Vorwort

Ich möchte mich herzlich bei Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam bedanken, der mir erlaubte und ermöglichte, diese Arbeit am Institut für Geotechnik verfassen zu können.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Kohlböck für seine Betreuung und besonders für seine Geduld, Toleranz und sein außerordentliches Engagement bedanken.

Ich bedanke mich bei Prof. Dr.techn. h.c. Georg Stefanoff, der mein Interesse an der Bodenmechanik geweckt hat, von ganzem Herzen.

Ich danke auch meiner Familie, von der ich großzügige Unterstützung während meines ganzen Aufenthalts in Wien erhalten habe.

Zuletzt möchte ich mich bei meinen Studienkollegen bedanken, die mich mit Rat und Hilfe unterstützt haben.

Kurzfassung

Diese Studie umfasst die Untersuchung von Dämmen als alternative Wärmequelle für Straßenheizung bzw. -kühlung oder für Gebäudeheizung. Dämme werden mit spezifischem Material gebaut, dessen Eigenschaften sich unter Umständen von dem anstehenden Bodenmaterial bei Flächenkollektoren unterscheiden können. Ebenso unterscheidet sich dieses System von den so genannten Massivabsorber, bei denen Absorberleitungen in massige Betonelemente eingelegt werden (z.B. bei Flach- und Tiefgründungen). Die Rohrleitungen, über die der Wärmeentzug erfolgt, haben ähnliche Dimensionen und Materialien wie bei anderen Anlagen, aber die Absorbertypen können sich unterscheiden. Zur Verwendung gelangen Flächenkollektoren und Energievliese, deren Eigenschaften schon wissenschaftlich untersucht wurden.

Die numerische Modelluntersuchung ist ein erster Schritt zur Ermittlung, wie viel thermische Energie sich aus den Dämmen entziehen lässt und ob diese für die teilweise oder volle Straßen- bzw. Gebäudeheizung ausreichend ist. Die wärmetechnischen Bodenparameter können aus bisherigen Untersuchungen übernommen werden. Im Modell werden dann die Modellparameter wie Elementgröße, Rohrtemperatur und Wärmedurchlaßkoeffizient des Rohres untersucht. Basierend darauf wird danach die Variation der Lagenanzahl und der Kollektoranzahl untersucht. Dabei liefern diese Untersuchungen wichtige qualitative und quantitative Zusammenhänge bei der geothermischen Nutzung von Dämmen.

Abstract

This study includes the investigation of embankments as an alternative heat source for heating and cooling of nearby roads or buildings Energy dams can be compared with conventional shallow geothermal energy sources (i.e. horizontal ground heat exchangers). However, embankments are built with specific material, which can have different material properties in comparison to the soil around horizontal ground heat exchangers. Additionally, the collector pipes can have different material properties in comparison to those, used in earth-coupled concrete structures, as piles, diaphragm walls etc. The so called “energy geotextile”, known from heat exchanger system in tunnels, can also be used in embankments.

In a first step, a numerical simulation is performed in order to determine the amount of extractable thermal energy. The thermal soil- and collector parameters and other model parameters (i.e. grid size) are adapted and the influences of these parameters are investigated. The amount of collector pipes, in a single, double or triple layer system is simulated. Hence, the optimum collector system can be derived, which provides the most efficient solution for the embankment. This is especially important to determine, whether the extractable thermal energy is sufficient for the heating and cooling of nearby buildings and roads.

Резюме

Това проучване обхваща насипите като алтернативен топлинен източник за отопление или охлаждане на пътища или сгради. Насипите биват изграждани по специфичен начин и със специфични материали, които според обстоятелствата, могат значително да се различават от тези, използвани при площните абсорбатори, положени в земята. Насипите се различават значително и от масивните абсорбатори, системи при които абсорбиращите проводници се полагат в масивни бетонови части при плиткото и дълбокото фундиране. Колекторите, чрез които се осъществява топлоизвличането, са подобни на използваните в останалите системи както по материал, така и по диаметър, но вида и разположението им могат да се различават. В насипите могат да се използват термоземни колектори и енергийни нетъкани текстили, чиито качества са вече добре познати.

Изследването чрез числен модел е една първа стъпка към изчислението на това, колко енергия може да се извлече от насипите и дали това би било достатъчно за частично или пълно отопление на пътища или сгради. Топлотехническите почвени параметри, използвани в изследването, са взети от досегашни проучвания на почвите. Първоначалните вариации, наблюдавани в модела, са неговите характеристики като големина на мрежата, температура на тръбите, коефициент на топлопроводимост на самите тръби и др. На базата на тези величини се правят вариации за броя на слоевете и броя на тръбите (колектори). Тези проучвания показват някои важни качествени и количествени връзки, описващи извличането на топлината от насипи. Преносът на топлината към пътищата и близките сгради е вече относително добре изследван и се счита за опознат.

1 Einleitung ... 8
2 Grundlagen ... 9
2.1 Physikalische Grundlagen ... 9
2.1.1 Wärme ... 9
2.1.2 Temperatur ... 10
2.1.3 Wärmetransport ... 11
2.2 Thermische Bodeneigenschaften ... 17
2.2.1 Physikalische Größen ... 17
2.2.2 Auswirkungen von Temperaturänderung auf den Boden (Markiewicz, 2004) ... 20
2.2.3 Temperaturgradient ... 22
2.3 Grundlagen der Geothermie ... 23
2.3.1 Das Funktionsprinzip ... 23
2.3.1.1 Wärmepumpe ... 23
2.3.1.2 Gewinnungskreislauf ... 25
2.3.1.3 Nutzungskreislauf ... 25
2.3.1.4 Erdwärmeanlagen ... 26
3 Dammtypen und Absorbertechnologie ... 33
3.1 Allgemeines ... 33
3.2 Begleitdämme ... 33
3.3 Straßendämme ... 36
3.4 Andere Dämme und Bauten ... 36
3.5 Absorber ... 37
3.5.1 Arten ... 37
3.5.2 Anordnung der Absorberleitungen im Damm ... 38
3.6 Einbau und Leitungsführung ... 41
4 Simulation ... 42
4.1 Allgemein ... 42
4.2 Simulationsprogramm ... 42
4.3 Modell ... 42
4.3.1 Geometrie ... 43
4.3.2 Materialeigenschaften ... 44
4.3.3 Rand- und Anfangsbedingungen ... 45
4.3.4 Netz ... 49

4.3.5 Parameterstudie und Auswertung ... 51
4.3.5.1 Variation Basismodellparameter ... 51
4.3.5.2 Variation Lagenanzahl ... 61
4.3.5.3 Variation Kollektoranzahl ... 67
4.3.5.4 Variation Bodenparameter ... 73
4.3.5.5 Endgültiges Modell ... 75
4.4 Interpretation ... 76
4.4.1 Temperaturverlauf im Dammkörper ... 76
4.4.2 Berechnung der Wärmeleistung für Straßenbeheizung ... 80
5 Nutzung der Erdwärme aus Dämmen ... 82
5.1 Straßenheizung ... 82
5.2 Betriebsgebäude und Familienhäuser ... 84
6 Zusammenfassung ... 85
7 Anhang - Tabelle zur Beschreibung der Modell- und der Variationsparameterstudie. ... 87
8 Literaturverzeichnis ... 96
9 Abbildungsverzeichnis ... 98
10 Tabellenverzeichnis ... 101

1 Einleitung

Im Inneren der Erde gibt es riesige Mengen von thermischer Energie. Seit einigen Jahrzehnten benutzt die Menschheit diese Energie als Wärme. Man spricht von oberflächennaher Geothermie (Erdwärme bis Tiefen von ca.150-200m). Die Temperatur der Luft schwankt mit der Jahreszeit sehr stark. Innerhalb der oberen Schichten der Erde werden diese Temperaturen jedoch nicht bzw. nur sehr stark gedämpft nachvollzogen. Aus mathematischer Sicht folgt der Temperaturverlauf einer harmonischen Schwingung. In 5 bis 15 m Tiefe entspricht die im Boden gemessene Temperatur praktisch der Jahresmitteltemperatur des Standortes (ca. 8 bis 10 °C in Mitteleuropa). Erdwärme ist die in den obersten Schichten der Erde gespeicherte Wärmeenergie. Im Wesentlichen ist die Erdwärme von der Sonneneinstrahlung in das Erdreich eingebracht, so dass nur ein sehr kleiner geothermischer Wärmestrom aus dem Erdmantel kommt. (Abb. 1.) Dieser bestimmt den geothermischen Gradienten, der je nach geographischer Lage eine Temperaturzunahme von etwa 3 °C pro 100 m vertikaler Tiefe hervorruft. Der Grund dafür ist der Zerfall radioaktiver Elemente im Erdmantel. Wenn man 1m^3 Boden um 1 °C abkühlt, erhält man 1 kWh thermische Energie. Unter einem Standardhaus bis 20 m Tiefe befinden sich 2000 m^3 Boden.

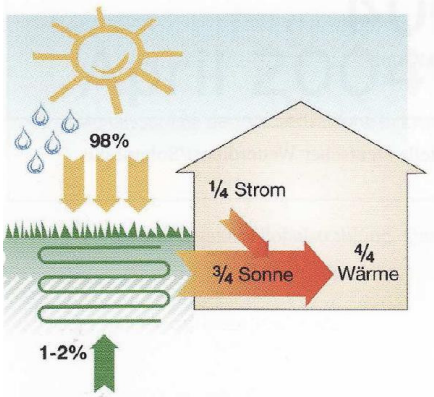


Abb. 1 Erdwärmenutzung- Schema. (Zauner, 2009)

Mittels Erdwärmesonden (vertikale Bohrungen), Erdwärmekollektoren (horizontal und oberflächennah ins Erdreich eingebrachte Systeme), Erdwärmekörbe und mit erdgebundenen Beton-Bauteilen wird die Wärme an die Oberfläche befördert. Mit der Entwicklung der Wärmepumpe ist es möglich, die Temperaturen der entzogenen oberflächennahen Erdwärme auf ein höheres Niveau anzuheben, um diese zum

Heizen zu nutzen. Erdwärme kann aber auch zum Kühlen verwendet werden. Es wird eine Kältemaschine eingesetzt oder die „Kälte" des Erdreiches wird direkt zur Kühlung benutzt. So kann die Erdwärme zum Heizung oder zur Kühlung verwendet werden. Bei Familienhäusern, öffentlichen Gebäuden, U-Bahn-Stationen, sogar schon bei Straßen und Brücken ist diese Art der Heizung bzw. Kühlung im Einsatz. Durch die Nutzung von Wärmepumpen können ca. ¾ der Heizenergie aus dem Boden gewonnen werden, während ¼ der Energie für den Betrieb der Wärmepumpe notwendig ist. Im Vergleich zu Strom, Gas, Erdöl und zu anderen Heizsystemen, ist die Erde als Heizquelle ökologisch rein und ruft keinen Treibhauseffekt hervor, da keine Abgase ausgeschieden werden. (Markiewicz, 2004)

Heute ist es Stand der Technik, konstruktiv ohnehin erforderliche, erdberührte Bauteile wie Schlitzwände, Pfähle und Fundamentplatten als Absorber zu nutzen. Die Auslegung solcher Anlagen basiert im Wesentlichen auf dem Prinzip einer Massivabsorberanlage. Bis jetzt hat man Erdwärmequellen wie Dämme nicht untersucht, obwohl sie für andere Zwecke gebaut werden und für Erdwärme benutzt werden könnten. In dieser Arbeit wird daher die Erdwärmenutzung von Dämmen näher untersucht.

2 Grundlagen

2.1 Physikalische Grundlagen

2.1.1 Wärme

Wärme (auch Wärmemenge) ist eine physikalische Größe. Sie kann sowohl mikroskopisch durch die Kinetische Theorie (Gastheorie), als auch makroskopisch durch die Thermodynamik (klassische Wärmelehre) beschrieben werden. Die Wärme ist über die Temperatur mit der Entropie verknüpft, Satz von Clausius:

$$\delta Q = \delta S.T$$

δQ übertragene Wärme, J

δS Entropie, J/K

T absolute Temperatur, ° K

Nach der Kinetischen Theorie ist Wärme eine ungeordnete Molekülbewegung. Die einzelnen Moleküle eines Körpers bewegen sich zufällig und unabhängig voneinander, ohne die Bewegung des Körpers zu beeinflussen. Wärme bezeichnet man als kinetische Energie dieser ungeordneten Molekülbewegung. (Kaller, 2007)

$$\bar{W} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \overline{v^2},$$

$\bar{W}$ mittlere kinetische Energie, J = Ws = Nm = kg x m/s² x m

m Masse, kg

$\overline{v^2}$ Mittelwert der Geschwindigkeitsquadrate der Moleküle m²/s²

Für Wärme gilt der Energieerhaltungssatz: Der gesamte Energieinhalt eines abgeschlossenen Systems bleibt unverändert. Diese Energie wird nach Kelvin als innere Energie *U* bezeichnet. Die Änderung der inneren Energie *ΔU* eines geschlossenen Systems ergibt sich durch die Summe von übertragener Wärme *ΔQ* und mechanischer Arbeit *ΔW*.

Kurzer Überblick über die Thermodynamischen Grundsätze:

0. Hauptsatz: „Stehen zwei Systeme jeweils mit einem dritten im thermodynamischen Gleichgewicht, so stehen sie auch untereinander im Gleichgewicht."

1. Hauptsatz: „Energie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur in andere Energiearten umgewandelt werden."

2. Hauptsatz: „Thermische Energie ist nicht in beliebigem Maße in andere Energiearten umwandelbar."

3. Hauptsatz: „Der absolute Nullpunkt der Temperatur ist unerreichbar." (www.wikipedia.org, 2009)

2.1.2 Temperatur

Als physikalischer Prozess steckt hinter der Temperatur eine mechanische Bewegung. Temperatur ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie der Moleküle

(Vogel, 1997). Die Temperatur eines Körpers wird durch das mittlere Geschwindigkeitsquadrat der einzelnen Teilchen bestimmt.

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot \overline{v^2} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \ ,$$

k Boltzmannkonstante k = $1{,}381 \cdot 10^{-23}$, J/K

T Temperatur, °K

$\overline{v^2}$ Mittelwert der Geschwindigkeitsquadrate der Moleküle m²/s²

2.1.3 Wärmetransport

Entstehen zwischen Teilen eines Körpers Temperaturunterschiede, gleichen sich diese aus. Dieser Ausgleich benötigt Zeit, da pro Zeiteinheit nur eine beschränkte Wärmemenge in ein begrenztes System transportiert werden kann. Der Wärmeübertragung erfolgt in Richtung des Temperaturgradienten. Es gibt mehrere Möglichkeiten für Wärmetransport: (Markiewicz, 2004)

- Wärmeleitung (Konduktion);
- Wärmestrahlung (Radiation);
- Wärmeübergang (Konvektion);
- Verdampfungs- und Kondensationsprozesse;
- Ionenausausch;
- Frost-Tau-Vorgänge;

Die maßgeblichsten Transportprozesse in ungefrorenen Böden sind die Wärmeleitung, der Wärmeübergang (Konvektion) und der Wärmeübergang aufgrund einer Phasenänderung des Wassers (Latente Wärme bei Verdampfung oder Kondensation). Bei Frost-Tau-Vorgängen werden auch maßgebende Mengen von Wärme transportiert. (Markiewicz, 2004)

Auch im Gleichgewichtszustand (gleiche Temperatur) tauschen Systeme Wärme aus. Allerdings sind die abgegebenen und aufgenommenen Wärmemengen gleichgroß, so dass die Effekte einander kompensieren.

Wärmeleitung (Konduktion)

Wärmeleitung betrifft molekularen oder atomaren Wärmetransport. Die Wärmemenge, die in einer bestimmten Zeiteinheit *t* je Fläche *A* übergeht, wird als Wärmestromdichte $\dot{q}$ bezeichnet. Diese Art der Wärmeübertragung ist irreversibel und transportiert die Wärme, immer vom höheren Energieniveau (mit höherer absoluter Temperatur) auf das niedrigere Niveau (mit niedrigerer Temperatur). Der Temperaturgradient wird mit der Wärmeleitfähigkeit λ nach dem Fourier'schen Grundgesetz beschrieben. (Markiewicz, 2004)

$$\dot{q}_{kond} = \frac{Q}{At} = \frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial \vec{n}}, \qquad \text{W/m}^2$$

Q Wärmemenge, W

A Fläche, m^2

t Zeit, s

$\vec{n}$ aktuelle Strömungsrichtung

λ Wärmeleitfähigkeit, W/(mK)

Mit der Wärmeleitung ist auch die physikalische Größe Temperaturleitfähigkeit (Diffusivität) a verbunden. Sie lässt sich wie folgt ausdrücken und beschreiben.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}, \text{ m}^2\text{/s}$$

λ Wärmeleitfähigkeit, W/mK

c spezifische Wärmekapazität , Ws/kgK (siehe S. 19)

ρ Dichte des Bodens, kg/m^3

Wärmestrahlung (Radiation)

Die Wärmestrahlung ist ein immaterieller Wärmetransport, der die Oberflächenteile betrifft. Sie ist der einzige Wärmetransportmechanismus im Vakuum, da ihr die elektromagnetische Welle zugrunde liegt. Meist wird die Energie durch Infrarotwellen,

die ein Teil des elektromagnetischen Spektrums sind, transportiert. Hier strömt die Energie in beide Richtungen, von Wärmequelle zur Wärmesenke und umgekehrt. Der Wärmestrom von warm nach kalt ist aber immer größer als dieser rückwärts, so dass die Resultierende von beiden Wärmeströmen immer von warm nach kalt zeigt. Diese Transportart wird durch das Bolzmansche Gesetz beschrieben. Jeder Körper strahlt Energie aus, deren Menge von der Temperatur des Körpers bestimmt wird.

$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$, W/m^2

E … Strahlungsenergie, W/m²
ε … Emissionskoeffizient, 0-1, %/100
σ … Stefan-Boltzmannkonstante 5,67·10^{-8} , W/(m²K^4)
T … Temperatur, K

Der Emissionskoeffizient ist eine physikalische Größe, die die Emissionsfähigkeit des Körpers beschreibt. Der Emissionskoeffizienten nimmt Werte zwischen 0 und 1 an. (Kaller, 2007). Für die Wärmestromdichte bei Abstrahlung sieht die Gleichung folgendermaßen aus:

$\dot{q}_s = a_s \cdot \Delta T$, W/m^2

$a_s = C \cdot b$, W/(m^{2}K)

$C = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon$, W/(m^{2}K)

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

Wärmeübergang (Konvektion)

Bei dieser Transportart ist immer ein Massentransport vorhanden. Der tritt bei flüssiger oder in gasförmiger Phase auf. Die Konvektion kann erzwungen oder frei sein. Bei freier Konvektion handelt es sich um Massentransport, der durch Dichteunterschiede hervorgerufen wird. Das passiert, wenn ein Fluid in ein Gravitationsfeld gestellt wird. Die wärmeren und leichteren Teilchen bewegen sich nach oben, und die kälteren und schwereren Teilchen nach unten. Diese Wärmebewegung, die durch einen molekularen oder atomaren Ortswechsel

zustande kommt, wird Wärmediffusion genannt. Die erzwungene Konvektion entsteht, wenn eine erzwungene Druckdifferenz hergestellt wird. Dazu braucht man eine äußere Energie, die das Fluid bewegen kann. Beispiele dafür sind Pumpen, Ventilationsanlagen u. a. (Kaller, 2007)

Wärmeübergang - Wärmeaustausch zwischen einem festen Körper und einem Fluidum (Beispiel Straße und Luft).

$\dot{q} = \Lambda \cdot \Delta T$, W/m^2

Λ Wärmedurchlaßkoeffizient, W/(m²K) (siehe auch S. 19)

$\Lambda = 6,2 + 4,2 \cdot w$, w<5 Strömungsgeschwindigkeit (Windgeschwindigkeit), m/s

$\Lambda = 7,15 \cdot w^{0,78}$, w>5 m/s

Diese Wärmetransportart geschieht im Boden durch Wasser- bzw. Luft- (Dunst) Konvektion. Die Gleichung für die Berechnung der Flüssigkeitskonvektion im Boden lautet:

$\dot{q}_{konv-F} = c_w \rho_w \overline{v}_w (T_B - T_B^{'})$, W/m^2 – flüssig (Wasser)

c_w spezifische Wärmekapazität des Bodenwassers, Ws/kgK

ρ_w Dichte des Wassers, kg/m^3

$\overline{v}_w$ Geschwindigkeitsvektor (nach *Darcy.* $v_w = k.i$ *), m/s*

$T_B^{'}$ Referenztemperatur , °C

T_B Bodentemperatur , °C

$\dot{q}_{konv-L} = c_L \rho_L \overline{v}_L (T_B - T_B^{'})$, W/m^2 – gasförmig (Luft)

Verdampfungs- und Kondensationsprozesse (Kaller, 2007)

Die Verdampfungswärme ist jene Energie die benötigt wird, um eine bestimmte Menge Fluid vom flüssigen in den gasförmigen Zustand zu bringen. Kondensation

bezeichnet den umgekehrten Prozess, bei dem der Aggregatzustand unter bestimmten Bedingungen von gasförmig zu flüssig übergeht.

Verdunstung einer ruhenden Wasserfläche und an die Luft übertragene Wassermenge:

$\dot{m}_w = \sigma \cdot A \cdot (x_s - x)$, kg/h

$\sigma = 25 + 19 \cdot w$, kg/(m^{2}h)

σ Verdunstete Wassermenge pro m^2 pro Stunde
w Windgeschwindigkeit, m/s
$\dot{m}_w$ Verdunstete Wassermenge pro Zeiteinheit, kg/h
A Wasseroberfläche, m^2
x Feuchtgehalt der Luft, kg/kg
x_s Feuchtgehalt der gesättigten Luft bei t_0 , kg/kg

Die Temperatur an der Grenze des Wassers und der Luft t_0 ist niedriger als Temperatur des Wassers. Der Temperaturunterschied kann in einer 1 mm dicken Schicht einige Grad K betragen, Gleichung nach Häussler:

$t_0 = t_i - \frac{1}{8} \cdot (t_i - t_f)$, °C

t_0 Temperatur der Wasseroberfläche, °C
t_f Feuchtkugeltemperatur, °C
t_i Temperatur im Wasserinneren, °C

Wärmestromdichte aus Massestrom:

$\dot{q}_v = \frac{\dot{m}_w}{A} \cdot r_w \cdot \frac{1}{3,6}$, W/m^2

$\dot{m}_w$ verdunstete Wassermasse pro Zeit, kg/h

A Wasseroberfläche, m²

$r_w = 2256$ Verdampfungswärme, kJ/kg

Im Boden betrachtet man den Phasenwechsel des Wassers (Verdunstung). Dieser Prozess charakterisiert sich mit hoher latenter Energie, deren Größe stark von der Verdunstungsrate im Boden abhängt. Wärmefluss:

$\dot{q}_{lat} = L_0 \rho_w \overline{v}_L$, W/m^2

L_0 latente Verdunstungswärme, J/kg

ρ_w Dichte des Wassers, kg/m^3

$\overline{v}_L$ Geschwindigkeitsvektor der Luft, m/s

Frost-Tau-Vorgänge

Der Phasenübergang des Wassers bei Vereisung und beim Schmelzen wird durch die Frost –Tau-Prozesse beschrieben. Die latente Wärme eines solchen Übergangs beträgt 334 kJ pro kg (Eis zu Wasser). Zu beachten ist, dass bei Temperaturen zwischen 0 und -2 Grad, welche unsere Kühlsysteme erreichen können, nicht das ganze Wasser im Boden frieren kann. Das Mikrowasser z.B. braucht Temperaturen unter -17 °C um in Eis überzugehen. (Алексиев, Стефанов, & др., 1989)

Grafische Darstellung der Wärmetransportarten und deren Bedeutung bei den verschiedenen Bodenarten ist in Abb. 2 dargestellt. Hauptsächlich wird der Wärmetransport durch Wärmeleitung realisiert, aber bei Schluff und Ton können auch andere Transportarten von Bedeutung sein. (Kaller, 2007)

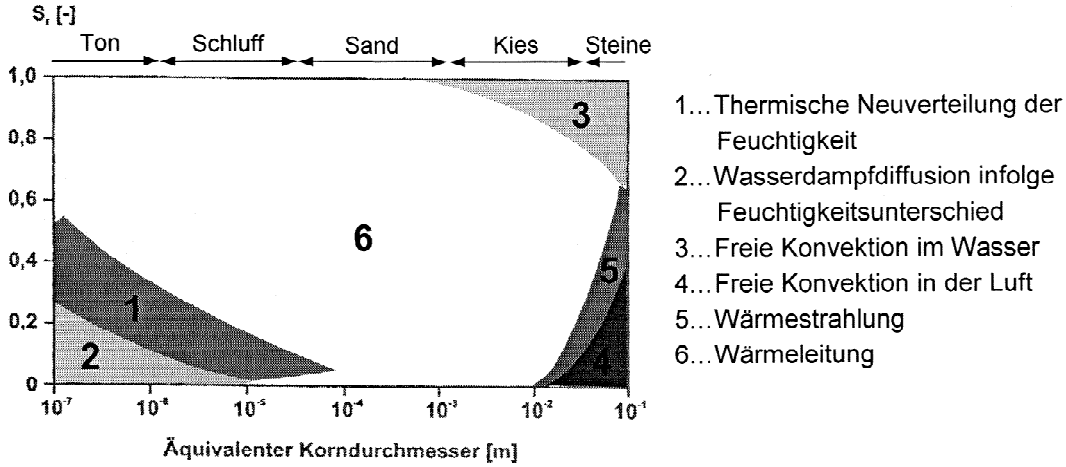


Abb. 2 Dominierende Wärmeübertragungsmechanismen in Abhängigkeit vom Korndurchmesser und Sättigungsgrad. (Markiewicz, 2004)

2.2 Thermische Bodeneigenschaften

Der Boden lässt sich als ein Dreiphasensystem darstellen. Das bestimmt einige sehr variable thermische Parameter des Erdreichs. Wegen seiner hohen Wärmekapazität und hohen Wärmeleitfähigkeit hat das Wasser einen großen Einfluss auf die thermischen Eigenschaften des Bodens. Dadurch unterscheiden sich sandige und kiesige Böden von tonigen und schluffigen Böden. Feinkörnige Böden haben einen größeren Porenanteil, was mit einem höheren Wassergehalt des Bodens verbunden ist. Dies resultiert letzlich in einer höheren Wärmekapazität und höheren Wärmeleitfähigkeit.

