralgehalt bestimmen die Koeffizienten K , c und ρ . Weil das Wasser eine hohe Wärmeleitfähigkeit und –kapazität hat, beeinflusst der Wassergehalt des Bodens die temperaturabhängige Materialparameter positiv und spielt eine maßgebende Rolle für die Bestimmung der thermischen Eigenschaften des Untergrunds. [17]

2.3.6 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit K [$W/(mK)$] hängt von der Bodenstruktur, den mengenmäßigen Anteilen der Stoffkomponenten und ihrer räumlich-geometrischen Anordnung ab. Die Luft ist ein schlechter Wärmeleiter. Die Wärmeleitung im Boden erfolgt aufgrund der Porenstruktur praktisch allein über die feste und flüssige Bodenphase. Dabei wird die Wärmeleitfähigkeit stark durch den Wassergehalt und die Lagerungsdichte des Bodens beeinflusst. Eine Information über die Größe des Schwankungsbereichs bietet Abbildung 2.5 und Abbildung 2.6. Aufgrund dieser großen möglichen Schwankungsbreite der Wärmeleitfähigkeit sind bei numerischen Berechnungen zur Auslegung von Absorberanlagen Parametervarianten unumgänglich.

„Der Wärmetransport erfolgt im Boden hauptsächlich durch Wärmeleitung (Abbildung 2.4). In Abhängigkeit von der Kornverteilung bzw. vom Porenvolumen und dem Sättigungsgrad kann jedoch auch Wärme durch freie und erzwungene Konvektion in Wasser und Luft, durch Wärmestrahlung oder durch Diffusion transportiert werden. Aus diesem Grund ist die effektive Wärmeleitfähigkeit des gesamten Bodensystems stark von der Art, der Dichte und dem Wassergehalt (auch die chemischen Eigenschaften des Wassers haben einen Einfluss) des Bodens abhängig.“ [1]

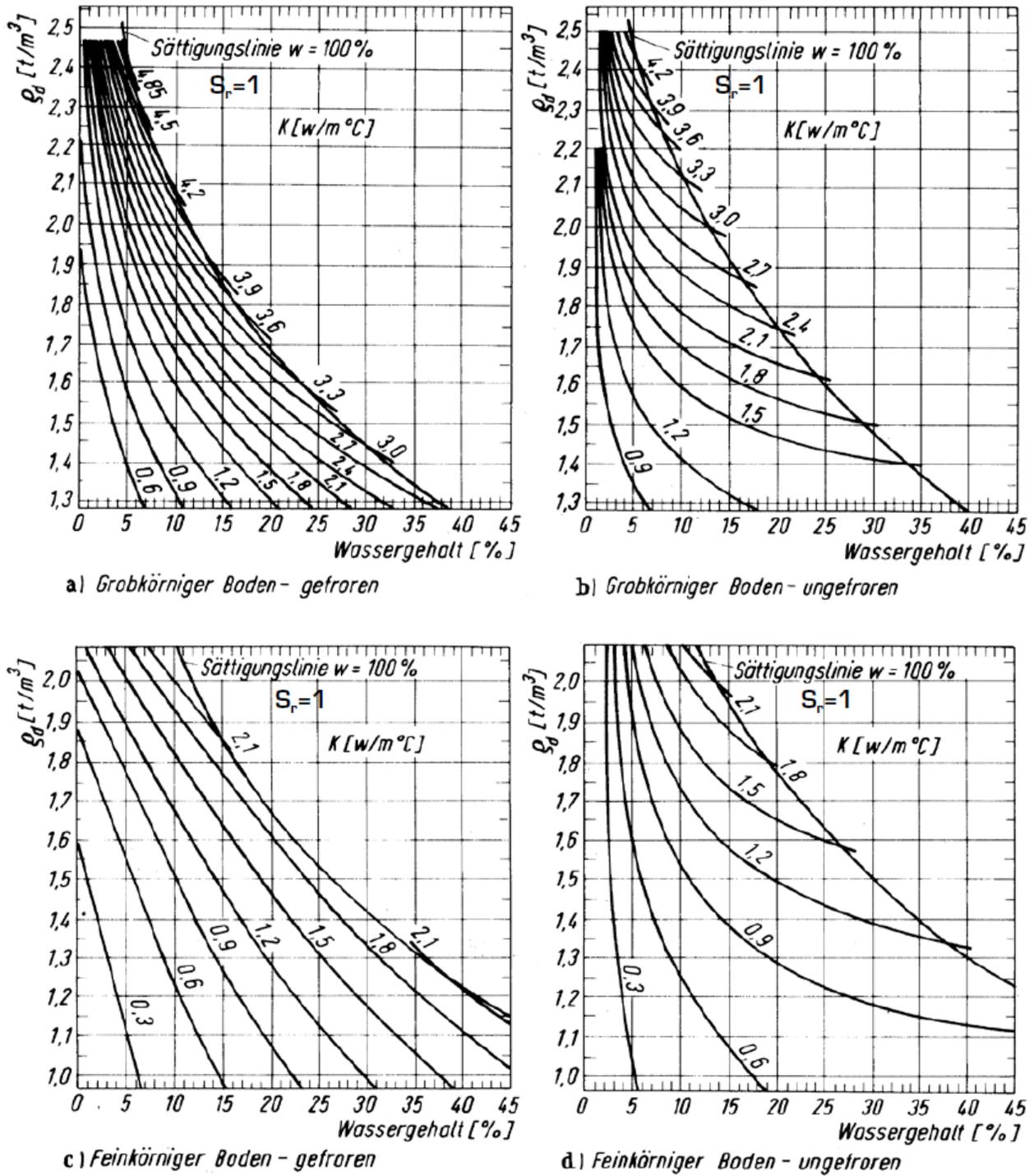


Abb. 2. 5: Wärmeleitfähigkeit des Bodens (K) in Abhängigkeit von Trockendichte (ρ_d) und Wassergehalt. zusammengestellt von JESSBERGER [17]

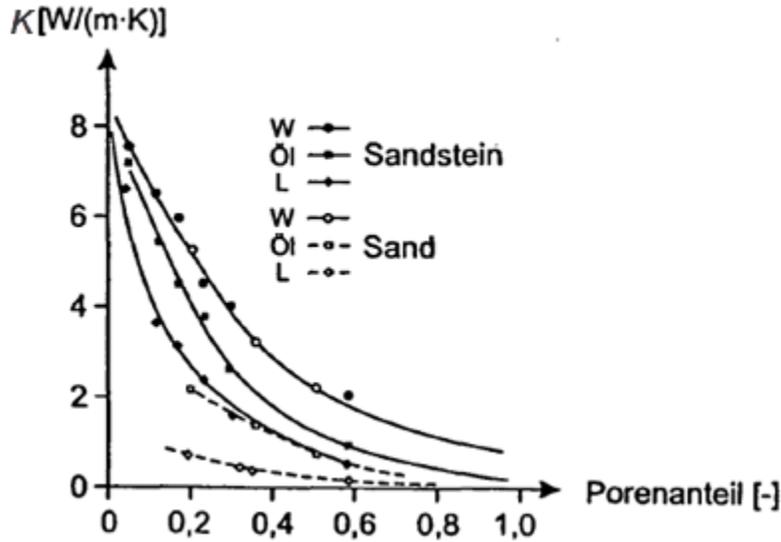


Abb. 2. 6: Einfluss von Porenanteil und Poreninhalt (Wasser (W), Öl (Öl), Luft (L)) auf die Wärmeleitfähigkeit K von Sandstein und Sand [1]

2.3.7 Wärmekapazität

„Die spezifische Wärmekapazität c [$\text{Ws}/(\text{kgK})$] gibt die Wärmemenge Q [Ws] an, die benötigt wird, um einen Stoff mit $m = 1$ [kg] Masse um $\Delta T = 1$ [K] zu erwärmen“. [1]

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (2.16)$$

„Die Wärmekapazität des Bodens ist von dessen mengenmäßigen Zusammensetzung abhängig, nicht aber von dessen Mikrostruktur. Sind die volumetrischen Anteile der Bodenbestandteile bekannt, kann die Gesamtwärmekapazität des Bodens durch additive Überlagerung der Einzelkomponenten berechnet werden“. [1]

$$c_B = c_s x_s + c_w x_w + c_l x_l \quad (2.17)$$

„Darin ist x der jeweilige Volumenanteil ($x_s = 1 - n$; $x_w = nS$; $x_l = n(1 - S)$) mit dem Porenanteil n und der Sättigungszahl S), der Index s kennzeichnet den Feststoffgehalt, w den Wassergehalt und l die Porenluft. Die Wärmekapazitäten von Wasser und Luft können als konstant angenommen werden, wobei jene der Luft vernachlässigbar ist. Kurzfristig gesehen ist nur der Wassergehalt eine veränderliche Größe. Die Gesamtkapazität nimmt demnach mit der Bodenfeuchte zu. Oftmals wird aus der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte des Bodens eine volumetrische Wärmekapazität errechnet, die als das gewichtete arithmetische Mittel der einzelnen Bodenkomponenten definiert ist“. [1]

$$c_{v,B} = \sum \rho_i c_i x_i \quad [\text{Ws}/(\text{m}^3\text{K})] \quad (2.18)$$

Nach der von Markiewicz durchgeführten numerischen Simulation wurde die volumetrische Wärmekapazität folgendermaßen berechnet.

$$c_{v,B} = \rho_s \left(c_s + c_w \frac{w}{100} \right) \quad (2.19)$$

mit c_s : spez. Wärmekapazität der Mineralien; für die meisten Mineralien ist bei 10°C
 $c_s=1000[\text{Ws}/(\text{kgK})]$
 c_w : spez. Wärmekapazität von Wasser; $c_w = 4180 [\text{Ws}/(\text{kgK})]$
 w : Wassergehalt [%]

3 Typen von Kollektoren

Die horizontal verlegte Absorberleitung besteht aus einem waagrechten in der Erde verlegten geschlossenen Rohrsystem. Um Beschädigungen der Rohrleitungen zu vermeiden, werden diese in einer Schutzschicht aus Sand verlegt. Der Kollektor wird dann mit Erdreich und viel Wasser eingeschlämmt, um Luft einschließen zu verhindern. Es ist auch zweckmäßig, dass die benötigte Bodenfläche natürlich gewachsen ist, sonst kann es bei Anschüttungen zu unterschiedlichen Setzungen kommen. [22]

Die Flächenkollektoren können in verschiedenen Bodenarten verlegt werden, die für die Wärmeentzugsleistungen eine wesentliche Rolle spielen. Je nach Bodenbeschaffenheit, wie in Tabelle 2.3 dargestellt, schwanken die entzogenen Wärmeleistungen zwischen 10 und 40 W/m². Damit lassen sich aus einem Quadratmeter Erdreich während der Heizperiode etwa 360 MJ Wärme gewinnen. Als Richtwert rechnet man für die vom Erdkollektor benötigte Fläche mit dem 1 – 2 fachen der Fußbodenfläche des Gebäudes (Neubau) oder – anders ausgedrückt – mit etwa 30 m² Bodenfläche pro kW Heizlast. Für die Wärmeentzugsleistung eines Flächenkollektors kann man von etwa 25 W/m² bei wassergesättigten Böden ausgehen. Übliche Einfamilienhäuser mit ca. 120 m² beheizbarer Wohnfläche kommen auf durchschnittlich 300-400 m zu verlegender Rohrleitung. Das macht den Einsatz von Kollektoren nur als Wärmequelle für kleinere Wärmepumpenanlage interessant, da sonst der Flächenbedarf zu groß würde. [13]

Die Länge der einzelnen Rohrsträngen soll nicht mehr als 100 m betragen, da sonst die benötigten aufzubringenden Pumpenleistungen, um die Druckverluste zu überwinden, zu hoch werden. Andere Ansprüche an das Rohrsystem sind die gleiche Länge und Rohrdurchmesser der Rohrsträngen, um identische Druckverluste und folglich gleiche Durchströmungsbedingungen zu erreichen. So erreicht man eine stetige Fluidströmung und Vorlauftemperaturänderung. Die Rohrenden werden in etwas höher gelegenen Vor- und Rücklaufsammlern, mit entsprechendem Entlüftungsmechanismus, zusammengefasst. Jeder Strang sollte unabhängig absperrbar sein. Mittels einer Umwälzpumpe wird die Sole durch die Kunststoffrohre gepumpt. Dabei nimmt sie die im Erdreich gespeicherte Wärme auf. [36]

In Frage kommen Rohrleitungen aus einfachem oder aus vernetztem PE mit einem Durchmesser von 20, 25 oder bzw. 32 mm. Alternativ kommt auch kunststoffummanteltes Kupfer zum Einsatz. Das Verhalten von Kupfer und PE beim Einsatz von Erdkabeln und Gasrohren weist eine nahezu unbegrenzte Lebensdauer auf. [36]

Es sind schon viele Studien durchgeführt worden, die die Auswirkungen von Erdwärmekollektoren auf die Erdreichtemperatur und die Vegetation untersuchen.

„Aus der VDI 4640 kann folgende Aussage entnommen werden: „Wenn Erdwärmekollektoren korrekt dimensioniert sind, dann sind die Einflüsse auf die Vegetation gering. Bei einer Unterdimensionierung des Kollektors kann es zu einer örtlich begrenzten Auswirkung auf die Vegetation kommen (Verlängerung der Kälteperiode)“. Außerdem kann es zur Eisbildung rund um die Kollektorrohre kommen, was sich an der Oberfläche in Form von Hebungen auswirken kann.“ [28]

3.1 Flächenkollektor

Beim Flächenkollektor wird der gesamte Oberboden bis auf die gewünschte Einbautiefe abgehoben. Auf dem entsprechend vorbereiteten Untergrund werden PE-Rohr-Schlingen ausgelegt und befestigt. Die Rohrenden werden in einem Sammelschacht, getrennt als Vor- und Rücklaufleitungen mit speziellen Armaturen zusammengefasst. Danach werden die PE-Schlingen wieder mit Erdreich überdeckt.

Bei einem oberflächennahen Erdwärmeabsorber hat der Einfluss des Klimas (Sonneneinstrahlung und Außenluft) überwiegende Bedeutung. Wenn die Rohre zu seicht verlegt werden, werden Temperaturen im Winter sehr ungünstig, die gesamte Fläche kann einfrieren. Wenn die Rohre zu tief verlegt werden, ist der Einfluss des Klimas sehr gering. Es wird daher im Allgemeinen empfohlen, dass die Rohre in einer Tiefe von 1,3 bis 1,8 m verlegt werden. Dadurch sind die verlegten Rohrleitungen einerseits nicht zu tief und andererseits frostfrei im Winter. Umso wichtiger ist es daher, dass Flächen, die mit Kollektoren belegt sind, nicht überbaut oder versiegelt werden, da die oberen Bodenschichten durch Sonnenenergie und einsickerndes Regenwasser ansonsten nicht regeneriert werden können. Um eine sinnvolle Verlegtiefe wählen zu können, ist es zweckmäßig, winterliche Temperaturen im Boden zu berücksichtigen. [15]

Der Abstand zwischen den einzelnen Rohren kann von 30 bis 80 cm variieren. Die untenstehende Abbildung liefert mögliche Richtwerte für den Rohrabstand nach der erwünschten Leistung und der Wärmeleitfähigkeit des Bodens. [36]

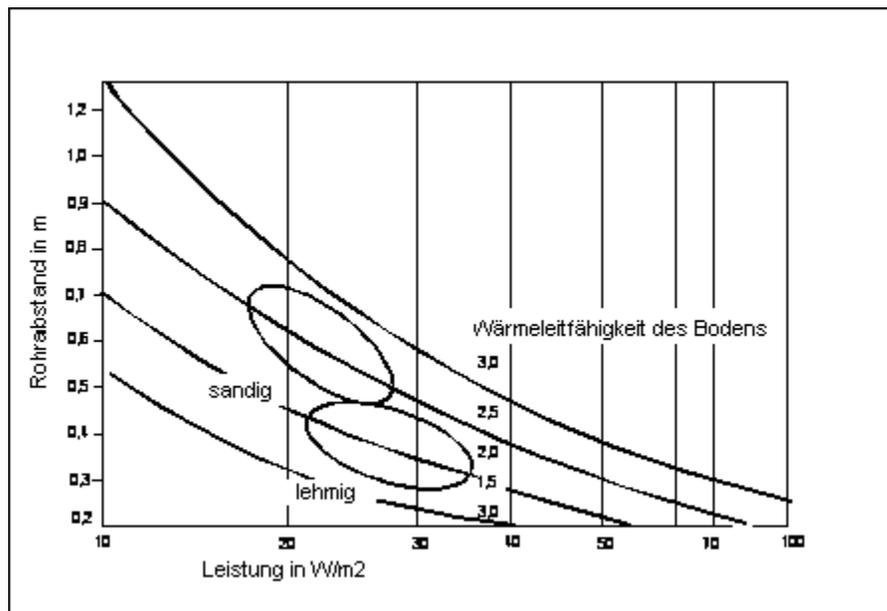


Abb. 3. 1: Richtwerte für den Rohrabstand in Kollektorfeldern [36]

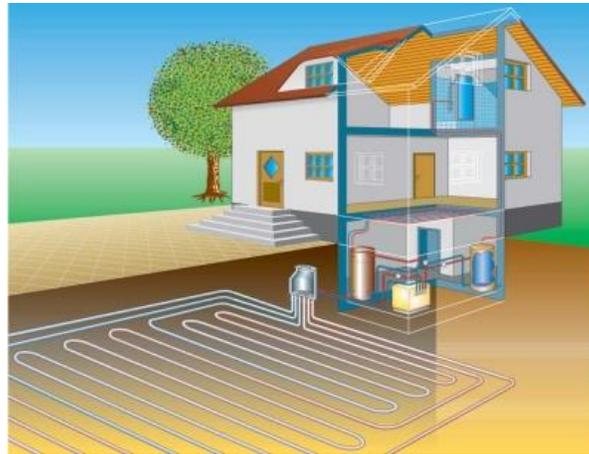


Abb. 3. 2: Schema Flächenkollektor [24]

Die Anordnung der Kollektorrohren kann in Serienschaltung oder in Parallelschaltung erfolgen.

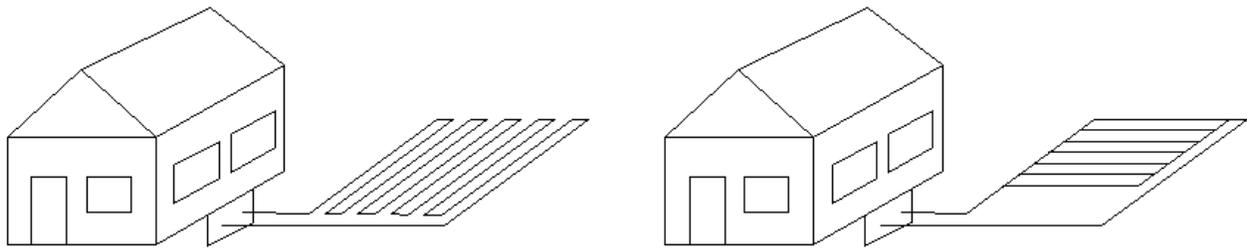


Abb. 3. 3: Prinzipskizze Serienschaltung (links) und Parallelschaltung (rechts) [21]

3.2 Grabenkollektor

Eine deutliche Verringerung des Flächenbedarfs und damit weniger Erdarbeiten können durch einen Grabenkollektor erreicht werden. Bei diesem Konzept werden die Wärmeübertragungsrohre an den Seitenwänden eines ca. 2,5 m und 3,0 m breiten Grabens verlegt. An dessen Wandflächen werden PE-Rohre in einem Abstand von ca. 10 cm horizontal übereinander verlegt und befestigt. Danach wird der Graben wieder verfüllt. Die erforderliche Grabenlänge hängt von der Bodenbeschaffenheit und der Heizleistung der Wärmepumpe ab. Als Richtwert kann eine spezifische Grabenlänge von 2 m pro kW Heizleistung angenommen werden. [12]

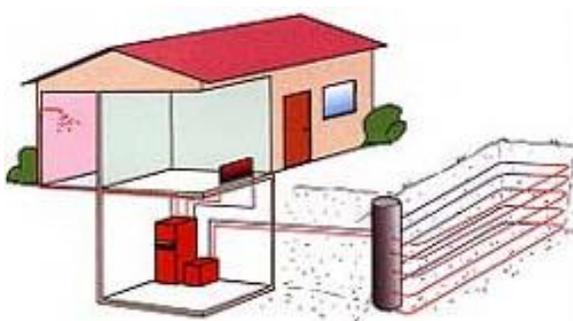


Abb. 3. 4: Schema des Grabenkollektors (links) [35] und Herstellung eines Grabenkollektors (rechts) [40]

3.3 Kompaktkollektoren

Kompaktkollektoren sind eine Variante von Flächenkollektoren, die aus vorgefertigten polymernetzten Kapillarrohmatten bestehen. Dadurch wird den Flächenbedarf verringert. Das System arbeitet nach dem Low-flow-Prinzip. Mit einer niedrigen Strömungsgeschwindigkeit wird ein optimaler Wärmeentzug aus dem Erdreich gewährleistet. Hier sind einige Arten von Kompaktkollektoren vorgestellt. Slinky- und Svec-Kollektoren sind die am meist verbreiteten Bauarten von Spiralkollektoren. [30]

- Slinky- oder Künettenkollektor – eine handelsübliche Rolle Kunststoffrohr wird auf den Boden eines breiten Grabes gelegt und seitlich, senkrecht zur Wickelachse, so auseinandergezogen, dass die Windungen sich jeweils überlappen. Anschließend wird der Graben wieder verfüllt. Ein solcher Kollektor kann auch senkrecht gestellt in einen schmalen, schlitzförmigen Graben eingelassen werden. [28]



Abb. 3. 5: Schema eines Slinky-Kollektors (links) [30] und Einbau eines Slinky-Kollektors (rechts) [28]

- Svec-Kollektor – ein Kunststoffrohr wird bereits bei der Herstellung auf eine Rolle aufgewickelt. Beim Einbau in einen vorbereiteten Graben kann das Rohr wie eine Schraubenfeder (parallel zur Wickelachse) auseinandergezogen und fixiert werden. Anschließend wird der Graben verfüllt. Bei solchen Kollektoren kann es Probleme mit der Entlüftung geben. [28]

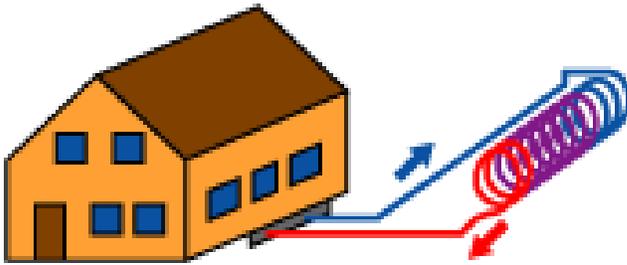


Abb. 3. 6: Schema eines Svec-Kollektors (links) [30] und Einbau eines Svec-Kollektors (rechts) [28]

- Gitterkollektor – die Rohre werden in Form eines Gitters angeordnet. Die festen Rohrabstände erreicht man mittels eines Holzgestells.



Abb. 3. 7: Schema eines Gitterkollektors [38]

- Achter Kollektor – kann mit einer Klemmschiene flexibel vor Ort ausgerichtet werden. Der Achterkollektor wird in einem 1,5 m breiten Graben eingelassen und bei ausreichendem Platz können auch mehrere Kollektoren hintereinander geschaltet werden. Für eine bessere Raumnutzung, können die Kollektoren horizontal oder vertikal eingebaut werden. Beim vertikalen Einbau wird eine Breite von 60 cm benötigt.

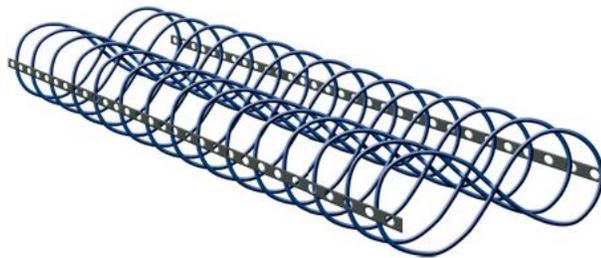


Abb. 3. 8: Schema eines Achter-Kollektors [38]

- Korbkollektor - sind üblicherweise kegelförmig gewickelte Erdwärmesonden mit einer Tiefe von 1 – 4 m und einem oberen Durchmesser von ca. 2 m. Ein solches System ist anwendbar, wenn der Energie- und Platzbedarf gering ist und Tiefbohrungen aus rechtlichen oder wirtschaftlichen Gründen ausgeschlossen werden. Der Abstand zwischen den einzelnen Körben muss 4 m betragen. Für den Einbau der Körbe wird ein ausreichend großes Loch ausgehoben, der Korb darin eingebracht und anschließend wieder verfüllt. Im Vergleich zu Flächenkollektoren kann der Platzbedarf um 50 % verringert werden.



Abb. 3. 9: Korbkollektor [28]

Bei all dieses kompakten Erdwärmekollektoren besteht die Gefahr, dass im ausschließlichen Heizbetrieb die notwendige Wärmeregeneration im Sommer nicht gegeben ist, da die Umgrenzungsfläche zum umgebenden Erdreich und zur Erdoberfläche relativ klein ist im Verhältnis zum erschlossenen Volumen. Eine derartige Konfiguration eignet sich daher eher zur Energiespeicherung. Dementsprechend sind kompakte Erdwärmekollektoren auch besonders für Anlagen zum Heizen und Kühlen sinnvoll. Für Wärmepumpen, die ausschließlich zu Heizzwecken betrieben werden, eignen sich dagegen flächige Erdwärmekollektoren besser. [12]

4 Wärmepumpen

Der Grundgedanke bei der Entwicklung der Wärmepumpe ist die Behauptung, dass genauso wie „der Dampf mechanische Arbeit erzeugen kann“, auch das umgekehrte Prinzip gültig ist: „die mechanische Arbeit kann Dampf erzeugen“. Mit Hilfe eines Kompressors wird der Dampf dabei komprimiert, bis eine für Heizzwecke ausreichende Temperatur erreicht wird.

Eine Wärmepumpenanlage besteht aus einem Gewinnungskreislauf (Wärmequelle), einer Wärmepumpe und einem Nutzungskreislauf (Wärmeentzugsanlage) (Abbildung 4.1). Da die Temperatur im Gewinnungskreislauf für die direkte Nutzung zu Heizzwecken unzureichend ist, ist der Einsatz einer Wärmepumpe erforderlich, um das Temperaturniveau anzuheben und die Wärme für die Beheizung von Gebäuden oder die Erwärmung von Brauchwasser nutzbar zu machen. [37]



Abb. 4. 1: Systembereiche der Erdwärmenutzung [28]

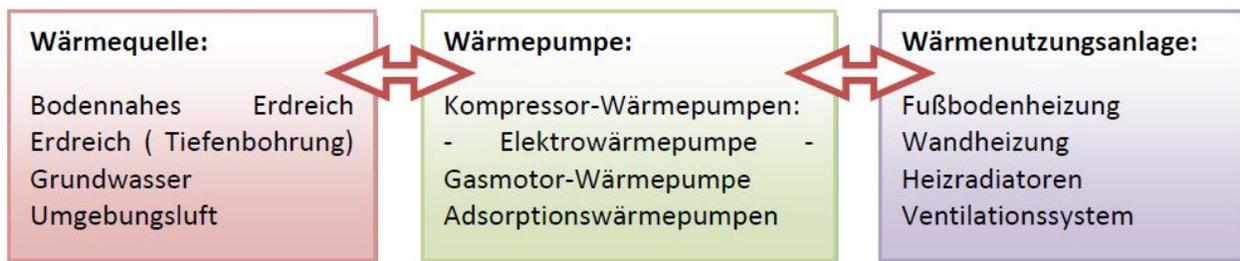


Abb. 4. 2: Komponenten einer Wärmepumpenanlage [37]

Es gibt verschiedene Arten von Wärmepumpen die sich in ihrer Funktionsweise unterscheiden und verschiedene Antriebsenergien verwenden. Eine Klassifikation der Wärmepumpen nach Anwendungsbereichen, Leistungszahlen und Antriebsenergie bietet Tabelle 4.1.

Tabelle 4. 1: Wärmepumpen - Anwendungsbereiche, Leistungszahlen und Antriebsenergie [37]

	Antriebsenergie	Anwendungsbereiche	max. Leistungszahl
Elektrowärmepumpe	El. Strom	Wohngebäude	3-6
Gasmotor-Wärmepumpe	Erdgas	hohe Leistungen lange Laufzeit	3-6
Absorptionswärmepumpe	Wärme/Gas	sehr große Leistungen	1.4-1.6

4.1 Funktionsweise

Kompressionswärmepumpe

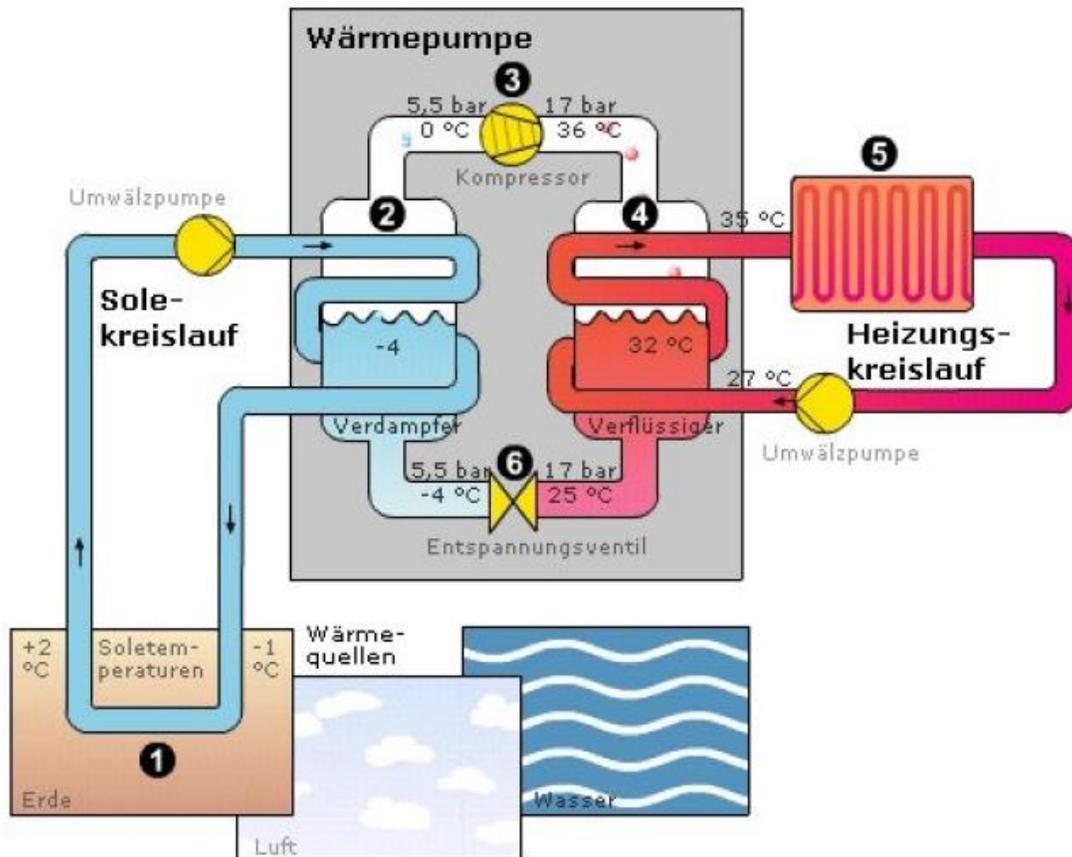


Abb. 4. 3: Funktionsschema einer Wärmepumpe [18]

- 1) Wärmequelle (Primärkreislauf)
- 2) Verdampfer: Ein Wärmetauscher, in dem sich ein flüssiges Kältemittel bei niedrigem Druck p_0 befindet. Die Siedetemperatur des Kältemittels T_0 bei diesem Druck ist niedriger als die Umgebungstemperatur des Verdampfers (Wärmequelles), so dass Wärme von der Umgebung auf das Kältemittel übergeht und dieses zum Sieden und damit zum Verdampfen bringt.
- 3) Kompressor: In dem als Kompressor bezeichneten Verdichter wird das dampfförmige Kältemittel angesaugt und unter Zuführung hochenergetischer mechanischer Antriebsenergie komprimiert. Dabei steigen Druck und Temperatur des Kältemitteldampfes.
- 4) Verflüssiger: Nach der Verdichtung auf p_c gelangt das Kältemittel in den auf der Hochdruckseite gelegenen Wärmetauscher. Durch die Druckerhöhung ist auch die Siedetemperatur T_c des Kältemittels gegenüber der Temperatur im Verdampfer angestiegen, so dass nun die den Verflüssiger umgebende Wärmesenke eine Kondensation des Kältemittels bewirkt und die dabei freiwerdende Wärme aufnimmt.
- 5) Heizungskreislauf (Sekundärkreislauf)
- 6) Entspannungsventil: Dort wird das anfallende flüssige Kältemittel auf den Druck p_0 bzw. die Temperatur T_0 im Verdampfer entspannt und so der Kreislauf geschlossen. [14]



Abb. 4. 4: Kreisprozess einer Wärmepumpe [41]

4.2 Kältemittel

In dem geschlossenen Kreislauf der Wärmepumpe (Abbildung 4.4) übernimmt das Arbeitsmedium Kältemittel die Aufgabe, die Wärme zu übertragen und zu transportieren. Das flüssige Kältemittel hat die Eigenschaft, dass es auch bei Minustemperaturen siedet und verdampft und die dabei aufgenommene Energie speichert. Durch Verflüssigung bei höheren Temperaturen und höherem Druck können Kältemittel wieder Wärme abgeben. In Tabelle 4.2 sind die umweltrelevanten Eigenschaften von Wärmepumpen-Arbeitsmittel dargestellt. [41]

Tabelle 4. 2: Umweltrelevanten Eigenschaften von Wärmepumpen-Arbeitsmittel [28]

	Name	Formel	Siedetemperatur [°C]	WGK ¹	ODP ²	GWP ³
HFKW: R134a	Tetrafluorethan	CF ₃ CH ₂ F	-26	1	0	1300
HFKW - Gemische:						
R407C	R32/R125 ⁴ /R134a im Verhältnis 23/25/52		-44	1	0	1610
R410A	R32/R32/R125 ⁴ a im Verhältnis 50/50		-51	1	0	1890
Halogenfreie Arbeitsmittel						
R290	Propan	C ₃ H ₈	-42	n.w. ⁵	0	3
R1270	Propen	C ₃ H ₆	-48	n.w. ⁵	0	3
R717	Ammoniak	NH ₃	-33	2	0	0
R744	Kohlendioxid	CO ₂	-57	n.w. ⁵	0	1

¹Wassergefährungsklasse

²Ozonabbaupotenzial (relativ, R11=1,0)

³GWP (Global Warming Potential) Treibhauspotenzial (relative, CO₂=1,0 Zeithorizont 100 Jahre)

⁴R32=Difluormethan (CH₂F₂); R125=Pentafluorethan (C₂HF₅)

⁵nicht wassergefährdend

4.3 Wärmepumpentypen

Wärmepumpen können wie folgend eingeteilt werden:

- Nach dem Funktionsprinzip – Kompressionswärmepumpe, Absorptionswärmepumpen (Die Wirkungsweise ist der Kompressorwärmepumpe sehr ähnlich mit dem Unterschied, dass an Stelle eines Kompressors ein thermischer Verdichter verwendet wird), Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe, Adsorptionswärmepumpe (der Sorbent ist ein Feststoff),
- Nach dem Einsatz – Heizung, Warmwasserbereitung, Wohnraumlüftung, Kühlung,
- Nach der Wärmequelle – Erdwärme, Grundwasser, Oberflächenwasser, Außenluft, Abluft, Abwasser,
- Medium Wärmequelle/Wärmeentzugsanlage – Direktverdampfung, Sole/Wasser, Wasser/Wasser, Luft/Wasser, Luft/Luft.

4.4 Energieeffizienz

4.4.1 Leistungszahl, COP (Coefficient of performance)

Die Leistungszahl, auch COP genannt (Coefficient of performance), ist das Verhältnis zwischen der von der Wärmepumpe abgegebenen Wärmeleistung und der aufgenommenen Antriebsleistung. Eine Leistungszahl von 4 bedeutet somit, dass im Falle einer Elektrowärmepumpe für 1 kWh Strom 4 kWh Heizwärme abgegeben werden.

$$\text{Leistungszahl} \quad \varepsilon_{WP} = \frac{\text{Heizleistung} \quad Q_{WP} \quad [kW]}{\text{Antriebsleistung} \quad P_{WP} \quad [kW]} \quad (4.1)$$

Die Leistungszahl ε gilt nur für einen definierten Betriebspunkt. Sie verändert sich also ständig in Abhängigkeit von der Quellen- und Heizungsvorlauftemperatur. Die Leistungszahl dient in der Praxis auch als Vergleich von Systemen bei gleichen Betriebsbedingungen. Das in Abbildung 4.5 dargestellte Diagramm zeigt den quantitativen Verlauf der Abhängigkeit der Leistungszahl von der Vorlauftemperatur. Als Richtwert gilt, dass pro eingespartem Grad der Vorlauftemperatur Einsparungen bis zu 2,5 % im Energieverbrauch der Wärmepumpe möglich sind. [41]

Bei der Berechnung des COP-Werts werden die Leistungen der Elektrischer Hilfsaggregate, die nicht direkt zum Wärmeprozess gehören, berücksichtigt. [22]

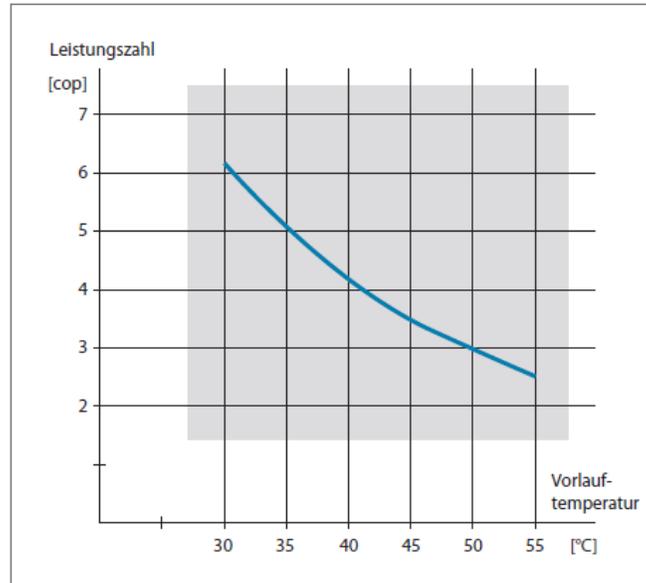


Abb. 4. 5: Leistungszahl in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur [41]

4.4.2 Jahresarbeitszahl β (JAZ)

Die Jahresarbeitszahl (JAZ) ist das Verhältnis der im Jahresverlauf abgegebenen Wärme des Wärmepumpensystems zur aufgenommenen elektrischen Arbeit (jährlicher Stromverbrauch). Sie steht somit für die Energieeffizienz der gesamten Anlage und nicht nur der Wärmepumpe.

$$JAZ \quad \beta = \frac{\text{Wärmeabgabe} \quad Q_{\text{Heiz}} \quad [kWh/a]}{\text{Energieverbrauch} \quad P_{\text{Antrieb}} \quad [kWh/a]} \quad (4.2)$$

4.4.3 Heizzahl (ζ)

Definition laut VDI 4640: „Die Heizzahl ζ einer verbrennungsmotorisch betriebenen Wärmepumpe oder einer mit Primärenergie betriebenen Absorptionswärmepumpe für einen bestimmten Arbeitspunkt ist das momentane Verhältnis von abgegebener Wärmeleistung zu aufgenommener Brennstoffleistung auf einen bestimmten Anlagenumfang.“ [26]

„Die Heizzahl wird statt der Arbeitszahl angegeben, wenn es sich um Absorptionswärmepumpen oder Wärmepumpen mit Verbrennungsmotorantrieb handelt. Die Antriebsenergie für solche Wärmepumpen liefert Erdgas, Propan oder Diesel.“ [28]

4.4.4 Nutzungsgrad

Der Nutzungsgrad ist die über die gesamte Heizperiode ermittelte Energiemenge, die tatsächlich verwendet wird.

4.4.5 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ist die zu einem Zeitpunkt gemessene Energiemenge, die tatsächlich verwendet wird. Weil der Wirkungsgrad unter optimalen Bedingungen bestimmt ist, liegen die Wirkungsgradwerte etwas höher als die des Nutzungsgrads.

4.5 Wärmepumpensysteme

Je nach Wärmeträgermedium im Wärmequellen- und Wärmenutzungskreislauf werden die Systeme z.B. als Luft-Wasser-Wärmepumpe, Luft-Luft, Sole-Wasser oder Wasser-Wasser Wärmepumpe bezeichnet. Für den Wärmeentzug aus dem Erdreich und den Wärmetransport von der Wärmequelle zur Wärmepumpe existieren 2 Möglichkeiten.

- Wärmeentzug und -transport können mittels eines Zwischenkreislaufs durch ein Wärmeträgermedium (Sole) erfolgen, welches Wärme aus dem Erdreich aufnimmt und an den Wärmepumpenverdampfer abgibt. Aus Frostsicherheitsüberlegungen wird eine Mischung von Monoethylglykol (25 % Glykol bis ca. -14°C und 33 % bis -21°C) eingesetzt. Als Wärmeüberträger zum Erdreich werden Schläuche aus Polyethylen, gelegentlich auch Polypropylen oder Polybutylen, mit Außendurchmessern von bis zu 40 mm eingesetzt. Diese Materialien weisen eine ausreichende Alters- und Korrosionsbeständigkeit auf und sind bei den auftretenden Temperaturen elastisch und chemisch stabil. Die Verbindung der einzelnen Rohrleitungen erfolgt durch Verschweißen oder durch Verschrauben (Abbildung 4.6 links). [12]
- Wärmeentzug und -transport können auch über eine Direktverdampfung realisiert werden. In den Rohren des Erdreichwärmeüberträgers zirkuliert das Arbeitsmittel der Wärmepumpe direkt. Es verdampft dort und entzieht dem Erdreich Wärme. Der Verdampfer der Wärmepumpe befindet sich im Erdreich. Es werden Kupferrohre verwendet, die mit einer Kunststoffhülle vor Korrosion geschützt werden. Der Vorteil der Direktverdampfung liegt in dem geringeren apparativen Aufwand und einer höheren erreichbaren Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe. Andererseits bedarf es einer kältetechnisch genau angepassten Anlagenausführung und die Füllmengen des Arbeitsmittels sind wesentlich höher als bei Anlagen mit Zwischenkreislauf (Abbildung 4.6 rechts). [12]

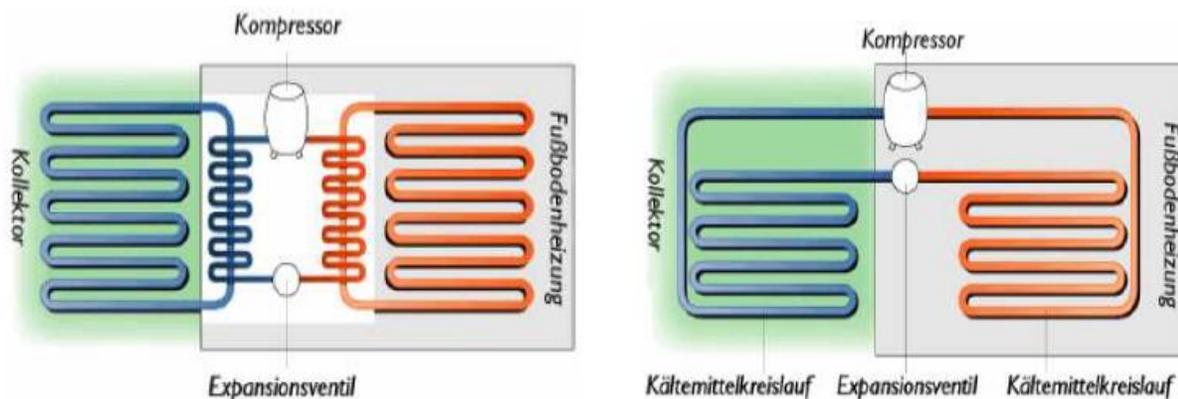


Abb. 4. 6 System Sole-Wasser (links) und Direktverdampfung (rechts) [28]

4.6 Betriebsarten und Einsatzgebieten

In erster Linie werden die Wärmepumpen zu Heizzwecken eingesetzt. Wenn eine Wärmepumpenanlage den Heizbedarf ganzjährig ohne die Nutzung anderer Wärmesysteme erfüllen kann, spricht man von einer monovalenten Betriebsweise. Voraussetzung für eine monovalente Nutzung ist eine Wärmequelle mit relativ hohem Temperaturniveau. Im Gegensatz zum monovalenten Betrieb kommen bei der bivalenten Betriebsart zwei Anlagen zur Bereitstellung von Wärmeenergie zum Einsatz. Die Wärmepumpe erhält somit Unterstützung durch ein weiteres Heizsystem. Bei bivalent arbeitenden Anlagen unterscheidet man zwischen bivalent parallelem und alternativem Betrieb. Wenn die fehlende Heizleistung zusätzlich durch Strom erzeugt wird, spricht man von monoenergetischem Betrieb. Weiterhin kann die Betriebsform nach Heizen und Kühlen, nach aktivem und passivem Betrieb bei Heizung und Kühlung sowie nach saisonaler Speicherung unterschieden werden. [39]

5 Simulationen

5.1 Comsol – Mechanische und mathematische Grundlagen

Comsol Multiphysics ist eine leistungsfähige interaktive Umgebung zum Modellieren und Lösen aller Arten wissenschaftlicher und technischer Aufgaben. Die Software bietet ein integriertes Interface, bei dem das Modell mit seiner Geometrie und den physikalischen Eigenschaften leicht abgebildet werden kann. Mit dem Programm kann man bequem ein einzelphysikalisches in ein multiphysikalisches Modell umwandeln, das eine Gesamtheit von physikalischen Problemstellungen lösen kann. Beim Lösen des Modells benutzt Comsol die bekannte Finite-Elemente-Methode (FEM), bei der im Modell ein adaptives Netz geschaffen wird.

Dank seiner Struktur, bei der alle Schritte während der Modellierung der Geometrie und des Netzes, die Einstellungen für die Untersuchungen, die Lösung, sowie die Vorstellung der Ergebnisse gespeichert werden, ermöglicht das Programm eine leichte und schnelle Veränderung der Parameter und die Neuberechnung des Modells.

Basierend auf partiellen Differentialgleichungen (PDEs) bietet Comsol Multiphysics ein breites Spektrum von technischen Problemlösungen. Zum Zweck der Diplomarbeit wird das Modul „Wärmetransport in porösen Medien“ verwendet. [6]

Wärmetransport im Erduntergrund

Ausgehend aus der Wärmetransportgleichung im Erduntergrund im Kapitel 2.2.2 (Formel 2.23) und unter Berücksichtigung, dass in dem betrachteten Fall die Konvektion und Dispersion, wegen der niedrigeren Filtergeschwindigkeit v_f vernachlässigt werden, wird der Wärmetransport in porösen Medium nach folgender Formel beschrieben. Es ist auch keine Wärmequelle/-senke vorhanden.

$$(\rho c)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K_{eq} \nabla T) \quad (5.1)$$

mit folgenden Materialbeziehungen:

ρ	Dichte	[kg/m ³]
c	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	[J/(kg·K)]
$(\rho c)_{eq}$	äquivalente spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	[J/(kg·K)]
K_{eq}	äquivalenter Wärmeleitfähigkeitskoeffizient (isotropes Medium: Skalar, anisotropes Medium: Tensor)	
T	absolute Temperatur	[K]

Im Modell „Wärmetransport in porösen Medien“ werden verschiedene Arten von Boden mit entsprechenden wärmephysikalischen Eigenschaften und vom Volumenanteil des Feststoffs abhängigem Wassergehalt simuliert.

Anfangsbedingung

Anfangsbedingung im Modell ist die Ausgangstemperatur des Bodens, die sich in Abhängigkeit von der Außentemperatur verändert. Die Ausgangstemperatur wird mit 12°C angenommen. In Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften und der Klimaregion bleibt diese Temperatur ab einer bestimmten Tiefe konstant.
 $T=12^{\circ}\text{C}$ – Anfangstemperatur

Randbedingung

Es gibt 2 verschiedene Randbedingungen: die Temperatur und der Wärmefluss. Erstere hat eine begrenzende Funktion, da die Temperatur am Rand als eine Konstante gegeben wird (Formel 5.6). Auf dieser Weise wird die Temperatur an der Sohle des Modells simuliert.

$$T = T_0 \quad (5.2)$$

Die zweite Randbedingung bestimmt die inneren Wärmeflüsse. Sie beschreiben die Wärmeübergänge (siehe Kapitel 2.3.3.5) von der Oberfläche zum Erduntergrund und vom Erduntergrund zum Rohr.

$$\dot{q} = -K\nabla T \quad (5.3)$$

$$-\vec{n} \cdot \vec{q} = q_0 \quad (5.4)$$

$$-\vec{n} \cdot (-K\nabla T) = \Lambda \cdot (T_{\text{ext}} - T) = q_0 \quad (5.5)$$

mit:	K	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient	[W/(m.K)]
	Λ	Wärmeübergangskoeffizient	[W/(m ² .K)]
	q	konduktiver Wärmeflussvektor	[W/m ²]
	q ₀	Wärmefluss, senkrecht am Rand	[W/m ²]
	\vec{n}	Normalvektor	
	T _{ext}	externe Temperatur	[°C]

Im Model sind folgende Wärmeflüsse als Randbedingungen definiert (graphische und tabellarische Darstellung mit konkreten Werten sind in Kapitel 5.2.7 gegeben):

1) Wärmefluss an der Seitenwänden – Isolation (Symmetrie)

$$-\vec{n}(-K\nabla T) = 0 \quad (5.6)$$

2) Wärmefluss von der Oberfläche zum Boden

Bei dieser Randbedingung werden 2 Wärmeflüsse definiert, die den Einfluss der Umgebungstemperatur und der Sonneneinstrahlung berücksichtigen. Die Umgebungstemperatur wird als Temperaturkurve $T=T(t)$ der Monatsmittelwerte für die gegebene Klimaregion definiert (siehe Kapitel 5.2.3 Außenlufttemperatur). Der Sonnenstrahlungswärmefluss besteht aus einer Zeitfunktion der Jahresgänge für die berechnete Globalstrahlung, bei der der Emissionsgrad des Bodens berücksichtigt worden ist. Bei steiler Oberfläche sind diese Werte mit den entsprechenden Koeffizienten korrigiert (siehe Kapitel 5.2.3 Sonnenstrahlung). Die „Oberfläche-zu-Umgebung“ Strahlung wird als zusätzliche Randbedingung nach Formel (5.7) definiert.

$$q = \varepsilon\sigma(T_{amb}^4 - T^4) \quad (5.7)$$

mit: ε Emissionsgrad
 σ Stefan-Boltzmannkonstante
 T_{amb} Umgebungstemperatur

3) Wärmefluss vom Boden zu den Kollektoren

Dieser Wärmefluss ist von den wärmetechnischen Eigenschaften der Kollektoren und deren Temperatur bestimmt. In Abhängigkeit vom Rohrmaterial variiert den Wärmedurchlasskoeffizient von 15 bis 50 [W/(m².K)]. Die Rohrtemperatur ist beim Betriebsfall „nur Heizen“ als eine Konstante und beim Betriebsfall „Heizen und Kühlen“ als eine Zeitfunktion gegeben (siehe Kapitel 5.2.5).

5.2 Modellierung des Simulationsbereiches

Die richtige Dimensionierung der Erdkollektoren als Wärmequelle ist von entscheidender Bedeutung für die Funktion der Wärmepumpe. Bei einer Unterdimensionierung kommt es zur Verminderung der Pumpenabgabeleistung und damit auch der Jahresarbeitszahl. Maßgebend für die Dimensionierung der Wärmequellenanlagen ist die Wärme- bzw. Kälteentzugsleistung des Verdampfers. Bei der Dimensionierung der Wärmepumpe ist zuerst die Wärmequelle grob einzuschätzen und anschließend anhand der Leistungsparameter die Wärmepumpe zu wählen. Für den Fall einer aktiver Kühlung ist die Anlage größer zu dimensionieren.

Die Wärmeentzugsleistung der Kollektoren wird durch eine Reihe von Parametern beeinflusst. Für die ökonomisch und ökologisch sinnvolle Wahl einer Wärmequelle sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Grundstücksgröße,
- Bodenbeschaffenheit,
- Klimazone,
- Sonnenstrahlung,
- Niederschlagsmenge,
- Lage des Grundstücks – Hangausrichtung und Hangneigung.