2.2.1 Physikalische Größen

Temperaturleitfähigkeit a

Die Temperaturleitfähigkeit hängt vom Bodenaufbau, der Bodenstruktur und dem Wassergehalt ab. Bei konstanten Randbedingungen ist die Temperaturleitfähigkeit entscheidend für die Zeit des Temperaturausgleichs im Erdreich. Je höher die Temperaturleitfähigkeit ist, desto schneller pflanzt sich die Temperaturwelle im Boden fort. Die Gleichung in Punkt 2.1.3 zeigt die Zusammensetzung der Bodenkenngrößen, die die Temperaturleitfähigkeit bestimmen. Die Dichte, die

Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität geben eine Näherung der temperaturabhängigen Materialparameter.

Wärmeleitfähigkeit λ

Die Wärmeleitfähigkeit hängt von den Stoffkomponenten und ihrer räumlich-geometrischen Anordnung ab. Die Luft ist ein schlechter Wärmeleiter und für die Wärmeleitung nicht maßgebend. Der Wärmetransport im Erdreich erfolgt hauptsächlich durch Wärmeleitung. Wärmeleitung tritt nur bei flüssiger und fester Phase auf. Das bestimmt die Dichte und den Wassergehalt des Bodens als maßgeblich für die Wärmeleitfähigkeit. Abb. 3 zeigt wie die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Dichte und zunehmendem Wassergehalt steigt.

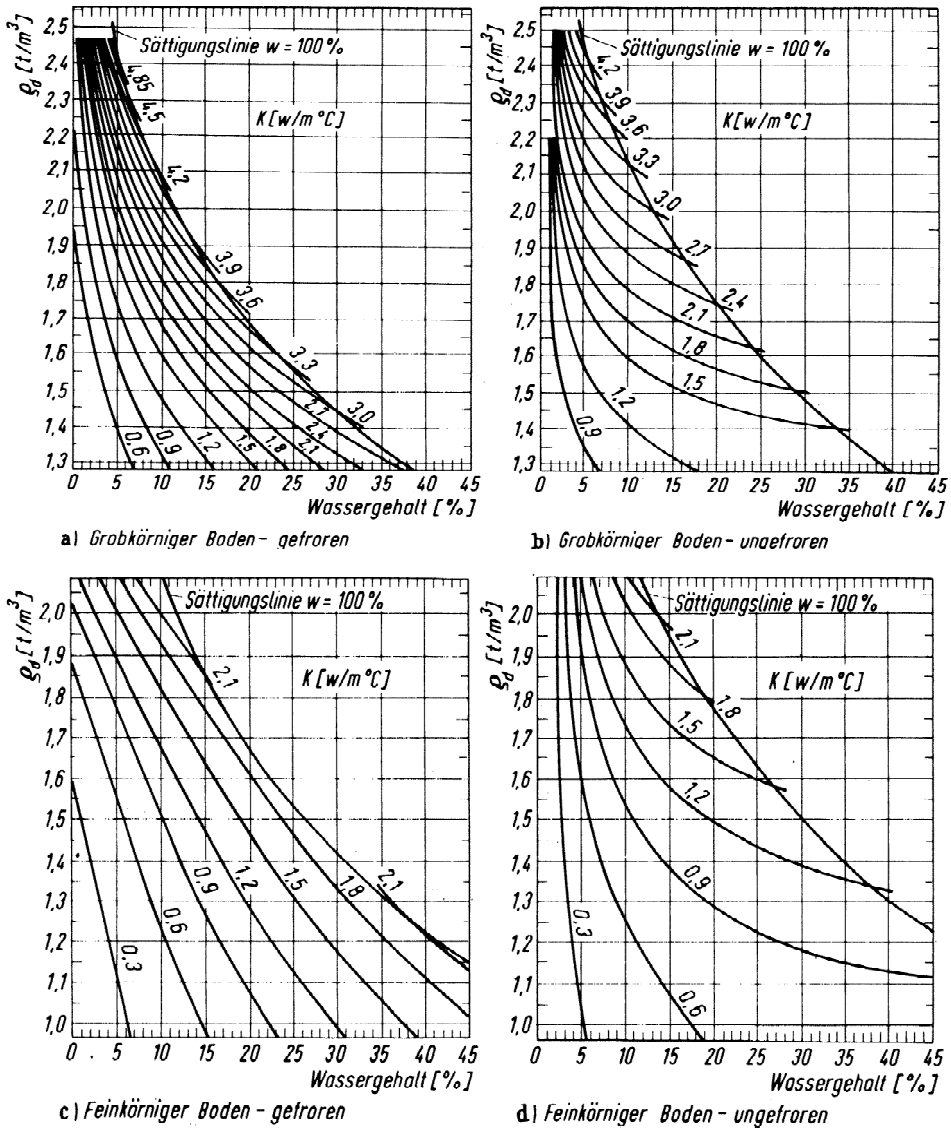


Abb. 3 Wärmeleitfähigkeit des Bodens (λ≡K) in Abhängigkeit von Trockendichte (ρ) und Wassergehalt. Zusammengestellt. (Heidenreich, 1999)

Ein weiterer Faktor, der die Wärmeleitfähigkeit wesentlich beeinflusst ist der Porenanteil (Abb. 4).

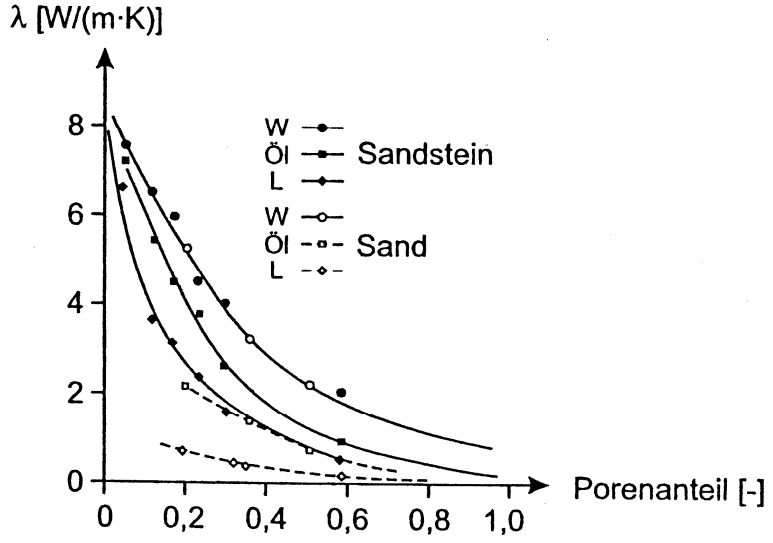


Abb. 4 Einfluss von Porenanteil und Poreninhalt (Wasser (W), Öl (Öl), Luft (L)) auf die Wärmeleitfähigkeit (λ) von Sandstein und Sand. (Ennigkeit, 2002)

Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische WärmekapazitäWs/(kgK) gibt die Wärmemenge *Q*, Ws (J) an, die benötigt wird, um einen Stoff mit 1 kg Masse um 1 K zu erwärmen.

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}, \quad \text{Ws/kgK}$$

m Masse, kg

ΔT Temperaturdifferenz, K

Q Wärmemenge, Ws

Die Wärmekapazität kann auch durch additive Überlagerung der Einzelkomponente ausgedrückt werden, wenn die Volumina der einzelnen Anteile bekannt sind.

$$c_b = c_s x_s + c_w x_w + c_L x_L, \quad \text{Ws/kgK}$$

x jeweiliger Volumenanteil (x_s=1-n; x_w =nS; x_L =n(1-S)

n Porenanteil

S Sättigungszahl

Der Index *s* kennzeichnet den Feststoffgehalt, *w* den Wassergehalt und *L* die Porenluft.

Es wird oft die volumetrische Wärmekapazität benutzt, die durch die spezifische Wärmekapazität und die Dichte der Bestandteile des Bodens errechnet wird.

$c_{V,B} = \sum \rho_i c_i x_i$, Ws/(m^{3}K)

In der Tab. 1 sind die wärmetechnischen Parameter einiger Bodenarten Zusammengestellt.

		Trocken dichte	Wasser-gehalt	Feucht-dichte	Wärmeleit-fähigkeit		spez. Wärmekapazität	Temperaturleit-fähigkeit (Diffusivität)	
		$\rho_{B,d}$	w	$\rho_{B,t}$	$\lambda_{B,min}$	$\lambda_{B,max}$	c_B	$a_{B,min}$	$a_{B,max}$
		[kg/m^3]	[%]	[kg/m^3]	[W/(mK)]		[Ws/(kgK)]	[m^2/s]	[m^2/s]
Ton	von	1200	20	1440	0.9	1.4	1836	3.4E-07	5.3E-07
	bis	1600	40	2240	0.9	1.4	2672	1.5E-07	2.34E-07
Schluff	von	1400	10	1540	1	2	1418	4.58E-07	9.16E-07
	bis	1800	30	2340	1	2	2254	1.9E-07	3.79E-07
trockener Sand	von	1700	4	1768	1.1	2.2	1167	5.33E-07	1.07E-06
	bis	2000	12	2240	1.1	2.2	1502	3.27E-07	6.54E-07
nasser Sand	von	1700	10	1870	1.5	2.7	1418	5.66E-07	1.02E-06
	bis	2100	18	2478	1.5	2.7	1752	3.45E-07	6.22E-07
Torf	von	400	5	420	0.2	0.5	1209	3.94E-07	9.85E-07
	bis	1100	200	3300	0.2	0.5	9360	6.48E-09	1.62E-08

Tab. 1 Wärmetechnische Bodenparameter (Markiewicz, 2004), modifiziert

2.2.2 Auswirkungen von Temperaturänderung auf den Boden (Markiewicz, 2004)

Physikalische Eigenschaften

Bei Schwankungen der Grundwassertemperatur schwankt auch die Viskosität (Niedrige Temperatur – hohe Viskosität). Wenn die Bodentemperatur von 9 auf 4 °C abgekühlt wird, erhöht sich die Viskosität um ca. 0.23x10^{-6}m^2/s und die Durchlässigkeit verringert sich um 0.25x10^{-3} m/s. Das bedeutet jedoch eine vernachlässigbare Änderung.

Chemische Eigenschaften.

Bei Erhöhung der Temperatur sinkt die Sauerstofflöslichkeit im Grundwasser, was die Trinkwasserversorgung beeinträchtigen kann. Mit der Abkühlung des Bodens nimmt der PH-Wert zu und die Löslichkeit von Calcium ab. Demgegenüber erreicht

man aber eine höhere Löslichkeit von Gasen, z.B. CO_2, die zu einer Aufhärtung des Wassers führt.

Biologische Eigenschaften

Die Organismen, die im Grundwasser leben, werden von den Temperaturänderungen beeinflusst, da diese oft nur in einem begrenzten Temperaturabschnitt existieren.

Mechanische Eigenschaften (Verformungen)

Bei Beton und Stahl wird schon lange Zeit die Temperaturverformung mit Hilfe des Hooke'schen Gesetzes beschrieben. Da der Boden aber kein ideal elastisches Material ist, führt man spezifische Untersuchungen zur Bestimmung des Materialverhaltens unter Temperaturänderung.

Durchgeführte Untersuchungen mit reine Tonmineralen, wie z.B. Kaolinit und Illit zeigen, dass erst ab Temperaturen von 400°C bedeutsame Dehnungen und Stauchungen festgestellt wurden. Die an der Technische Universität Darmstadt durchgeführte Untersuchungen zeigten aber folgende Effekte bei Temperaturänderungen von Tonen:

- Austrocknung: Die Dehnung des freien Porenwassers, das einen höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten besitzt als die Tonminerale selbst, führt zu einer Steigerung des Porenwasserdruckes. Dies kann zum Austrocknen des Bodens in den wärmeren Zonen führen, wodurch Schrumpfungsvorgänge und damit Setzungen verursacht werden. In den kälteren Zonen findet demnach eine Wasseransammlung statt, die zum Quellen des Bodens führen kann. (Markiewicz, 2004)

- Thermische Verfestigung: Die Erwärmung von Tonböden führt zu einer Dehnung der Tonminerale, wodurch ein bestimmter Anteil der zwischen den Tonpartikeln bestehenden Bindungen aufgelöst wird. Diese Störung und die anschließende Neuordnung der inneren Struktur des Tons verursacht unter gleichbleibendem Druck eine Volumenreduktion. Diese Verdichtung, die bei Tonen mit höherem Anfangsporengehalt ausgeprägter auftritt, ist irreversibel. (Markiewicz, 2004)

- Veränderung des mechanischen Verhaltens unter Erwärmung: Eine Temperaturerhöhung führt zu einer Abnahme der Scherfestigkeit aufgrund der verminderten inneren Viskosität. Untersuchungen mit Schluff und Sand aber zeigen, dass der Zuwachs der E-Modul mit steigender Belastung bei wärmeren Boden größer wird.

- Konsolidierung unter Erwärmung: Bei höheren Temperaturen ist eine schnellere Konsolidierung festgestellt worden, die mit der niedrigen Viskosität des Porenwassers und folglich mit einer scheinbar höheren Durchlässigkeit des Bodens begründet werden kann. (Markiewicz, 2004)

.

2.2.3 Temperaturgradient

Zu den thermischen Boden-eigenschaften ist auch der Temperaturverlauf im Erdreich zu nennen. Der Temperaturgradient bestimmt die niedrigste Tiefe, die wenig von den Lutfttemperaturschwankungen beeinflusst wird. Für die vier Jahreszeiten ist der durchschnittliche Temperaturverlauf auf Abb. 5 gezeichnet. Bei geringerer Tiefe erfolgt die Wärmeregeneration hauptsächlich durch Sonnenstrahlung und Sickerwasser. Auch die Schneedecke ist relevant für die Bodentemperatur während und nach der Wärmeentzugs-periode, da diese eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit und eine geringe Durchlässigkeit aufweist und wie eine Isolationsschicht wirkt.

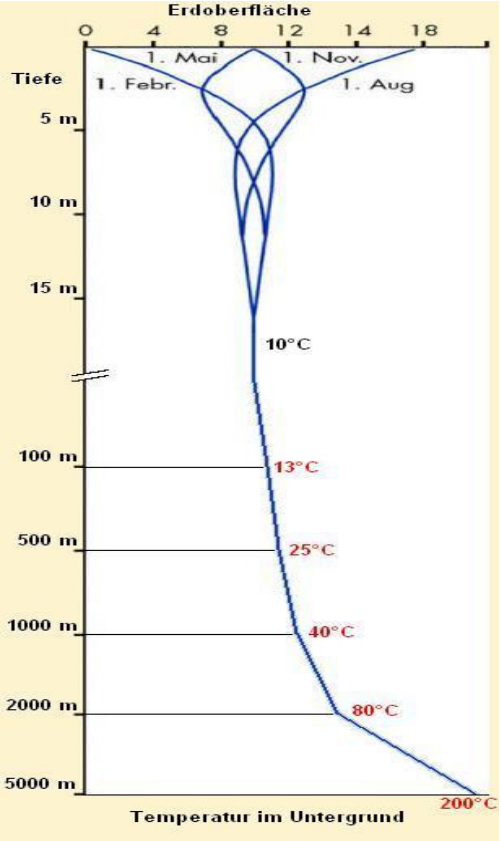


Abb. 5 Temperaturverlauf in verschiedenen Jahreszeiten im Erde. (www.gefga.de/geothermie.htm, 2009)

2.3 Grundlagen der Geothermie

2.3.1 Das Funktionsprinzip

Das Grundprinzip der Erdwärmenutzung besteht darin, dass die Wärmepumpe eine benötigte Erhöhung der Bodentemperatur ermöglicht. In der Regel enthält die systematische Gliederung der Erdwärmenutzung die folgenden drei Bereiche: Wärmeentnahme, Temperaturerhöhung und Wärmeabgabe, die auf Abb. 6 dargestellt sind.

Abb. 6. System der Erdwärmenutzung (Zauner, 2009)

2.3.1.1 Wärmepumpe

Das Prinzip der Wärmepumpe ist dasselbe wie ein Kühlschrank. Man braucht fremde Energie, um die nötige Temperaturerhöhung bzw. Temperaturerniedrigung zu verwirklichen. Der Wärmepumpenkreislauf ist auf (Abb. 7) gezeigt. Die Hauptteile der Wärmepumpe sind ein Kompressor und ein Expansionsventil. Normalerweise läuft die Wärmeübertragung auf diese Weise ab: vom Primärkreislauf zum Kältemittel beim Verdampfer und vom Kältemittel zum Sekundärkreislauf im Verflüssiger. Der Wärmepumpenkreislauf (Kältemittelkreislauf) wird durch die folgende Prozesse verwirklicht: Verdampfung, Verdichtung, Kondensation und Expansion. Diese Prozesse werden auch durch den Carnot Cyklus (Kreisprozess) beschrieben. (Markiewicz, 2004)

Auf der Abb. 8 sind zwei Carnot Kreisprozesse gezeigt, links - Idealer, rechts - Realer.

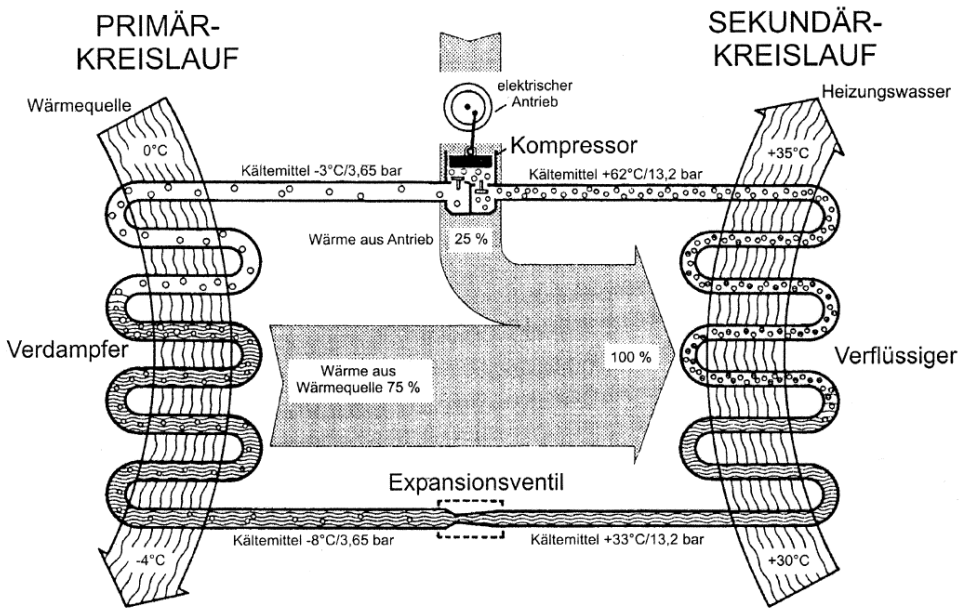


Abb. 7 Wärmepumpenkreislauf mit Temperaturen und Drücken, beispielsweise für das Kältemittel R290 (Staiß, 2001)

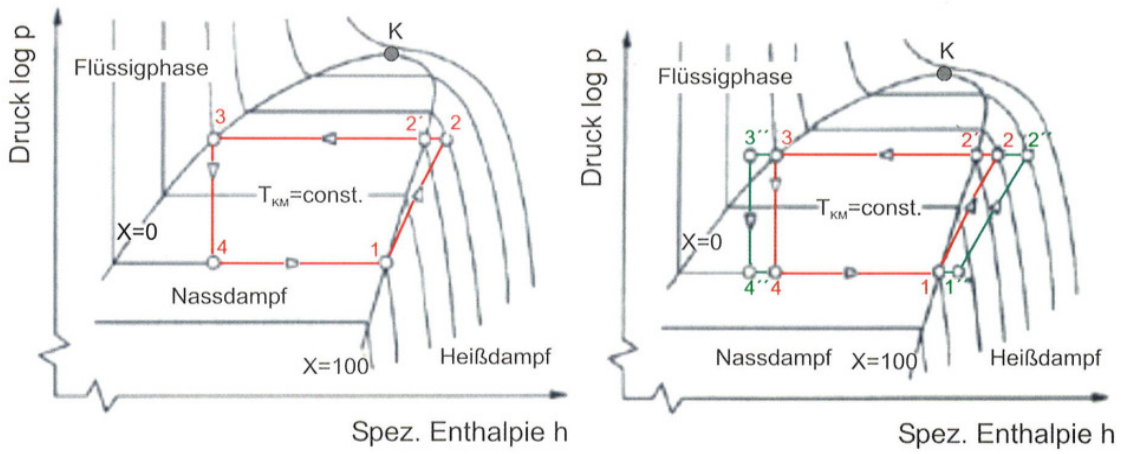


Abb. 8 Idealer (links) und realer (rechts) Kreisprozess. (Markiewicz, 2004)

Abb. 8 (links) sind die einzelnen Vorgänge für einen idealen Wärmepumpen-Kreisprozess eingetragen:

•1-2: isentrope (konstante Eutropie): Verdichtung bis zur Verdichtungsendtemperatur mit Überhitzung des Kältemittels; keine Wärmeabgabe.

•2-2': isobare (konstanter Druck): Abkühlung bis zur Verflüssigungstemperatur; Abgabe der Überhitzungsenthalpie $h_{2\text{-}2'}$.

•2'-3: isobare (konstanter Druck): Verflüssigung; Abgabe der Verflüssigungsenthalpie $h_{2\text{-}3}$. Die Temperatur bleibt beim Phasenübergang konstant!