5.2.1 Geometrie

Die Wahl der Geometrie entspricht der zu simulierenden Art der Kollektorverlegung, die von der vorhandenen Fläche bestimmt wird. In den Simulationen werden 4 mögliche Anordnungen der Kollektoren betrachtet, die an die Geländeoberfläche angepasst sind.

5.2.1.1 Flächenkollektoren

Abbildung 5.1 zeigt die Modelgeometrie von Flächenkollektoren im Boden. Im Basismodell beträgt die Verlegungstiefe 1,5 m und der Rohrabstand 0,5 m.

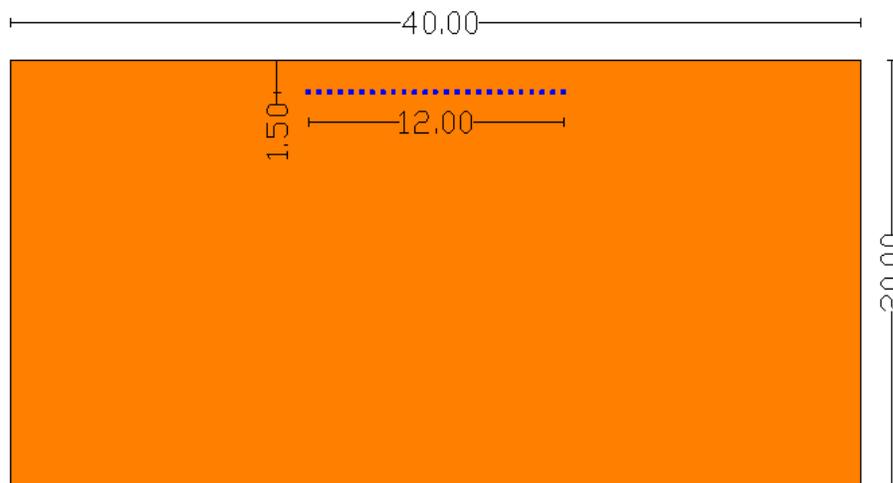


Abb. 5. 1: Modelgeometrie Flächenkollektoren. Einheiten sind in Meter angegeben.

5.2.1.2 Grabenkollektoren

Die in Abbildung 5.2 gezeigte Modelgeometrie zeigt die Rohrverteilung auf beiden Seiten eines Grabens. Die Parameter a, b und c variieren nach der Grabenbreite, -tiefe und dem Rohrabstand der einzelnen Kollektoren. Im Basismodell betragen diese Werte a=1.5 m, b=4.8 m und c=0.3 m. Weiters wurden verschiedenen Simulationsszenarien mit folgenden Werte durchgeführt:

a=0.3; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5 m

b=4.6; 4.8; 5.0 m

c=0.1; 0.3; 0.5 m

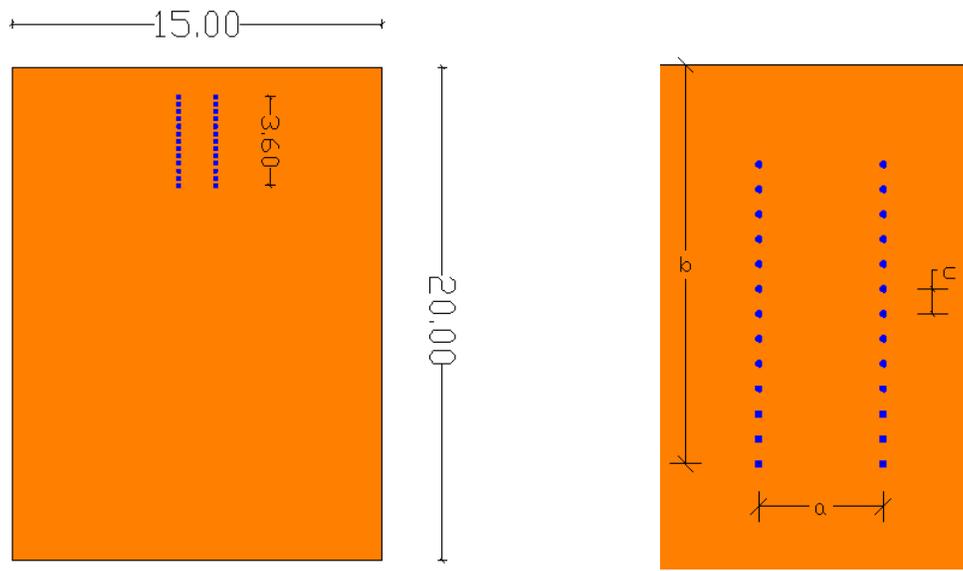


Abb. 5. 2: Modellgeometrie Grabenkollektoren (links) und Anordnung der Rohrleitungen (rechts). Einheiten sind in Metern angegeben

5.2.1.3 Steilkollektoren

Wenn wir ein steiles Gelände betrachten, ist eine steile Anordnung der Kollektoren möglich (Abbildung 5.3). Analog zu den Flächenkollektoren variieren hier noch die Hangneigung und –ausrichtung. Der Neigungswinkel α ist:

$\alpha = 0^\circ$ (Flächenkollektoren), 15° , 30° , 45°

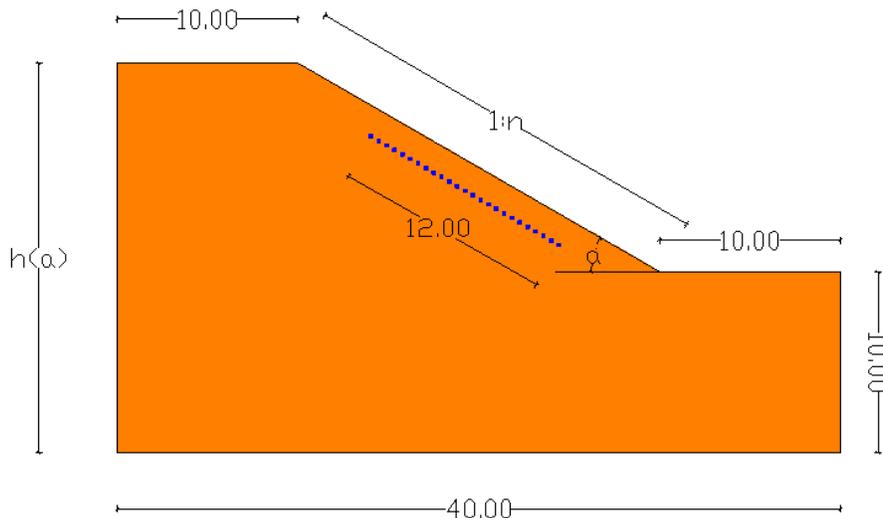


Abb. 5. 3: Modelgeometrie – steile Anordnung der Kollektoren. Einheiten sind in Metern angegeben.

Abbildung 5.4 zeigt eine andere Möglichkeit nicht nur die Fläche, sondern auch das Volumens des Hangs optimale zu nutzen. Eine solche Anordnung erfordert einen relativ großen Aushub, wobei die Rohrleitungen vertikal, horizontal und schräg verlegt werden. Bei der Analyse der Ergebnisse wird sowohl

die Wärmeentzugsleistung des ganzen Rohrsystems, als auch der separate Anteil der schräg-, vertikal- und horizontal verlegten Rohre berücksichtigt.

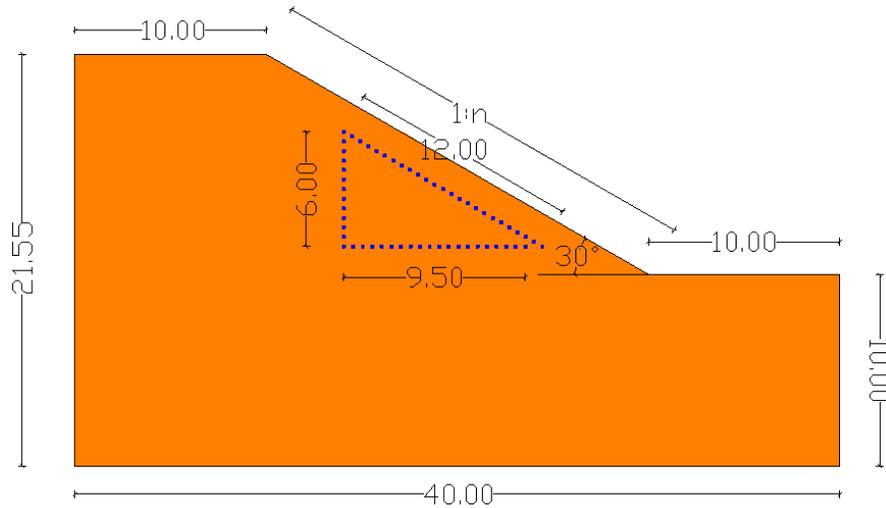


Abb. 5. 4: Modelgeometrie Hangaushub. Einheiten sind in Metern angegeben.

5.2.2 Boden

Der Boden wird als ein homogenes Erd-Wasser-Gemisch modelliert, das durch die Wärmeleitfähigkeit K , die Dichte ρ , und die spezifische Wärmekapazität c definiert wird. Das gesamte Model ist isotrop. Das mit $K=1.5$ [W/(mK)], $\rho=1800$ [kg/m³], $c=1600$ [Ws/(kgK)] charakterisierte Erdreich des Basismodells entspricht einem schluffigen Boden. In weiteren Betriebsszenarien werden auch Ton, trockener und nasser Sand mit den in Tabelle 5.1 gezeigten Bodenparameter simuliert.

Tabelle 5. 1: Wärmetechnische Parameter der Böden

	Dichte, ρ	Wärmeleitfähigkeit	Spez. Wärmekapazität	Wassergehalt
	[kg/m ³]	[W/(m.K)]	[Ws/(kg.K)]	%
Basis	1800	1.5	1600	20
Ton	2000	1.2	2200	30
Trockener Sand	1800	1.6	1200	7
Nasser Sand	2200	2.2	1600	15
Wasser (T=12°C)	1000	0.6	4200	100

Die Wärmeübergangskoeffizient an der Oberfläche wird mit $\Lambda=15$ [W/(m².K)] aus [9] übernommen.

5.2.3 Klima

An der Erdoberfläche wirken die von der Ortslage und der Zeit abhängigen meteorologischen Elemente Lufttemperatur und Sonnenstrahlung. Die Leistungsfähigkeit eines Erdwärmekollektors ist von der Jahresmitteltemperatur und von den Temperaturschwankungen der Monatsmittelwerte stark abhängig. Je wärmer eine Region im Durchschnitt ist, desto mehr Wärme strömt von der Erdoberfläche und aus

tiefen Erdschichten zum Kollektor. Dies verringert die Eisbildung und beschleunigt das Abtauen im Frühjahr. In wärmeren Regionen können daher die Erdwärmekollektoren auf eine wesentlich höhere spezifische Entzugsleistung ausgelegt werden. Da die Erdoberfläche unversiedelt bleiben muss, wird die Randbedingung Außenluft als eine Zeitfunktion der Temperatur angesetzt. Die Vorgabe einer ganzjährig konstanten Erdoberflächentemperatur t_{OF} wäre möglich, wenn der Erdwärmekollektor beispielweise mit einem Gebäude überbaut ist. Der Erdwärmekollektor könnte dann aber nur im ausgeglichenen Speicherbetrieb genutzt werden (Heiz- und Kühlbetrieb). [8]

Außenlufttemperatur

Österreich ist in 4 Klimazonen eingeteilt. Die Abbildung 5.5 zeigt die Monatsmittelwert-Temperaturkurve für jede Klimaregion. Die Simulationen umfassen einen Zeitraum von 4 Jahren. [34]

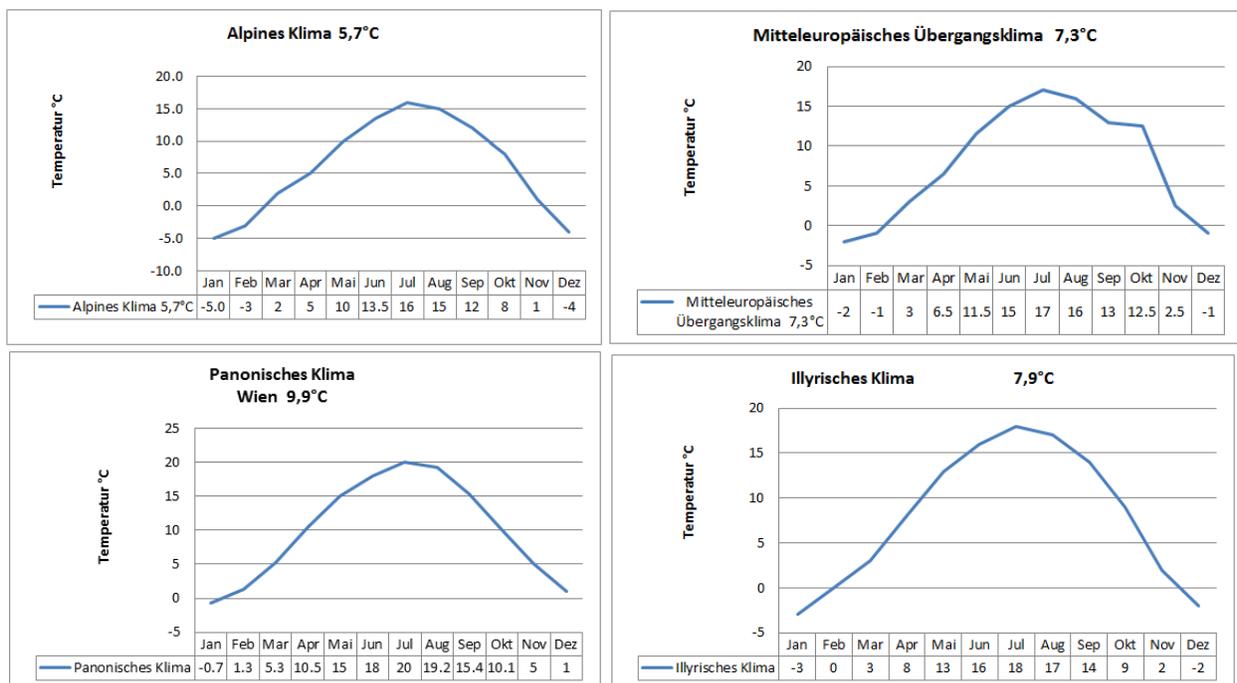


Abb. 5. 5: Temperaturkurve alpine Klimazone (oben links), Temperaturkurve mitteleuropäische Klimazone (oben rechts), Temperaturkurve panonisches Klimazone (unten links), Temperaturkurve illyrische Klimazone (unten rechts) [34]

Bei der Simulationen wird der Einfluss der verschiedenen Klimazonen auf die Wärmeentzugsleistung der verschiedenen Kollektortypen untersucht. Als Standort für das Basismodel wird die pannonische Klimaregion gewählt.

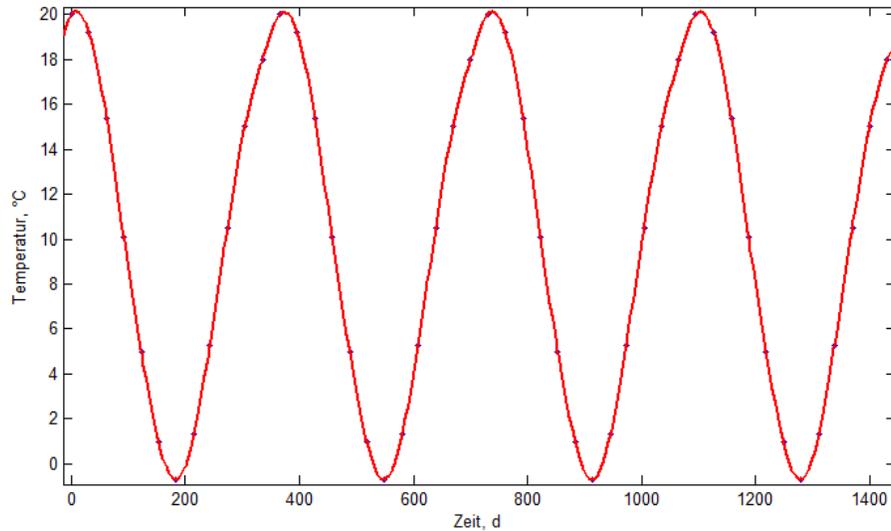


Abb. 5. 6: Temperaturkurve für einen Zeitraum von 4 Jahren

Sonnenstrahlung

Die gemessenen Werte der Sonnenstrahlung auf verschiedene Standorte in Österreich zeigen, dass in den ländlichen Regionen die Werte überall fast gleich sind. Dagegen ist in den gebirgigen Regionen eine wesentlich höhere Einstrahlung trotz niedriger Temperaturen zu bemerken. Für die mitteleuropäische, pannonische und illyrische Klimazone wird die berechnete Sonnenstrahlung der *Station Graz-Universität* und für die alpine Klimazone die Werte von der *Station Sonnblick* genommen (Abbildung 5.7). [19]

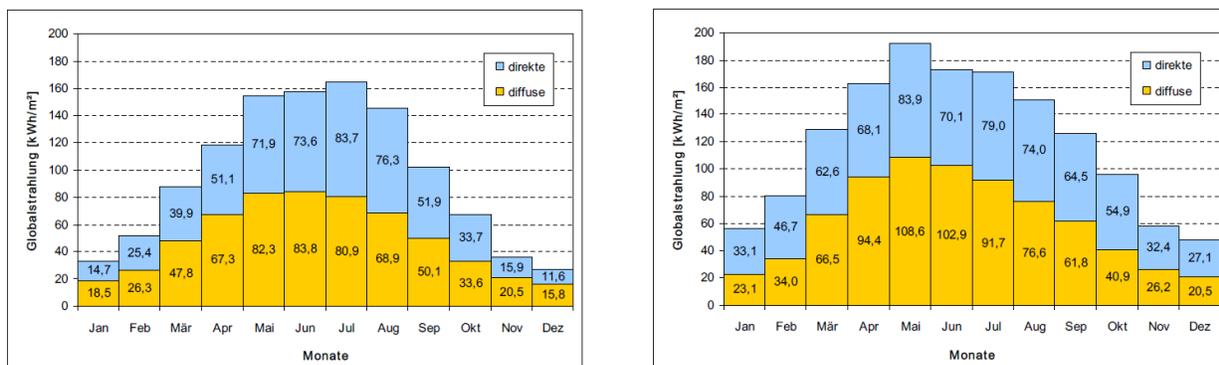


Abb. 5. 7: Jahresgänge für die berechnete Globalstrahlung (direkte und diffuse) auf eine horizontale Ebene, Station Graz-Universität, Sh 366m (links) und Station Sonnblick, Sh 3100m (rechts) [19]

Als besonders wichtige Einflüsse der Sonnenstrahlung auf den Wärmestrom im Erdreich sind der Emissionsgrad der Böden und die „Oberfläche-zu-Umgebung“-Strahlung zu berücksichtigen. In Comsol Multiphysics kann man diese Forderung leicht als Randbedingung definieren. Die Funktionsgrafik dieser Randbedingung ist in Abbildung 5.8 veranschaulicht. Die dazugehörigen Werte befinden sich in Tabelle 5.2. Diese Werte bekommt man nach der Umrechnung der Globalstrahlung in Abbildung 5.7 von kWh/m^2 in W/m^2 . Anschließend werden sie mit dem Emissionsgrad der entsprechenden Böden korrigiert und im Modell als Wärmefluss definiert. Weil die Station Sonnblick sich auf einer Seehöhe von 3100 m befindet, kann eine permanente Schneedecke in den Wintermonaten angenommen werden. Bei einer

geschlossenen Schneedecke, ist die Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche zu vernachlässigen. Deshalb ist in der Grafik der Globalstrahlung in den Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar) die Globalstrahlung gleich null (Abbildung 5.8 rechts).

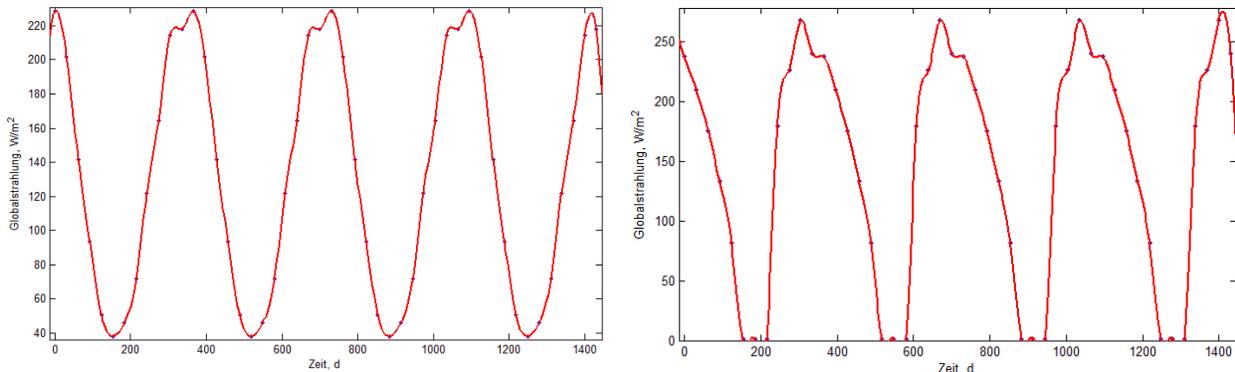


Abb. 5. 8: Die berechnete Globalstrahlung in W/m^2 für ländliche (links) und gebirgige (rechts) Region

Die Werte des Emissionsgrades für entsprechende Böden sind in Tabelle 5.3 dargestellt. [35]

Tabelle 5. 2: Einfluss der Sonnenstrahlung auf den Wärmestrom ans Erdreich

Region	Sonnenstrahlung W/m^2											
	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Now	Dez
ländliche	46.1	71.8	121.8	164.4	214.2	217.9	228.6	201.7	141.7	93.5	50.6	38.1
gebirgige	78.1	112.1	179.3	225.7	267.4	240.3	237.1	209.2	175.4	133.1	81.4	66.1

Tabelle 5. 3: Emissionsgrad für verschiedene Böden [44]

Boden	Emissionsgrad
Ton	0.39
Schluff	0.53
Sand	0.76
Schnee	0,85-0,98

Bei einer geneigten Geländeoberfläche (bei Steilkollektoren), fallen die Sonnenstrahlen unter verschiedenen Winkel ein. Damit verändert sich der Einfluss der Sonneneinstrahlung auf den Wärmestrom ans Erdreich erheblich. Tabelle 5.4 zeigt die berechnete Korrekturkoeffizienten der Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit von der Hangausrichtung und der Hangneigung. Anhand der Daten kann man feststellen, dass der größte Wärmestrom bei einem südlich orientierten Hang mit einem Neigungswinkel von 30° bis 40° erreicht werden kann. Die Werte für einen westlich oder östlich orientierten Hang sind gleich. Im Vergleich zur südlichen ist aber die westlich/östliche Ausrichtung ungünstiger. Die Werte wurden durch die Korrektur der Daten aus Tabelle 5.2 mit einem von der Energieagentur NRW erstellten Kalkulators berechnet. [33]

Tabelle 5. 4: Korrekturkoeffizienten der Sonnenstrahlung bei verschiedener Hangausrichtung und – neigung.

Hangausrichtung	Hangneigung		
	15°	30°	45°
Norden	0.85	0.69	0.54
Süden	1.11	1.18	1.17
Osten	0.98	0.93	0.85
Westen	0.98	0.93	0.85

Niederschläge

Entgegen Behauptungen, dass der Enthalpieeintrag der Niederschläge maßgeblich für die Wärmezufuhr an das Erdreich ist, zeigen die Berechnungen in Formeln (5.8) und (5.9), dass dies nicht zutreffend ist. In Tabelle 5.5 sind einige meteorologische Daten für den Standort Wien zusammengefasst. [8]

Tabelle 5. 5: Mittlere Luft- und Erdreichtemperaturen sowie Niederschlagsmengen für Wien [34]

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Mit. Luftt. in°C	-0.7	1.3	5.3	10.5	15	18	20	19.2	15.4	10.1	5	1	9.9
Mit. Erdreicht. in °C in der Tiefe von 5 cm	1.3	3.5	5.4	11.5	18.1	20.4	22.5	21.2	15.9	10.9	5.6	1.1	11.4
Niederschlag in mm/(m ² a)	38	42	41	50	61	72	62	65	45	41	50	44	611

Nimmt man vereinfachend an, dass die Temperatur der Niederschläge der Lufttemperatur entspricht, so würde deren Eindringen in das Erdreich eine Abkühlung bewirken. Es kommt daher zu einem Wärmeentzug, nicht zu einer Wärmezufuhr. Im Jahresmittel ergäbe sich der Wärmeeintrag zu:

$$Q_{\text{Niederschlag}} = m_{\text{Niederschlag}} \cdot c_{\text{Wasser}} (t_{\text{Luft}} - t_{\text{Erdreich}}) = 611 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{a}) \cdot 4200 \text{ J}/(\text{kgK}) \cdot (9,9^\circ\text{C} - 11,4^\circ\text{C}) \quad (5.8)$$

$$Q_{\text{Niederschlag}} = 1070 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \text{a})$$

Demgegenüber steht beispielsweise die flächenbezogene Entzugsleistung des Kollektorfeldes von:

$$Q_{\text{Kollektor}} = 25 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot 2400 \text{ h}/\text{a} = 60000 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \text{a}) \quad (5.9)$$

Betrachtet man das Gesamtsystem beträgt der Wärmeentzug weniger als 2 % der Entzugsleistung und ist somit vernachlässigbar. Der Vorteil des eindringenden Niederschlagswassers wird jedoch darin gesehen, dass die Wärmeleitfähigkeit des feuchten Erdreiches bedeutend höher ist, als die des trockenen Erdreiches.

5.2.4 Randbedingungen an den Rändern des Modells

An der Sohle des Simulationsbereichs wird die Temperatur des Bodens als Randbedingung erster Art angenommen, d.h. eine konstante Temperatur $t_{\text{Erdsohle}}=12^\circ\text{C}$ vorgegeben. Falls sich eine Grundwasser

führende Schicht in der Tiefe T_{sim} befindet, ist die Wassertemperatur maßgebend und dann wäre die Temperatur als Zeitfunktion darstellbar. Im Allgemeinen soll die Tiefe des Simulationsbereiches so gewählt werden, dass dort näherungsweise die Temperatur des ungestörten Erdreiches gilt.

5.2.5 Modellierung des Rohrsystems

Maßgeblich für die Wärmeentzugsleistung sind bei der Wahl des Rohrsystems, der Rohrdurchmesser, der Wärmedurchlasskoeffizient und die Rohrtemperatur. Diese Parameter variieren in den durchgeführten verschiedenen Simulationsszenarien.

Rohrdurchmesser

Es kommen Rohrleitungen mit einem Außendurchmesser von 20 mm, 25 mm 32 mm und einer Wanddicke von 2,5 mm (Abbildung 5.9) zur Anwendung.

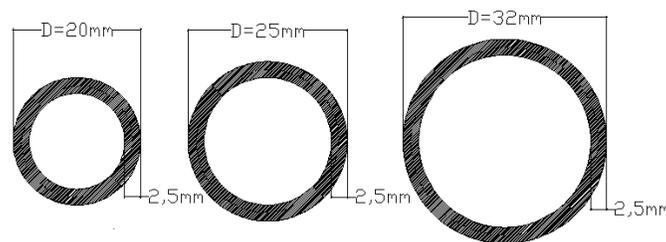


Abb. 5. 9: Querschnitt der Rohrleitungen

Der größere Durchmesser führt bedingt durch die größere Wärmeübertragungsfläche zu einer größeren maximalen spezifischen Entzugsleistung. Ein weiterer Vorteil, der im 2D Modell nicht simuliert werden kann, ist die turbulente Strömung. Die Strömung des Fluids im Rohr führt zu einer erzwungenen Konvektion. Bei laminarer Strömung ist keine Quervermischung der Teilchen in y-Richtung (senkrecht zu der Strömungsrichtung) vorhanden, deshalb erfolgt die Wärmeübertragung überwiegend durch Wärmeleitung entlang eines Temperaturgradienten in der thermischen Grenzschicht. Bei turbulenter Strömung ist der Wärmeaustausch durch Mischbewegung wesentlich höher als den durch Wärmeleitung. Bei einer turbulenten Strömung im Rohr ist bei gleichem Rohrdurchmesser aufgrund des besseren Wärmeübergangs eine höhere maximale spezifische Entzugsleistung zu erreichen als bei laminarer Strömung. „Im Rohr DN 32 kann auch bei der Berücksichtigung des maximalen Druckverlustes immer eine turbulente Strömung erreicht werden, sodass auf die Berechnung mit laminarer Strömung verzichtet werden kann. Bei den Rohrdurchmessern DN 20 und DN 25 sind die maximalen flächenspezifischen Entzugsleistungen sowohl für eine turbulente als auch eine laminare Strömung im Rohr zu berechnen“. [48]

Wärmedurchlasskoeffizient

Der Wärmedurchlasskoeffizient Λ kann mittels der Wärmeleitfähigkeit K des gewählten Materials und der Wandstärke nach Formel 5.10 berechnet werden. Am meisten werden PVC-Rohrleitungen mit $K=0,1$ [W/(mK)] eingesetzt.

$$\Lambda = \frac{K}{d} = \frac{0.1}{0.0025} = 40, \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad (5.10)$$

Λ – Wärmedurchlasskoeffizient, [W/(m²K)]
 K – Wärmeleitfähigkeit, [W/(mK)]
 d – Wandstärke [m]

Rohrtemperatur

Die Rohrtemperatur ist von der in den Rohren fließenden Fluidtemperatur abhängig. Bei der Simulation des Heizbetriebes wurde diese Temperatur im Basismodel mit 2°C gewählt, während sie beim Kühlen 28°C beträgt.

5.2.6 Betrieb des Systems

Es werden 2 Betriebsszenarien – nur Heizen und Heizen und Kühlen betrachtet. Beginn des Betriebs (Simulationsbeginn) ist im Monat Juli.

- Heizen

Es wird angenommen, dass eine Heizung notwendig ist, wenn die Außentemperatur unter 12°C liegt. Diese Grenze dient als Kriterium für das Ein- und Ausschalten des Systems. Das System ist ausgeschaltet, wenn durch die Rohre kein Wärmestrom fließt, d.h. der Wärmedurchlasskoeffizient gleich 0 ist. Deshalb wird er als eine Zeitfunktion definiert, der von der Außenlufttemperatur bestimmt ist (Abbildung 5.10). Die Rohrtemperatur bleibt konstant bei 2°C.

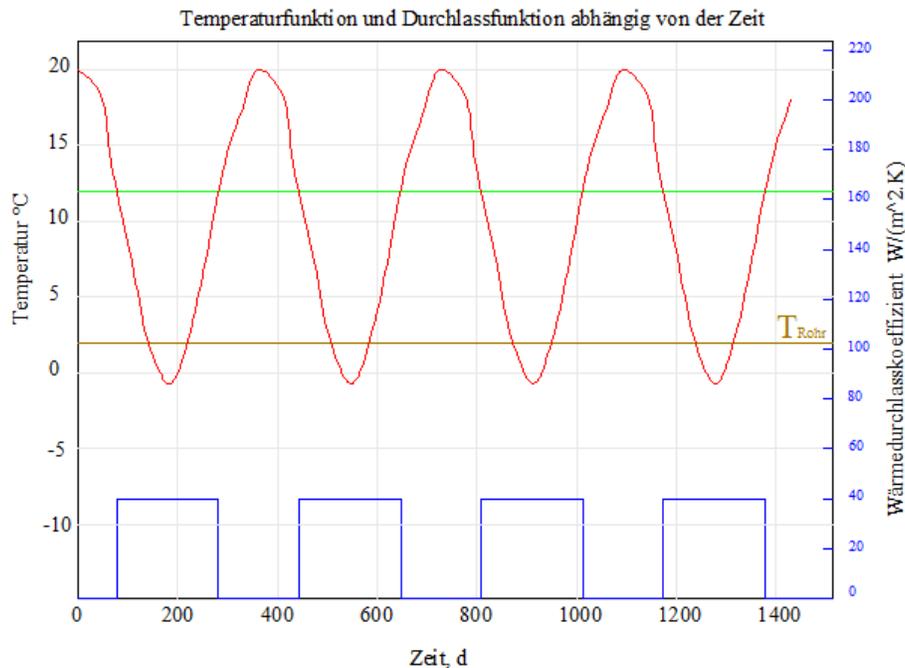


Abb. 5. 10: Durchlasskoeffizient Λ , abhängig von der Zeit t und der Außentemperatur, 12°C – Grenze als Kriterium für das Ein- und Ausschalten des Systems

- Heizen und Kühlen

Das System läuft im Kühlbetrieb in den Monaten Juni, Juli und August. In diesem Zeitraum (Kühlbetrieb) und bei einer Außentemperatur unter 12°C (Heizbetrieb) ist das System eingeschaltet, ansonsten bleibt es ausgeschaltet. Die Rohrtemperatur wird als von Betriebsart des Systems abhängige Zeitfunktion definiert (Abbildung 5.11).

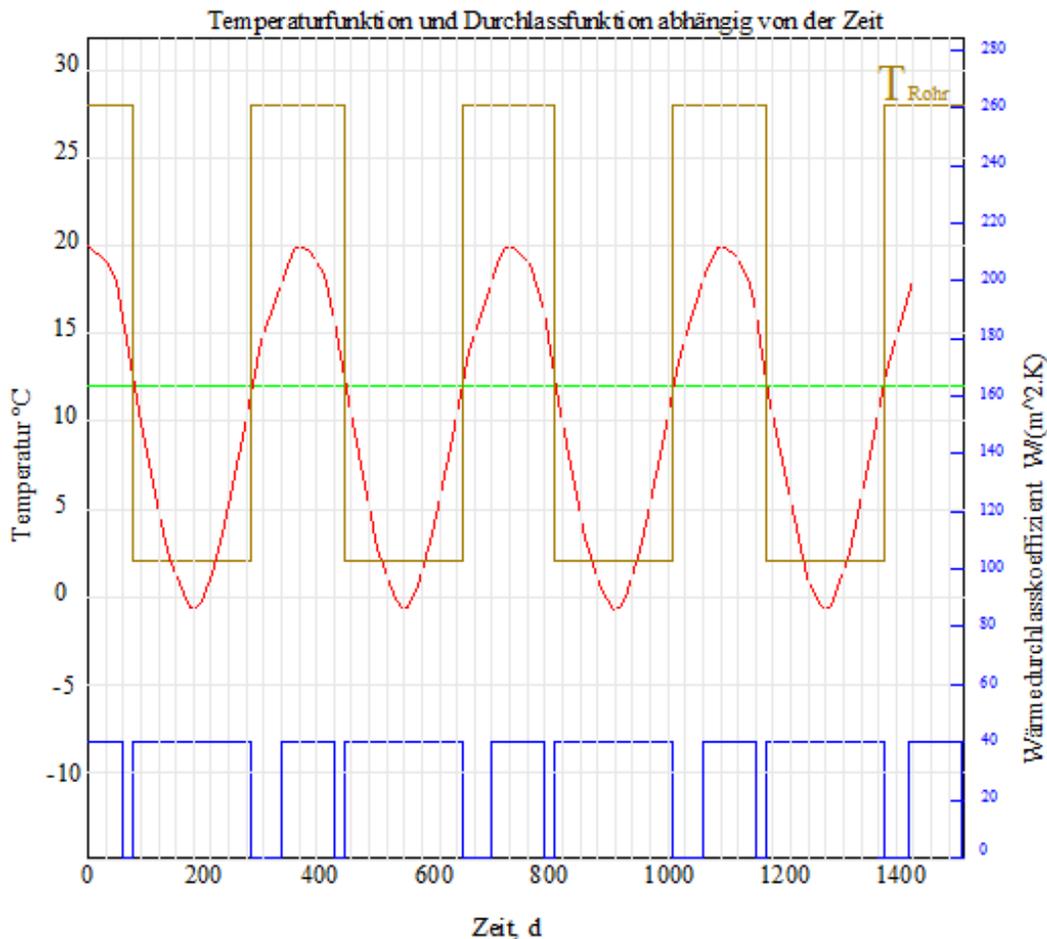


Abb. 5. 11: Durchlasskoeffizient λ und Rohrtemperatur, abhängig von der Zeit t und der Außentemperatur

5.2.7 Rand- und Anfangsbedingungen

Die schon betrachteten Einflüsse auf die Wärmeentzugsleistung werden folgendermaßen im Modell definiert. Um Rechenzeit zu sparen, wird die Symmetrie im Modell benutzt und so die Zahl der Netzelemente halbiert. Die Ergebnisse werden anschließend verdoppelt. Die Seiten werden thermisch isoliert, d.h. $q=0$ [W], damit die Geometrie endlich bleibt und kein Wärmestrom an der Seite verloren geht. Abbildung 5.12 und Tabelle 5.6 bieten eine graphische und tabellarische Darstellung der Rand- und Anfangsbedingungen.

Tabelle 5. 6: Rand- und Anfangsbedingungen Basismodell

Größe	Bezeichnung	Wert oder Funktion	Einheit
Außentemperatur	$T_{\text{Außen}}$	$T(t)$	$^{\circ}\text{C}$
Wärmeübergangskoeff. Oberfläche	$\Lambda_{\text{Oberfläche}}$	15	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Sonnenstrahlung	q_s	$q_s(t)$	W/m^2
Bodentemperatur	T_{Boden}	12	$^{\circ}\text{C}$
Wärmedurchlasskoeff. Rohr	Λ_{Rohr}	$\Lambda_{\text{Rohr}}(t)$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Rohrtemperatur (nur Heizen)	T_{Rohr}	2	$^{\circ}\text{C}$
Rohrtemperatur (Heizen und Kühlen)	T_{Rohr}	$T(t)$	$^{\circ}\text{C}$
Temperatur an der Sohle	T_{Sohle}	12	$^{\circ}\text{C}$

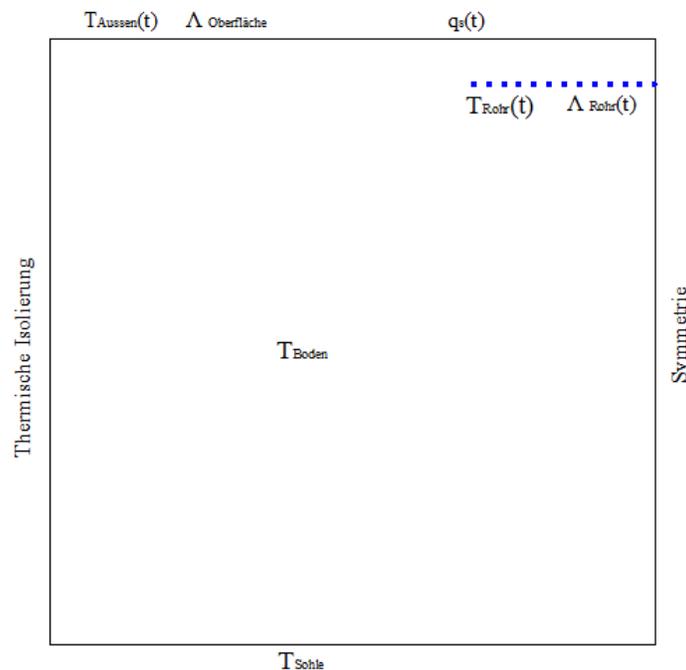


Abb. 5. 12: Modellierung Rand- und Anfangsbedingungen

5.2.8 Netz

Abbildung 5.13 zeigt das Netz und die lokalen Verfeinerungen. Das Netz wird mittels einer im Programm festgelegten Funktion als freies Dreiecksnetz erstellt. Die minimale Elementgröße beträgt 0,006 m mit einer Auflösung der Krümmungen von 0,3. Bei einer maximalen Element-Wachstumsrate von 1,3 wachen die Elemente bis zu einer maximalen Größe von 1,34 m. [6]

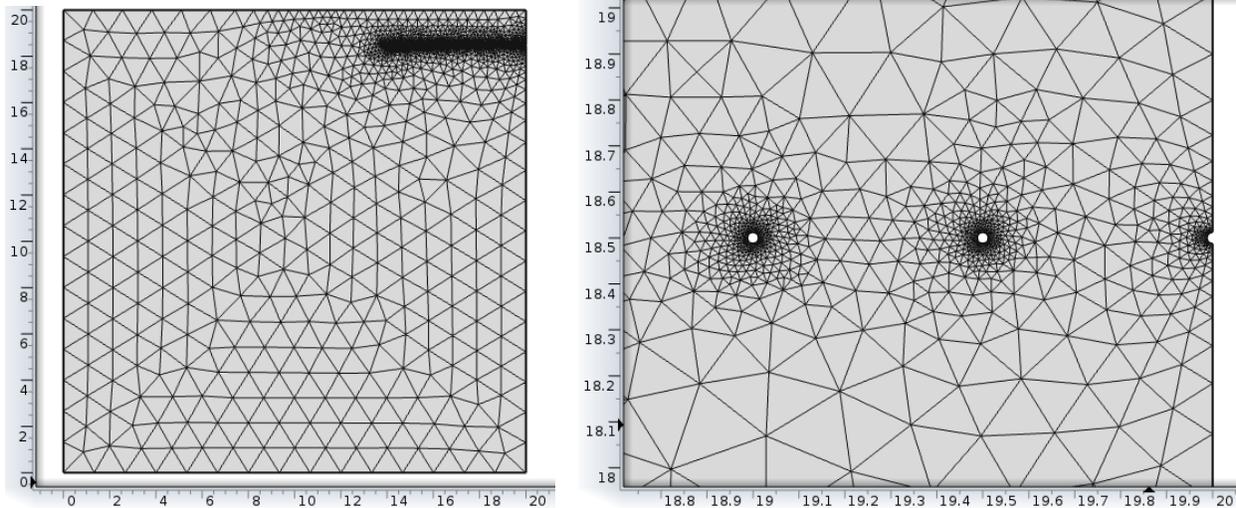


Abb. 5. 13: Modellnetz (links), lokale Verfeinerungen (rechts). Einheiten sind in Metern angegeben

5.3 Parameterstudie

5.3.1 Basismodell

Tabelle 5.7 zeigt die Simulationsparameter, die das sogenannte Basismodell bilden. Die Parameter, die sich auf die Kollektoren beziehen, werden einzeln variiert, während die Bodenparameter sich je nach Bodenart verändern.

Tabelle 5. 7: Basismodelparameter

Kollektoren		
Tiefe	1.5	m
Rohrabstand	0.5	m
Rohrdurchmesser	25	mm
Wärmedurchlasskoeff. Rohr	40	W/(m ² .K)
Rohrtemperatur	2	°C
Boden		
Dichte	1800	kg/m ³
Spez. Wärmekapazität	1600	J/(kg.K)
Wärmeleitfähigkeit	1.5	W/(m.K)
Temperatur	12	°C

Die Ergebnisse der Untersuchung des Basismodells sind in Tabelle 5.8 dargestellt. Eine Heizperiode umfasst die Zeitspanne von 203 Tagen. Wie in Abbildung 5.14 zu erkennen ist, sind für die Wärmeentzugsleistung die Daten nach 3 Jahr maßgebend, da ab diesem Zeitpunkt die Werte annähernd konstant bleiben. Deshalb umfasst die Berechnung der Wärmeentzugsleistung die Daten ab Tag 1176, der dem Anfang der Heizperiode entspricht. Die berechneten Ergebnisse der Untersuchung sind auf 2400 und 1800 Jahresbetriebsstunde umgerechnet.

Tabelle 5. 8: Basismodelstudie

Basismodel		
Anzahl der Kollektorrohren	25	
Zeitschritt	1	d
Anfang der Integration	1176	d
Ende der Integration	1378	d
Zeitspanne	203	d
Integrierte Wärmemenge	485.57	kWh/Zeitspanne
mittlerer Wärmestrom	99.67	W/lfm Kollektor
2400h/a	202.32	W/lfm Kollektor
1800h/a	269.76	W/lfm Kollektor
mittlerer Wärmestrom Kollektorrohr	3.99	W/lfm Rohr
2400h/a	8.09	W/lfm Rohr
1800h/a	10.79	W/lfm Rohr
Wärmeentzugsleistung	8.31	W/m ²
2400h/a	16.86	W/m ²
1800h/a	22.48	W/m ²

Der Wärmestrom in den Kollektoren über einen Zeitraum von 4 Jahren ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Man kann ganz klar Anfang und Ende der Heizperiode, sowie die Zeiten, in denen das System ausgeschaltet ist, unterscheiden. Die Spitzenwerte entsprechen dem Zeitpunkt, in dem das System eingeschaltet wird und der Temperaturunterschied zwischen der Boden- und der Kollektortemperatur am größten ist. Mit dem Abkühlen des Bodens durch die Außentemperatur und dem Wärmeentzug sinkt die Wärmestromkurve bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Außentemperatur wieder steigt. Bei extrem schlechten Bedingungen ist es möglich, dass die Bodentemperatur niedriger als die Rohrtemperatur ist und es kommt zu einer Wärmeabgabe an den Boden und damit zu einem negativer Wärmefluss. Um dies zu vermeiden könnte entweder die Rohrtemperatur und somit die Fluidtemperatur gesenkt werden, oder die Kollektoren sind tiefer zu verlegen, um den Einfluss der Umgebungstemperatur zu senken. Der niedrigere Spitzenwert im ersten Jahr ist Folge der kürzeren Wirkungszeit der Sonneneinstrahlung im Vergleich zu den folgenden Jahren. Die Temperaturfelder für verschiedene Zeitschritte sind in den Abbildungen 5.17 bis 5.19 veranschaulicht.

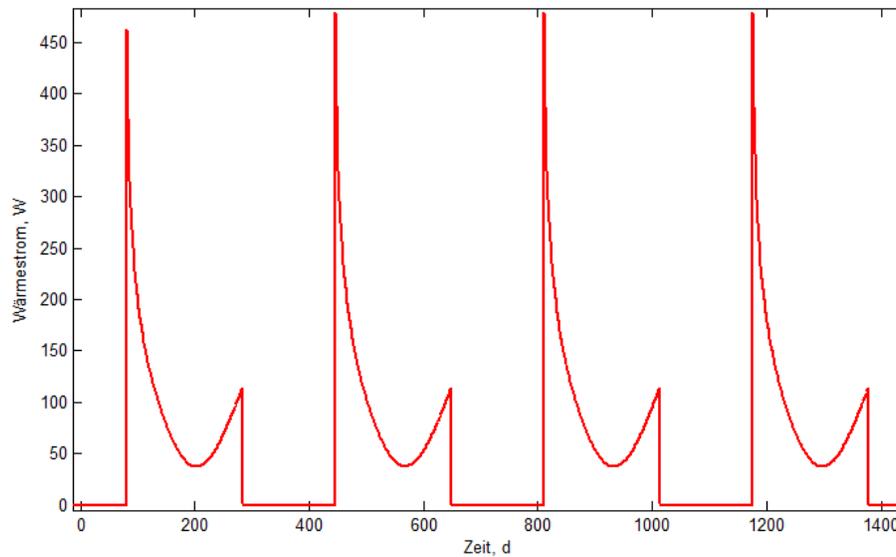


Abb. 5. 14: Wärmestrom (aus 11fm Kollektor), der durch 1 lfm Gesamtkollektor für 4 Jahre fließt

In engem Zusammenhang mit der Abbildung 5.6 und 5.8 steht die Abbildung 5.15. Aus der Grafik lässt sich eine mittlere Wärmestrahlung von $10,54 \text{ W/m}^2$ berechnen, die vergleichbar mit den Werten für die globale Sonneneinstrahlung in Tabelle 5.2 ist. Aus den Daten kann man schließen, dass bei einem Emissionsgrad von 0,53 und einer Außentemperatur nach Abbildung 5.6 15 % der von der Sonnenstrahlung eingebrachten Wärme wieder an die Umgebung abgestrahlt wurde.

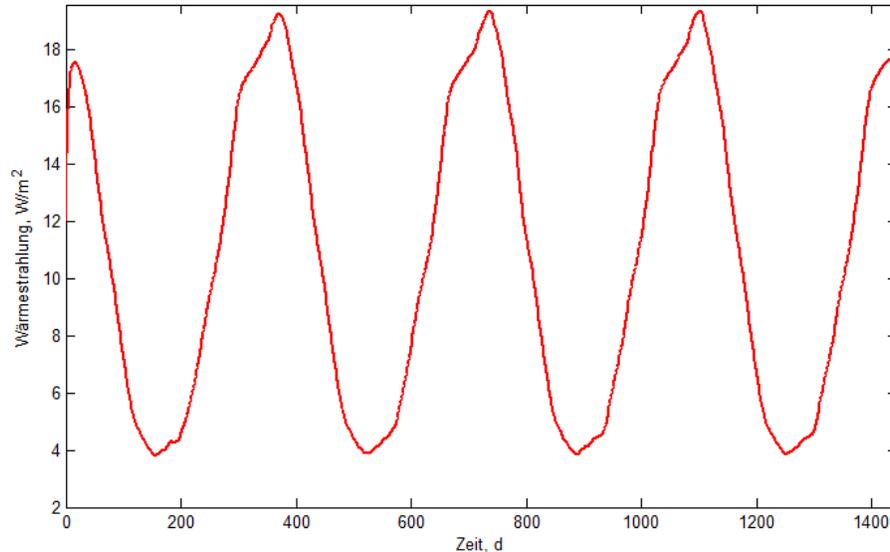


Abb. 5. 15: Oberfläche-zu-Umgebung Wärmestrahlung

Tabelle 5.9 bietet Information darüber, wie sich die Wärmeentzugsleistung in den Jahren verändert. Die Daten sind für 2400 Jahresbetriebsstunden ermittelt und bleiben fast konstant. Für die weiteren Berechnungen werden 4 Jahre Simulationszeit verwendet.

Tabelle 5. 9: Wärmeentzugsleistung in verschiedenen Jahren

	Jahr, W/m ² , 2400h/a			
Jahr	1	2	3	4
	16.68	16.90	16.89	16.86

Eine ausführliche Untersuchung der Kollektoren zeigt, wie sich der Wärmestrom innerhalb dem Kollektorfeld unterscheidet. Die in Abbildung 5.16 dargestellte Wärmestromkurve ist im Mittelfeld flach und steigt am Rand schnellen. Die Nummerierung der Kollektorrohre erfolgt von links nach rechts. Im Vergleich zum 13. Kollektorrohr ist der Wärmestrom am 1. Kollektorrohr um knapp 50% größer. Nach ca. drei Metern vom Kollektorrand entfernt bleibt der Wärmestrom relativ konstant. Das lässt sich durch den horizontalen Wärmetransport erklären, da der Wärmefluss nicht nur in vertikaler, sondern auch in horizontaler Richtung vorhanden ist.