•3-4: Entspannung in dem Nassdampfgebiet; keine Enthalpieabgabe; Abkühlung und teilweise Verdampfung.
•4-1: isobare (konstanter Druck) Verdampfung; Aufnahme der Verdampfungsenthalpie $h_{4\text{-}1}$. Die Temperatur bleibt beim Phasenübergang konstant! (Markiewicz, 2004)

Der Hauptgrund, dass bei idealem Carnot Kreisprozess Wärmeverluste entstehen, ist der Mangel an einer isentropen Verdichtung. Die Wärmeverluste werden hauptsächlich bei inneren Reibung der Moleküle und auch beim Verdichter als Ganzes realisiert. Das zeigt Linie 1“-2“ auf Abb. 8 (rechts). Auch eine Überhitzung des Kältemittels ist noch vor der Verdichtung notwendig, um die Kältemittel nicht flüssig zu lassen. Bei 3-3“ erfolgt eine Flüssigkeitsunterkühlung, die bei 4“-1 eine höhere Menge Verdampfungswärme benötigt.

2.3.1.2 Gewinnungskreislauf

Der Gewinnungskreislauf besteht aus Wärmetransportmitteln, Kollektoren und einer Umwälzpumpe. Der Wärmetransport zwischen dem Erdreich und den Kollektoren erfolgt nach dem Prinzip des Wärmeüberganges, welcher in Punkt 2.1.3, erläutert ist. Das hängt sowohl von den Bodeneigenschaften als auch von den Material-eigenschaften der Kollektoren ab.

Interessanter ist aber der Wärmetransport zwischen den Kollektorwänden und der Flüssigkeit, die die Wärme entnimmt. Das erfolgt meistens mittels einer erzwungenen Konvektion, die durch eine turbulente und eine laminare Schicht bestimmt ist. Der thermische Gradient im den Übergang wird stark durch diese Schichtung beeinflusst. Mit der Strömungsdynamik und Thermodynamik werden die Vorlauf-geschwindigkeiten und die Vorlaufenergiemenge bestimmt.

2.3.1.3 Nutzungskreislauf

Der Nutzungskreislauf betrifft den Bereich Wärme- und Klimaanlagentechnik. Das Wichtigste hier ist, dass die Temperatur des umgewälzten Heizmittels (des Wassers) möglichst niedrig bleibt, da der Auswirkungsgrad der Wärmepumpe mit steigendem

Temperaturunterschied zwischen Gewinnungskreislauf und Nutzungskreislauf abnimmt. Man benutzt Wärmeträger mit Umwälztemperatur bis 35 – 45 °C. Das erfordert besondere Heizanlagen, wie Fußbodenheizung, Wandheizungen oder spezielle Konvektoren.

Das Verhältnis von abgegebener Heizleistung zu aufgenommenen elektrischen Antriebsleistung, bezogen auf einen bestimmten Anlagenumfang und für ein bestimmtes Temperaturverhältnis wird bei einer Elektrowärmepumpe durch die Leistungszahl ε_{WP} (oder *COP* = Coefficient of Performance) definiert:

$$\varepsilon_{WP} = \frac{abgeg.Heizleistung}{el.Antriebsleistung} = 4 \div 5$$

Derzeit werden aus ökonomischen Gründen Leistungszahlen von $\varepsilon_{WP} > 4$ erreicht. (Markiewicz, 2004)

Zur Beschreibung der Effizienz der gesamten Wärmepumpenanlagen dient die Jahresarbeitszahl ε_a (oder *SPF* = Seasonal Performance Factor), die aus dem Verhältnis jährlich gelieferter Wärme (Heizarbeit) zu jährlich aufgenommener elektrischer Antriebsenergie, bezogen auf einen bestimmten Anlagenumfang, berechnet wird:

$$\varepsilon_a = \frac{Heizarbeit}{el.Antriebsarbeit} = 3.8 \div 4.3$$

Die Jahresarbeitszahl gibt an, wie viele Einheiten Nutzenergie mit einer Einheit Antriebsenergie (Strom) in der betrachteten Heizsaison erzeugt werden können. Es wird zusätzlich zur Antriebsarbeit des Kompressors auch der Energieverbrauch peripherer Komponenten, wie z.B. Umlaufpumpen, berücksichtigt. (Markiewicz, 2004)

2.3.1.4 Erdwärmeanlagen

Seit einigen Jahre hat sich die Anzahl der benutzten Erdwärmesysteme vergrößert. Verschiedene Erdwärmeanlagen kommen in neu errichteten Gebäuden zum Einsatz.

Flächenkollektoren

Flächenkollektoren belegt man in einer Tiefe von 1 – 2 m mit einem Abstand von 50 bis 80 cm. Solche Anlagen werden oft in Einfamilienhäusern geplant, wo genug Fläche zur Verfügung steht. Man braucht 1,5 bis 2 m^2 Erdfläche um 1 m^2 Wohnfläche im Laufe der ganzen Kälteperiode zu heizen. Der Entzug der Erdwärme mit Flächenkollektoren ist mit dem Wärmeentzug von Straßen und Begleitdämmen praktisch vergleichbar. Die Wärmeentzugsleistung beträgt 10 bis 30 W/m^2 belegter Fläche (bei 2400h/a, nach (VDI4640)), abhängig von den Bodenparametern und der den Systemsparametern. (Zauner, 2009)

Beispiel mit Angaben: Einfamilienhaus in Salzburg (Abb. 9)

Ein der Häuser ist im Jahr 2002 gebaut und mit Erdwärmekollektoren (ca. 500 m^2 Flächenkollektoren) ausgestattet.
Die Wärme wird durch eine Fußbodenheizung auf einer Fläche von 230 m^2 verteilt. Die durchschnittliche Vorlauftemperatur im Jahr ist 30°C. Die mittlere Arbeitszahl beträgt etwa 4,24.

Gebäudetyp:	Einfamilienhaus
Standort:	Salzburg
Fertigstellung:	2002
Heizlast:	Nicht bekannt
Wärmeabgabe:	232m^2 Fußbodenheizung
Erdwärmegewinnung:	500m^2 Flächenkollektor, Sole/Wasser
Warmwasserbereitung:	500 l Pufferspeicher mit Durchlaufwassererhitzer

Abb. 9 Einfamilienhaus in Salzburg (Zauner, 2009)

Abb. 10 Warmepumpe und Pufferspeicher (Zauner, 2009)

Erdsonden

Erdwärmesonden sind vertikale Absorberleitungen, die eine Tiefe von 10 bis über 100 m erreichen. Diese Art des Wärmeentzuges charakterisiert sich mit hoher Arbeitszahl. Der größte Vorteil aber ist der besonders geringere Flächenbedarf. Wärmeentzugsleistung beträgt 20 bis 70 W/lfm Sonde (bei 2400h/a, nach (VDI4640))

Beispiel:

Ein Mehrfamilienhaus, das im Jahr 1949 gebaut ist. Die Nutzfläche beträgt 359 m^2. Die Wärmeabgabe erfolgt durch Radiatoren mit einer Vorlauftemperatur von 45°C. Nach einer Sanierung beträgt die Heizlast 14kW. Zwei je 100 m tiefe Erdwärmesonden liefern die notwendige Energie zur Beheizung. (Zauner, 2009)

Gebäudetyp:	Mehrfamilienhaus
Standort:	Vorarlberg
Fertigstellung:	1949
Heizlast:	14 kW
Nutzfläche:	359 m^2
Wärmeabgabe:	Radiatoren
Erdwärmegewinnung:	Tiefensonde, 2x 100m
Warmwasserbereitung:	E- Boiler

Abb. 11 Mehrfamilienhaus Bregenz (Zauner, 2009)

Der nächste Beispiel befasst sich mit der Straßenheizung. Das Schweizer Projekt SERSO wurde für die Eisfreihaltung von Straßen und Brücken entwickelt. Die im

Sommer anfallende Wärmeenergie wird in einen direkt neben der Brücke befindlichen Felsspeicher, mit Energiesonden geleitet. Im Winter strömt die Energie in die umgekehrte Richtung von dem Fels zu dem Straßenbelag. Die Anlage funktioniert ohne Temperaturerhöhung (ohne Wärmepumpe).

Für Kollektorleitungen in der Straße werden Stahlröhre von Chromstahl V4A benutzt, die 7cm unter der Oberfläche liegen. Im Fels befinden sich 90 Erdwärmesonden, je 65m tief. So wird ein Felsspeicher von 55.000 m^3 Volumen aktiviert und 1.300 m^2 Belagsfläche bewirtschaftet. Im Sommer steigt die Felstemperatur bis etwa 20 °C was eine Wärme von 140 MWh bedeutet. Die Betriebsstunden im Sommer sind 1000 h und im Winter etwa 850 h, was Betriebskosten von ca. 0.8 €/m^2 für Laufpumpe benötigt. Die gesamten Investitionskosten betragen 3.5Mio € inklusiv Voruntersuchungen. Die werden sich aber in zukünftigen Projekten halbieren, (Abb. 12, Abb. 13). (Kaller, 2007)

Abb. 12 Fotoaufnahme vom Einbau der Heizrohre, www.geothermie.de/oberflaechennahe/serso.htm – ©Polydynamics Engineering Zürich aus (Kaller, 2007)

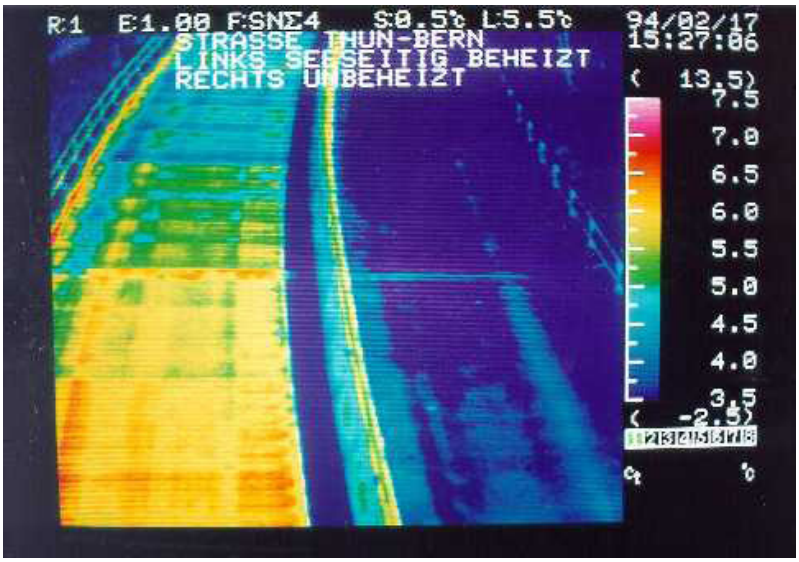


Abb. 13 Wärmebildaufnahme der Anlage in Betrieb, www.geothermie.de/oberflaechennahe/serso.htm – ©Polydynamics Engineering Zürich aus (Kaller, 2007)

Erdberührte Bauteile, Massivabsorber

Betonteile, die in den Boden eingebracht werden und mit Absorberleitungen ausgestattet sind, können als erdberührte Bauteile betrachtet und zur Erdwärmenutzung verwendet werden. Zusätzlich weist der Beton bessere wärmetechnische Eigenschaften als der umgebende Boden auf. Die Kollektoren werden fast ohne zusätzliche Operationen und Kosten in Pfähle, Schlitzwände und Bodenplatten eingebracht werden. Oft werden diese „Massivabsorber“ auch in Kombination in einem Projekt benutzt. (Zauner, 2009)

Beispiele:

Erdwärmenutzung mit Energiepfählen im Baulos LT24

Das Baulos „LT24 – Hadersdorf-Weidlingau“ ist ein Verknüpfungsbauwerk zwischen der Westbahn und dem Lainzer Tunnel. Es beinhaltet eine unterirdische Weichenhalle, die in Deckelbauweise errichtet worden ist und einen Überschüttungsbereich von ca. 1,5 – 2,5 m aufweist. Die Tunnelwände bestehen aus Bohrpfählen,die mit einer Einbindung von ca. 5 bis 6 m unter die Bodenplattenunterkante ausgeführt sind und einer verbundenen Innenschale aus 35 cm Stahlbeton.

In der südlichen Bohrpfahlwand wurden insgesamt 59 Pfähle (Energiepfähle) mit Absorberschläuchen ausgestattet (jede 3. Bohrpfahl ist ein Energiepfahl). Die insgesamt 80 Absorberkreise sind an einem Verteiler angeschlossen, von welchem Sammelleitungen zu einem Schulgebäude führen. Im Schulgebäude sind 6 Wärmepumpeneinheiten direkt beim Verbraucher installiert. Beim Verbraucher befindet sich zusätzlich eine bereits vorhandene Gaskesselanlage, welche bei Absorbertemperaturen unter etwa -2°C hinzugeschaltet werden kann. (Hofinger & Kohlböck, 2006)

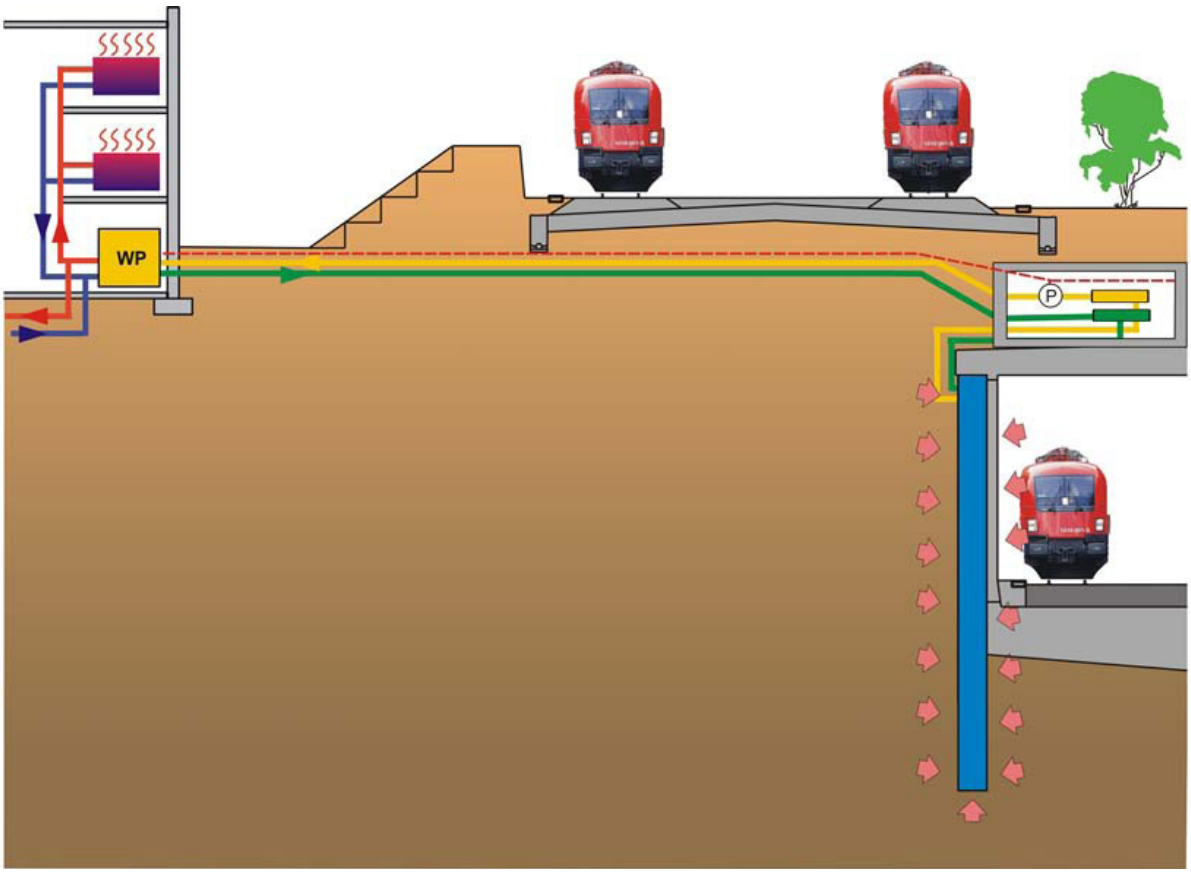


Abb. 14 Energiepfähle Baulos LT24 (Markiewicz, 2004)

Energievlies

Das Prinzip ist ähnlich dem der bereits erwähnten Massivabsorber. Die Einbettung in das Vlies bringt zwei wesentliche Vorteile: Erstens ist das Vlies ein ohnehin erforderlicher Tunnel-Bauteil, so dass keine zusätzlichen Kosten da für entstehen und zweitens werden die Wärmetauscherrohre durch das Vlies beim Betonieren geschützt. Versuche, die im Zuge der Dissertation von Markiewicz (Markiewicz, 2004) durchgeführt wurden, zeigen, dass sich das Vlies nicht dämmend auf die Wärmeübertragung zwischen der Tunnelschale und der Absorberleitung auswirkt. Im Zuge der Untersuchung wurden folgenden Werte ermittelt: Kurzfristige Wärmeentzug: 33 W/m^2, belegte Tunnelfläche, langfristige: 14 W/m^2. (Hofinger & Kohlböck, 2006)

Weitere Erdwärmeanlagen sind **Energiebrunnen** und **Energieanker**.

Bei Brunnen wird die Wärme von dem Grundwasser entzogen. Das Wasser wird ausgepumpt, abgekühlt und wieder versickert um den natürlichen Zustand, und die Setzungsempfindlichkeit nicht zu beeinflussen (Abb. 15). Dieser Wärmeentzug, der sich mit sehr hoher Arbeitszahl charakterisiert , ist allerdings nur bei entsprechende Grundwasserverhältnisse möglich. Die Energieanker sind ein relativ neuer Begriff. Diese Anker können sowohl in Tunnelbau als auch für klassische Sicherheitszwecke in der Geotechnik benutzt werden.

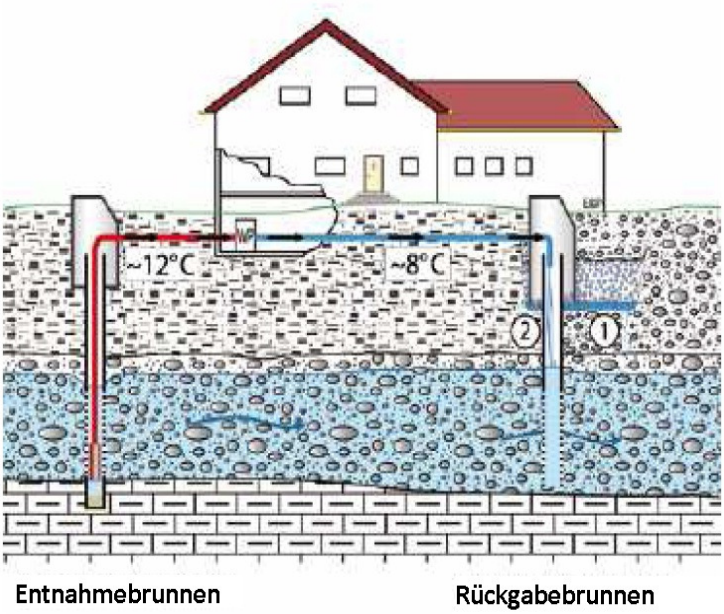


Abb. 15 Energiebrunnen Schema (Zauner, 2009)

3 Dammtypen und Absorbertechnologie

3.1 Allgemeines

Die Idee „Erdwärme von Dämmen“ zu nutzen, stammt aus der Technologie des Dämmenbaues. Bei Dämmen, wie Straßendämmen und Begleitdämmen, wird nur die Belegung mit Rohrleitungen benötigt, was relativ billig ist um Wärmeentzug zu verwirklichen. Zunächst werden die möglichen Dammtypen und die Nutzungsbereiche beschrieben. Die Absorbertechnologie ist aus anderen Geothermienutzungen relativ weit fortgeschritten und kann in Dämmen naturgemäß ebenfalls verwendet werden.

3.2 Begleitdämme

Das sind Dämme, die nicht weit von der Straße liegen und nicht stark befahren sind. Im Allgemeinen können sie Lärmschutzdämme oder Hochwasserschutzdämme sein. Ähnliche Eigenschaften besitzen auch andere Schüttungen vom Boden, z. B. hinter Stützmauer.

Mit steigendem Verkehrslärm steigt die Anzahl der Maßnahmen, die für Lärmverminderung vorgesehen werden. Oft werden Lärmschutzwände benutzt, aber auch Dämme können aus ökologischen und landwirtschaftlichen Gründen günstig sein. Eine schematische Darstellung und eine echte Aufnahme von Lärmschutzdämmen sind auf Abb. 16 und Abb. 17 gezeigt. Für die Bestimmung der anwendbare Materialien und Böschungen ergeben sich die folgenden Fragen: Was für Material steht zur Verfügung? Muss der Damm befahrbar sein? Wie groß ist der Platzbedarf? Wird der Damm für andere Zwecke z.B. Hochwasserschutz benutzt?

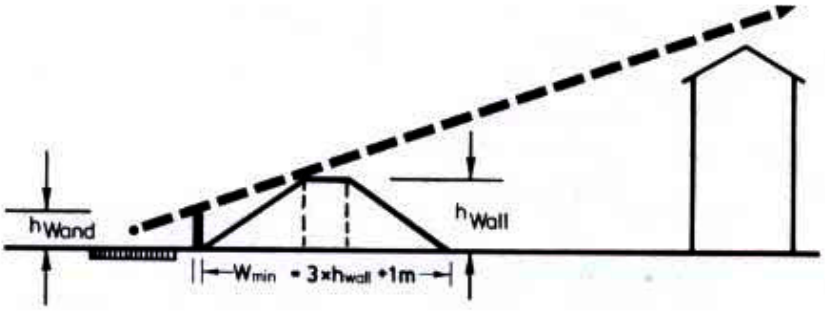


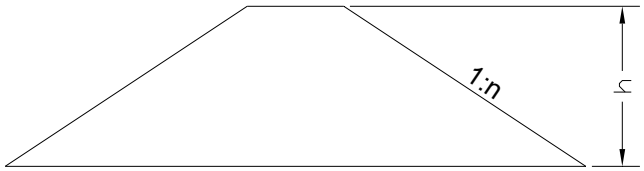
Abb. 16 Lärmschutzdamm Schema (Mihaylova, 2008)

Abb. 17 Lärmschutzdamm Foto (Mihaylova, 2008)

Die Böschungshöhe und -neigung ergibt sich in Abhängigkeit von den Materialien für befahrene Dämme (Tab. 2).

Hochwasserschutzdämme gemäß Abb. 18 sind Anlagen die hochwassergefährdete Gebiete vor Überschwemmungen schützen. Oftmals werden sie aus Ortmaterialien gefertigt. Als wasserundurchlässige Teil kommen häufig Schmalwände oder Kerne aus Ton zur Anwendung. Von der Luftseite der Dämme ordnet man gewöhnlich Drainagen an die das durchgedrungene Wasser sicher ableiten. Bei hohen Dämmen werden die Luft- und eventuell die Wasserseiten mit Bermen ausgebildet. Die wasserseitige Oberfläche des Dammes kann gegen Auswaschen befestigt werden. Die Böschungen von Tab. 2 gelten auch für Hochwasserschutzdämme, falls die Durchlässigkeit und Stabilität gesichert sind.