Tabelle 5. 10: Wärmestrom durch die einzelnen Kollektorrohren

	Kollektorrohr, W/lfm Rohr, 2400h/a							
Kollektorrohr	Mittelwert	1	2	3	4	7	10	13
	8.09	11.02	9.28	8.44	8.02	7.58	7.45	7.45

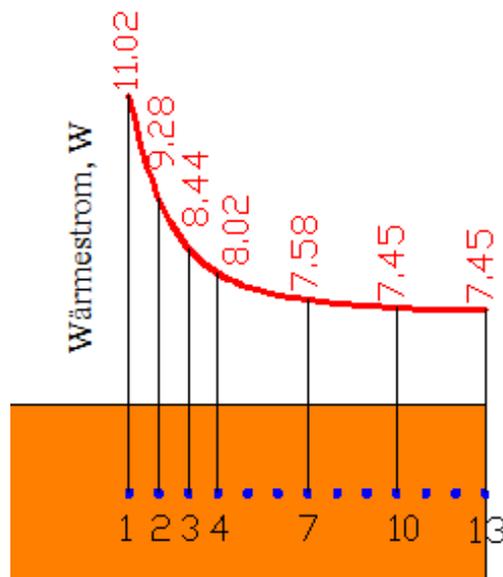


Abb. 5. 16: Wärmestrom (aus 1lfm Rohr) durch die einzelnen Kollektorrohren

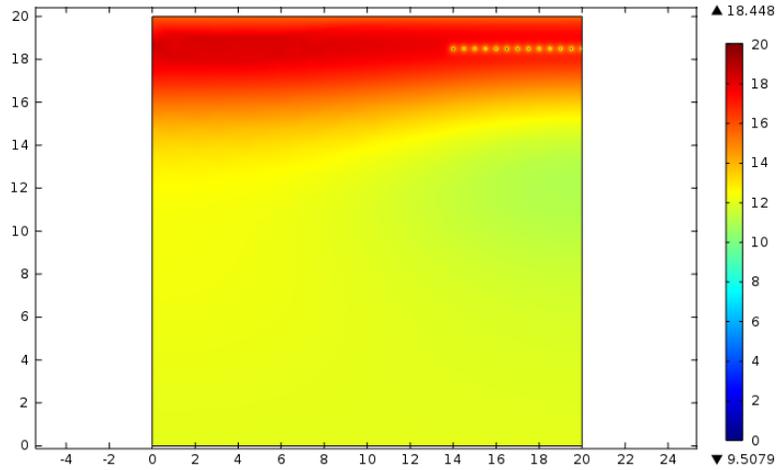


Abb. 5. 17: *Temperaturausbreitung am Beginn der Heizperiode am Tag 1176*

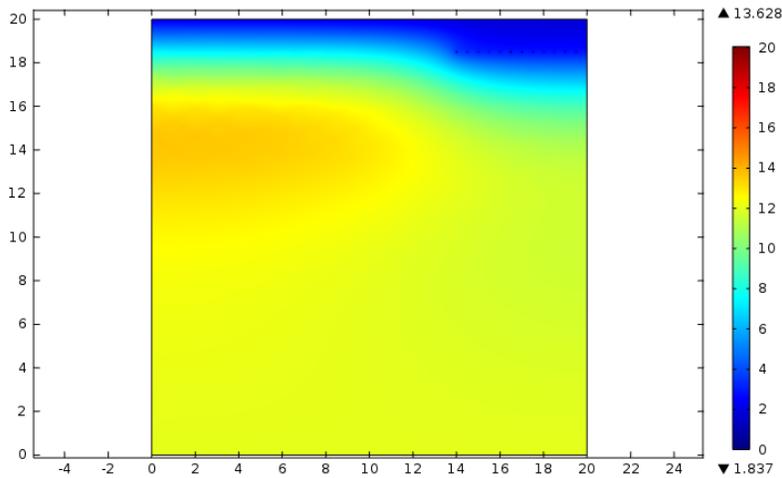


Abb. 5. 18: *Temperaturausbreitung zum kältesten Zeitpunkt am Tag 1295*

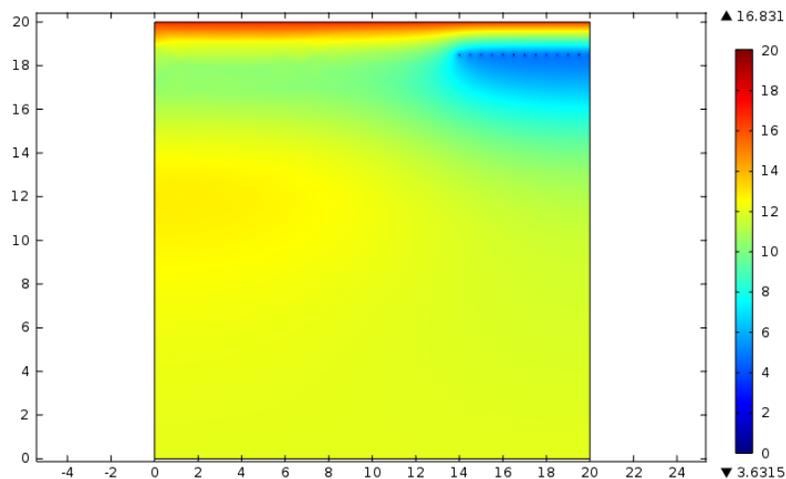


Abb. 5. 19: *Temperaturausbreitung am Ende der Heizperiode am Tag 1378*

5.3.2 Variation Rohrparameter

Rohrtemperatur

Die Untersuchungsdaten des Modells mit verschiedenen Rohrtemperaturen sind in Tabelle 5.11 dargestellt. In Abbildung 5.20 wird eine lineare Abhängigkeit der Wärmeentzugsleistung bei verschiedenen Rohrtemperaturen gezeigt. Aus den Daten ist ein Wachstum der Leistung von 25% pro °C Rohrtemperaturrückgang bei ansonst konstanten Bedingungen zu erkennen. Ein ungewünschter Fall ist in Abbildung 5.21 (rechts) zu beobachten. In der kältesten Winterzeit tritt ein negativer Wärmestrom auf, weil die Bodentemperatur unter die Rohrtemperatur fällt. Für die weiteren Simulationen wird eine Rohrtemperatur von 2°C benutzt.

Tabelle 5. 11: Variation Rohrtemperatur

Rohrtemperatur, °C	Wärmestrom 11fm Kollektor, W		Wärmestrom 11fm Rohr, W		Wärmeentzugsleistung W/m ²	
	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a
6°C	144.53	108.40	5.78	4.34	12.04	9.03
4°C	207.57	155.68	8.30	6.23	17.30	12.97
2°C	269.76	202.32	10.79	8.09	22.48	16.86
0°C	332.44	249.33	13.30	9.97	27.70	20.78

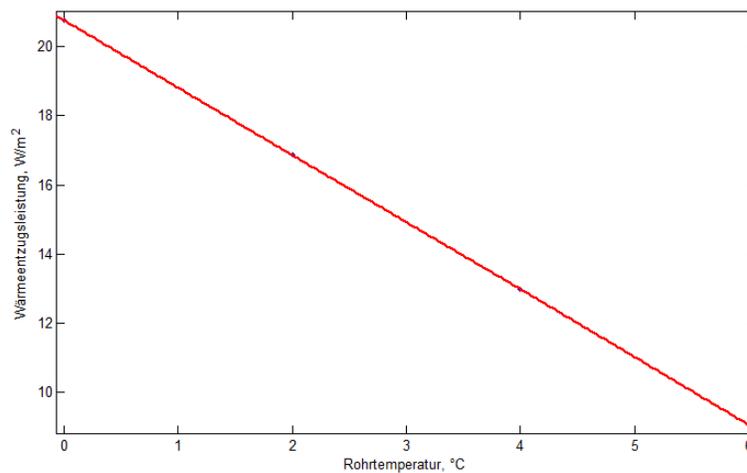


Abb. 5. 20: Wärmeentzugsleistung bei verschiedener Rohrtemperatur bei 2400h/a

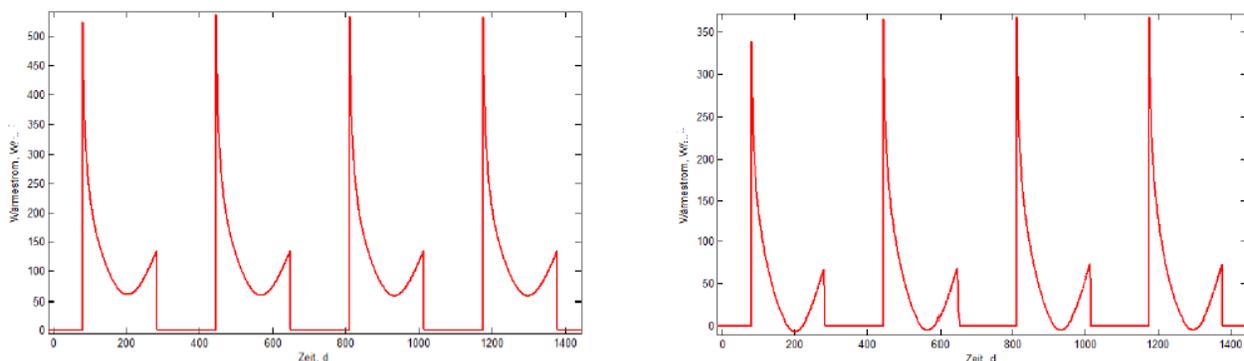


Abb. 5. 21: Wärmestrom (aus 11fm Kollektor) bei Rohrtemperatur 0°C (links) und 6°C (rechts)

Wärmedurchlasskoeffizient

Tabelle 5.12 und Abbildung 5.22 zeigen den Einfluss des Wärmedurchlasskoeffizienten auf die Wärmeentzugsleistung. Die Kurve in Abbildung 5.22 zeigt ein logarithmisches Wachstum. Das am meist verwendete Material für Kollektoren sind PVC-Rohre. Diese besitzen einen Wärmedurchlasskoeffizienten bis $50 \text{ [W/(m}^2\cdot\text{K)]}$. Für die Simulationen wurde daher der Wärmedurchlasskoeffizient mit $40 \text{ [W/(m}^2\cdot\text{K)]}$ gewählt.

Tabelle 5.12: Variation Wärmedurchlasskoeffizient

Wärmedurchlasskoeff., [W/(m ² ·K)]	Wärmestrom 11fm Kollektor, W		Wärmestrom 11fm Rohr, W		Wärmeentzugsleistung W/m ²	
	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a
10	175.64	131.73	7.03	5.27	14.64	10.98
20	228.89	171.67	9.16	6.87	19.07	14.31
30	254.28	190.71	10.17	7.63	21.19	15.89
40	269.76	202.32	10.79	8.09	22.48	16.86
50	280.60	210.45	11.22	8.42	23.38	17.54
70	293.20	219.90	11.73	8.80	24.43	18.33
100	302.96	227.22	12.12	9.09	25.25	18.94
150	309.95	232.46	12.40	9.30	25.83	19.37

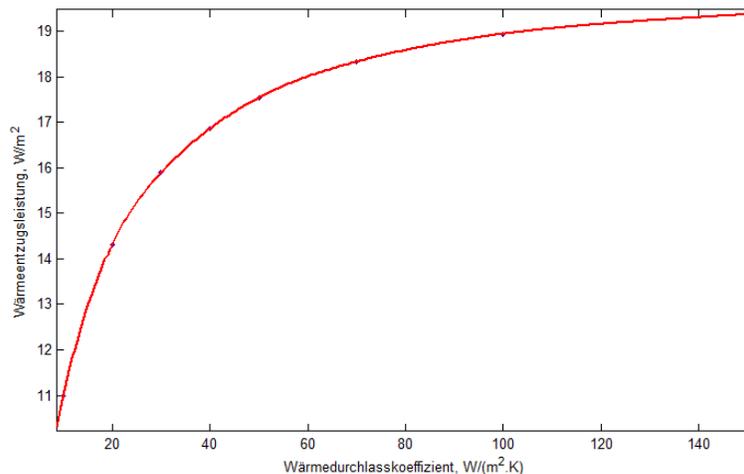


Abb. 5.22: Wärmeentzugsleistung bei verschiedenen Wärmedurchlasskoeffizienten, 2400h/a

Rohrdurchmesser

Die bessere Wärmeentzugsleistung bei größerem Rohrdurchmesser ist Folge einer größeren Wärmeübergangsfläche. Das Wachstum der Leistungen ist aber nicht proportional zum Wachstum der Fläche, d.h. der Wärmestrom pro 1 cm^2 Rohrfläche sinkt mit der Steigerung des Rohrdurchmessers. Für die weiteren Simulationen wurde ein Außenrohrdurchmesser von 25 mm gewählt.

Tabelle 5. 13: Variation Rohrdurchmesser

Rohrdurchmesser, mm	Wärmestrom 1lfm Kollektor, W		Wärmestrom 1lfm Rohr, W		Wärmeentzugsleistung W/m ²	
	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a
20	232.25	174.19	9.29	6.97	19.35	14.52
25	269.76	202.32	10.79	8.09	22.48	16.86
32	285.29	213.97	11.41	8.56	23.77	17.83

5.3.3 Variation Modelgeometrie Flächenkollektoren

Rohrabstand

Mit der Variation des Rohrabstandes variiert auch die Zahl der Kollektorrohre. Je mehr Kollektorrohre in 1 m² Fläche liegen, desto größer ist die Wärmeentzugsleistung [W/m²] jedoch sinkt dadurch der Wärmestrom in den einzelnen Kollektorrohren (Abbildungen 5.29 und 5.30).

Tabelle 5. 14: Variation Rohrabstand

Rohrabstand, m	Zahl der Kollektorrohre	Wärmestrom aus 1lfm Kollektor, W		Wärmestrom 1lfm Rohr, W/m		Wärmeentzugsleistung W/m ²	
		1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a
0.3	41	307.80	230.85	7.51	5.63	25.65	19.24
0.5	25	269.76	202.32	10.79	8.09	22.48	16.86
0.8	16	217.08	162.81	13.57	10.18	18.09	13.57
1	13	203.75	152.81	15.67	11.75	16.98	12.73
1.2	11	184.49	138.37	16.77	12.58	15.37	11.53

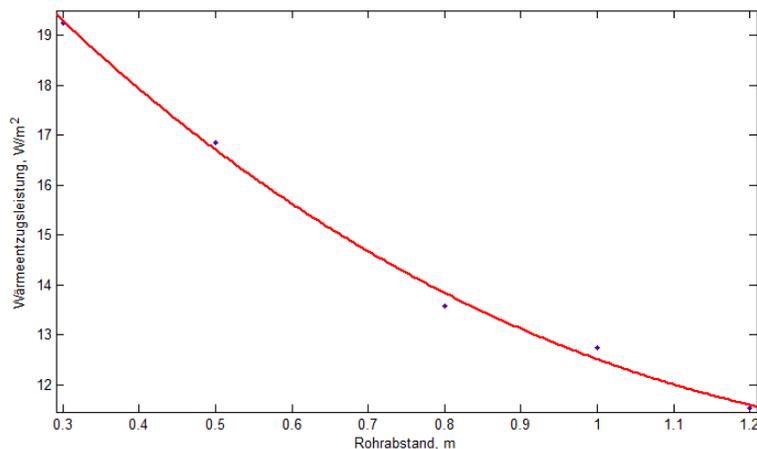


Abb. 5. 23: Wärmeentzugsleistung bei verschiedenen Rohrabstand, 2400h/a

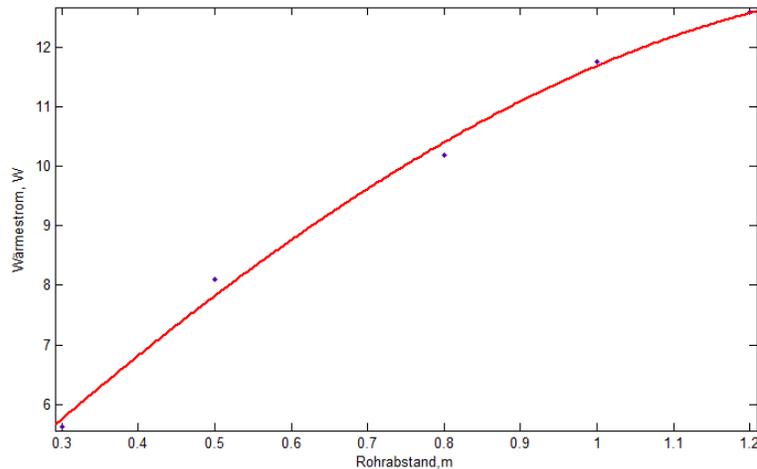


Abb. 5. 24: Wärmestrom (aus 11fm Rohr) durch die einzelnen Kollektorrohre bei verschiedenen Rohrabständen, 2400h/a

5.3.4 Variation Hangausrichtung und Hangsneigung

Die Daten aus der Tabelle 5.15 bis 5.17 stehen im engen Zusammenhang mit den Koeffizienten in Tabelle 5.4. In Abhängigkeit von der Ausrichtung und Neigung ist die Wärmeentzugsleistung bei südlich orientierten Hängen bis zu 20% höher als bei Hängen mit nördlicher Orientierung. Im Vergleich zur ebenen Flächen hat die geneigte Fläche nur bei südlich ausgerichteten Hängen einen positiven Einfluss.

Tabelle 5. 15: Nördliche Ausrichtung des Geländes

Neigung	Wärmestrom 11fm Kollektor, W		Wärmestrom 11fm Rohr, W		Wärmeentzugsleistung W/m^2	
	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a
0°	269.76	202.32	10.79	8.09	22.48	16.86
15°	257.76	193.32	10.31	7.73	21.48	16.11
30°	242.91	182.18	9.72	7.29	20.24	15.18
45°	230.21	172.66	9.21	6.91	19.18	14.39

Tabelle 5. 16: Südliche Ausrichtung des Geländes

Neigung	Wärmestrom 11fm Kollektor, W		Wärmestrom 11fm Rohr, W		Wärmeentzugsleistung W/m^2	
	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a
0°	269.76	202.32	10.79	8.09	22.48	16.86
15°	279.48	209.61	11.18	8.38	23.29	17.47
30°	284.71	213.53	11.39	8.54	23.75	17.82
45°	284.88	213.66	11.40	8.55	23.74	17.81

Tabelle 5. 17: Westliche/Östliche Ausrichtung des Geländes

Neigung	Wärmestrom 11fm Kollektor, W		Wärmestrom 11fm Rohr, W		Wärmeentzugsleistung W/m^2	
	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a
0°	269.76	202.32	10.79	8.09	22.48	16.86
15°	268.09	201.07	10.72	8.04	22.34	16.76
30°	264.43	198.32	10.58	7.93	22.04	16.53
45°	257.76	193.32	10.31	7.73	21.48	16.11

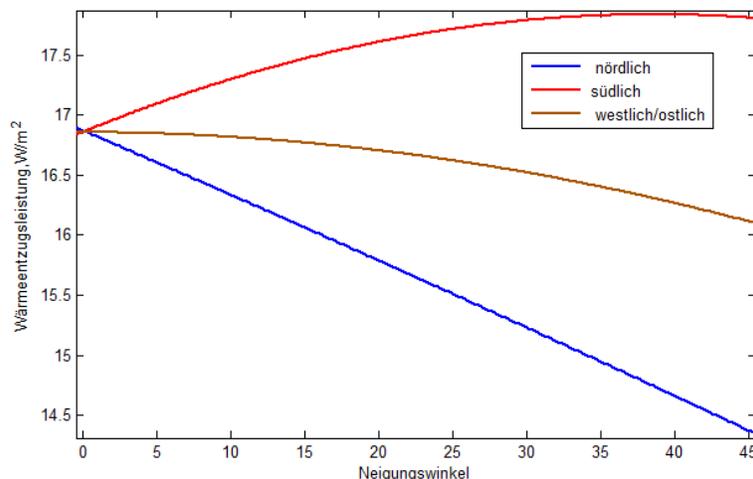


Abb. 5. 25: Wärmeentzugsleistung in Abhängigkeit von Hangausrichtung und -neigung, 2400h/a

5.3.5 Grabenkollektoren – Basismodel

Im Vergleich zu Flächenkollektoren sind bei Grabenkollektoren die folgenden Unterschiede zu bemerken:

- Die Rohrverlegung erreicht eine Tiefe bis zu 5m,
- der Rohrabstand ist kleiner,
- von Bedeutung für den horizontalen Wärmefluss ist die Grabenbreite,
- der Einfluss der Umgebungsfaktoren ist wegen der vertikalen Anordnung unterschiedlich für die verschiedenen Kollektorrohre.

Die Basismodelparameter für Grabenkollektoren zeigt Tabelle 5.18. Für die Analyse der Ergebnisse ist der gleiche Zeitraum der Integration wie bei den Flächenkollektoren gewählt, um die Ergebnisse vergleichen zu können (Tabelle 5.19). Die Kollektorrohre sind in 2 Spalten auf beiden Seiten des Grabens gestellt. Jede Spalte besteht aus 13 Rohren (Abbildung. 5.2).

In Abbildungen 5.26 bis 5.29 sind die Wärmeströme in unterschiedlichen Kollektorrohren dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Wärmestrom nach Einschalten des Systems einen Spitzenwert erreicht, der anschließend aber rasch abfällt. Abbildung 2.27 zeigt sogar einen Wärmestromabfall bis auf nahezu Null im Gegensatz zu den Wärmeströmen in den anderen beiden Kollektorrohren. Dieses Phänomen lässt sich darauf zurückführen, dass das oberste Kollektorrohr am meisten von den Umgebungsfaktoren

(Außenlufttemperatur) beeinflusst wird. Weiters lässt sich aus den Abbildungen erkennen, dass die Erhöhung der Verlegetiefe die Regenerationsfähigkeit des Bodens vermindert. Desto tiefer die Kollektorrohre liegen desto weniger Einfluss hat die Energie, die die Sonneneinstrahlung ins Erdreich einbringt. In Abbildung 5.28 ist kein Minimum der kältesten Zeitperiode zu erkennen und die Spitzenwerte am Anfang der ersten Heizperiode sind im ersten Jahr wesentlich höher als in den nächsten Jahren, weil durch die fehlende Regeneration dem Boden in den Folgejahren nicht so viel Wärme entzogen werden kann.

Tabelle 5. 18: Simulationsparameter - Grabenkollektoren

Kollektoren		
Grabentiefe	4.8	m
Rohrabstand	0.3	m
Grabenbreite	1.5	m
Rohrdurchmesser	25	mm
Wärmedurchlasskoeff. Rohr	40	W/(m ² .K)
Rohrtemperatur	2	°C
Boden		
Dichte	1800	kg/m ³
Spez. Wärmekapazität	1600	J/(kg.K)
Wärmeleitfähigkeit	1.5	W/(m.K)
Temperatur	12	°C

Tabelle 5. 19: Studie Grabenkollektoren

Basismodel			
Anzahl der Kollektorrohren	26		
Zeitschritt	1	d	
Anfang der Integration	1176	d	
Ende der Integration	1378	d	
Zeitspanne	203	d	
Integrierte Wärmemenge	301.85	kWh/Zeitspanne	
mittlerer Wärmestrom	61.96	W/lfm Kollektor	
2400h/a	125.77	W/lfm Kollektor	
1800h/a	167.69	W/lfm Kollektor	
mittlerer Wärmestrom Kollektor	2.38	W/lfm Rohr	
2400h/a	4.84	W/lfm Rohr	
1800h/a	6.45	W/lfm Rohr	
Wärmeentzugsleistung	8.60	W/m ²	
2400h/a	17.47	W/m ²	
1800h/a	23.29	W/m ²	

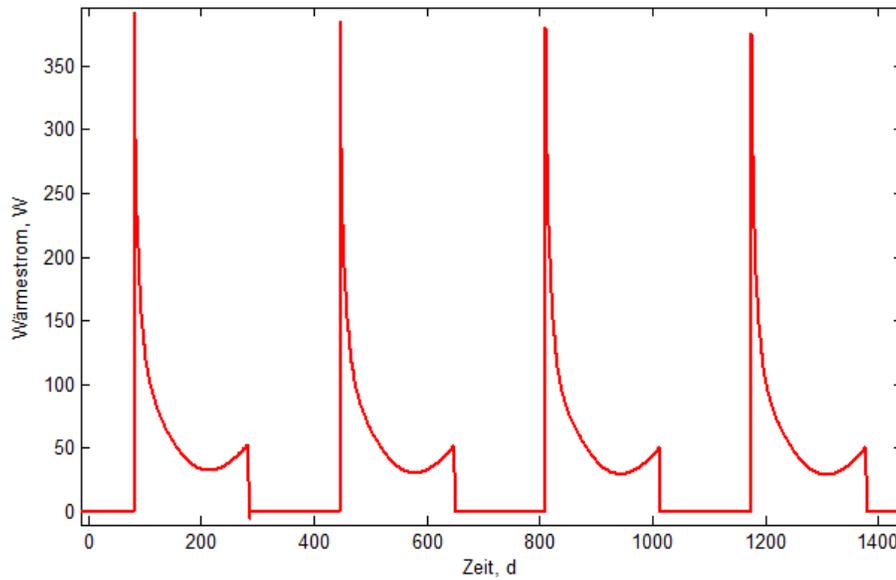


Abb. 5. 26: Wärmestrom (aus 1lfm Kollektor), der durch den Gesamtkollektor für 4 Jahre fließt

Tabelle 5. 20: Wärmeentzugsleistung in verschiedenen Jahre

	Jahr, W/m ² , 2400h/a			
Jahr	1	2	3	4
	18.63	17.98	17.66	17.47

Tabelle 5. 21: Wärmestrom (aus 1lfm Rohr) durch die einzelnen Kollektorrohre

	Kollektorrohr, W/lfm Rohr, 2400h/a									
Kollektorrohr	Mittelwert	1	2	3	5	7	9	11	12	13
	4.84	6.50	5.13	4.54	4.03	3.95	4.14	4.86	5.68	7.52

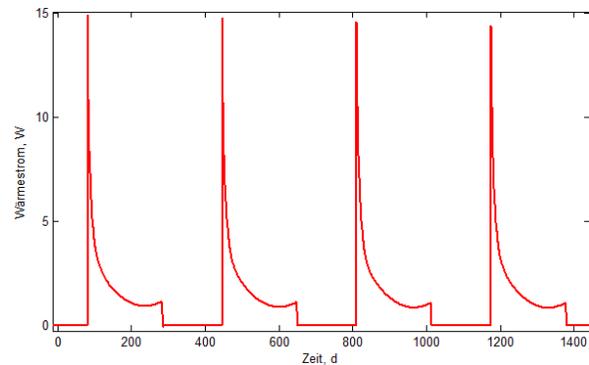
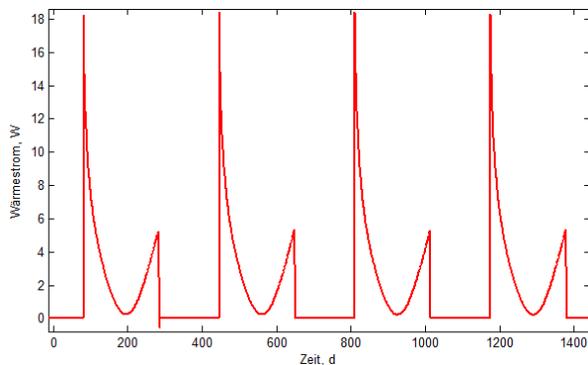


Abb. 5. 27: Wärmestrom (aus 1lfm Rohr) durch das 1. Kollektorrohr (links) und durch das 7. Kollektorrohr (rechts)

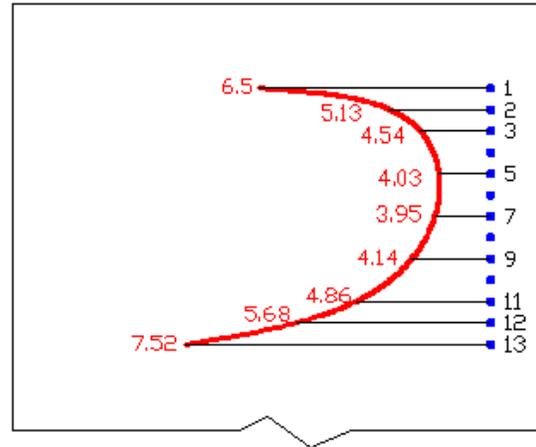
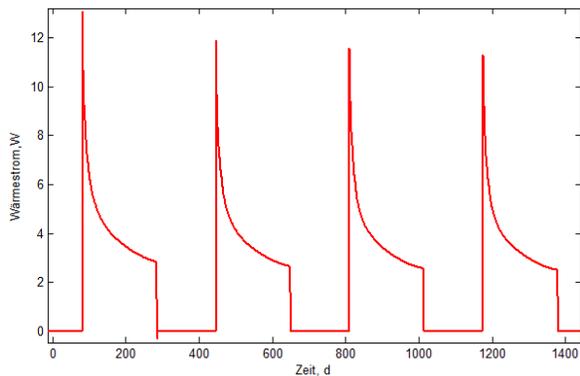


Abb. 5. 28: Wärmestrom (aus 11fm Rohr) durch das 13. Kollektorrohr (links) und durch die einzelnen Kollektorrohre (rechts), 2400h/a

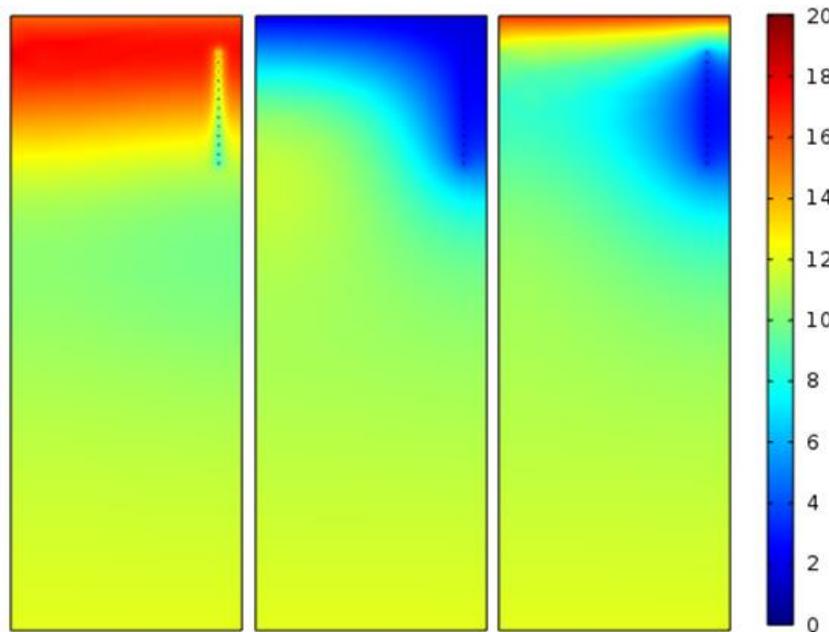


Abb. 5. 29: Die Temperaturausbreitung in verschiedenen Momenten der Heizperioden: Beginn der Heizperiode $t=1176$ d (links), kältester Zeitpunkt $t=1295$ d (Mitte), Ende der Heizperiode $t=1378$ d (rechts)

5.3.6 Variation Modellgeometrie Grabenkollektoren

Grabenbreite

Die Daten von Tabelle 5.22 und Abbildung 5.30 zeigen ein Wachstum der Wärmeentzugsleistung mit der Erhöhung der Grabenbreiten. Diese Tendenz ist die Folge des horizontalen Wärmeaustausches zwischen den Kollektorrohren auf beiden Seiten des Grabens. Ab einer gewissen Grabenbreite haben die beiden Kollektorspalten keinen Einfluss mehr aufeinander.

Tabelle 5. 22: Variation Grabenbreite

Grabenbreite, m	Wärmestrom 1lfm Kollektor, W		Wärmestrom 1lfm Rohr, W		Wärmeentzugsleistung W/m ²	
	1800 h/a	2400 h/a	1800 h/a	2400 h/a	1800 h/a	2400 h/a
0.3	139.12	104.34	5.35	4.01	19.32	14.49
0.5	144.59	108.44	5.56	4.17	20.08	15.06
1	157.64	118.23	6.06	4.55	21.89	16.42
1.5	167.69	125.77	6.45	4.84	23.29	17.47
2	175.67	131.75	6.76	5.07	24.40	18.30
2.5	184.00	138.00	7.08	5.31	25.56	19.17
3	190.24	142.68	7.32	5.49	26.42	19.82

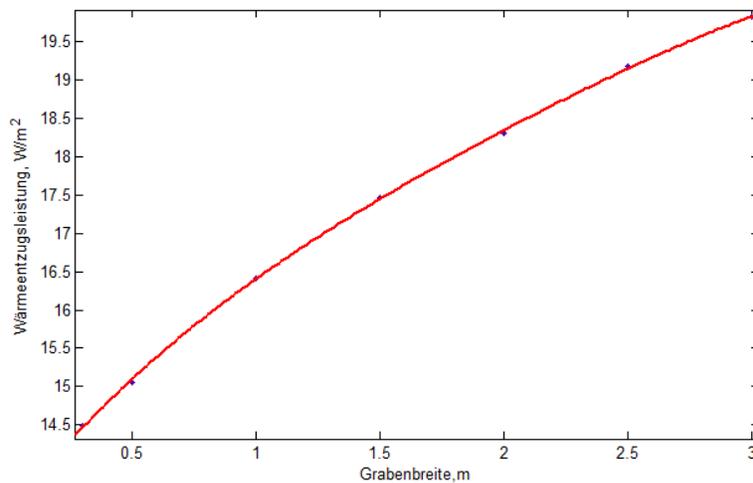


Abb. 5. 30: Wärmeentzugsleistung in Abhängigkeit von der Grabenbreite

Grabentiefe

Im Modell ist die Tiefe des Grabens eine Summe der Verlegungstiefe der obersten Kollektorleitung plus 13 mal der Abstand von 0,3 m zwischen den einzelnen Kollektorrohren. Wegen der vertikalen Anordnung haben bei der Variation der Grabentiefe nur die obersten Kollektorrohre einen Einfluss auf die Wärmeentzugsleistung. Der Beitrag dieser Rohre zur Gesamtleistung ist nicht maßgebend. Daher unterscheiden sich die Werte in Tabelle 5.23 kaum voneinander.

Tabelle 5. 23: Variation Grabentiefe

Grabentiefe, m	Wärmestrom 1lfm Kollektor, W		Wärmestrom 1lfm Rohr, W		Wärmeentzugsleistung W/m ²	
	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a
4.6	169.35	127.01	6.51	4.89	23.52	17.64
4.8	167.69	125.77	6.45	4.84	23.29	17.47
5.1	164.04	123.03	6.31	4.73	22.78	17.09

Rohrabstand

Aus den Ergebnissen dieser Studie kann man feststellen, dass im Vergleich zu einem Rohrabstand von 0,5 m es bei einem Rohrabstand von 0,1 m 4,6 mal mehr Rohrleitungen pro laufendem Meter gibt und trotzdem ist die Wärmeentzugsleistung nur um 2 W/m^2 gewachsen.

Tabelle 5. 24: Variation Rohrabstand

Rohrabstand, m	Zahl der Kollektorrohre	Wärmestrom 1fm Kollektor, W		Wärmestrom 11fm Rohr, W/m		Wärmeentzugsleistung W/m^2	
		1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a
0.1	74	180.36	135.27	2.44	1.83	25.05	18.79
0.3	26	167.69	125.77	6.45	4.84	23.29	17.47
0.5	16	156.83	117.62	9.80	7.35	22.40	16.80

5.3.7 Basismodell Steilkollektoren

Bei der Simulation der Modellgeometrie von Abbildung 5.4 wird die Sonneneinstrahlung wie auf einer ebenen Flächen angenommen, obwohl die Fläche geneigt ist. Der Grund dafür ist, dass die Ergebnisse dieser Simulation mit den Simulationsergebnissen der Flächenkollektoren und der Grabenkollektoren vergleichbar sein sollen. Für die Verlegung der Kollektoren in einer solchen Geometrie benötigt man einen Aushub von $51,6 \text{ m}^3/\text{1fm}$. Aus den unten dargestellten Grafiken (Abbildung 5.33) kann man feststellen, dass die Ergebnisse von steil angeordneten Kollektoren den Flächenkollektoren entsprechen, während die horizontalen und vertikalen wegen der verschiedenen Verlegungstiefe als Grabenkollektoren behandelt werden können. Aus den Ergebnissen kann man schließen, dass die Neigung nur Einfluss auf die Wärmeentzugsleistungen hat, wenn die Hangausrichtung berücksichtigt wird. Im Vergleich zur Wärmestromlinie in Abbildung 5.16 bei Flächenkollektoren und Abbildung 5.30 bei Grabenkollektoren zeigen die Kurvenlinien in Abbildung 5.34 eine unharmonische Veränderung, die man mit der größeren Zahl der Kollektoren pro Flächeneinheit in der Ecke des Dreiecks erklären kann. Für den ganzen Aushub kann eine Wärmeentzugsleistung von $2,91 \text{ W/m}^3$ Aushub berechnet werden.

Tabelle 5. 25: Simulationsparameter Steilkollektoren

Kollektoren		
Verlegungstiefe der Steilkollektoren	1.5	m
Rohrabstand	0.5	m
Querfläche des Aushubs	51.6	m^2
Rohrdurchmesser	25	mm
Wärmedurchlasskoeff. Rohr	40	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Rohrtemperatur	2	$^{\circ}\text{C}$
Boden		
Dichte	1800	kg/m^3
Spez. Wärmekapazität	1600	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
Wärmeleitfähigkeit	1.5	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Temperatur	12	$^{\circ}\text{C}$

Tabelle 5. 26: Studie Steilkollektoren

Basismodel		
Anzahl der Kollektorrohren	56	
Zeitschritt	1	d
Anfang der Integration	1176	d
Ende der Integration	1378	d
Zeitspanne	203	d
Integrierte Wärmemenge	731.95	kWh/Zeitspanne
Mit. Wärmestrom	150.24	W/lfm Kollektor
	2400h/a	304.98 W/lfm Kollektor
	1800h/a	406.64 W/lfm Kollektor
Mit. Wärmestrom Kollektor	2.68	W/lfm Rohr
	2400h/a	5.45 W/lfm Rohr
	1800h/a	7.26 W/lfm Rohr
Wärmeentzugsleistung	5.37	W/m ²
	2400h/a	10.89 W/m ²
	1800h/a	14.52 W/m ²

Tabelle 5. 27: Ergebnisse Steilkollektoren

Basis	Wärmestrom lfm Kollektor, W		Wärmestrom lfm Rohr, W		Wärmeentzugsleistung W/m ²	
	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a
Alle	406.64	304.98	7.26	5.45	14.52	10.89
Anteil steil	181.27	135.95	7.25	5.44	15.11	11.33
Anteil vertikal	89.03	66.77	7.42	5.56	14.84	11.13
Anteil horizontal	128.75	96.56	6.78	5.08	12.87	9.66

Tabelle 5. 28: Wärmeentzugsleistung in verschiedenen Jahren, 2400h/a

Jahr	Jahr, W/m ² , 2400h/a			
	1	2	3	4
	12.52	11.19	11.00	10.89

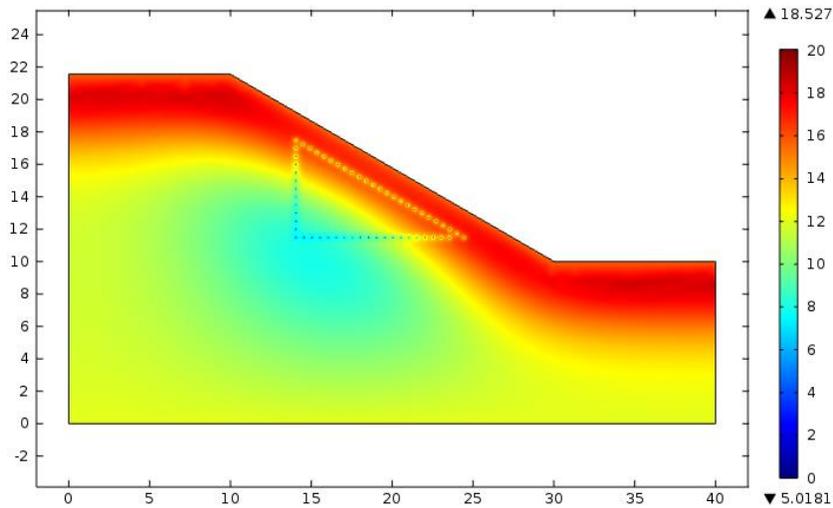


Abb. 5. 33: *Temperaturausbreitung am Beginn der Heizperiode, $t=1176$ d*

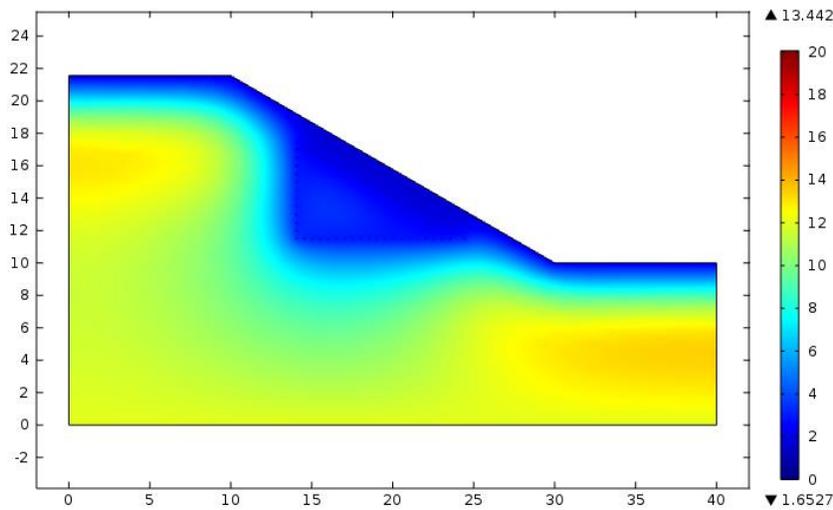


Abb. 5. 34: *Temperaturausbreitung zum kältesten Zeitpunkt, $t=1295$ d*

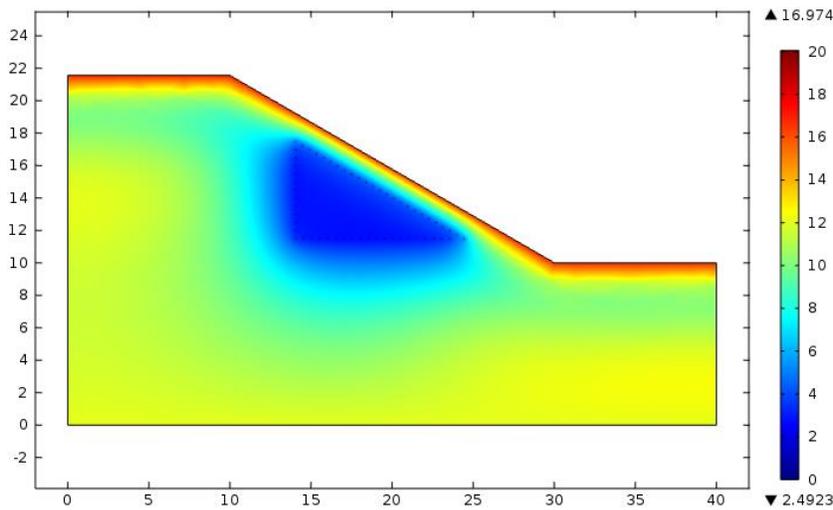


Abb. 5. 35: *Temperaturausbreitung am Ende der Heizperiode, $t=1378$ d*

5.3.8 Variation der Bodenparameter

Für die Simulationen wird die Basismodelgeometrie der unterschiedlichen Kollektortypen in verschiedenen Bodenarten dargestellt (siehe Punkt 5.2.2). Die Grafiken in Abbildung 5.38 zeigen, welcher Kollektortyp für die entsprechende Bodenart am besten geeignet ist. Für alle Bodenarten erzielten die Grabenkollektoren das beste Ergebnis, vor den Flächenkollektoren und vor den Steilkollektoren. Allerdings liegt der Unterschied zwischen den Graben- und den Steilkollektoren nur bei in etwa 6 W/m^2 . Es muss aber auch berücksichtigt werden, dass der Rohrabstand der Basismodelgeometrie der Flächen- und Steilkollektoren $0,5 \text{ m}$ beträgt, während er bei Grabenkollektoren $0,3 \text{ m}$ beträgt. Im Vergleich zum Ergebnis aus der Variation des Rohrabstands (5.3.4) zeigen die Flächenkollektoren eine bessere Leistung. Aus den Werten kann man berechnen, dass der Einfluss des Bodens auf die Wärmeentzugsleistung bis zu 65% betragen kann.

Tabelle 5. 29: Einfluss von Boden auf die Leistungen verschiedener Typen von Kollektoren

Boden	Kollektortyp	Wärmestrom 1lfm Kollektor, W		Wärmestrom 1lfm Rohr, W		Wärmeentzugsleistung W/m^2	
		1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a
Ton	Flächen	247.24	185.43	9.89	7.42	20.60	15.45
	Graben	151.64	113.73	5.83	4.37	21.06	15.80
	Steil	363.41	272.56	6.49	4.87	12.98	9.73
Schluff	Flächen	269.76	202.32	10.79	8.09	22.48	16.86
	Graben	167.69	125.77	6.45	4.84	23.29	17.47
	Steil	406.64	304.98	7.26	5.45	14.52	10.89
trockener Sand	Flächen	289.85	217.39	11.59	8.70	24.15	18.12
	Graben	178.00	133.50	6.85	5.13	24.72	18.54
	Steil	433.71	325.28	7.74	5.81	15.49	11.62
nasser Sand	Flächen	385.87	289.40	15.43	11.58	32.16	24.12
	Graben	245.96	184.47	9.46	7.10	34.16	25.62
	Steil	595.16	446.37	10.63	7.97	21.26	15.94

Die Abbildung 5.37 zeigt wie sich die Wärmeentzugsleistung in den verschiedenen Jahren verändert. Bei Grabenkollektoren im Ton ist eine deutliche negative Tendenz der Wärmeentzugsleistung zu erkennen. Diese Tendenz ist Folge der größeren spezifischen Wärmekapazität des Tons und der kleineren Wärmeleitfähigkeit, die auch die Regenerationsfähigkeiten des Bodens negativ beeinflusst. Die gleichen Wärmeentzugsleistungen von Grabenkollektoren bei Ton und trockenem Sand in der ersten Heizperiode kann man mit der niedrigeren Wärmeleitfähigkeit, der begrenzter Wirkungszeit der Randbedingungen an der Erdoberfläche am Anfang der ersten Heizperiode und der größeren Verlegungstiefe erklärt werden. All diese Umstände verringern das Eindringen der Temperaturwellen.

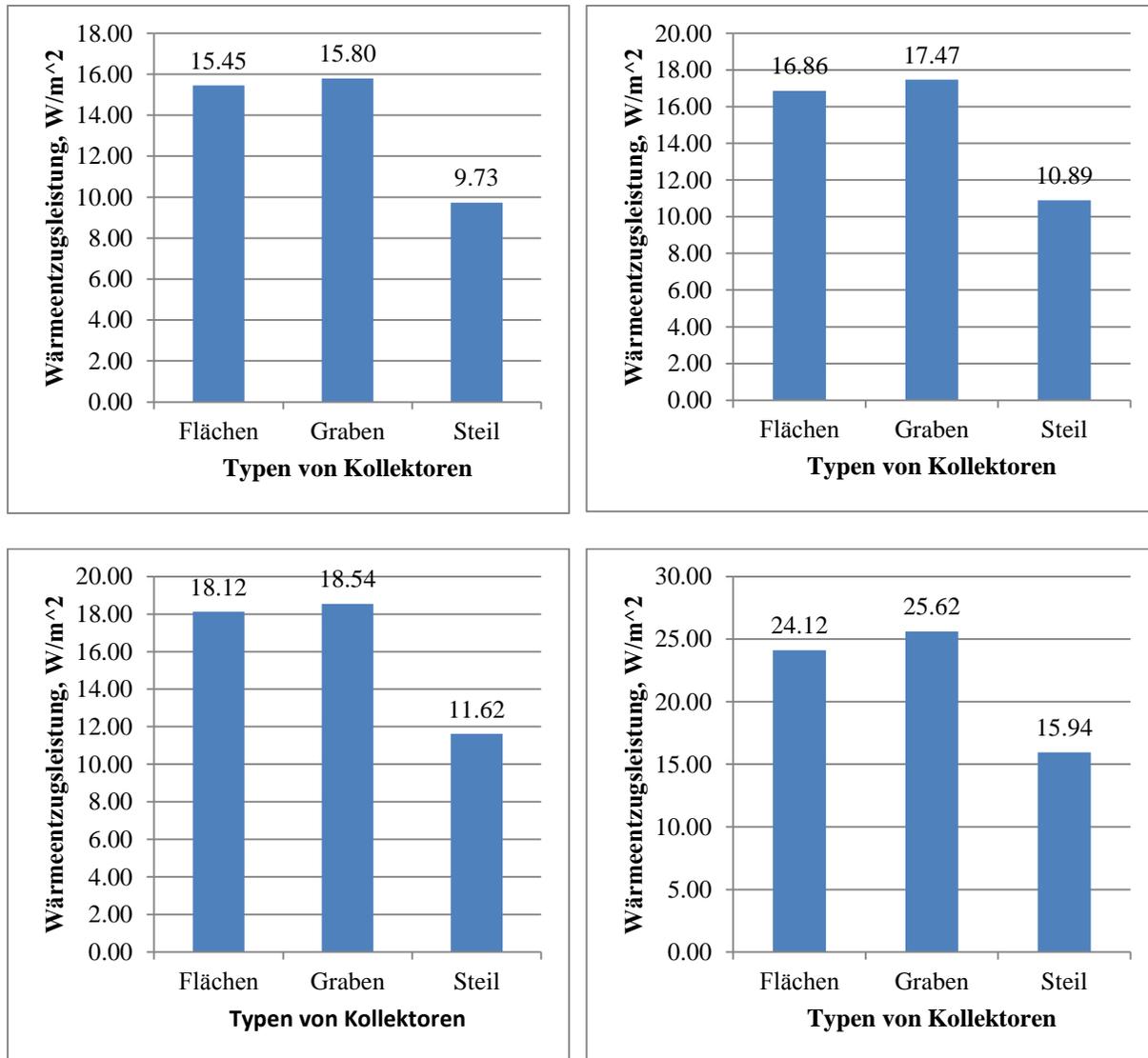


Abb. 5. 36: Wärmeentzugsleistung der Kollektortypen im Ton (oben links), im Schluff (oben rechts), im trockenen Sand (unten links), im nassen Sand (unten rechts), 2400h/a

Tabelle 5. 30: Wärmeentzugsleistung der Flächenkollektoren in verschiedenen Jahren in Abhängigkeit vom Boden, 2400h/a

Boden	Jahr, W/m^2 , 2400 h/a			
	1	2	3	4
Ton	16.14	15.77	15.50	15.43
Schluff	16.65	16.87	16.87	16.83
trockener Sand	17.37	18.05	18.12	18.09
nasser Sand	23.13	23.99	24.08	24.08

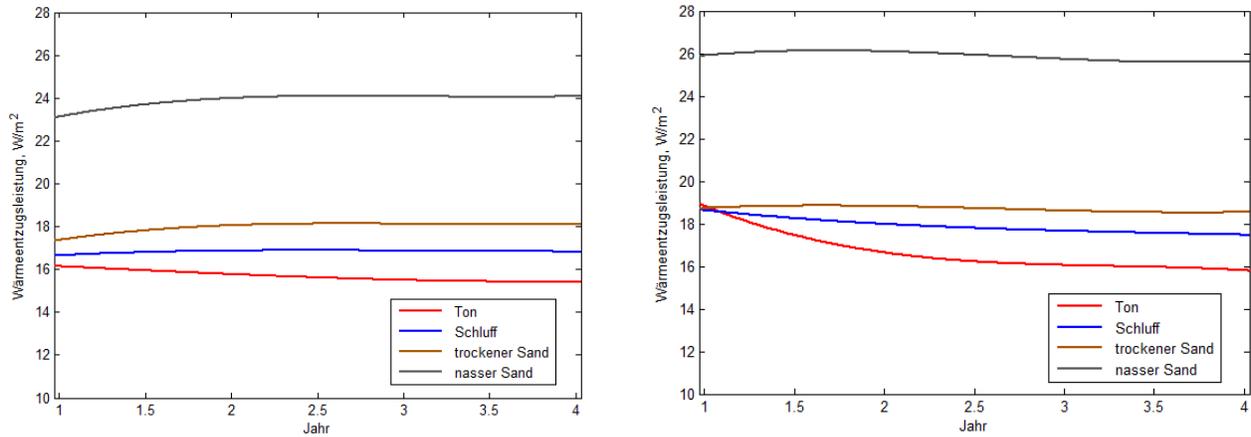


Abb. 5. 37: Wärmeentzugsleistung der Flächenkollektoren (links) und der Grabenkollektoren (rechts) in verschiedenen Jahren in Abhängigkeit vom Boden, 2400h/a

Ähnlich der Abbildung 5.15 zeigt die Abbildung 5.38 die wieder an die Umgebung abgestrahlte Wärme. Alle drei Grafiken haben den gleichen zeitlichen Verlauf. Es unterscheiden sich nur die Spitzenwerte, die von dem Emissionsgrad abhängig sind. Je größer der Emissionsgrad ist, desto mehr Wärme wird abgestrahlt.

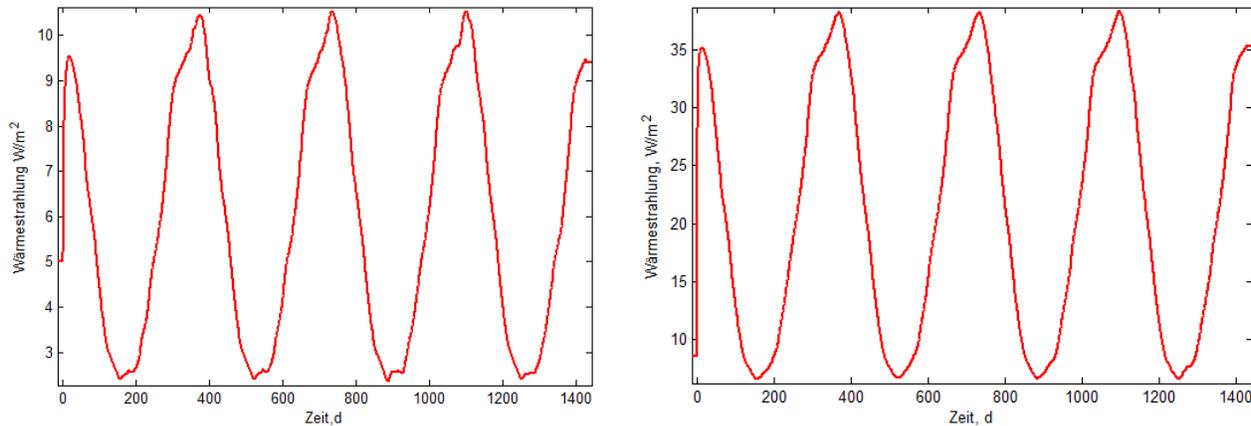


Abb. 5. 38: Oberfläche-zu-Umgebung Wärmestrahlung beim Ton (links) und beim Sand (rechts)

5.3.9 Variation Klimazonen

Die einzelnen Klimaregionen unterscheiden sich durch die Außenlufttemperatur, die Sonneneinstrahlung und die von der Außenlufttemperatur bestimmte Zeitdauer der Heizperiode. Bei dieser Simulation werden als Randbedingung die Außenlufttemperatur und die Sonneneinstrahlung für die entsprechende Klimaregion als Funktion der Zeit, wie im Punkt 5.3.2 gezeigt, definiert.