	Erdstoff	Böschung	Höhe *h* und Neigung 1: *n*				
nach Deutsche Gesellschaft für Geotechnik [2.7]	nichtbindig:	Einschnitte und Dämme	0 ... 15 m				
	Kiessand und Steine grober Sand feiner Sand		1:1,5 1:1,7 1:2,0				
	bindig:	Einschnitte	0 ... 3	3 ... 6	6 ...9	9 ... 12	12 ...15 m
	Schluff magerer Lehm fetter Lehm, magerer Ton fetter Ton		1:1,25 1:1,25 1:1,25 1:1,25	1:1,6 1:1,25 1:1,25 1:1,25	1:1,75 1:1,4 1:1,25 1:1,25	1:1,9 1:1,6 1:1,7 1:1,5	1:1,20 1:1,7 1:1,20 1:1,20
	bindig:	Dämme	0 ... 3	3 ... 6	6 ...9	9 ... 12	12 ...15 m
	Schluff magerer Lehm fetter Lehm, magerer Ton fetter Ton		1:1,6 1:1,25 1:1,25 1:1,25	1:2,0 1:1,6 1:1,7 1:1,4	1:2,2 1:1,8 1:2,1 1:2,6	1:2,3 1:1,9 1:2,4 1:3,2	1:2,4 1:2,0 1:2,5 1:3,5
Erdbauwerke der DB [3.2]	grobkörnig:	Einschnitte und Dämme	0 ... 12 m				
	GW, GI GE, SI, SW SE		1:1,5 1:1,7 1:2,0				
	gemischt- und feinkörnig:	Einschnitte	0 ... 6		6 ... 9		9 ... 12 m
	GU, SU, GT, ST, $G\overline{U}$, $S\overline{U}$, $G\overline{T}$, $S\overline{T}$ UL, TL		1:1,6 1:1,6		1:1,8 1:1,8		1:1,9 1:1,9
	gemischtkörnig:	Dämme	0 ... 6		6 ... 9		9 ... 12 m
	$G\overline{U}$, $S\overline{U}$, $G\overline{T}$, $S\overline{T}$ GU, SU, GT, ST		1:1,6		1:1,8		1:2,0



Tab. 2 Böschungen von Dämmen und Einschnitten (Striegler, 1998)

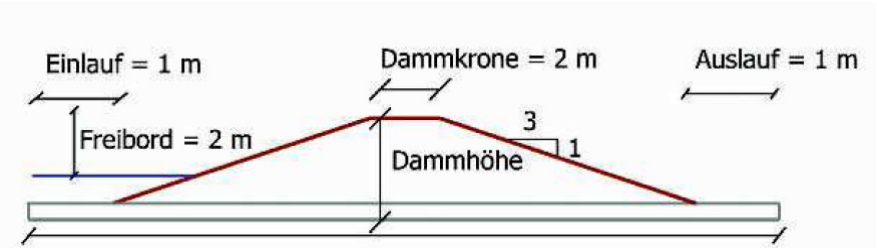


Abb. 18 Hochwasserschutzdamm (www.dvw-bayern.de, 2009)

3.3 Straßendämme

Straßendämme unterscheiden sich von den anderen Dämmen hinsichtlich der Anforderungen an das Schüttmaterial. Ein besonderes Merkmal ist, dass diese Dämme stark befahren sind, was sie naturgemäß ungeeignet für einen oberflächennahen Wärmeentzug macht. Dieser Art von Dämme wird jedoch sehr oft gebaut.

Auf Abb. 19 ist ein typischer Straßenaufbau im Querschnitt dargestellt. Erdwärmeentzug ist nur unter den Unterbauplanum möglich. Aus ökonomischen und wärmetechnischen Gründen müssen aber die Absorberkollektoren erst in den Dammkörper in einer Tiefe von 1-2 m gelegt werden. Solche Dämme werden nur an besonderen Stellen, wie Brücken, Autobahnknoten, Ein- und Ausfahrten gebaut. Auch in hügeligen Bereichen und in Gebirgen sind solche Dämme oft zu treffen.

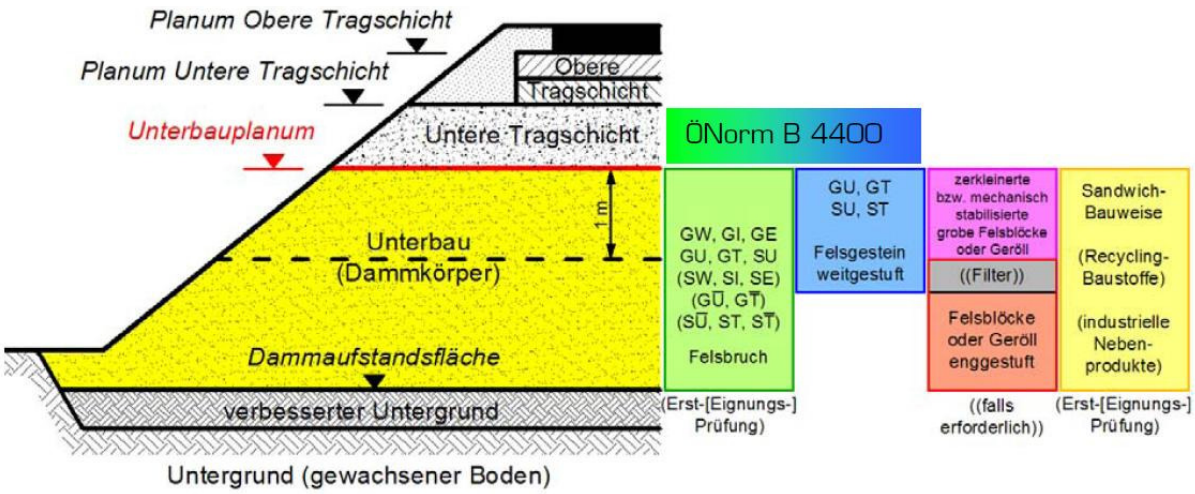


Abb. 19 Dammschnitt und Dammbaustoffe für Verkehrswege (Adam, Grundbau und Bodenmechanik Skriptum SS, 2009)

3.4 Andere Dämme und Bauten

Das sind Dämme oder dammähnliche Bauten wie Böschungen oder Schüttungen z.B.hinter Stützmauern, die mit Böden mit guten wärmetechnischen Parametern gebaut sind. Hier meint man, dass eine Schüttung z.B. mit Dränage-Material für eine Erdwärmenutzung nicht geeignet ist.

Für die Bewehrung von Böschungen benutzt man verschiedene Arten Geogittern. Diese können leicht mit Absorberkollektoren verknüpft werden, um den Wärmeentzug zu erfüllen.

Stützmauern und der hinterfüllte Bereich könnten ebenfalls für Erdwärmenutzung verwendet werden. Wegen der größeren Flächen zur Luftseite und der hohen Wärmeleitfähigkeit der Mauermaterialien wird der Wärmestrom jedoch niedrig sein. Trotzdem könnten diese in besonderen Situationen als Sonderanlagen benutzt werden.

3.5 Absorber

3.5.1 Arten

Durch die permanente Weiterentwicklung der PE-Materialien in den letzten Jahren wurde die Leistungsfähigkeit von PE- Rohren und Formteilen erheblich verbessert.
PE wird in der Regel als Rohrmaterial für Erdwärme verwendet. PE-Hart ist eine Weiterentwicklung der PE-Materialien, die durch ein modifiziertes Polymerisationsverfahren eine geänderte Molmassenverteilung aufweist. Dadurch haben diese Materialien höhere Dichte und auch verbesserte mechanische Eigenschaften wie erhöhte Steifigkeit und Härte. Die Zeitstandsfestigkeit und der Widerstand gegen schnelle Rissfortpflanzung konnte auch deutlich verbessert werden. Tab. 3 zeigt die mechanischen und thermischen Eigenschaften einer Art PE, die für Erdwärmekollektoren in Dämmen geeignet sind.

Mechanische Eigenschaften des PEH:			
Dichte	>	940	kg/m^3
Fließspannung	>	19	N/mm^2
Max. Druckbelastung:			
(Transport)		3	N/mm^2
(Dauerbelastung)		0,5	N/mm^2
Thermische Eigenschaften:			
Ausdehnungskoeffizient		$2 \cdot 10^{-4}$	K^{-1}
Wärmeleitfähigkeit		0,43	W/mK
Schmelzindex		0,3-0,8	g/10 min.

Tab. 3 Mechanische und Thermische Eigenschaften von PEH (KEKELIT, 2005)

Als Rohrdurchmesser und Material wird aufgrund hydraulischer, wärmetechnischer und mechanischer Gründe oft PN 10 (25 • 2,3 = 0,75" = DN 20 oder 32 • 3 = 1" = DN 25) verwendet. Eine Variation der Rohrwandstärke ist möglich. (Zauner, 2009)

3.5.2 Anordnung der Absorberleitungen im Damm

Die Anordnung kann in Serienschaltung oder in Parallelschaltung erfolgen (siehe Abb. 20).

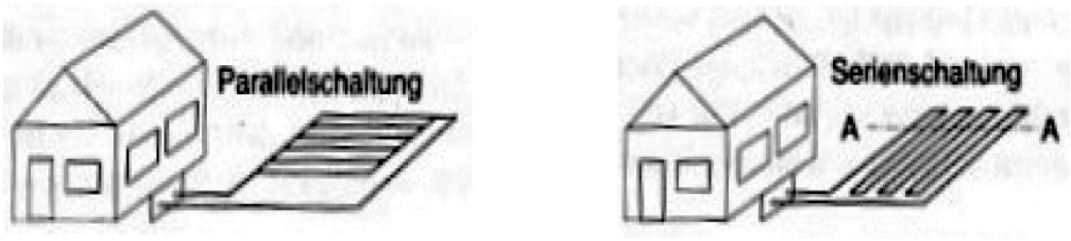


Abb. 20 Parallel- und Serienschaltung (Zauner, 2009)

Damit die Druckunterschiede in der einzelnen Kollektoren kleiner gehalten werden, sollten diese jeweils annähernd dieselbe Länge aufweisen. Bei Parallelschaltung erfolgt die Verlegung daher nach dem Tickelmann- Prinzip (Abb. 20). (Zauner, 2009)
Für die Kollektoren in den Energievliesen beim Tunnelbau gibt es drei mögliche Anordnungsweisen die auf Abb. 21 dargestellt sind. Diese Anordnungen sind auch für Energiedämme denkbar (Abb.22 und Abb. 24).

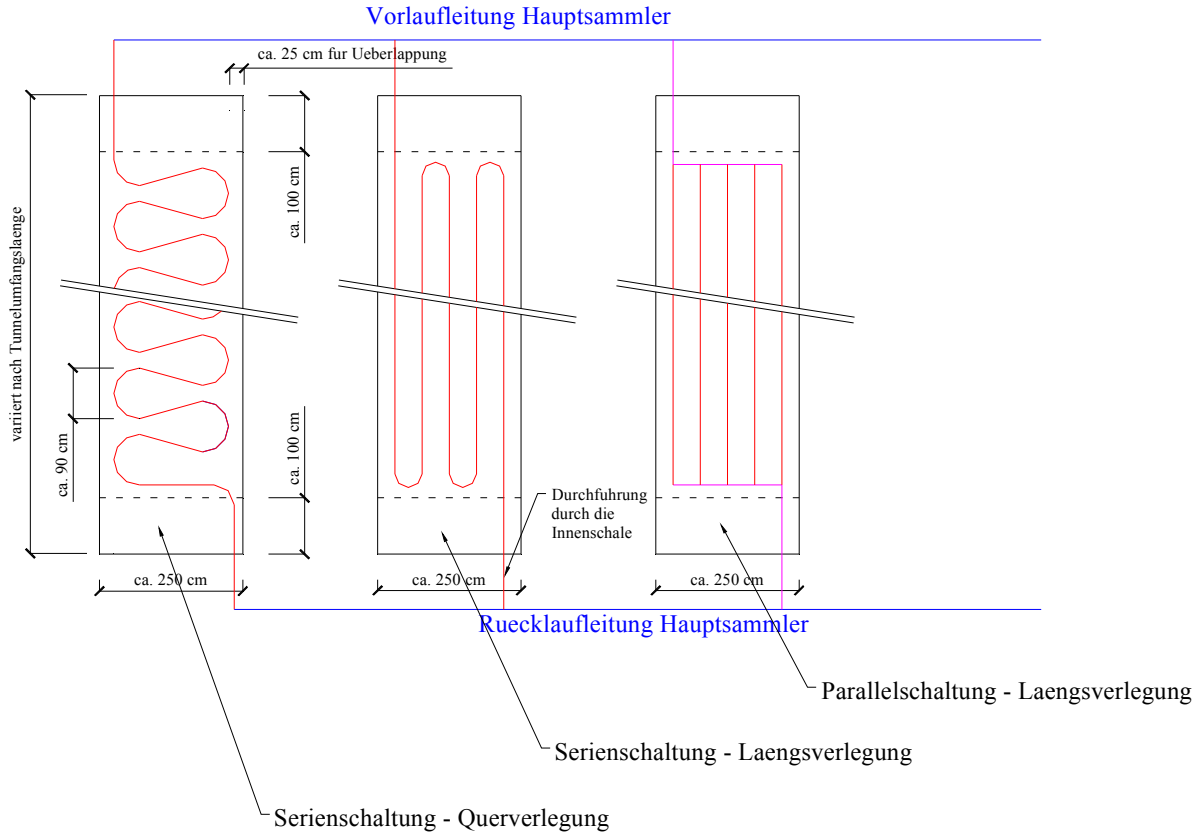


Abb. 21 Kollektoranordnung – Energievlies (Markiewicz, 2004)

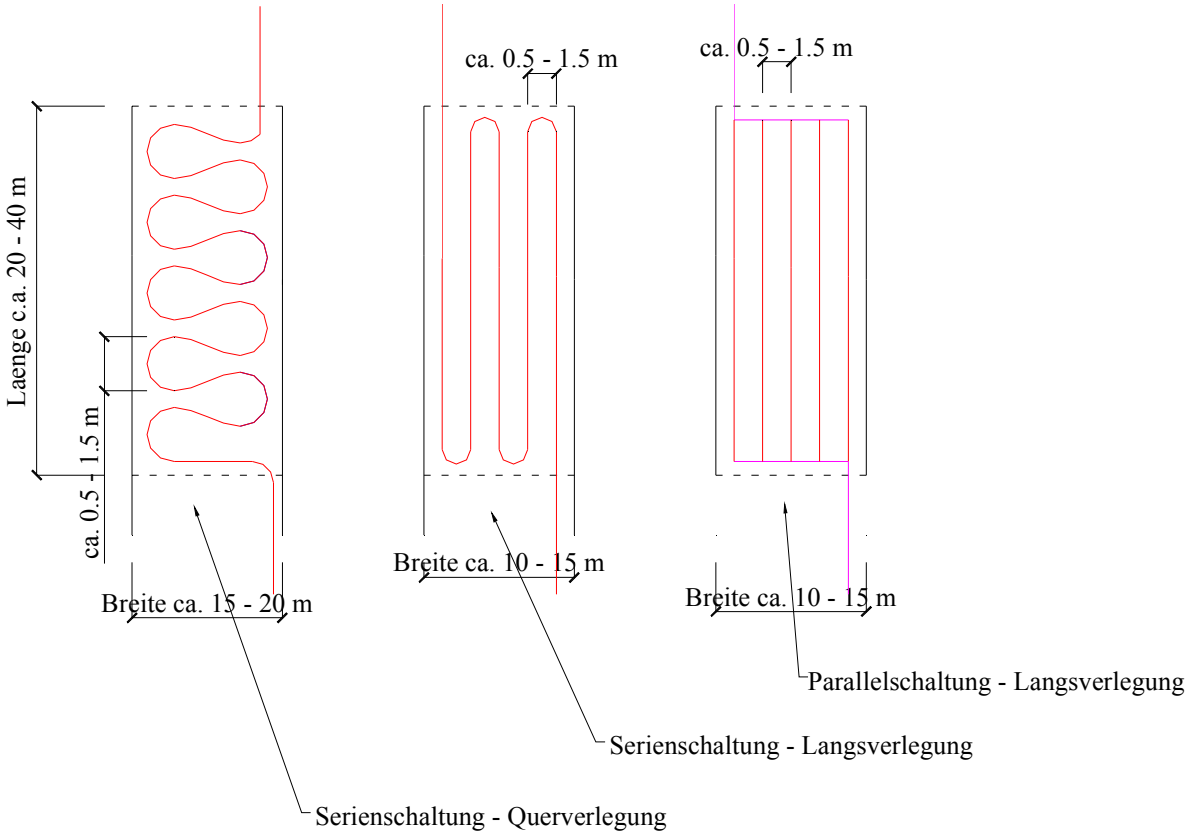


Abb. 22 Mögliche Kollektoranordnungen bei kleineren Dämmen (ein oder mehrlagig)

(1)

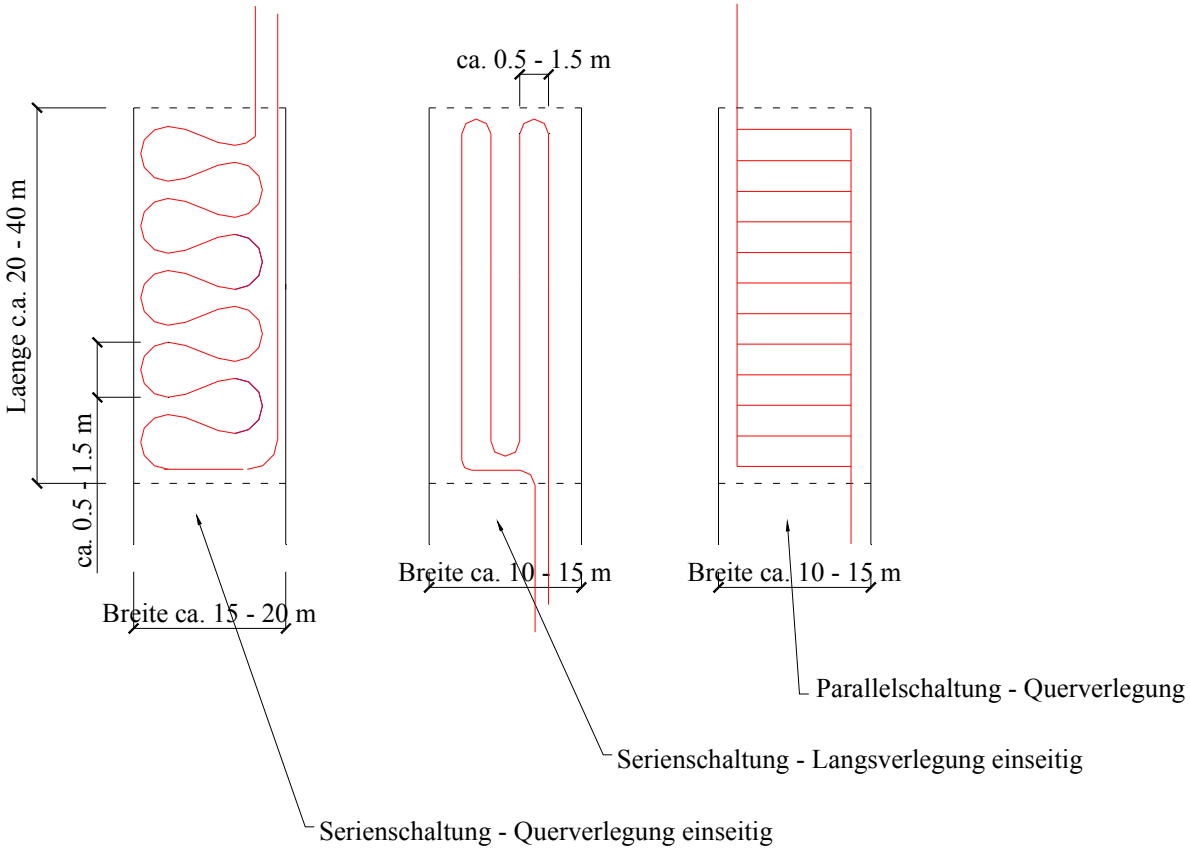


Abb. 23 Mögliche Kollektoranordnungen bei kleineren Dämmen (ein oder mehrlagig) (2)

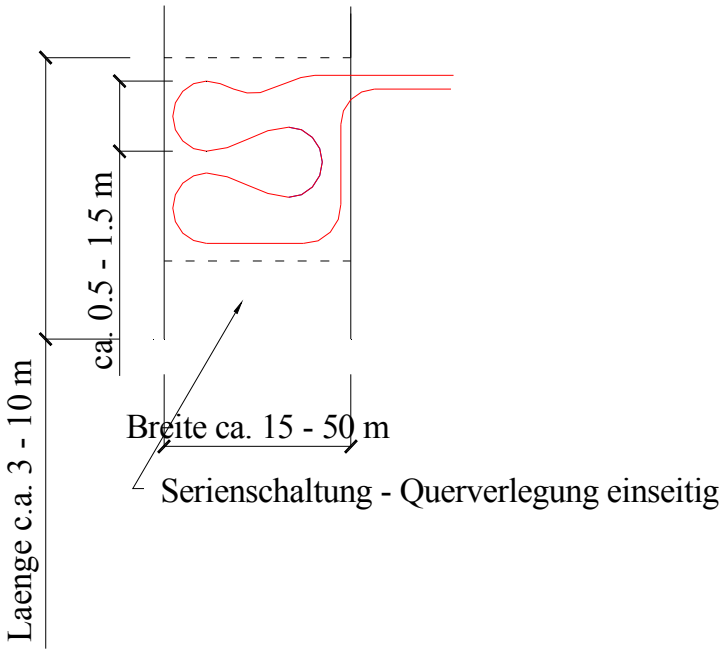


Abb. 24 Verkürzung der von einem Kollektor belegten Länge bei breiteren Dämmen

3.6 Einbau und Leitungsführung

Zur Sicherung der Rohre und für eventuelle spätere Arbeiten sollten ca. 50cm über den Leitungen Warnbänder verlegt werden. Darüber hinaus sollen eine genaue Lageskizze und eine laufende Fotodokumentation angefertigt werden.

Der Einbau der Erdwärmekollektoren in Dämmen hängt hauptsächlich von ihrer Art und ihrem Material ab. Bei freien Kollektoren werden größere Flächen verlegt und dann werden sie mit Boden geschüttet und verdichtet. Bei Erdwärmevliesen sind kleinere Fläche bevorzugt, da das Vlies aus logistischen Gründen nicht zu groß sein kann. Die Schüttung erfolgt nach der Regel, die auf Abb. 25 dargestellt ist.

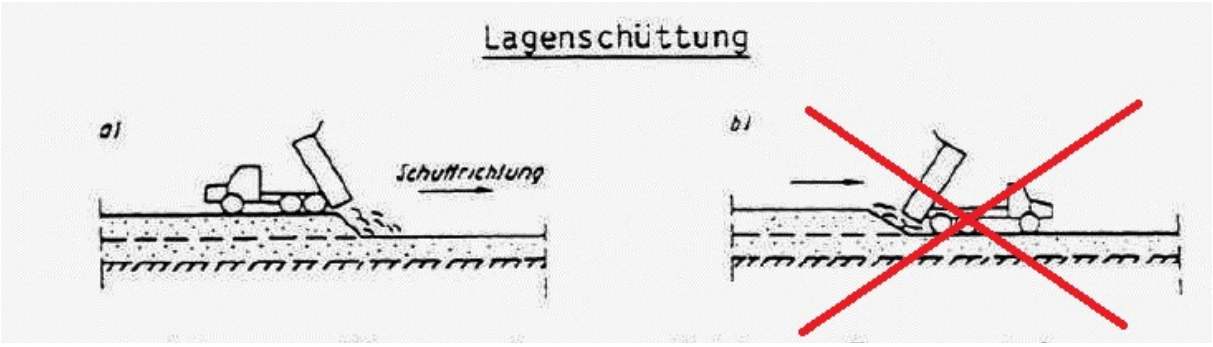


Abb. 25 Schüttvorgang bei verlegten Kollektoren in Dämmen (Blab, 2008)

Die Kollektoren müssen sowohl bei Schüttvorgang als auch bei Verdichtung geschützt werden. Die Verdichtung erfolgt mit den klassischen Vibrationsgeräten im Erdbau (z.B. Walzenzüge). Besondere Aufmerksamkeit ist für die Anschlussstellen notwendig. Es ist zu berücksichtigen, ob mögliche Setzungen und Setzungsdifferenzen zu einer Beschädigung des Rohrleitungssystems führen können.

Die Verbindung zwischen Erdwärmekollektoren (Erdwärmesammlern) und der Wärmepumpe erfolgt immer mit isolierten Rohren. Die Art der Isolation hängt von der Entfernung ab.

4 Simulation

4.1 Allgemein

Es wurde eine Modell-Studie durchgeführt, in der die „Erdwärmenutzung von Dämmen“ zum ersten mal untersucht wird. Zur Verfügung steht eine Vielfalt von Information über die Bodenparameter, die geometrischen und wärmetechnischen Kollektorparameter und auch das allgemeine Verhalten von Systemen für Erdwärme, die leicht in ein Computer-Modell eingeführt werden können. Basierend auf diesen Daten kann das Computer-Modell ausreichende quantitative und qualitative Zusammenhänge liefern, die ein klares Bild der „Erdwärmenutzung von Dämmen“ darstellen.

4.2 Simulationsprogramm

COMSOL Multiphysics ist eine leistungsstarke interaktive Umgebung für die Modellierung und Lösung aller Arten von wissenschaftlichen und technischen Problemen, die auf partiellen Differentialgleichungen (PDEs) basieren.

Dank des integrierten Physikmoduls ist es möglich, Modelle, durch die Definition der relevanten physikalischen Größen, wie z. B. Materialeigenschaften, Lasten, Randbedingungen, Quellen und Ströme zu bauen. Der Betreiber kann jederzeit diese Variablen, Ausdrücke oder Zahlen direkt in feste Bereiche, Grenzen, Kanten und Punkte unabhängig von dem Elementnetz verwandeln. COMSOL Multiphysics erstellt intern eine Reihe von partiellen Differentialgleichungen, die das gesamte Modell beschreiben. Der Betreiber greift auf die Möglichkeiten von COMSOL Multiphysics über eine flexible grafische Benutzeroberfläche oder per Skript-Programmierung in der MATLAB-Sprache zu. (COMSOL, 2008)

4.3 Modell

Das Modell wird in 2D Geometrie errichtet, da drei dimensionale Probleme aufwendiger in der Erstellung sind und einen hohen Rechenaufwand erfordern. Ein

Untersuchungspunkt, der im 2D Modell nicht berücksichtigt werden kann, ist die Änderung der Temperatur in den Kollektoren.

Die Geometrie wird auf Basis von schon ausgeführten Erdwärmesystemen bestimmt. Die Tiefe wird gemäß Richtlinie VDI 4640 genommen und an die Besonderheiten eines Dammaufbaus angepasst. Bei der Auswertung der Ergebnisse wird der durchschnittliche Wärmestrom auf 2400 Betriebsstunden (eine durchschnittliche Heizperiode) umgerechnet. (VDI 4640)

4.3.1 Geometrie

Abb. 26 zeigt die Geometrie des Modells, das durch den Boden begrenzt wird. Diese Geometrie bleibt in allen Parameterstudien gleich. Abb. 27 zeigt die Anordnung der Rohrleitungen im Basismodell und die Parameter, die später variiert werden. Abb. 28 stellt die Kollektorgeometrie dar. Der Außendurchmesser beträgt 25mm für alle Parameterstudien.

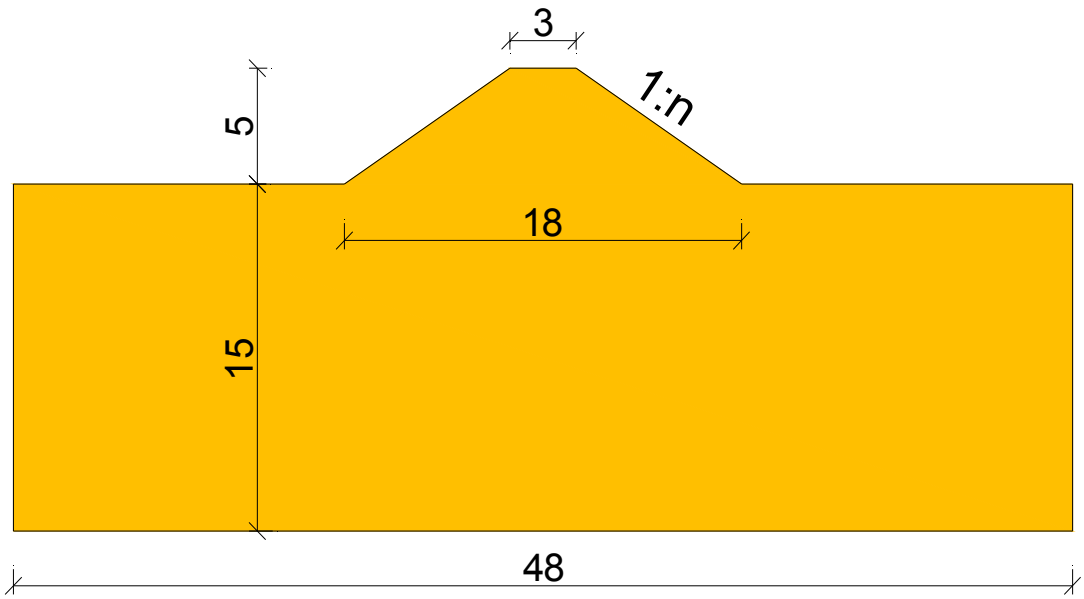


Abb. 26 Geometrie des Modells (Einheiten in Meter)

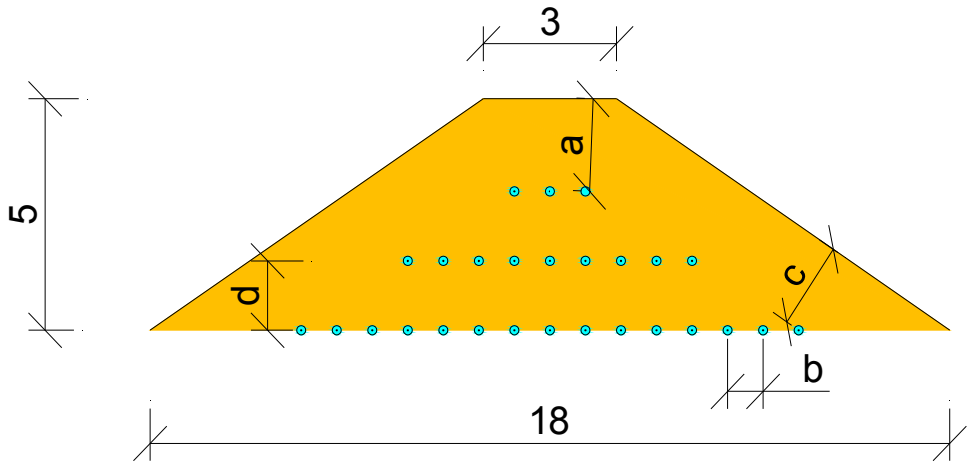


Abb. 27 Geometrie der Kollektoren - Basismodell (Einheiten in Meter)

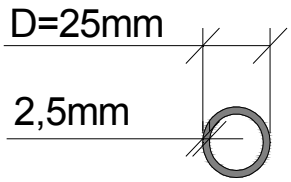


Abb. 28 Geometrie - Kollektor (Rohr)

4.3.2 Materialeigenschaften

Boden

Einige wärmetechnische Bodeneigenschaften sind allgemein in Tab. 1 angegeben. Da tonige Materialien für den Dammbau in der Regel nicht geeignet sind und nur für Kernzonen in Dämmen benutzt werden, werden sie als obere Grenzwerte angenommen. Die thermischen Parameter von Kiesen und Steinen bestimmen die niedrigen Grenzwerte. Tab. 4 zeigt die zunächst ausgewählten Werte für das Basismodell. Diese Werte passen am besten zu schluffigen Böden,sie können aber auch beim Ton oder beim trockenem Sand vorkommen. Die Werte werden danach in der Parameterstudie variiert.

Trockendichte	ρ_B	1700	kg/m^3
Wärmeleitfähigkeit	λ_B	1.5	W/m.K
Wärmekapazität	c_B	1600	Ws/(kg.K)

Tab. 4 Termische Bodenparameter – Basismodell (aus Tab 1)

Kollektor

Die Kollektoren werden mit zwei physischen Koeffizienten im Modell beschrieben. Das sind dieTrockendichte, ρ_R und Wärmeleitfähigkeit, λ_R (Tab. 5).

Trockendichte	ρ_R	1200	kg/m^3
Wärmeleitfähigkeit	λ_R	0.35	W/(m.K)

Tab. 5 Termische Kollektorparameter - Basismodell

Der Wärmedurchlaßkoeffizient, der durch die Wärmeleitfähigkeit und die Wandstärke des Rohres bestimmt wird, wird später in der Parameterstudie verwendet. Der Basiswert 100 W/(m^2.K) errechnet sich durch die folgende Gleichung.

$$\Lambda = \frac{\lambda}{d} = \frac{0.35}{0.0035} = 100 \,, \qquad \text{W/(m}^2\text{.K)}$$

Λ - Wärmedurchlaßkoeffizient, W/(m^2.K)

λ - Wärmeleitfähigkeit, W/(m.K)

d - Wandstärke, m

Fluid

Das Fluid wird mit konstanter Temperatur angenommen. Im Basismodell wird diese Temperatur mit 4 °C angenommen. Normalerweise erreicht die Differenz zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur maximal etwa 4 °C, das bedeutet 4±2 °C. Die mittlere Kollektortemperatur wird später bei der Parameterstudie untersucht.

4.3.3 Rand- und Anfangsbedingungen

Anhand der Basisgeometrie werden die folgenden Randbedingungen definiert. An der Oberfläche wird die Sonnenstrahlung, Wind u.a. durch eine Sinus-Temperaturkurve und den Wärmeübergangskoeffizient ersetzt. Unten bleibt die Bodentemperatur die ganze Zeit konstant. Damit die Geometrie endlich bleibt, und kein Wärmestrom an den Seiten verloren geht, werden sie thermisch isoliert. Die Randbedingungen werden auf Abb. 29 und auf Tab. 6 dargestellt.

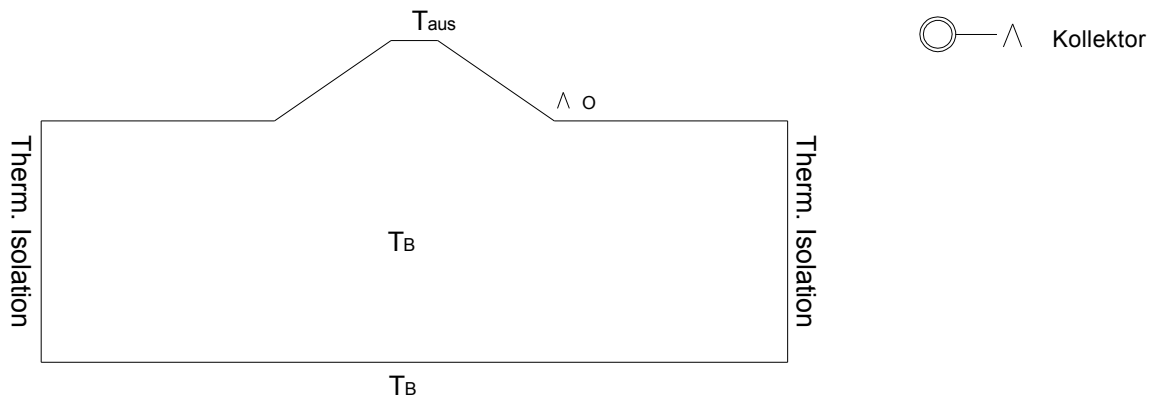


Abb. 29 Anfangs- und Randbedingungen

Größe	Bezeichnung	Wert oder Formel	Einheit
Außentemperatur	T_{aus}	9.68+11.02*(sin(2*pi/365*(t+71)))	°C
Wärmeübergangskoeff. Oberfläche	Λ_{O}	15	W/(m^2.K)
Bodentemperatur	T_B	10	°C
Wärmedurchlaßkoeff. Kollektor	$\Lambda_{Kollektor}$	100	W/(m^2.K)

Tab. 6 Anfangs- und Randbedingungen - Basismodell

Beschreibung

Die Temperatur an der Oberfläche ist vorwiegend von der Sonnenstrahlung und den Wetterbedingungen abhängig. Diese wird in dem Programm mit Hilfe einer Sinusfunktion modelliert. Als Datenquelle werden Klimadaten (Tagesmittelwerte) der Messstation Mariabrun, Wien benutzt. Mariabrun liegt im Westen von Wien und passt am besten zum außerstädtischen Gebiet (wo sich Dämme oftmals befinden).

Zur Bestimmung der Temperatur-Sinuskurve werden Daten von 1.07.2004 bis 30.06.2006 (insgesamt 2 Jahre) benutzt. Mit Hilfe der MATLAB Software wird eine Kurve folgender Art bestimmt: a*(sin(2*pi/365*(t+b)))+c, wobei a, b und c die Koeffizienten der Gleichung und *t* der Zeitvektor sind (Abb. 30).

$$T_{aus}(t) = 9.68+11.02*(\sin(2*pi/365*(t+71)))$$

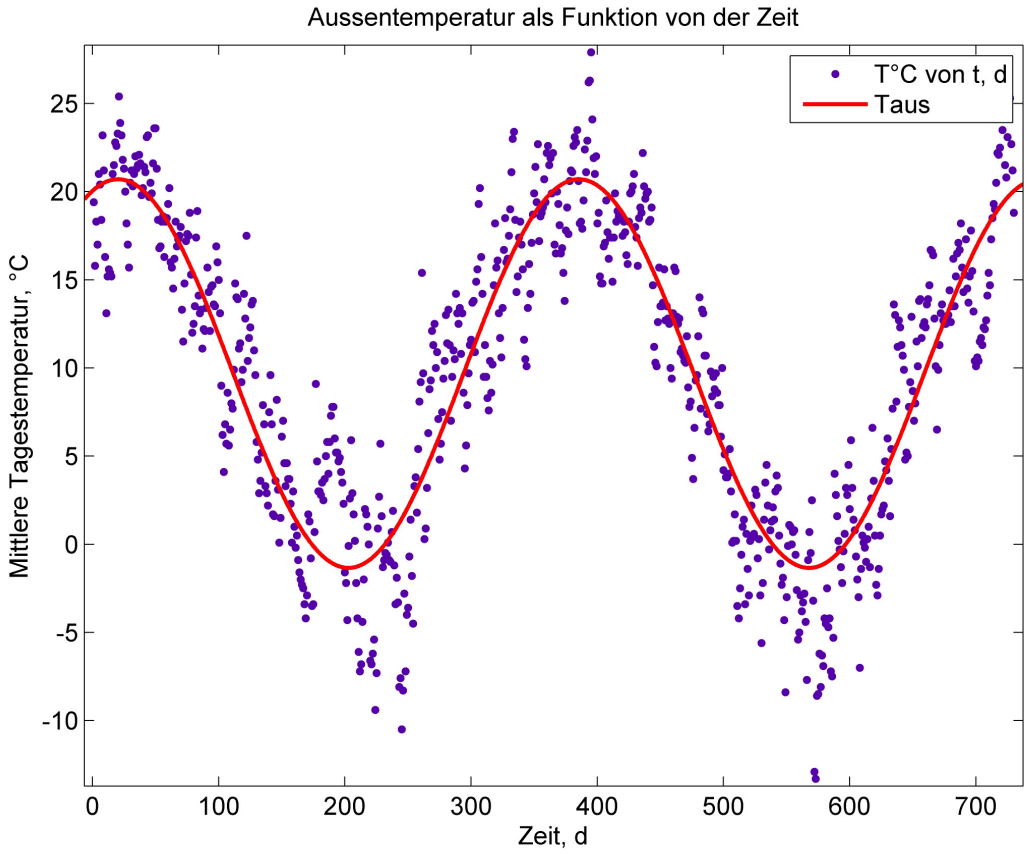


Abb. 30 Auslegung der Temperatursinuskurve aus Tagesmittelwerte mit Hilfe von MATLAB

Der Zeitanfang (t = 0) entspricht dem Anfang des Monats Juli. Abb. 31 zeigt die Temperaturkurve für die in Tab. 7 dargestellte Periode.

Monat		Zeit
Juli	1	1
August	1	32
September	1	63
Oktober	1	93
November	1	124
Dezember	1	154
Jänner	1	185
Februar	1	216
März	1	244
April	1	275
Mai	1	305
Juni	1	336
Juli	1	366

Tab. 7 Zeitachse: Monat – Tag

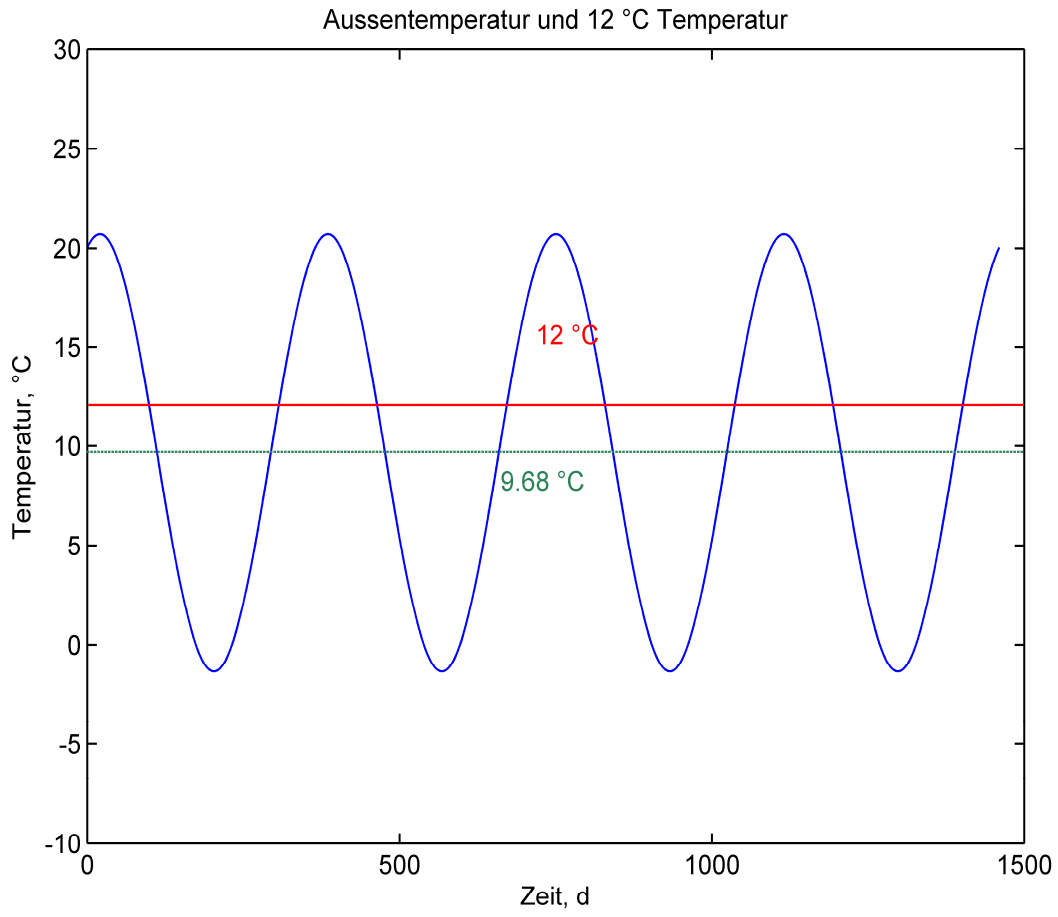


Abb. 31 Außentemperatur für die ganze Simulationszeit. 12° C Temperatur und 9.68 °C – mittlere Jahrestemperatur.

Der Wärmeübergangskoeffizient an der Oberfläche wird mit h = 15 W/(m^2.K) aus „Wirtschaftliche Optimierung von TunnelThermie®-Absorberanlagen“ (Hofinger & Kohlböck, 2006) übernommen. Dieser Koeffizient kann auch mit den Formeln in Punkt (2.1.3) berechnet werden.

Der Wärmedurchlaßkoeffizient Λ (Abb. 32 - rot) des Kollektors wird mit Hilfe der Wärmeleitfähigkeit des Materials und der Wandstärke in Punkt 4.3.2 bestimmt. Beim Betrieb kann dieser Wert schwanken. Im Betrieb wird nur der Spitzenwert modelliert, welcher später in der Parameterstudie weiter untersucht wird.

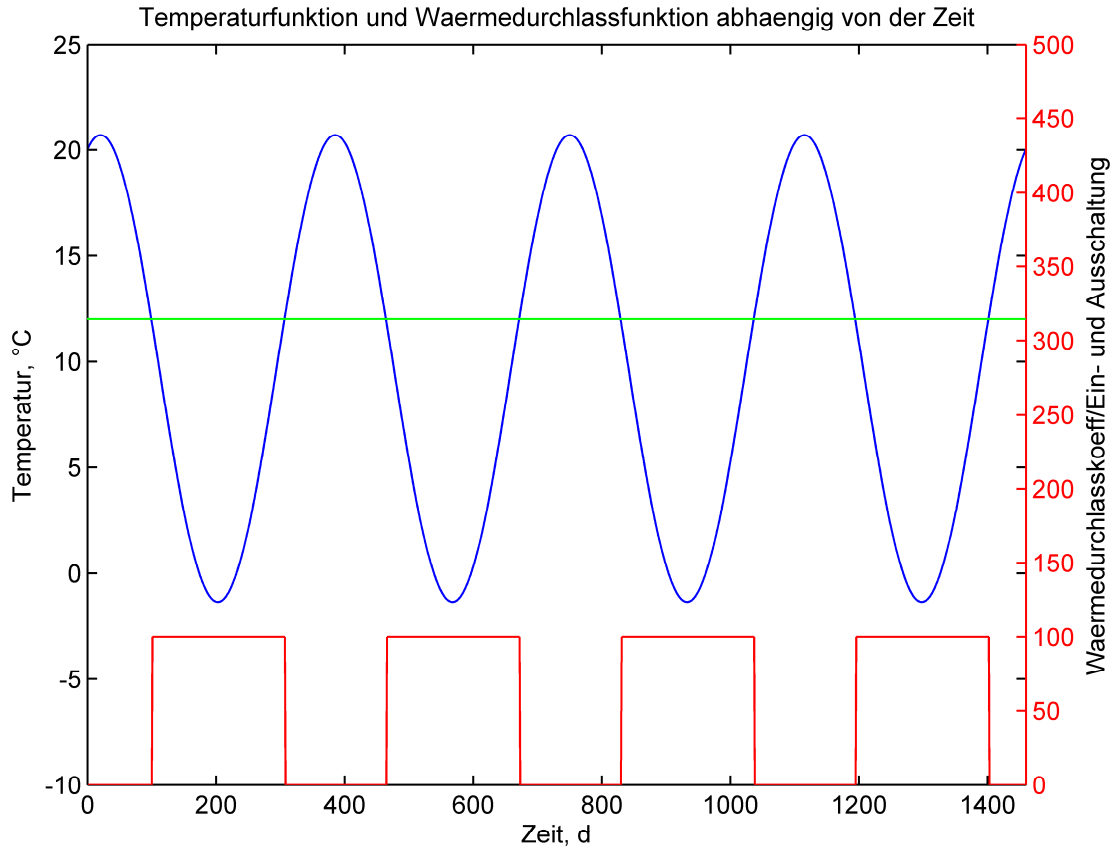
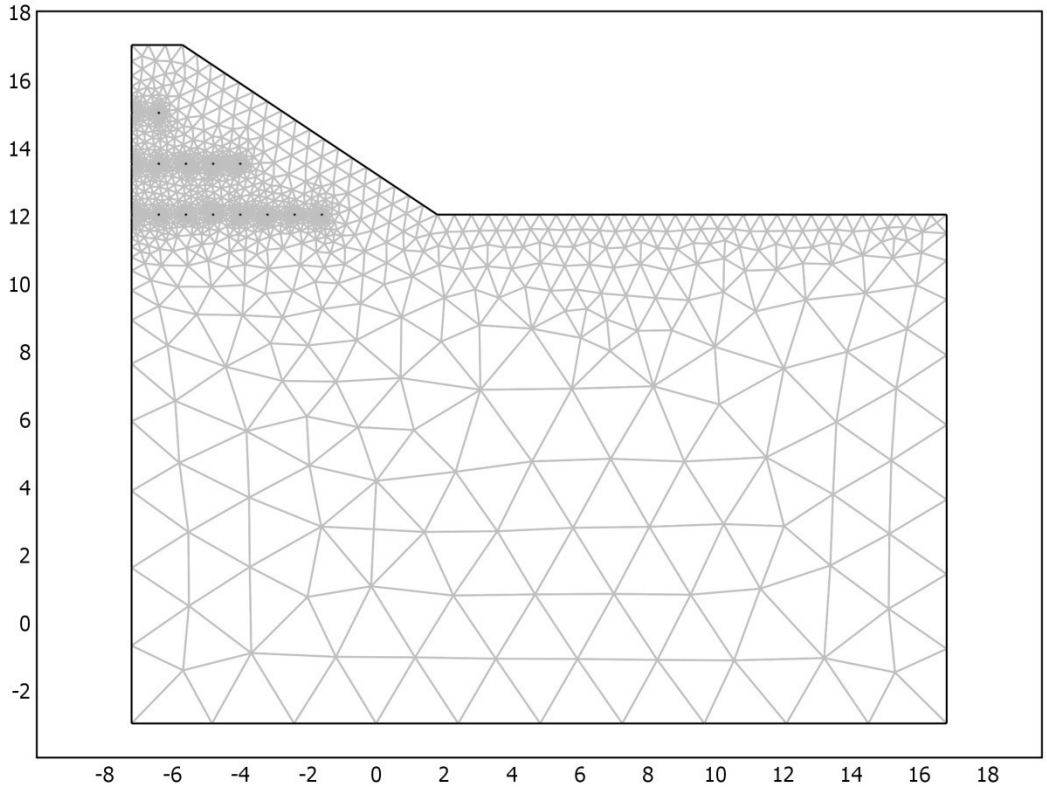