Tabelle 5. 31: Einfluss von Klima auf die Leistungen verschiedener Typen von Kollektoren

Klima	Mittlere Außenluftt.	Sonnenstrahlung	Zeitdauer der Heizperiode, d	Typ von Kollektor	Wärmestrom 1lfm Kollektor, W		Wärmestrom 1lfm Rohr, W		Wärmeentzugsleistung W/m ²	
					1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a
Alpines	5.7°C	gebirgige	261	Flächen	252,12	189,09	10,08	7,56	21,01	15,76
				Graben	151,00	113,25	5,81	4,36	20,97	15,73
				Steil	387,44	290,58	6,92	5,19	13,84	10,38
Mittel europäisches	7.3°C	ländliche	213	Flächen	225,23	168,92	9,01	6,76	18,77	14,08
				Graben	143,63	107,72	5,52	4,14	19,95	14,96
				Steil	342,72	257,04	6,12	4,59	12,24	9,18
Panonisches	9.9°C	ländliche	203	Flächen	269,76	202,32	10,79	8,09	22,48	16,86
				Graben	167,69	125,77	6,45	4,84	23,29	17,47
				Steil	406,64	304,98	7,26	5,45	14,52	10,89
Illyrisches	7.9°C	ländliche	224	Flächen	249,52	187,14	9,98	7,49	20,79	15,60
				Graben	156,47	117,35	6,02	4,51	21,73	16,30
				Steil	374,51	280,88	6,69	5,02	13,38	10,03

In Abbildung 5.39 ist die Wärmeentzugsleistungen der verschiedenen Kollektortypen und in Abbildung 5.40 und 5.41 der Wärmestrom durch die Kollektoren in Abhängigkeit der Klimaregionen dargestellt. Anhand der Grafiken kann man folgendes feststellen:

- Die Flächenkollektoren in alpinen Klimazonen zeigen eine relativ hohe mittlere Wärmeentzugsleistung. In Abbildung 5.40 aber ist ein deutlich negativer Wärmefluss in kältesten Winterzeiten zu beobachten. Das macht die Flächenkollektoren bei einer Verlegungstiefe von 1,5 m und weniger unwirtschaftlich. Mögliche Lösungen wären eine größere Verlegungstiefe oder eine niedrigere Temperatur des Fluids (weniger als 2 °C)
- Trotz der niedrigeren Temperaturen in alpinen Klimazonen sind die Wärmeentzugsleistungen im Vergleich zu den mitteleuropäischen und illyrischen Klimazonen für alle Kollektortypen höher. Daraus kann man feststellen, dass die Wärmeentzugsleistung mehr von der Sonneneinstrahlung als von der Außenlufttemperatur beeinflusst wird.
- Von Bedeutung ist nicht nur die mittlere Lufttemperatur, sondern auch wie sie sich über die Zeit verändert. Bei illyrischen Klimazonen bleiben die Temperaturen nach der Einschaltung des Systems annähernd bei 12°C. Dadurch kann man die höheren Spitzenwerte am Beginn der Heizperiode und die besseren Leistungen im Vergleich zu mitteleuropäischen Klimazonen trotz der fast gleichen Durchschnittstemperatur erklären. Dagegen steht die mitteleuropäische Klimazone, in der die niedrigeren Leistungen Folge der nach dem Einschalten des Systems stark fallenden Temperaturen sind.

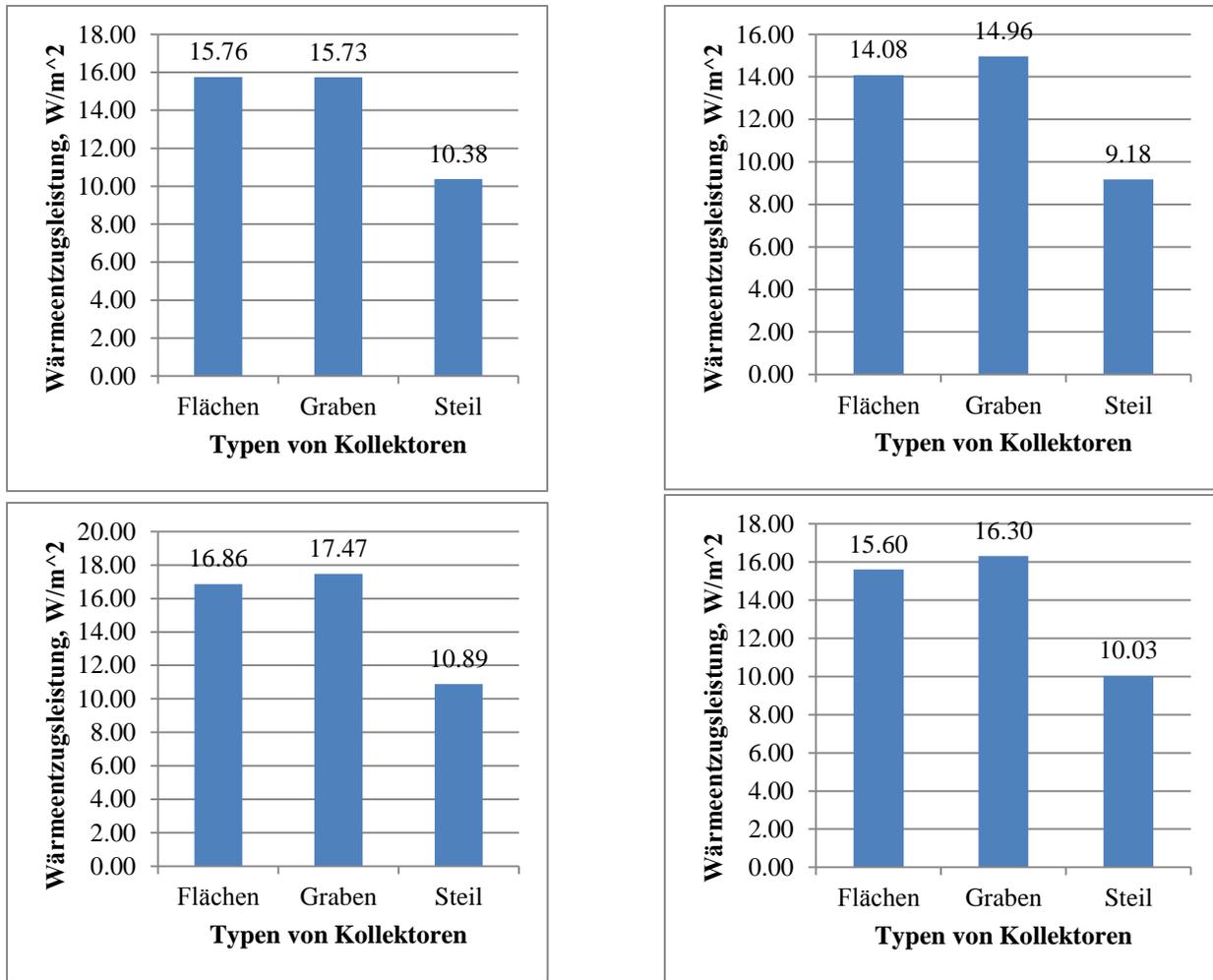


Abb. 5. 39: Wärmeentzugsleistung der Kollektortypen in alpinen Klimazonen (oben links), mitteleuropäischen Klimazonen (oben rechts), panonischen Klimazonen (unten links), illyrischen Klimazonen (unten rechts) 2400h/a

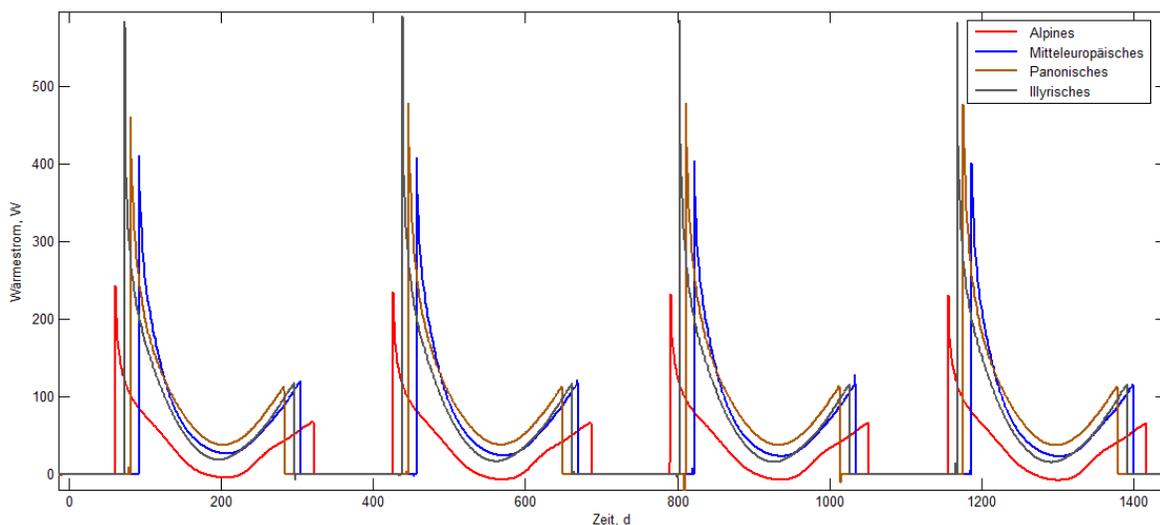


Abb. 5. 40: Wärmestrom (aus 1lfm Kollektor) durch Flächenkollektoren in Abhängigkeit von der Klimaregionen

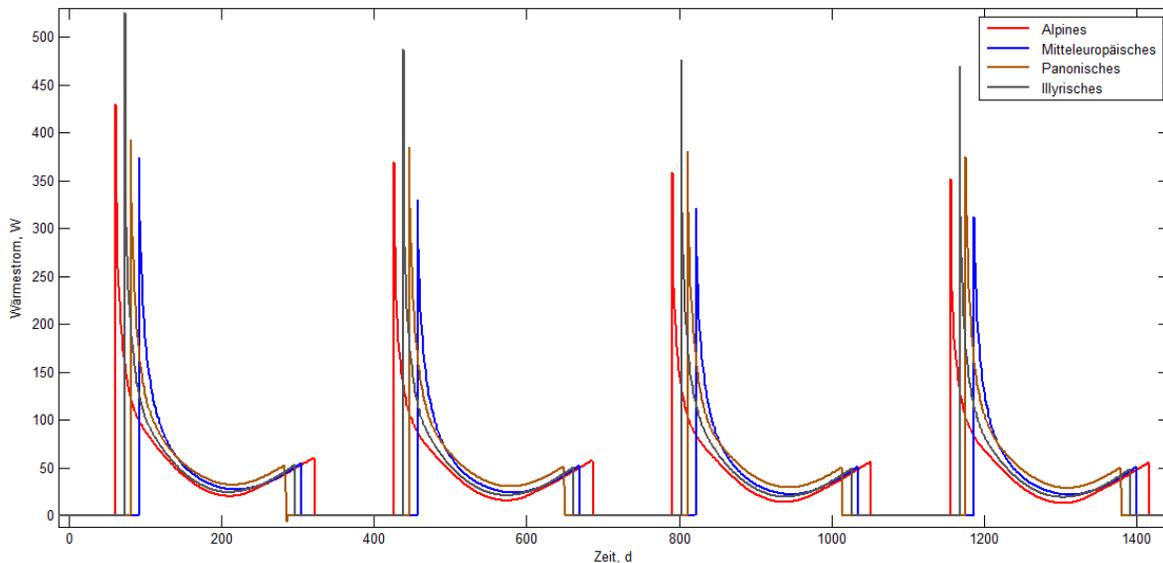


Abb. 5. 41: Wärmestrom (aus 11fm Kollektor) durch Grabenkollektoren in Abhängigkeit von den Klimaregionen

5.3.10 Variation Heizen und Kühlen

Beim Kühlbetrieb wird die Wärme von den gekühlten Räumen wieder in den Boden abgegeben. Dadurch wird die Regenerationsfähigkeiten des Bodens verbessert und es können höhere Leistungen des Gesamtsystems erzielt werden. Für die Simulationen bedeutet die Abgabe von Wärme einen negativen Wärmestrom (Abbildung 5.42). Bei Flächenkollektoren ist dieser Wärmestrom auch von den Randbedingungen an der Oberfläche beeinflusst.

Die Grafik in Abbildung 5.43 veranschaulicht wie sich die Wärmeentzugsleistung bei verschiedenen Kollektortypen verbessert, wenn das System auch zum Kühlen benutzt wird. Daraus kann man feststellen, dass je tiefer die Kollektoren liegen, desto mehr Wärme im Boden gespeichert bleibt. Deshalb steigt die Entzugsleistung von Flächenkollektoren nur um 2,27 W/m², während bei Grabenkollektoren die Steigerung 6,48 W/m² beträgt.

Tabelle 5. 32: Einfluss der Betriebsart auf die Leistungen verschiedener Typen von Kollektoren

Typen von Kollektoren	Betriebsart	Wärmestrom 11fm Kollektor, W		Wärmestrom 11fm Rohr, W		Wärmeentzugsleistung W/m ²	
		1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a	1800h/a	2400h/a
Flächenkollektoren	nur Heizen	269.76	202.32	10.79	8.09	22.48	16.86
	Heizen und Kühlen	306.03	229.52	12.24	9.18	25.50	19.13
Grabenkollektoren	nur Heizen	167.69	125.77	6.45	4.84	23.29	17.47
	Heizen und Kühlen	229.89	172.42	8.84	6.63	31.93	23.95
Steilkollektoren	nur Heizen	406.64	304.98	7.26	5.45	14.52	10.89
	Heizen und Kühlen	637.13	477.85	11.38	8.53	22.75	17.07

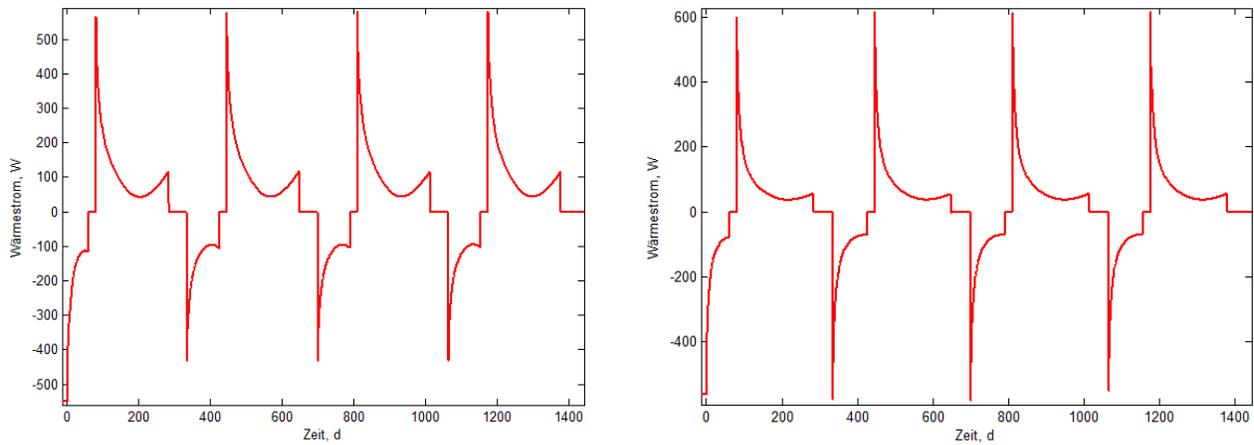


Abb. 5. 42: Wärmestrom (aus 11fm Kollektor) durch Flächenkollektoren (links) und durch Grabenkollektoren (rechts) beim Heiz- und Kühlbetrieb

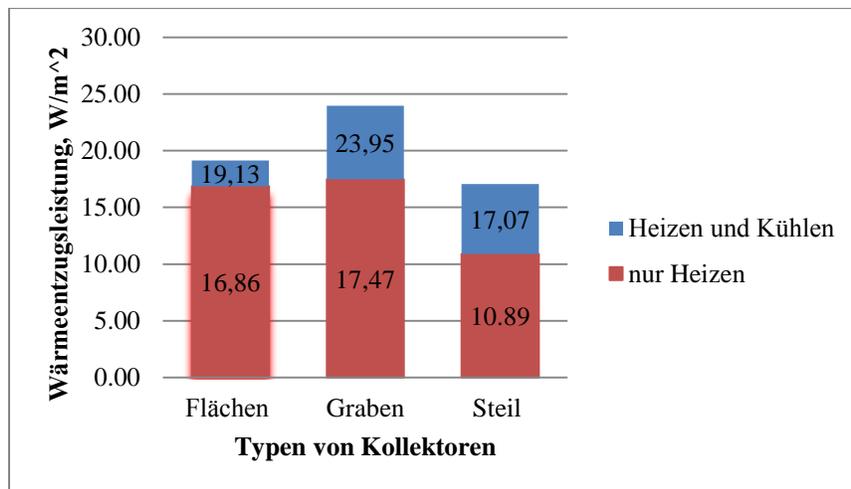


Abb. 5. 43: Wärmeentzugsleistung der Kollektortypen bei verschiedenen Betriebszenarien

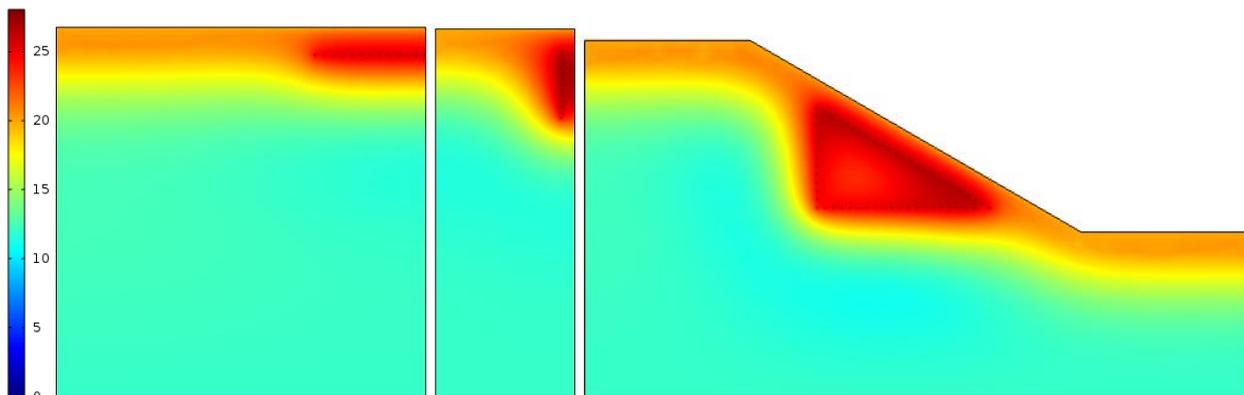


Abb. 5. 44: Temperaturentausbreitung im Ende des Kühlbetriebs bei verschiedener Modelgeometrie, $t=1155$ d

5.4 Vergleich der Kollektortypen nach Wärmetzugsleistung für 1 m³ Aushub und Wärmestrom durch 1 lfm Kollektorrohr

Das Verlegen der Kollektoren ist mit erheblichen Erdarbeiten verbunden, die zusammen mit der Länge der verlegten Rohrleitungen die Baukosten bestimmen. Informationen über die Effektivität der verschiedenen Kollektortypen bezüglich der erforderlichen Erdarbeiten und den benötigten Abmessungen der Rohrleitungen bietet Tabelle 5.33.

Tabelle 5. 33: Wärmestrom für 1 m³ Aushub und durch 1 lfm Kollektorrohr

Kollektortyp	Querschnittsfläche des Aushubs, m ²	Wärmetzugsleistung für 1 m ³ Aushub, W/m ³ , 2400 h/a	Wärmestrom 1lfm Kollektorrohr, W, 2400 h/a
Flächenkollektor	12x1,5=18	11.24	8.09
Grabenkollektor	1,5x4,8= 7,2	17.47	4.84
Steilkollektor	7,7x13,4/2=51,6	5.91	5.45

Der notwendige Aushub wurde nach der Basismodelgeometrie der verschiedenen Kollektortypen berechnet. Die Daten zeigen, dass bei den Grabenkollektoren die notwendigen Erdarbeiten am geringsten ausfallen, dabei sind aber knapp 70% mehr Rohrleitungen im Vergleich zu Flächenkollektoren notwendig. Die Verwendung von Steilkollektoren ist mit dem größten Arbeitsaufwand und einem hohen Materialeinsatz in Form von Rohrleitungen verbunden. Bei einem südlich orientierten Hang sollten die in Tabelle 5.33 berechneten Werte für Steilkollektoren gemäß den Ergebnissen in Kapitel 5.3.4 um 10 % erhöht werden.

6 Anwendungsbereiche

6.1 Wohngebäude

Als Grundlage für die Ermittlung des Heizleistungsbedarfes dient die Heizlastberechnung. Für eine überschlägige Berechnung können Erfahrungswerte herangezogen werden, die jedoch von unterschiedlichen Faktoren abhängen. Solche Faktoren sind:

- Neu- oder Altbau,
- Richtlinien spezieller Wärmeschutzverordnungen,
- Wärmedämmung,
- die Qualität des Mauerwerks.

Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über den Heizleistungsbedarf je nach Baustandard.

Tabelle 6. 1: Heizleistungsbedarf je nach Baustandard [25]

Richtwerte für Österreich	Besondere Maßnahme	Spezifischer Heizleistungsbedarf
Altbau um 1960	Keine Wärmedämmung	250 W/m ²
Bauordnung vor 1998	Keine Wärmedämmung	150 W/m ²
Bauordnung nach 1998	Normale Wärmedämmung	80 W/m ²
Wohnbauförderung nach 1998	Normale Wärmedämmung	65 W/m ²
Wohnbauförderung Energiesparhaus	Gute Wärmedämmung	<55 W/m ²
Wohnbauförderung Niedrigenergiehaus	Beste Wärmedämmung	<40 W/m ²

Vergleicht man die Ergebnisse der Simulationen mit den in der Tabelle 6.1 angegebenen Richtwerten stellt man fest, dass die Flächenabsorber am besten für den Heizleistungsbedarf von Neubauwohnungen mit guter bzw. bester Wärmedämmung anwendbar sind. Dabei wird in Abhängigkeit des Kollektortyps und des Bodens 2 bis 3 mal so viel Absorberfläche wie Wohnfläche benötigt.

Beispiel:

In Abbildung 6.1 ist ein mit einer Wärmepumpenanlage ausgerüstete Einfamilienhaus gezeigt. Die Erdwärmegewinnung erfolgt durch 3x90 m lange Tiefsonden. Tabelle 6.2 bietet die Kenndaten des Gebäudes, sowie eine Berechnung der notwendigen Absorberflächen, Rohrleitungslänge und Erdarbeiten bei gleicher Heizlast. Damit ist ein Vergleich zwischen beiden Arten von Erdwärmequellen möglich.

Tabelle 6. 2: Eckdaten Einfamilienhaus in Niederösterreich [28]

Gebäudetyp	Einfamilienhaus
Standort	Niederösterreich
Baubeginn	1987, 2007 Erdwärme
Energiebezugsfläche	ca. 300 m ²
Heizlast	17 kW / 56,6 W/m ²
Erdwärmegewinnung	Tiefsonde 3x90 m
Heizlast Wärmequelle	12.75 kW
Absorberfläche	666 m ²
Grabenlänge (Grabentiefe 5 m)	74 m
Absorberleitungen (Flächen/Graben)	1387 m / 1924 m
Aushub (Flächen/Graben)	999 m ³ / 555 m ³



Abb. 6. 1: Einfamilienhaus in Niederösterreich [28]

6.2 Bürogebäude

Hier werden ein Bürogebäude, das schon mit einer Wärmepumpenanlage verschiedener Erdwärmequellen ausgerüstet ist, und ein Niedrigenergie-Bürogebäude betrachtet. Nach schon bekannten Daten für die Heizlast der Gebäude und für die Wärmeentzugsleistung nach den Simulationsergebnissen, werden die notwendigen Absorberfläche berechnet. Bei der Berechnung wird die Heizlast der Gebäude als Heizlast für die Wärmepumpe angenommen. Daraus ergibt sich für eine Wärmepumpe mit einer Leistungszahl 4, dass die reale Leistung der Wärmequelle $\frac{3}{4}$ der Heizlast der Wärmepumpe betragen muss. Als Wärmeentzugsleistung wird 19,13 W/m² (für Flächenkollektoren) und 23,95 W/m² (für Grabenkollektoren) angenommen. Diese Werte entsprechen dem Basismodell mit Heiz- und Kühlbetrieb.



Abb. 6. 2: Büroturm Uniqa Tower Wien (links) [28] Passivhaus-Bürogebäude Betriebsweiterung Rubblemaster HMH GmbH (rechts) [31]

Tabelle 6. 3: Eckdaten Büroturm Uniqa Tower Wien [28]

Projekt	Büroturm Uniqa Tower Wien
Gebäudetyp	Bürogebäude
Standort	Wien
Fertigstellung	2004
Bruttogeschoßfläche	38500 m
Erdwärmegewinnung	Massivabsorber (44 km Absorberleitungen in 35 m tiefer Schlitzwand)
Heizlast	880 kW / 23 W/m ² (nur Wärmepumpe)*
Betriebsart	bivalent
Heizlast Wärmequelle	660 kW
Absorberfläche	34500 m ²
Grabenlänge (Grabentiefe 5 m)	3830 m
Absorberleitungen (Flächen/Graben)	72 km / 99,5 km
Aushub (Flächen/Graben)	51750 m ³ / 28725 m ³

*Die Heizlast ist nicht vom ganzen Gebäude, sondern nur von der Wärmepumpe

Die Ergebnisse aus Tabelle 6.3 zeigen, dass die Ausrüstung des Gebäudes mit einer Wärmepumpenanlage mit Flächenkollektoren eine riesige Absorberfläche und somit große Erdarbeiten benötigen. Üblicherweise befindet sich Bürogebäude in innerstädtischen Bereichen, in denen es un bebauten Grünflächen mangelt. Im Vergleich zu den Einfamilienhäusern sind die Energiebezugsfläche bei den Bürogebäuden größer. Diese Tatsachen begrenzen die Einsatzmöglichkeit von Flächenabsorbern für die Klimatisierung von Bürogebäuden. Trotzdem zeigen die Daten in Tabelle 6.4, dass bei Neubauten, wenn das Gebäude als Niedrigenergiehaus projektiert ist, können Flächenabsorber eine Anwendung finden.