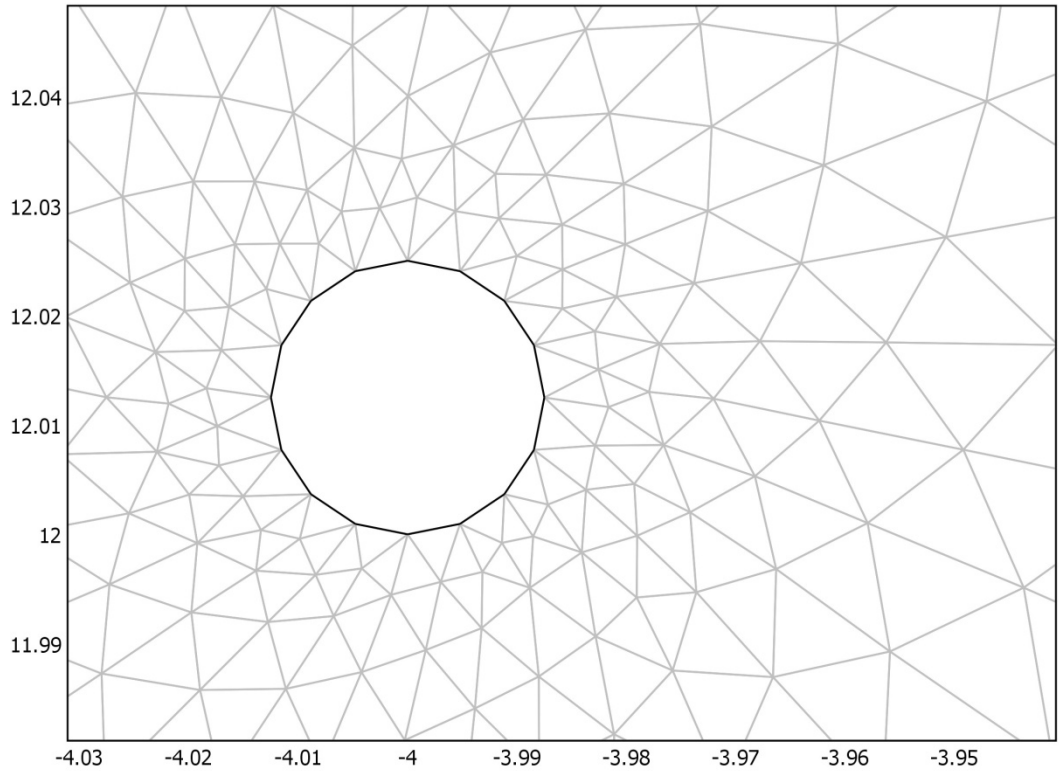
Abb. 32 Durchlaßkoeffitient *Λ,* abhängig von Zeit *t* und der Oberflächentemperatur, 12 °C – Grenze als Kriterium für das Ein und Ausschalten des Systems.

4.3.4 Netz

Das Netz (Constrained Delaunay Triangulation) wird durch eine im Programm festgelegte Funktion erstellt. Nur einige Ränder wie Geländeoberfläche und die Rohre werden extra definiert. Abb. 33 zeigt das Netz und die lokalen Verfeinerungen. Bei einer Voruntersuchung des Modells wird folgendes festgestellt. Die Resultate werden stark von einem nicht genug verfeinerten Netz bei den Rohrleitungen und bei der Oberfläche beeinflusst. Eine Anpassung des Netzes in Teilbereiche ist dann nötig.

Die Elementgröße des Rohrrandes beträgt 0.005m = 5mm. Dieser Wert wird in der Parameterstudie näher untersucht. Die Elementgröße der Erdoberfläche ist 0.5m. Abb. 33 zeigt das Netz des ganzen Modells und einen Detailausschnitt von den Kollektorrändern. Zur Einsparung von Rechenzeit wird eine Symmetrieachse verwendet. So wird die Elementanzahl halbiert, ohne dass die Ergebnisse beeinflusst werden.





..

Abb. 33 Modellnetz. (Einheiten in Meter)

4.3.5 Parameterstudie und Auswertung

4.3.5.1 Variation Basismodellparameter

Um die qualitativen Zusammenhänge im Simulationsmodell zu untersuchen, wird eine Variation der grundlegenden Modellparameter gemäß Tab. 8 durchgeführt. Diese Parameter bilden den so genannte „Basismodel“. Bei der Variation der Parameter werden die Daten immer in Form der Tab. 8 dargestellt, wobei nur einer der Werte variiert wird. Die Tabellen für die einzelnen Parameterstudien sind dem Anhang beigefügt.

Versuch1

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedürchlaßkoeff.Rohr	100.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	1194.00	d
Ende der Integration	1402.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	296.66	kWh/Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	118.85	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	247.22	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	9.16	W/lfmRohr

Tab. 8 Variation grundlegender Modellparameter des Basismodells

Abb. 34 stellt den Wärmestrom, der durch die Kollektrowände für 4 Jahre fließt dar. Am Diagramm ist ein negativer Wärmestrom zu bemerken. In diesem Zeitpunkt ist die Temperatur der Kollektoren mit 4 °C höher als die Temperatur des umliegenden Bodens und es findet ein umgekehrter Wärmestrom stat. Dies erfolgt wegen der starken Wärmeentnahme, die mit einem hohen Wärmedurchlasskoeffizient der Kollektorwände verbunden ist. In der Parameterstudie wird die mittlere Intensität der Wärmeentnahme untersucht.

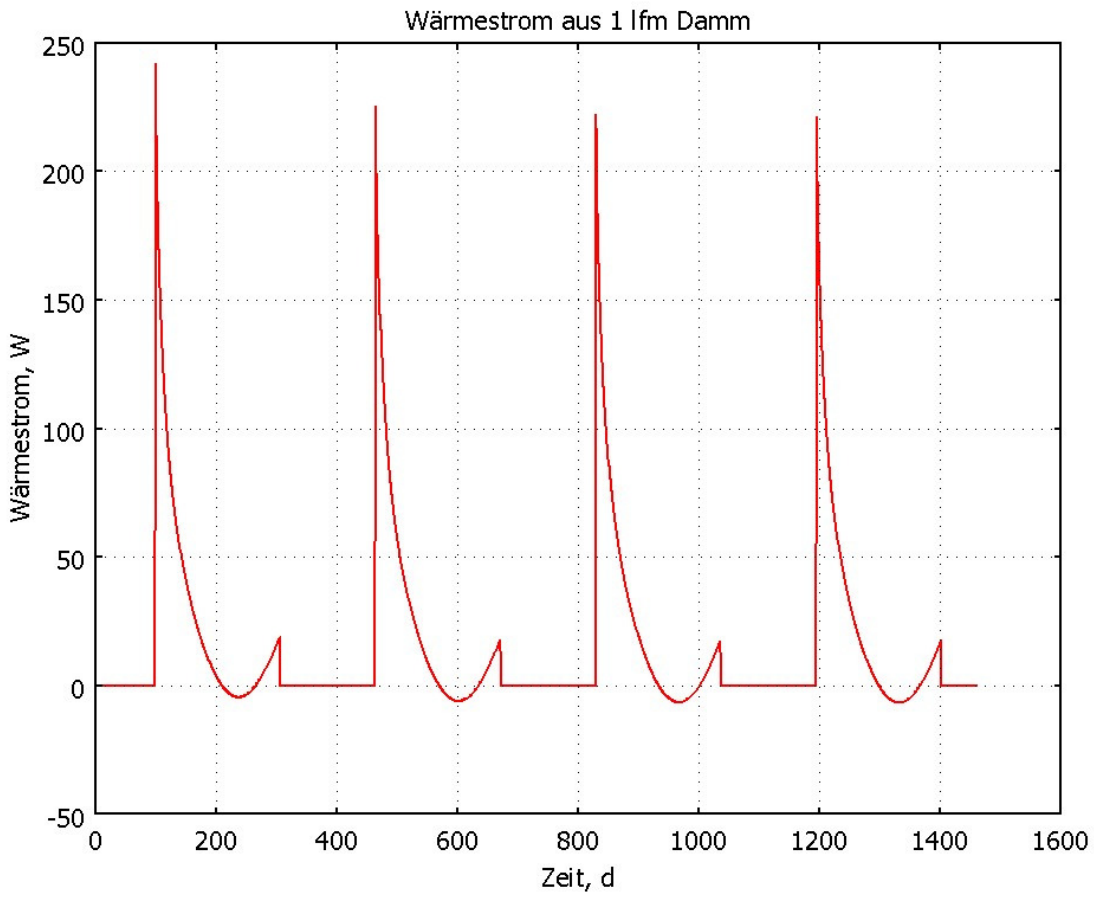


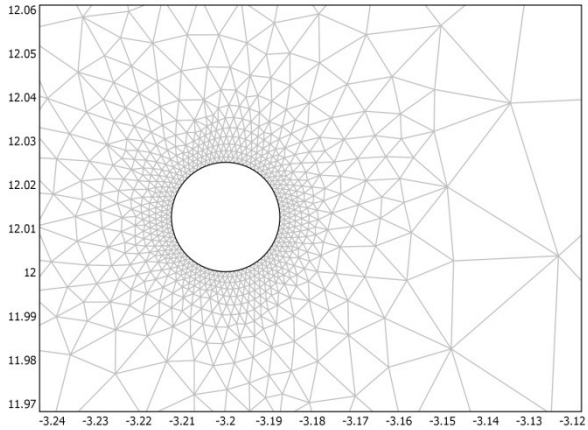
Abb. 34 Wärmestrom der durch die Kollektorwände für 4 Jahre fließt (Basismodell)

Variation Netz (Netz neben den Kollektoren)

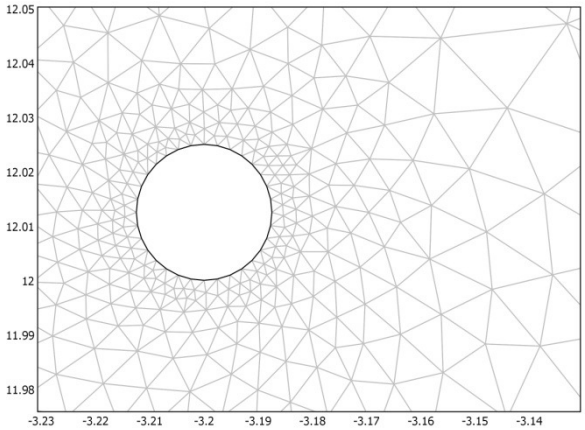
Hier werden für die Elementgröße des Rohrrandes folgende Werte angenommen: 1, 2.5, 5 und 10 mm (Abb. 35). Abb. 36 zeigt die Abhängigkeit der Wärme von der Elementgröße.

Elementgröße Kollektorrand, mm	10	5	2.5	1
Elementanzahl	7332	9600	17279	23031
Freiheitsgrade	14939	19577	35188	47340
Rechenzeit, min	5	7	14	23
Wärmestrom aus 1lfm Damm, W	237.76	244.57	246.7	247.2

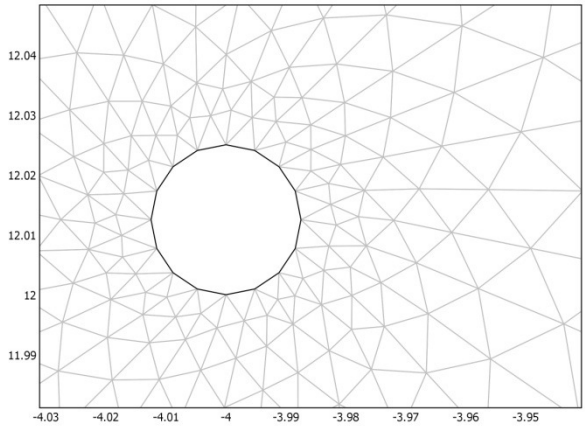
Tab. 9 Variation der Elementgröße Kollektorrand – Basismodeldaten. Bemerkung: Verwendung von Symmetrie



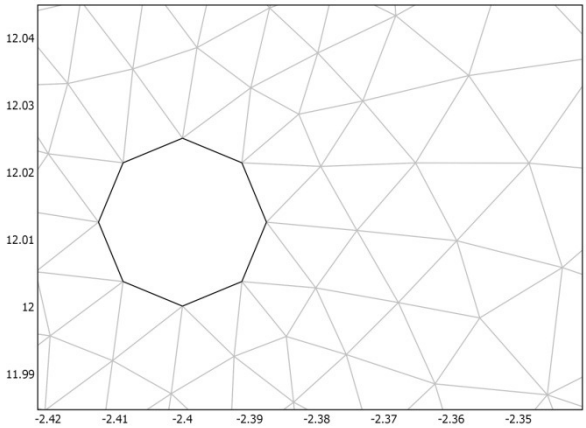
Elementgröße 1mm



Elementgröße 2.5 mm



Elementgröße 5 mm



Elementgröße 10 mm

Abb. 35 Elementgröße Kollektorrand

Wärmestrom 1lfm Damm, W	Wärmestrom 1lfm Kollektor, W	Elementgröße Kollektorrand, m
247.22	9.16	0.001
246.74	9.14	0.0025
244.57	9.06	0.005
237.76	8.81	0.01

Tab. 10 Wärmestrom – Variation Elementgröße

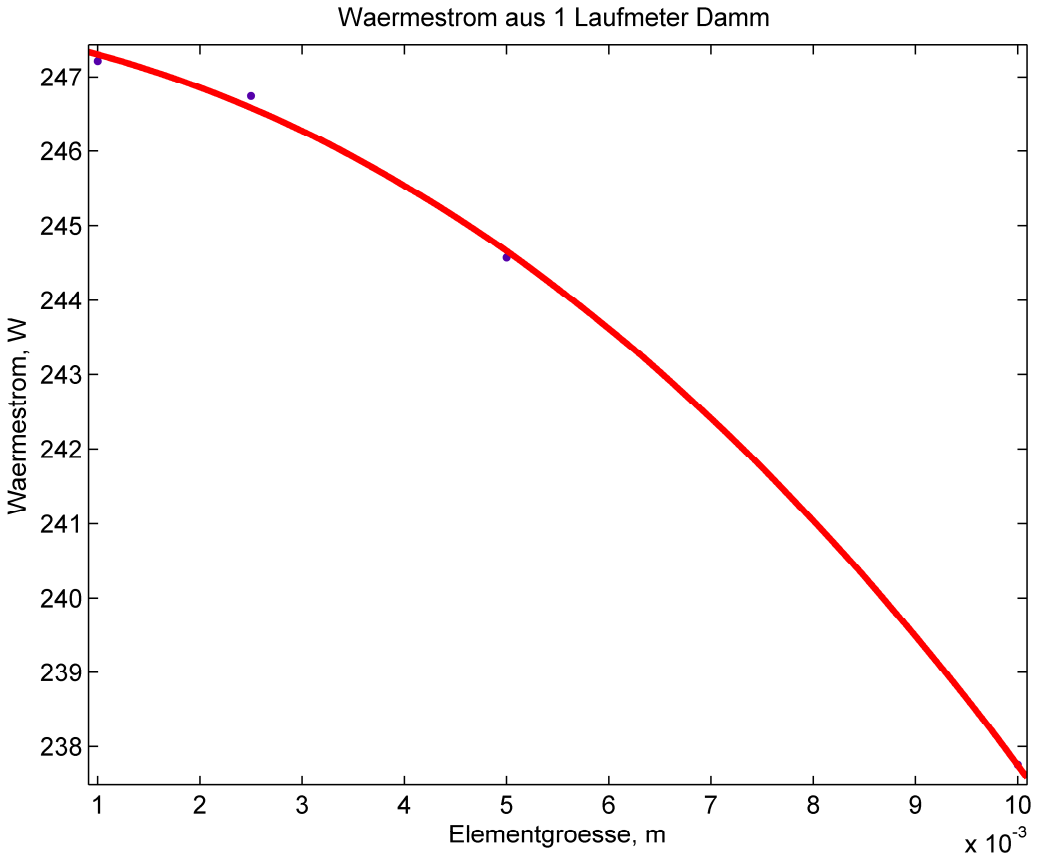


Abb. 36 Wärmestrom – Variation Elementgröße

Der Prozentfehler zwischen einem ganz feinen Netz mit 1 mm Elementgröße und diese mit 5 mm beträgt etwa 1%. Der wird nach folgender Formel berechnet.

$$F = \frac{I_2 - I_1}{I_2}.100\% = \frac{247.22 - 244{,}57}{247{,}22} = 1{,}07\%,$$

I_2 - Mittlerer Wärmestrom bei Element 1mm

I_1 - Mittlerer Wärmestrom bei Element 5mm

Wenn der Prozentfehler mit der Hilfe von der Kurvengleichung berechnet wird, ergibt sich ein wenig größeren Fehler:

I_3 - Mittlere Wärmestrom, Berechnet nach der folgenden Gleichung:

$I_3(x)$ = -46530*exp(21.79*x)+46780*exp(21.67*x);

Elementgröße x = 1e-10

I_3 (x→0) = 250 (Grenzwert)

$$F = \frac{I_3 - I_1}{I_1}.100\% = \frac{250 - 244{,}57}{244{,}57} = 2{,}17\%$$

Diese relativen Fehler zeigen, dass eine Elementgröße von 5mm ausreichend für die weiteren Berechnungen ist.

Variation Jahresanzahl

Die Studie zeigt, ab welchem Jahr der integrierte Wärmestrom aus dem Damm relativ stabil bleibt. Auf Abb. 37 ist der von einem Laufmeter Damm entzogene Wärmestrom dargestellt. Für die Geometrie und die Anfangs- und Randbedingungen werden die bis jetzt beschriebenen Daten benutzt. Eine Aufzählung der Werte sowie der integrierten Wärmestrommengen pro Laufmeter Damm und pro Laufmeter Rohrleitung sind in Tab. 11 gegeben .

Wärmestrom 1lfm Damm, W	Wärmestrom 1lfm Kollektor, W	Jahr
287.58	10.65	1
254.38	9.42	2
247.46	9.17	3
244.57	9.06	4

Tab. 11 Wärmestrom – Variation Jahresanzahl

Die der Gleichung der auf bild Abb. 37 gezeichnete Kurve lautet: a*exp(-b*x)+c,

I_1 (x→∞) = 182,8*exp(-1.444*x)+244.4

I_1 (x→∞) = 244.4(Grenzwert)

$$F = \frac{I_2 - I_1}{I_2}.100\% = \frac{244.57 - 244{,}4}{244.4} = 0{,}06\%,$$

I_2 - Mittlere Wärmestrom Jahr 4

I_1 - Mittlerer Wärmestrom Grenzwert

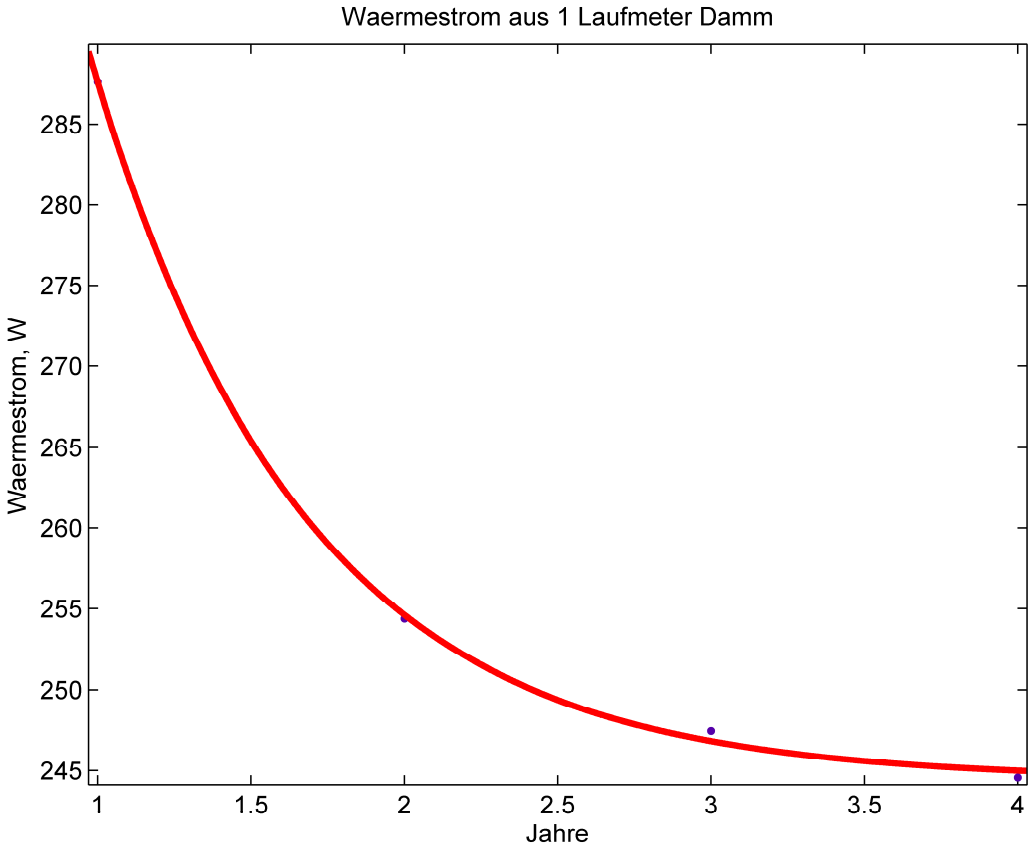


Abb. 37 Wärmestrom – Variation Jahresanzahl

Im vierten Jahr gibt es nur einen vernachlässigbar kleinen Unterschied zu dem Grenzwert. Eine Modelluntersuchung im dritten Jahr würde auch ausreichen. Für die weiteren Berechnungen werden 4 Jahre Simulationszeit verwendet.

Variation der Rohrtemperatur

Diese Variation zeigt die quantitative Verbindung zwischen Rohrtemperatur und entzogener Wärmemenge bzw. Wärmestrom. Die Ergebnisse sind auf Tab. 12 und Abb. 38 zu sehen.

Wärmestrom 1lfm Damm, W	Wärmestrom 1lfm Kollektor, W	Temperatur Kollektor, °C
473.92	17.55	0
359.26	13.31	2
244.57	9.06	4
130.05	4.82	6

Tab. 12 Wärmestrom – Variation Rohrtemperatur

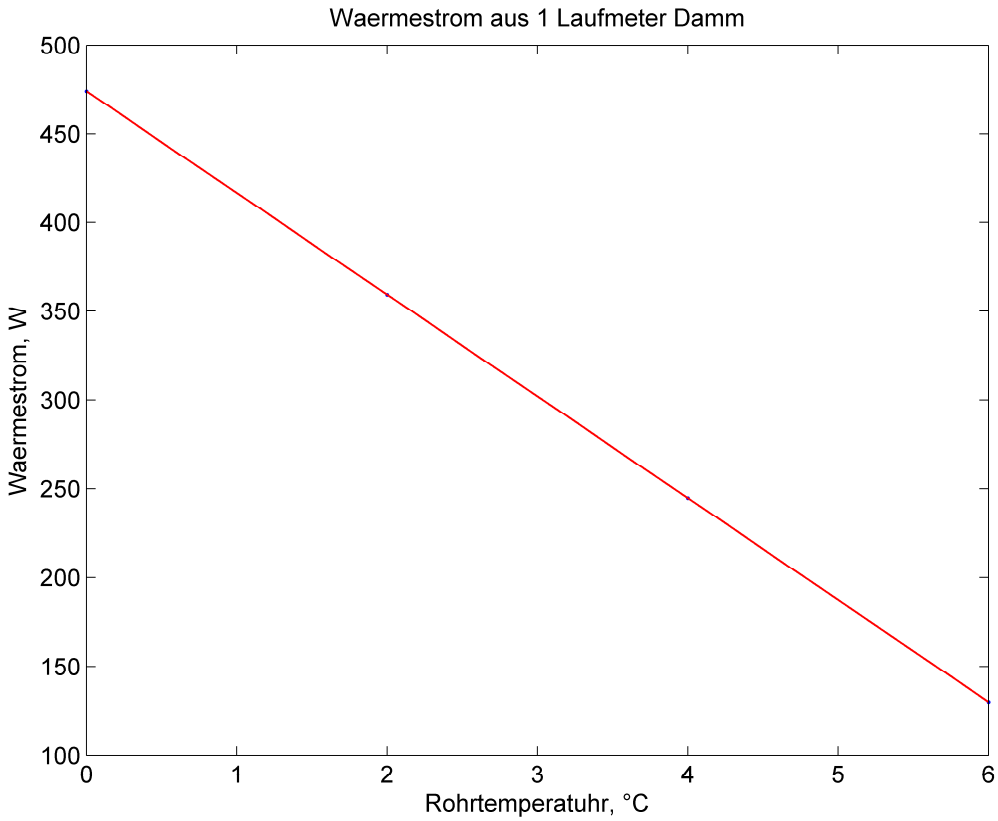


Abb. 38 Wärmestrom – Variation Rohrtemperatur

Bei dieser Variation bemerkt man, dass das System einen fast linearen Zusammenhang aufweist. Dieser Zusammenhang gilt nicht nur für Dämme sondern auch für andere Erdwärmequellen. In den weiteren Berechnungen wird eine Kollektortemperatur von 4 °C verwendet.

Variation von Wärmedurchlaßkoeffizient des Rohres

Diese Variation (Tab. 13 und Abb. 39) basiert darauf, dass verschiedene Rohrmaterialien für Absorberleitungen benutzt werden können. Der Wärmedurchlaßkoeffizient des Rohres fasst die Wärmeleitfähigkeit des Materials und die Wandstärke des Rohres zusammen.

Wärmestrom 1lfm Damm, W	Wärmestrom 1lfm Kollektor, W	Wärmedurchlaßkoeff. Kollektor, W/(m^{2}K)
164.95	6.11	10
232.21	8.60	50
244.57	9.06	100
249.01	9.22	150

Tab. 13 Wärmestrom – Variation Wärmedurchlässigkeit des Rohres

Mit einem Wärmedurchlaßkoeffizient von 1000 W/(m^2.K), was praktisch derzeit nicht möglich ist, steigt der mittlere Wärmestrom nur auf 256.73 W. Basierend auf der heutigen Technologie kann man von einem Wärmedurchlaßkoeffizient von 150 W/(m^2.K) angehen. In den weiteren Berechnungen wird aber einen Wärmedurchlaßkoeffizient von 100 W/(m^2.K) verwendet.

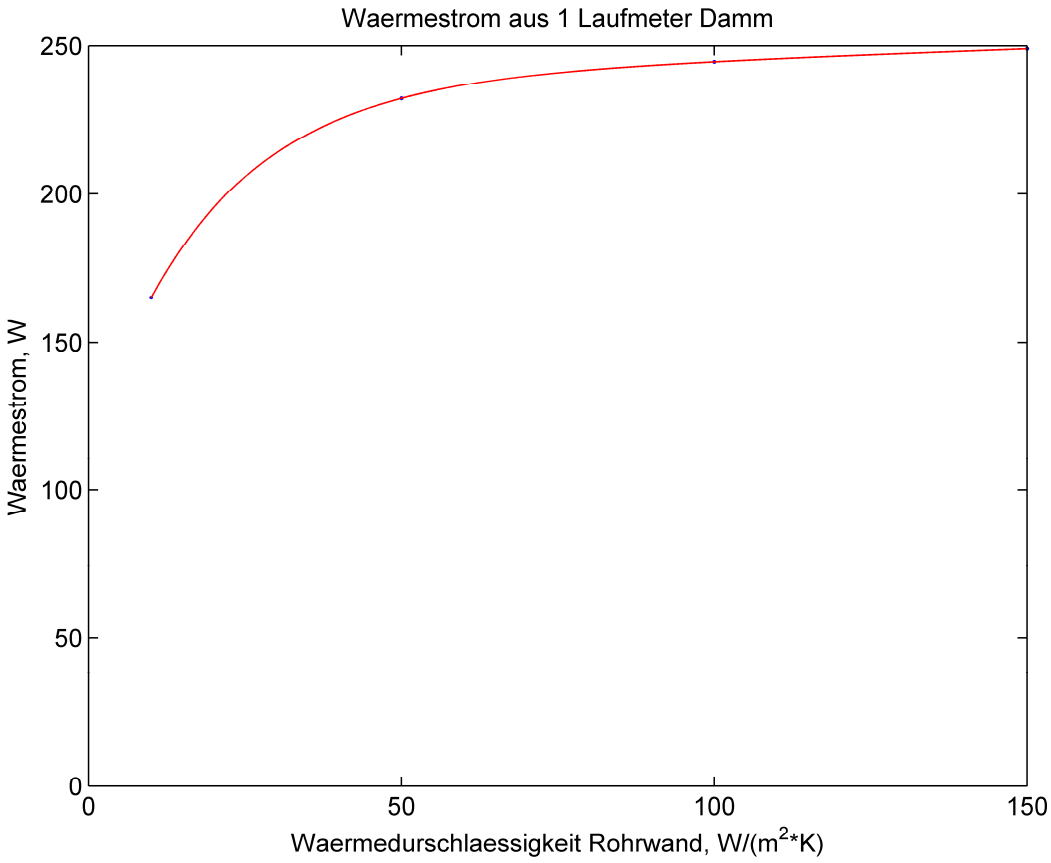


Abb. 39 Wärmestrom – Variation Wärmedurchlässigkeit des Rohres

Auswertung von Temperatur und Wärmedurchlaßkoeffizient der Kollektoren

Zusammen mit der Außentemperatur und den Bodenparametern stellen die Rohr- und Fluidparameter einen komplizierten Wärmestrom im Jahr dar. Auf Abb. 40 sind die Wärmeströme beim Wärmedurchlass der Rohrwände Λ = 50 und 150 W/(m^2.K) dargestellt. Dieser Wert hat einen Einfluss auf den Spitzenwert, er beeinflusst aber die integrierte Wärmemenge nur wenig (siehe Abb. 39). Das Basismodell wird mit Wärmedurchlass Λ = 100 W/(m^2.K) berechnet. Abb. 34 auf S. 52 zeigt dieselbe Grafik für das Basismodell.

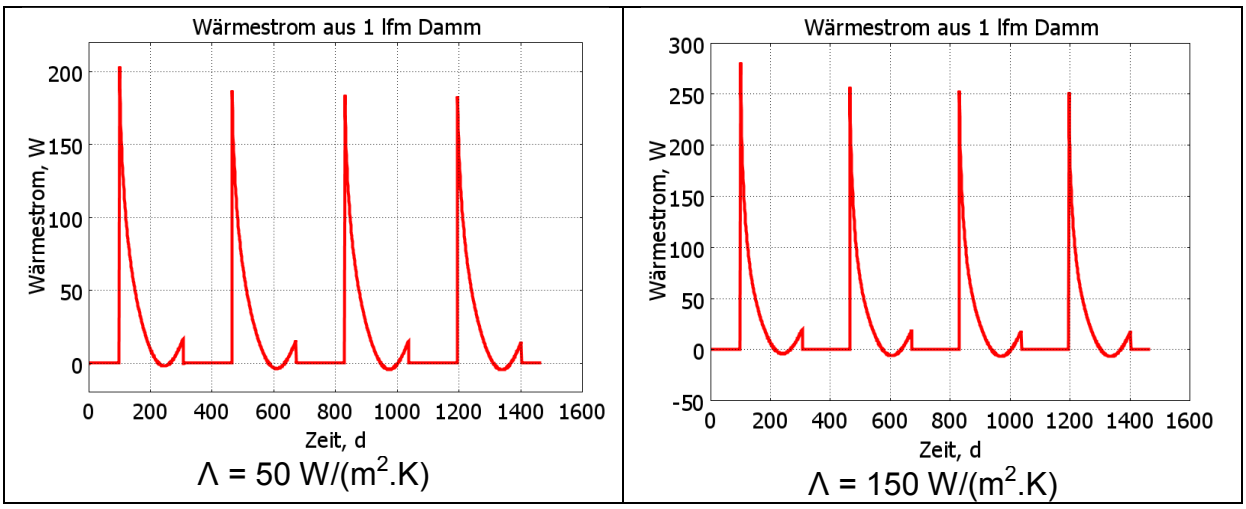


Abb. 40 Wärmestrom für 4 Jahren - Einfluss der Rohrparameter

Wie schon erwähnt, wird das Fluid nur durch konstante Temperatur ersetzt. Diese Temperatur hat einen sehr starken Einfluss sowie auf den Spitzenwert als auch auf die entzogene Wärmemenge. Auf Abb. 41 sind die Wärmeströme bei mittlerer Fluidtemperatur T = 2 und 6 °C dargestellt. Mittlere Temperatur unter 2 °C ist für Dämme nicht geeignet, da diese zu einer schädlichen Wirkung führt. Die Fluidtemperatur des Basismodells ist 4 °C (Abb. 34 auf S. 52).

Auf Abb. 42 sind der Wärmedurchlass und die Fluidtemperatur zusammen dargestellt. Die Daten sind von der Parameterstudie des Basismodells (3-lagig) genommen. Auf dem Bild ist der starke Einfluss der Fluidtemperatur zu beobachten. Der Schnittpunkt bei 100 W/(m^2.K) und 4 °C zeigt, wo sich das Basismodell befindet. Vom Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit wäre eine möglichst niedrige Temperatur der Umwälz mittel vernünftig.

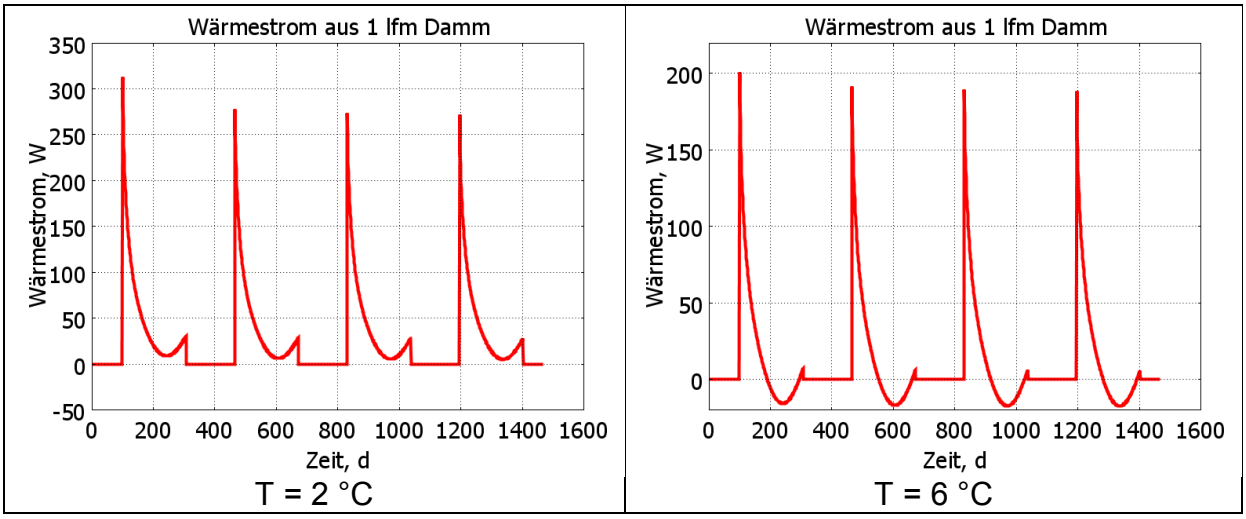


Abb. 41 Wärmestrom für 4 Jahre - Einfluss der Tempredatur des Fluids

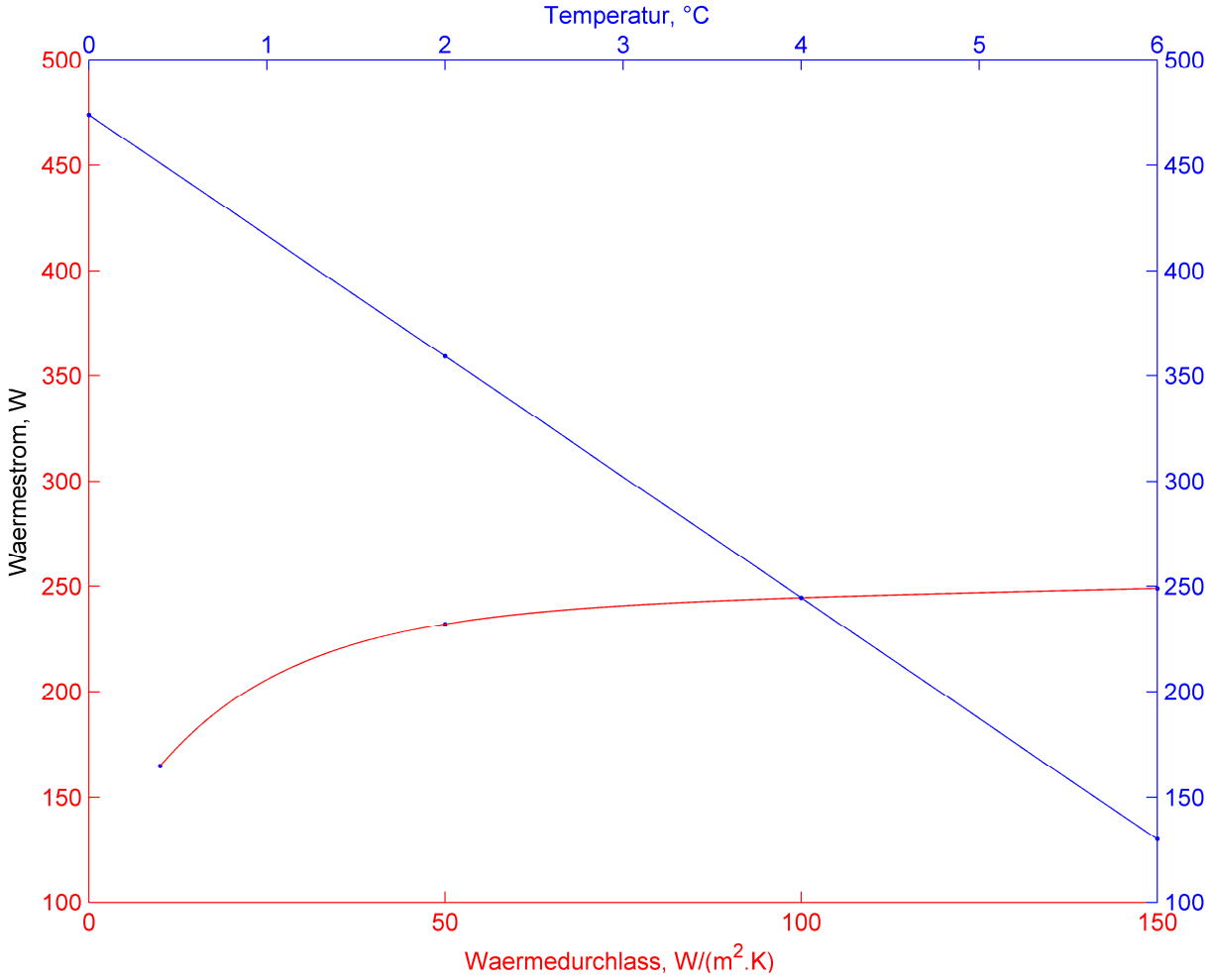


Abb. 42 Wärmestrom aus 1 lfm Damm – Durchlaß der Rohrwände und Fluidtemperatur

Variation Zeitschritt

Der Ein/Ausschalt-Zeitpunkt hängt naturgemäß auch mit dem Zeitschritt der Simulation zusammen und beeinflusst die Ergebnisse daher je nach Übereinstimmung der Schaltzeitpunkte mit den Zeitschritten in beide Richtungen. Die Genauigkeit des entzogenen Wärmestroms hängt nur wenig von dem Zeitschritt ab. Was sehr stark von dem Zeitschritt abhängt, ist die Verschiebung der Integrationszeit gegenüber der Ein- und Ausschaltung des Systems. Andererseits lassen sich Ein- und Ausschaltung des Systems für weniger als 6 Stunden nicht simulieren. Diese Begrenzung wird durch die Ersetzung der Heaviside Funktion mit stetig differenzierbarer Funktion aufgehoben, die die Systemkonvergenz sichert. Bei gleichem Zeitschritt kann man die Resultate aus anderen Parameterstudien vergleichen. Als Hauptzeitschritt gilt 1 Tag (Tab. 14).

.

Wärmestrom 1lfm Damm, W	Wärmestrom 1lfm Kollektor, W	Zeitschritt, d
247.26	9.16	0.5
244.57	9.06	1
239.46	8.87	2
249.08	9.23	4

Tab. 14 Wärmestrom – Variation Zeitschritt

4.3.5.2 Variation Lagenanzahl

Die Variation der Lagenanzahl gibt Aufschluss über die Ab- und Zunahme des Wärmestroms in Abhängigkeit von der Anzahl der Lagen und der Anzahl der Leitungen. Eine größere Lagenanzahl benötigt nicht nur mehr Einbaukosten, sondern auch mehr Betriebskosten. Bei dieser Variation werden die Anfangsgeometrie und die Basismodelparameter benutzt (Abb. 26 - Abb. 28, Tab. 4 - Tab. 6). Hier werden nur die Lage und die Anzahl der Kollektoren variiert.

Lagenvariation bei verschiedener Kollektoranzahl

Die Abbildungen (Abb. 43 bis Abb. 46) zeigen verschiedene Kombinationen von Lagen und Anzahl von Rohre (Kollektoren).

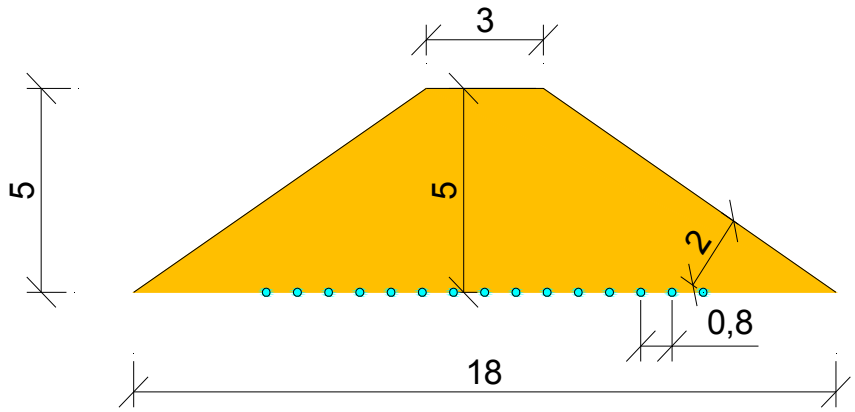


Abb. 43 Geometrie Einlagig. Kollektoranzahl = 15

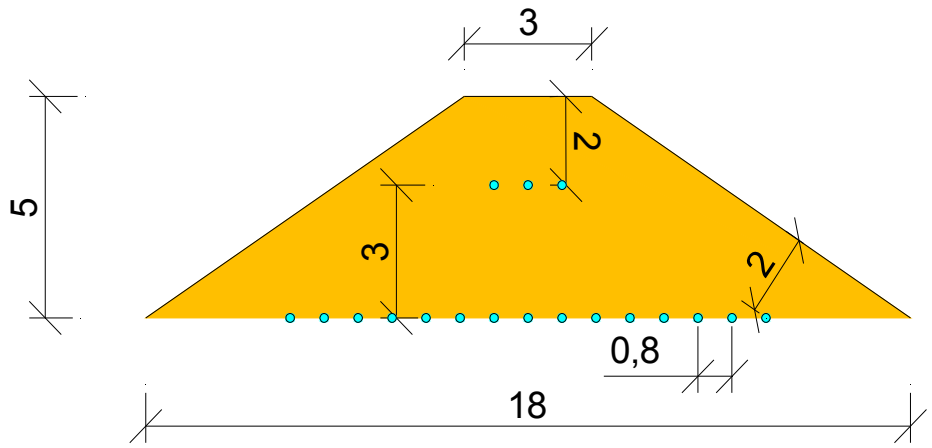


Abb. 44 Geometrie Zweilagig A, Kollektoranzahl = 18

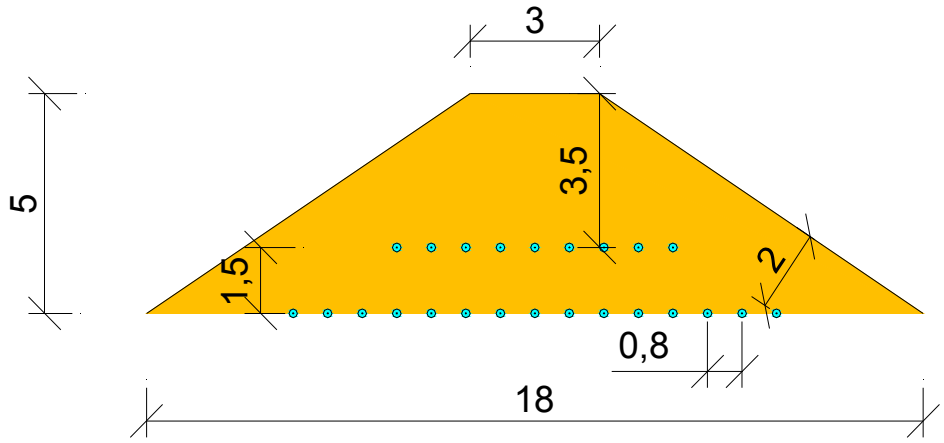


Abb. 45 Geometrie Zweilagig B Kollektoranzahl = 24

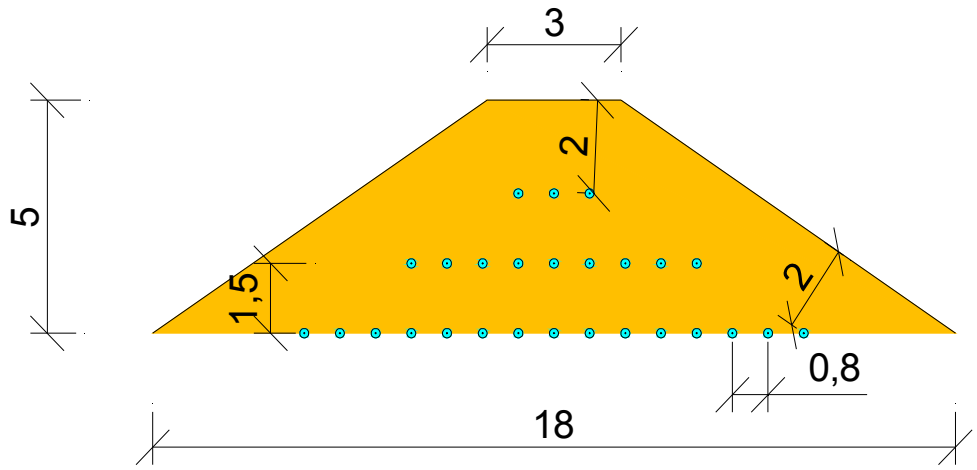


Abb. 46 Geometrie Dreilagig Kollektoranzahl = 27

In Tab. 15 sind die Ergebnisse der Variation gegeben.