Tabelle 6. 4: Eckdaten Bürogebäude [31]

Projekt	Betriebserweiterung Rubblemaster
Gebäudetyp	Bürogebäude
Standort	Linz
Baubeginn	2008
Energiebezugsfläche	1040 m ²
Heizlast	21 kW / 20,2 W/m ²
Kühllast	29,00 kW / 27,88 W/m ²
Energiekennzahl	15 kWh/ (m ² *a)
Wärmeentzugsleistung	15.75 kW
Absorberfläche	823 m ²
Grabenlänge (Grabentiefe 5 m)	91.3 m
Absorberleitungen (Flächen/Graben)	1715 m / 2374 m
Aushub (Flächen/Graben)	1234,5 m ³ / 685 m ³

6.3 Straßen- und Schienenheizung

Die Nutzung der Erdwärme für die Beheizung von Straßen und damit für die Eisfreihaltung, sowie Untersuchungen über die erforderlichen Wärmemengen wurden schon in den Diplomarbeiten von Kaller [11] und Kerenchev [13] durchgeführt. Für die Straßen-/Brücken-Heizungsanlage des Fluss-Kraftwerkes Freudenu in Wien zeigt die analytische Lösung im Vergleich zu einer FE Modellberechnung einen deutlich höheren Wärmebedarf. Bei der analytischen Berechnung benötigt die Heizanlage 502 W/m², während beim FE Modell der Wärmebedarfs 244 W/m² beträgt. Diese Zahlen wurden dem ausgeführten Projekt entnommen. [11, 13]

Da das Modell für eine Gebäudeheizung erstellt wurde (das System ist in Betrieb bei einer Außenlufttemperatur unter 12 °C), muss der Wärmestrom auf die entsprechenden Betriebsstunden umgerechnet werden. Die in der Diplomarbeit von Kerenchev durchgeführten Berechnungen zeigen, dass bei Temperaturen unter 2 °C (das Einschaltungskriterium des Systems bei Straßenheizung) der Betrieb des Systems 2064 Betriebsstunden beträgt. Daraus ergibt sich für das Basismodell ein Wärmestrom von 19,6 W/m² bei 2064 h/a (16,86 W/m² bei 2400 h/a). [13] Im Vergleich zu den erforderlichen Wärmestromdichten ist ein Faktor von ca. 10 zwischen der gewonnenen und der notwendigen Energie festzustellen. [13]

Eine andere Anwendung der Erdwärme im Verkehrswesen ist die Schienenheizung im Bereich von Weichen. Die Erfahrung von schon ausgeführten Projekten zeigt, dass die benötigte Energie für die Heizung von 1 m Schienen 330 W beträgt. Die zwischen der Backenschiene und Zunge gestellten und am Steg befestigten Kapillarrohren verhindern die Eisbildung. Auf diese Weise wird die freie Bewegung der Weichen versichert. Ähnlich wie bei Straßenheizung ist die Grenze von 2 °C das Kriterium für das Einschalten des Systems. Tabelle 6.5 bietet eine Information für das schon ausgeführte Projekt und eine Umrechnung für die oberflächennahen Erdwärmeabsorber. [49]

Tabelle 6. 5: Eckdaten Schienenheizung [49]

Projekt	Hamburger Hafenbahn
Heizlast	1,8 kW
Erdwärmegewinnung	2x50 m Tiefsonde
Wärmeentzugsleistung (2064 h/a) (Flächen/Graben)	19,6 W/m ² / 20,3 W/ m ²
Absorberfläche	91,8 m ²
Grabenlänge (Grabentiefe 5 m)	12,3 m

7 Zusammenfassung

Die Nutzung der regenerativen "Oberflächennahen Geothermie" für die Beheizung oder Kühlung von Gebäuden ist heute keine Vision mehr, sondern die Anwendung von vorhandener moderner Technik und weiterentwickelten „Know How“. Dabei sollte die dezentrale Versorgung des überwiegenden Anteils von Neubauten auf dem Ein- und Mehrfamilienhaussektor mit Erdwärme als Ziel festgelegt werden. Die Erdwärme bietet zusammen mit anderen regenerativen Energien die Möglichkeit das langfristige Ziel einer nachhaltigen Energiewirtschaft zu erreichen. Das wichtigste Kriterium bei der Planung und Errichtung einer Erdwärmennutzungsanlage ist dabei die Qualität sämtlicher Planungs- und Herstellungsprozesse.

Bei den Untersuchungen ist der große Einfluss des Bodens auf die Wärmeentzugsleistung zu bemerken. Die wassergesättigten bindigen Böden weisen eine um gut 30 % höhere Wärmeleistung als trockene Böden auf. Die richtige Modellierung des Rohrsystems hat auch einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse. Der vom Rohrmaterial beeinflusste Wärmedurchlasskoeffizient kann die Wärmeentzugsleistung bis zu 60 % verbessern. Bei detaillierten Untersuchungen mit Hilfe eines 3D Modells können die Menge und Geschwindigkeit des Fluidstroms, sowie die seriellen oder parallelen Einschaltung bei Flächenkollektoren modelliert werden. Durch die Bestimmung der Funktion der Sonneneinstrahlung kann der Einfluss der direkten und diffusen Strahlung auf die Bodenoberflächen genauer untersucht werden. Bei geneigten Flächen ist eine Ausführung von Steilkollektoren nur bei einer südlichen Hangausrichtung zweckmäßig. Die Wirkungen der Außenlufttemperatur und der Sonneneinstrahlung sind im Modell durch zwei verschiedene Funktionen bestimmt. Die Verwendung einer Wärmepumpenanlage zu Kühlzwecken hat einen erheblichen Einfluss auf die Wärmeentzugsleistung von 40% bei Graben- und 55% bei Steilkollektoren. Bei Flächenkollektoren beträgt dieser Einfluss nur 15 %.

Insbesondere bei der korrekten Dimensionierung und bei dem Bau im Bereich der Wärmequelle müssen hohe Qualitätsstandards angesetzt werden damit die Leistungen der Wärmepumpe optimal genutzt und die Anlage über Jahrzehnte mit entsprechender Effizienz betrieben werden kann. Aus den Ergebnissen der in der Diplomarbeit durchgeführten Simulationen kann festgestellt werden, dass Flächenkollektoren den Wärmebedarf von Einfamilienhäusern mit guter Wärmedämmung befriedigen können. Reicht die Leistung der Flächenabsorber nicht aus, um den notwendigen Wärmebedarf zu decken, können Flächenabsorber zusammen mit Erdwärmesonden oder Massivabsorber kombiniert werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Adam D.: Einfluss der Temperatur auf Böden, Vorlesungsskriptum, 2010.
- [2] Adam D., Markiewicz R.: Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauwerke – Teil 1: Theoretische Grundlagen; Heft4/2002, Wien, 2002
- [3] Ashrae Handbook „Fundamentals“, 2001
- [4] Baumann M., Laue H.-J., Müller P.: Wärmepumpen- Heizen mit Umweltenergie., Karlsruhe : FIZ , 2007
- [5] COMSOL: COMSOL Multiphysics Model Library; COPYRIGHT 1998–2008 by COMSOL AB, 2008
- [6] COMSOL: COMSOL Multiphysics User’s Guide; COPYRIGHT 1998–2008 by COMSOL AB, 2008
- [7] Gemeinde Tulln: Geothermische Nutzung der erdberührten Bauteile von Bauwerksfundamenten, speziell der Tiefgarage am Hauptplatz von Tulln.
- [8] Glück B.: Simulationsmodell "Erdwärmekollektor" zur wärmetechnischen Beurteilung von Wärmequellen, Wärmesenken und Wärme-Kältespeichern; Forschung und Entwicklung technische Gebäudeausrüstung.
- [9] Heidenreich B.: Modellierung des Spannungs-Dehnungsverhaltens eines Energiepfahls und des umgebenden Bodens unter Temperaturwechseln mittels numerischer Computersimulation nach der FEM; Technischen Universität Darmstadt; Darmstadt, Deutschland; Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik, 1999
- [10] Hoffinger H., Kohlböck D.Ö’: Wirtschaftliche Optimierung von Tunnelthermie – Magistratabteilung 27 EU Strategie und Wirtschaftsentwicklung, 2006
- [11] Kaller R.: Wärmetransportverhalten von Freiflächenheizungen; Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Diplomarbeit; Wien, Technische Universität Wien; 2007
- [12] Kaltschmitt M., Huenges E., Wolff H.: Energie aus Erdwärme; Geologie, Technik und Energiewirtschaft; Stuttgart, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1999
- [13] Kerenchev N.: Erdwärmennutzung von Dämmen; Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Diplomarbeit; Wien, Technische Universität Wien, 2010
- [14] Kruse H., Heidelck R.: Heizen mit Wärmepumpe; Köln, Verlag TÜV Rheinland, 1997

- [15] Loose P.: Erdwärmenutzung, Versorgungstechnische Planung und Berechnung; Heidelberg , C.F. Müller Verlag, 2007
- [16] Ludwig von Cube H., Steimle F.: Wärmepumpen – Grundlagen und Praxis; Düsseldorf, VDI-Verlag, 1984
- [17] Markiewicz R.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau; Dissertation am Institut für Grundbau und Bodenmechanik; Wien, Technische Universität Wien, 2004
- [18] Oberflächennahe Geothermie in Luxemburg; Luxemburg, Centre De Ressources des Technologies Pour, 2010.
- [19] Podesser A.: Klimaatlas Steiermark, Strahlung; Zentralanstalt für Meteorologie und Thermodynamik
- [20] Primus, I.-F.: Massivabsorber. Die Wärmequelle für die Wärmepumpe; Düsseldorf, Beton-Verlag, 1995
- [21] Recknagel H., Sprenger E., Schramek E.-R.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 2002
- [22] Schreier U.: Wärmepumpe, Beratungspaket; Beratungsordner mit Präsentationsgrafiken, Fachinformationen und Serviceteil; Berlin, Solarpraxis
- [23] Studer H., Haage U., Staller S.: Wärmepumpen, Erdkollektoren, Garten- und Wohnqualität; Wien, Studie im Auftrag der NÖ Wohnbauforschung, 2006
- [24] Tholen M., Walker-Hertkorn S.: Arbeitshilfen Geothermie. Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen; Bonn, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2008
- [25] ÖNORM 7500: Heizungssysteme in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast (Nationale Ergänzung zu ÖNORM EN 12831), 2006
- [26] VDI4640: VEREIN DEUTSCHE INGENIEURE "VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrunds", Richtlinie, Blatt 1(2008) Blatt 2 (2001) Blatt 3 (2001) Blatt 4 (2004).
- [27] Vogel H.: Gerthsen Physik; Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 1997
- [28] Zauner A.: Oberflächennahe Erdwärmenutzung in Österreich - Überblick und Stuserhebung; Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik; Wien, Technische Universität Wien, 2009
- [29] Алексиев А., Стефанов Г.: Наръчник по земна механика и фундиране; София, 1989

- [49] Feldmann W.: Geothermal point heaters on trial; Railway Gazette International, September 2012
- [50] Brehm D.: Entwicklung, Validierung und Anwendung eines dreidimensionalen, strömungsgekoppelten finite Differenzen Wärmetransportmodells; Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften der Justus Liebig-Universität Gießen, Gießen 1989
- [51] Kohl T.: Modellsimulation gekoppelter Vorgänge beim Wärmenutzung aus heißem Tiefgesteine; Zürich 1992

Internetquellen:

- [30] <http://www.bosy-online.de/Erdkollektoren>
- [31] <http://www.climadesign.at>
- [32] <http://www.dimplex.de>
- [33] http://www.energieagentur.nrw.de/_database/_data/datainfopool/solaratlas
- [34] <http://www.erdpunkte.de/klima>
- [35] <http://www.erdwaerme-infos.de/energie/flaechenkollektor>
- [36] <http://www.fleischer-energietechnik.de>
- [37] <http://www.freisolar.de/cms/website.php?id=/de/index/erdwaerme-kollektoren>
- [38] <http://g-mar.ru/Statyi8>
- [39] <http://www.heizung-waermepumpe.de>
- [40] <http://www.h-ganglberger.at>
- [41] <http://www.idm-energie.com>
- [42] <http://www.lrz.de/~t5412cs/webserver/webdata/download/da/628-angerer>
- [43] <http://www.nick-leonberg.de/grabenkollektor>
- [44] <http://www.omega.com/literature/transactions/volume1/emissivityb>
- [45] <http://www.strompreise-runter.de>
- [46] <http://vatafu.de/erdwaerme/erdgekoppelte-waermepumpen>
- [47] <http://www.waermepumpen-pfaffenhofen.de>
- [48] <http://www.waermepumpe.de>

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1. 1: Energieverbrauch im privaten Haushalt [45].....	1
Abb. 1. 2: Energieschema einer geothermisch betriebenen Wärmepumpenanlage. Der Energiefluss ist bei einer Leistungszahl 4 der Wärmepumpe dargestellt [28].....	2
Abb. 2. 1: Zeitlicher Zusammenhang zwischen Wärmebedarf und Wärmeangebot der Wärmequelle[14]..	3
Abb. 2. 2: Bestimmung der erforderlichen Größen einer Erdreichwärmequelle [8]	5
Abb. 2. 3: Oberflächennahe Temperaturverteilung im Boden im Jahresverlauf (links) [14] und ungestörte Temperaturen im Erdreich (rechts) [46].....	5
Abb. 2. 4: Dominierende Wärmeübertragungsmechanismen in Abhängigkeit vom Korndurchmesser und Sättigungsgrad. [1]	9
Abb. 2. 5: Wärmeleitfähigkeit des Bodens (K) in Abhängigkeit von Trockendichte (ρ_d) und Wassergehalt. zusammengestellt von JESSBERGER [17].....	17
Abb. 2. 6: Einfluss von Porenanteil und Porenhalt (Wasser (W), Öl (Öl), Luft (L)) auf die Wärmeleitfähigkeit β) von Sandstein und Sand [1].....	18
Abb. 3. 1: Richtwerte für den Rohrabstand in Kollektorfeldern [36].....	21
Abb. 3. 2: Schema Flächenkollektor [24].....	22
Abb. 3. 3: Prinzipskizze Serienschaltung (links) und Parallelschaltung (rechts) [21]	22
Abb. 3. 4: Schema des Grabenkollektors (links) [35] und Herstellung eines Grabenkollektors (rechts) [40]	22
Abb. 3. 5: Schema eines Slinky-Kollektors (links) [30] und Einbau eines Slinky-Kollektors (rechts) [28]	23
Abb. 3. 6: Schema eines Svec-Kollektors (links) [30] und Einbau eines Svec-Kollektors (rechts) [28]	23
Abb. 3. 7: Schema eines Gitterkollektors [38]	24
Abb. 3. 8: Schema eines Achter-Kollektors [38].....	24
Abb. 3. 9: Korbkollektor [28].....	24
Abb. 4. 1: Systembereiche der Erdwärmennutzung [28].....	26
Abb. 4. 2: Komponenten einer Wärmepumpenanlage [37].....	26
Abb. 4. 3: Funktionsschema einer Wärmepumpe [18].....	27
Abb. 4. 4: Kreisprozess einer Wärmepumpe [41]	28
Abb. 4. 5: Leistungszahl in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur [41].....	30
Abb. 4. 6 System Sole-Wasser (links) und Direktverdampfung (rechts) [22].....	31

Abb. 5. 1: Modelgeometrie Flächenkollektoren. Einheiten sind in Meter angegeben.	36
Abb. 5. 2: Modellgeometrie Grabenkollektoren (links) und Anordnung der Rohrleitungen (rechts). Einheiten sind in Metern angegeben	37
Abb. 5. 3: Modelgeometrie – steile Anordnung der Kollektoren. Einheiten sind in Metern angegeben. ...	37
Abb. 5. 4: Modelgeometrie Hangaushub. Einheiten sind in Metern angegeben.	38
Abb. 5. 5: Temperaturkurve alpine Klimazone (oben links), Temperaturkurve mitteleuropäische Klimazone (oben rechts), Temperaturkurve panonisches Klimazone(unten links), Temperaturkurve illyrische Klimazone (unten rechts) [34]	39
Abb. 5. 6: Temperaturkurve für einen Zeitraum von 4 Jahren	40
Abb. 5. 7: Jahresgänge für die berechnete Globalstrahlung (direkte und diffuse) auf eine horizontale Ebene, Station Graz-Universität, Sh 366m (links) und Station Sonnblick, Sh 3100m (rechts) [19].....	40
Abb. 5. 8: Die berechnete Globalstrahlung in W/m^2 für ländliche (links) und gebirgige (rechts) Region..	41
Abb. 5. 9: Querschnitt der Rohrleitungen	43
Abb. 5. 10: Durchlasskoeffizient Λ , abhängig von der Zeit t und der Außentemperatur, $12^\circ C$ – Grenze als Kriterium für das Ein- und Ausschalten des Systems	44
Abb. 5. 11: Durchlasskoeffizient Λ und Rohrtemperatur, abhängig von der Zeit t und der Außentemperatur	45
Abb. 5. 12: Modellierung Rand- und Anfangsbedingungen	46
Abb. 5. 13: Modellnetz (links), lokale Verfeinerungen (rechts). Einheiten sind in Metern angegeben.....	47
Abb. 5. 14: Wärmestrom, der durch den Gesamtkollektor für 4 Jahre fließt	49
Abb. 5. 15: Oberfläche-zu-Umgebung Wärmestrahlung.....	49
Abb. 5. 16: Wärmestrom durch die einzelnen Kollektorrohren	50
Abb. 5. 17: Temperatursausbreitung am Beginn der Heizperiode am Tag 1176.....	51
Abb. 5. 18: Temperatursausbreitung zum kältesten Zeitpunkt am Tag 1295	51
Abb. 5. 19: Temperatursausbreitung am Ende der Heizperiode am Tag 1378	51
Abb. 5. 20: Wärmeentzugsleistung bei verschiedener Rohrtemperatur bei 2400h/a	52
Abb. 5. 21: Wärmestrom bei Rohrtemperatur $0^\circ C$ (links) und $6^\circ C$ (rechts).....	52
Abb. 5. 22: Wärmeentzugsleistung bei verschiedenen Wärmedurchlasskoeffizienten, 2400h/a	53
Abb. 5. 23: Wärmeentzugsleistung bei verschiedenen Rohrabstand, 2400h/a.....	54
Abb. 5. 24: Wärmestrom durch die einzelnen Kollektorrohre bei verschiedenen Rohrabständen, 2400h/a	55
Abb. 5. 25: Wärmeentzugsleistung in Abhängigkeit von Hangausrichtung und -neigung, 2400h/a	56
Abb. 5. 26: Wärmestrom, der durch den Gesamtkollektor für 4 Jahre fließt	58
Abb. 5. 27: Wärmestrom durch das 1. Kollektorrohr (links) und durch das 7. Kollektorrohr (rechts).....	58

Abb. 5. 28: Wärmestrom durch das 13. Kollektorrohr (links) und durch die einzelnen Kollektorrohre (rechts), 2400h/a.....	59
Abb. 5. 29: Die Temperaturlausbreitung in verschiedenen Momenten der Heizperioden: Beginn der Heizperiode $t=1176$ d (links), kältester Zeitpunkt $t=1295$ d (Mitte), Ende der Heizperiode(rechts) $t=1378$ d.....	59
Abb. 5. 30: Wärmeentzugsleistung in Abhängigkeit von Grabenbreite.....	60
Abb. 5. 31: Wärmestrom in einem Zeitraum von 4 Jahren, durch den Gesamtkollektor (oben links), durch steil angeordnete Kollektorrohre (oben rechts), durch vertikal angeordnete Kollektorrohre (unten links), durch horizontal angeordnete Kollektorrohre (unten rechts)	63
Abb. 5. 32: Wärmestrom durch einzelne Kollektorteile.....	63
Abb. 5. 33: Temperaturlausbreitung am Beginn der Heizperiode, $t=1176$ d.....	64
Abb. 5. 34: Temperaturlausbreitung zum kältesten Zeitpunkt, $t=1295$ d.....	64
Abb. 5. 35: Temperaturlausbreitung am Ende der Heizperiode, $t=1378$ d.....	64
Abb. 5. 36: Wärmeentzugsleistung der Kollektortypen im Ton (oben links), im Schluff (oben rechts), im trockenen Sand (unten links), im nassen Sand (unten rechts), 2400h/a	66
Abb. 5. 37: Wärmeentzugsleistung der Flächenkollektoren (links) und der Grabenkollektoren (rechts) in verschiedenen Jahren in Abhängigkeit vom Boden, 2400h/a.....	67
Abb. 5. 38: Oberfläche-zu-Umgebung Wärmestrahlung beim Ton (links) und beim Sand (rechts).....	67
Abb. 5. 39: Wärmeentzugsleistung der Kollektortypen im alpinen Klimazonen (oben links), mitteleuropäischen Klimazonen (oben rechts), panonischen Klimazonen (unten links), illyrischen Klimazonen (unten rechts) 2400h/a.....	69
Abb. 5. 40: Wärmestrom durch Flächenkollektorrohren in Abhängigkeit von der Klimaregionen.....	69
Abb. 5. 41: Wärmestrom durch Grabenkollektorrohren in Abhängigkeit von der Klimaregionen.....	70
Abb. 5. 42: Wärmestrom durch Flächenkollektorrohren (links) und durch Grabenkollektorrohren (rechts) beim Heiz- und Kühlbetrieb	71
Abb. 5. 43: Wärmeentzugsleistung der Kollektortypen bei verschiedenen Betriebsszenarien	71
Abb. 5. 44: Temperaturlausbreitung im Ende des Kühlbetriebs bei verschiedener Modelgeometrie, $t=1155$ d.....	71
Abb. 6. 1: Einfamilienhaus in Niederösterreich [28].....	74
Abb. 6. 2: Büroturm Uniqa Tower Wien (links) [28] Passivhaus-Bürogebäude Betriebserweiterung Rubblemaster HMM GmbH (rechts) [31].....	75

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2. 1: Erdreich als Wärmequelle [14].....	4
Tabelle 2. 2: Wärmetechnische Bodenparameter typischer Böden, basierend auf den Angaben der EN ISO 13370:1998 [17]	6
Tabelle 2. 3: Wärmeentzugsleistung für einen Flächenkollektor bei 1800 Jahresbetriebsstunden [28].....	7
Tabelle 2. 4: Benötigte Kollektorfläche für 1800 bis 2400 Jahresarbeitsstunden in Abhängigkeit von der Jahresarbeitszahl [28].....	7
Tabelle 4. 1: Wärmepumpen - Anwendungsbereiche, Leistungszahlen und Antriebsenergie [37]	26
Tabelle 4. 2: Umweltrelevanten Eigenschaften von Wärmepumpen-Arbeitsmittel [28]	28
Tabelle 5. 1: Wärmetechnische Parameter der Böden.....	38
Tabelle 5. 2: Einfluss der Sonnenstrahlung auf den Wärmestrom ans Erdreich	41
Tabelle 5. 3: Emissionsgrad für verschiedene Böden [44].....	41
Tabelle 5. 4: Korrekturkoeffizienten der Sonnenstrahlung bei verschiedener Hangausrichtung und –neigung.....	42
Tabelle 5. 5: Mittlere Luft- und Erdreichtemperaturen sowie Niederschlagsmengen für Wien [34].....	42
Tabelle 5. 6: Rand- und Anfangsbedingungen Basismodell	46
Tabelle 5. 7: Basismodelparameter	47
Tabelle 5. 8: Basismodelstudie.....	48
Tabelle 5. 9: Wärmeentzugsleistung in verschiedenen Jahren	50
Tabelle 5. 10: Wärmestrom durch die einzelnen Kollektorrohren	50
Tabelle 5. 11: Variation Rohrtemperatur.....	52
Tabelle 5. 12: Variation Wärmedurchlasskoeffizient.....	53
Tabelle 5. 13: Variation Rohrdurchmesser.....	54
Tabelle 5. 14: Variation Rohrabstand.....	54
Tabelle 5. 15: Nördliche Ausrichtung des Geländes	55
Tabelle 5. 16: Südliche Ausrichtung des Geländes	55
Tabelle 5. 17: Westliche/Östliche Ausrichtung des Geländes.....	56
Tabelle 5. 18: Simulationsparameter - Grabenkollektoren.....	57
Tabelle 5. 19: Studie Grabenkollektoren.....	57
Tabelle 5. 20: Wärmeentzugsleistung in verschiedenen Jahre	58
Tabelle 5. 21: Wärmestrom (aus 11fm Rohr) durch die einzelnen Kollektorrohre.....	58
Tabelle 5. 22: Variation Grabenbreite	60

Tabelle 5. 23: Variation Grabentiefe 60

Tabelle 5. 24: Variation Rohrabstand..... 61

Tabelle 5. 25: Simulationsparameter Steilkollektoren 61

Tabelle 5. 26: Studie Steilkollektoren 62

Tabelle 5. 27: Ergebnisse Steilkollektoren..... 62

Tabelle 5. 28: Wärmeentzugsleistung in verschiedenen Jahren, 2400h/a 62

Tabelle 5. 29: Einfluss von Boden auf die Leistungen verschiedener Typen von Kollektoren 65

Tabelle 5. 30: Wärmeentzugsleistung der Flächenkollektoren in verschiedenen Jahren in Abhängigkeit vom Boden, 2400h/a..... 66

Tabelle 5. 31: Einfluss von Klima auf die Leistungen verschiedener Typen von Kollektoren..... 68

Tabelle 5. 32: Einfluss der Betriebsart auf die Leistungen verschiedener Typen von Kollektoren 70

Tabelle 5. 33: Wärmestrom für 1 m³ Aushub und durch 1 lfm Kollektorrohr 72

Tabelle 6. 1: Heizleistungsbedarf je nach Baustandart [25]..... 73

Tabelle 6. 2: Eckdaten Einfamilienhaus in Niederösterreich [28]..... 74

Tabelle 6. 3: Eckdaten Büroturm Uniqa Tower Wien [28] 75

Tabelle 6. 4: Eckdaten Bürogebäude [31] 76

Tabelle 6. 5:Eckdaten Schienenheizung..... 77