Wärmestrom 1lfm Damm,	Wärmestrom 1lfm Kollektor,	Kollektoranzah	Lage
202.64	13.51	15	1
222,24	12,35	18	2A
235,35	9,81	24	2B
244.57	9.06	27	3

Tab. 15 Wärmestrom – Variation Lagenanzahl – Kollektoranzahl

Die Abweichung zwischen dem 1- und 3- lagigen Modell beträgt:

$$P_{1-3} = \frac{q_2 - q_1}{q_2}.100\% = \frac{244.57 - 202.64}{244.4} = 17.2\%,$$

q_2 - Mittlerer Wärmestrom aus 1lfm Damm 3-lagig

q_1 - Mittlerer Wärmestrom aus 1lfm Damm 1-lagig

$$P_{2A-2B} = \frac{q_2 - q_1}{q_2}.100\% = \frac{235.35 - 222.24}{235.35} = 5.6\%,$$

q_2 - Mittlerer Wärmestrom aus 1lfm Damm 2-lagig B

q_1 - Mittlerer Wärmestrom aus 1lfm Damm 2-lagig A

Der naturgemäß hohe Herstellungsaufwand und die zusätzlichen Betriebskosten lässt das 1-lagige Modell am wirtschaftlichsten erscheinen. Für ein zweilagiges Modell wird der Mittelwert von 2A und 2B genommen.

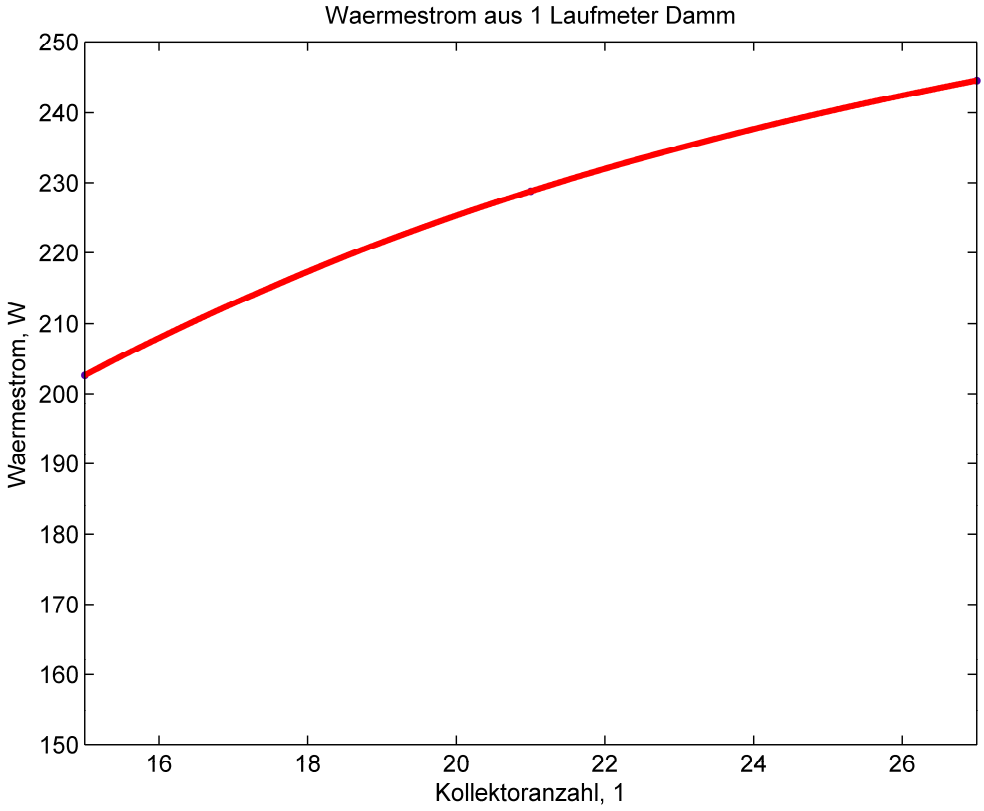


Abb. 47 Wärmestrom – Variation Lagenanzahl – Kollektoranzahl(1)

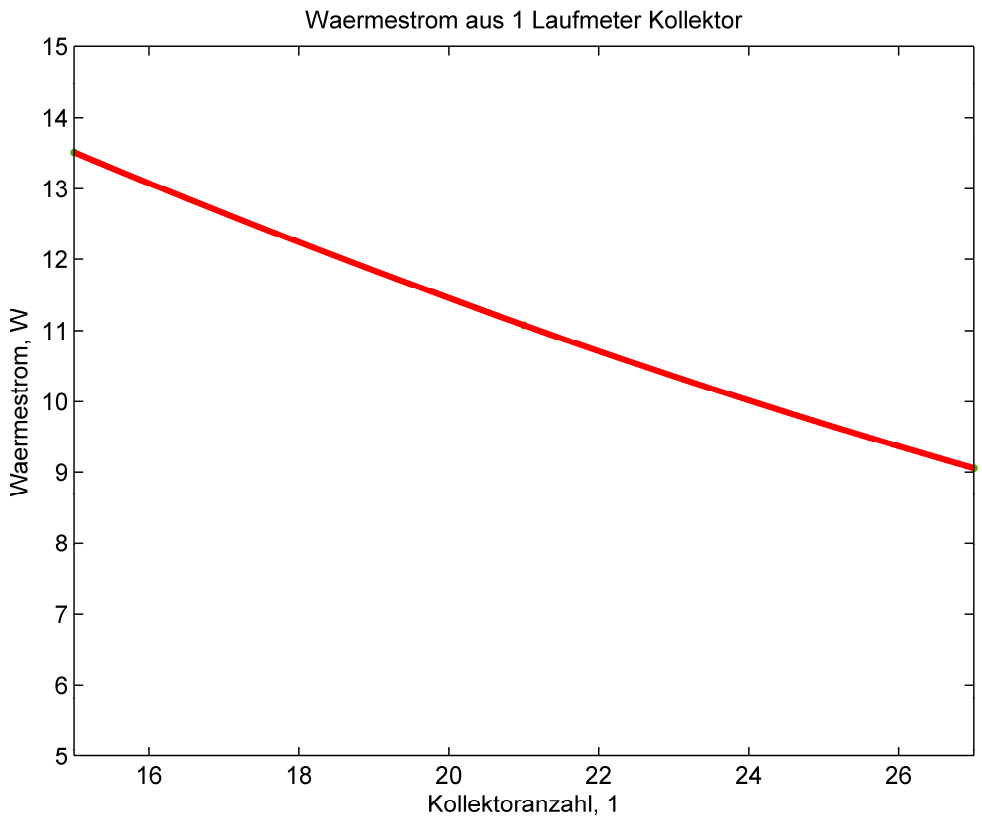


Abb. 48 Wärmestrom – Variation Lagenanzahl – Kollektoranzahl(2)

Lagevariation bei gleich bleibender Kollektoranzahl

Abbildungen (Abb. 49 bis Abb. 51) zeigen die Variation der Kollektorlagen bei gleichbleibender Kollektoranzahl. Die Ergebnisse sind in Tab. 16 zusammengefasst.

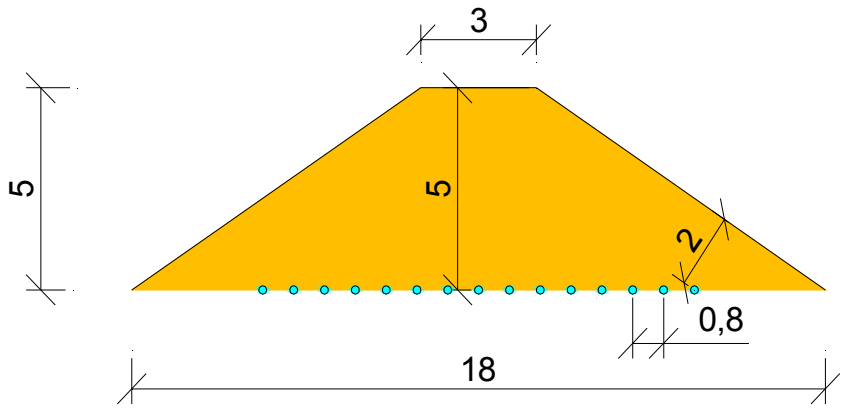


Abb. 49 Geometrie Einlagig, Kollektoranzahl = 15

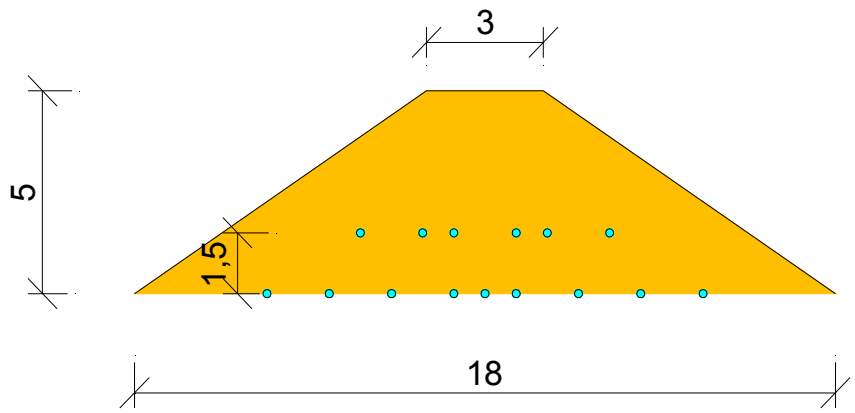


Abb. 50 Geometrie Zweilagig, Kollektoranzahl = 15

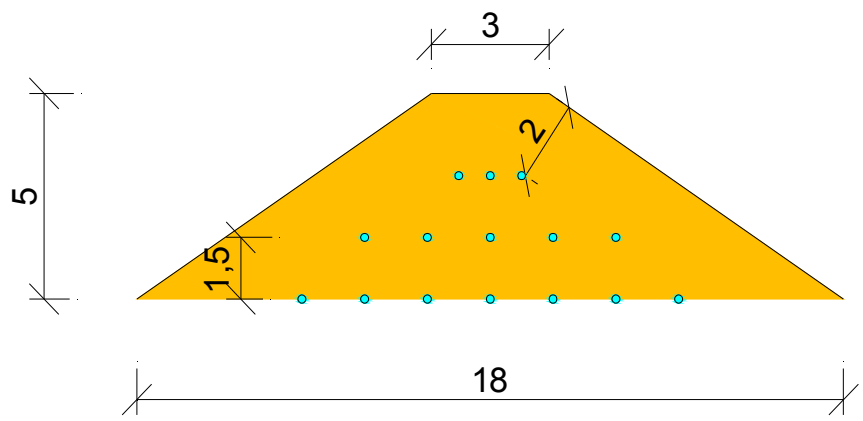


Abb. 51 Geometrie Dreilagig, Kollektoranzahl = 15

Wärmestrom 1lfm Damm, W	Wärmestrom 1lfm Kollektor, W	Kollektoranzahl	Lage
202,63	13,51	15	1
206,36	13,76	15	2
201,73	13,45	15	3

Tab. 16 Wärmestrom – Variation der Lagenanzahl bei gleicher Kollektoranzahl

Eine graphische Darstellung der Werte aus Tab. 16 sind auf Abb. 52 und Abb. 53 gezeigt.

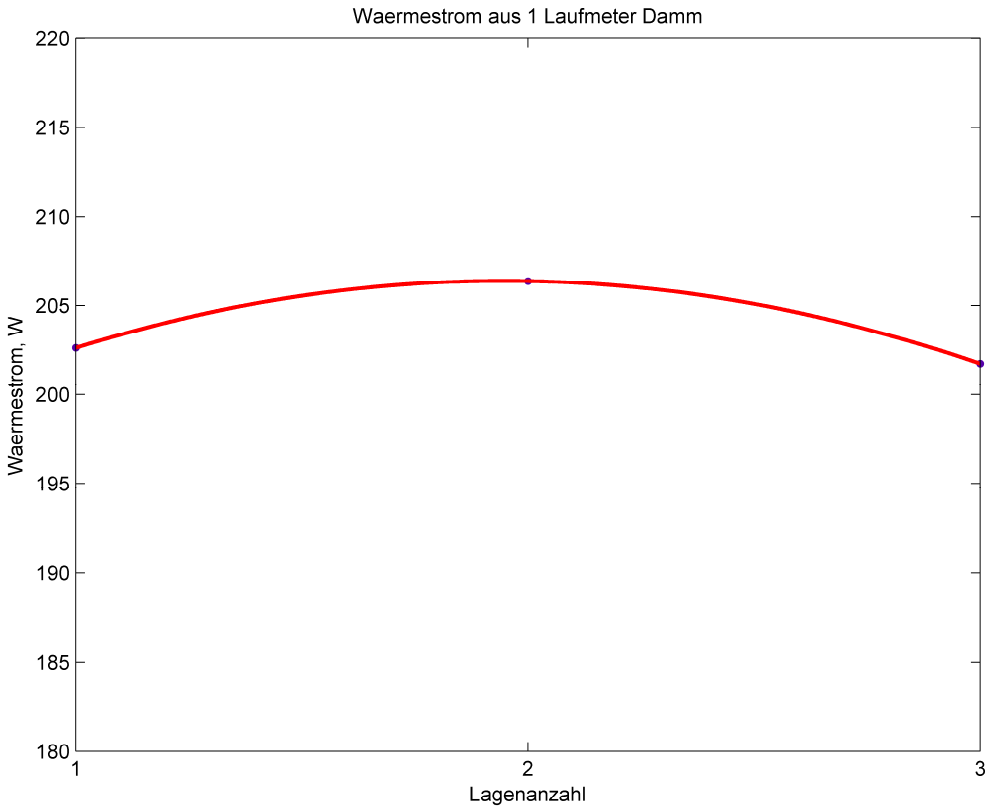


Abb. 52 Wärmestrom – Variation Lagenanzahl(1)

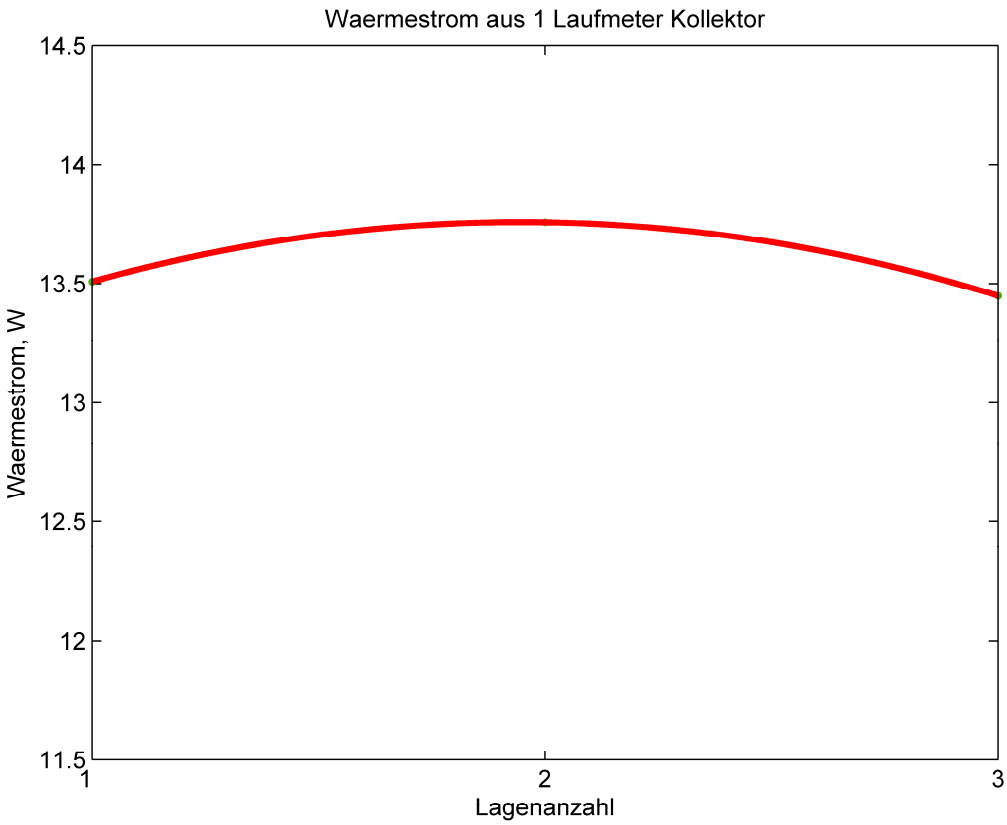


Abb. 53 Wärmestrom – Variation Lagenanzahl(2)

Die Abweichung zwischen den 1- und 2- lagigen Modell beträgt:

$$P = \frac{q_2 - q_1}{q_2}.100\% = \frac{206.36 - 202.63}{206.36} = 1.8\%,$$

q_2 - Mittlerer Wärmestrom aus 1lfm Damm 2-lagig

q_1 - Mittlerer Wärmestrom aus 1lfm Damm 1-lagig

Als wirtschaftlich erscheint das 1-lagige Modell, weil es einen sehr geringen Unterschied zwischen dem 1-lagigen und dem 2-lagigen Modell gibt. Die Abb. 52 und die Abb. 53 zegen, dass eine dritte Lage einen negativem Effekt bewirkt. Das kann durch den Einfluss der Tiefe erklärt werden. Die dritte Lage befindet sich nur 2 m unter der Erdoberfläche und wird daher vom seitlichen Wärmestrom stark beeinflusst. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen wird nur das einlagige Modell weiter untersucht.

4.3.5.3 Variation Kollektoranzahl

Horizontalabstand

Auf den folgenden Abbildungen (Abb. 54 bis Abb. 57) ist die Variation des Horizontalabstandes der Kollektoren ersichtlich.

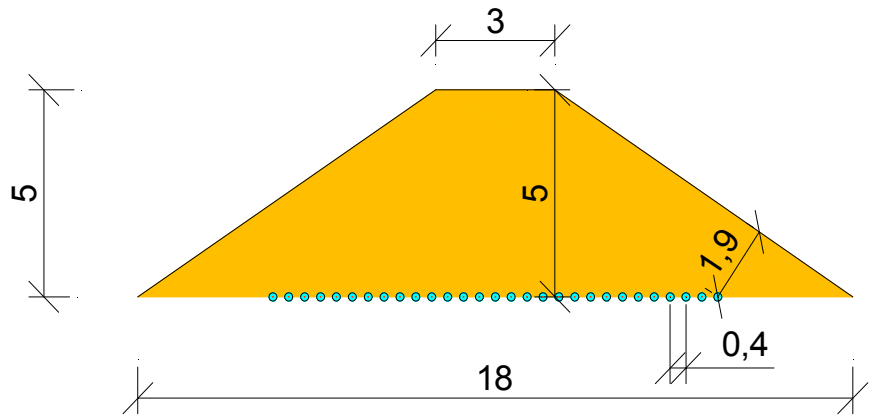


Abb. 54 Geometrie Kollektorabstand 0.4 m, 25 Rohre

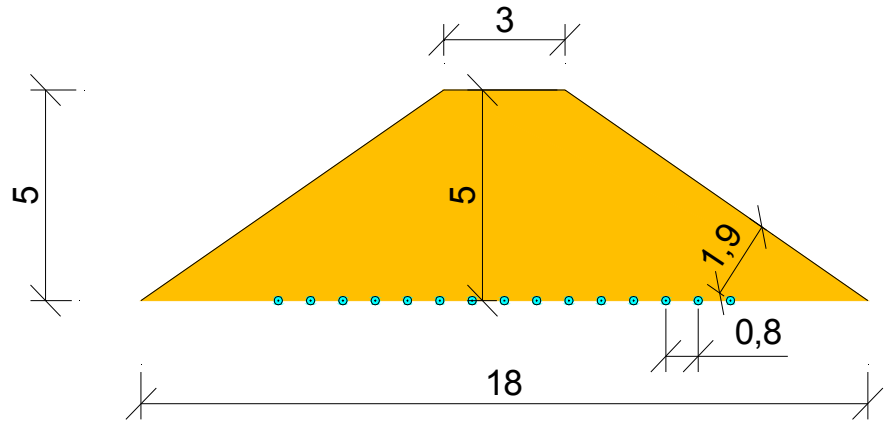


Abb. 55 Geometrie Kollektorabstand 0.8 m, 15 Rohre

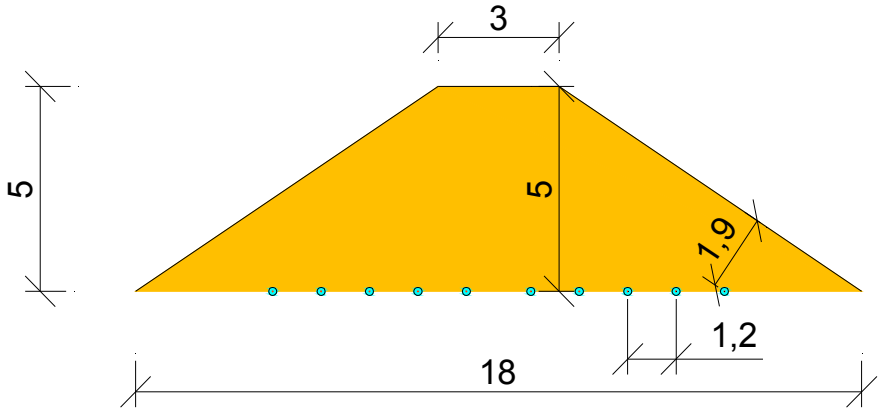


Abb. 56 Geometrie Kollektorabstand 1.2 m, 10 Rohre

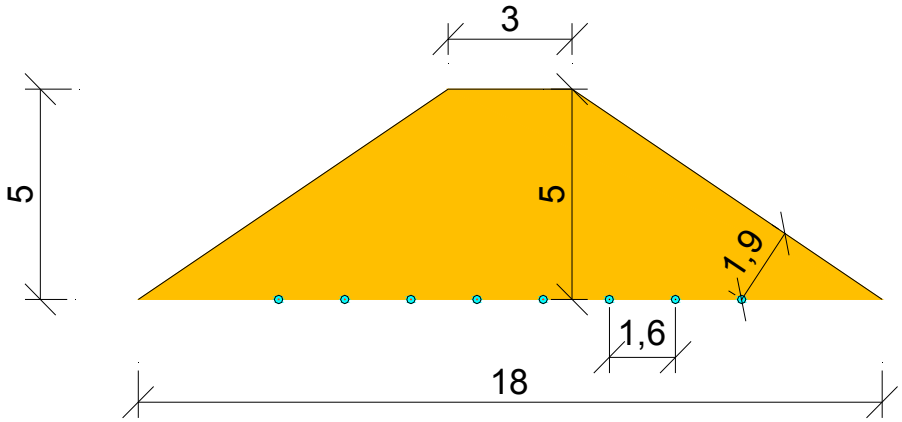


Abb. 57 Geometrie Kollektorabstand 1.6 m, 8 Rohre

Die Ergebnisse der Variation sind in Tab. 17 gegeben.

Wärmestrom 1lfm Damm, W	Wärmestrom 1lfm Kollektor, W	Abstand, m	Anzahl der Leitungen
228,06	7,86	0,40	29
202,43	13,50	0,80	15
177,49	17,75	1,20	10
160,92	20,12	1,60	8

Tab. 17 Wärmestrom – Variation Abstand

Die Verwendung der 80%/20% Regel ergibt eine relativ gute erste wirtschaftliche Optimierung des Systemaufbaus.

$80\%.W_{\max} = 80\%.228.06 = 182.45$, W Wärmestrom

Daraus ergibt sich ein idealer Kollektorabstand von 1.1 m (Abb. 58 und Abb. 59)

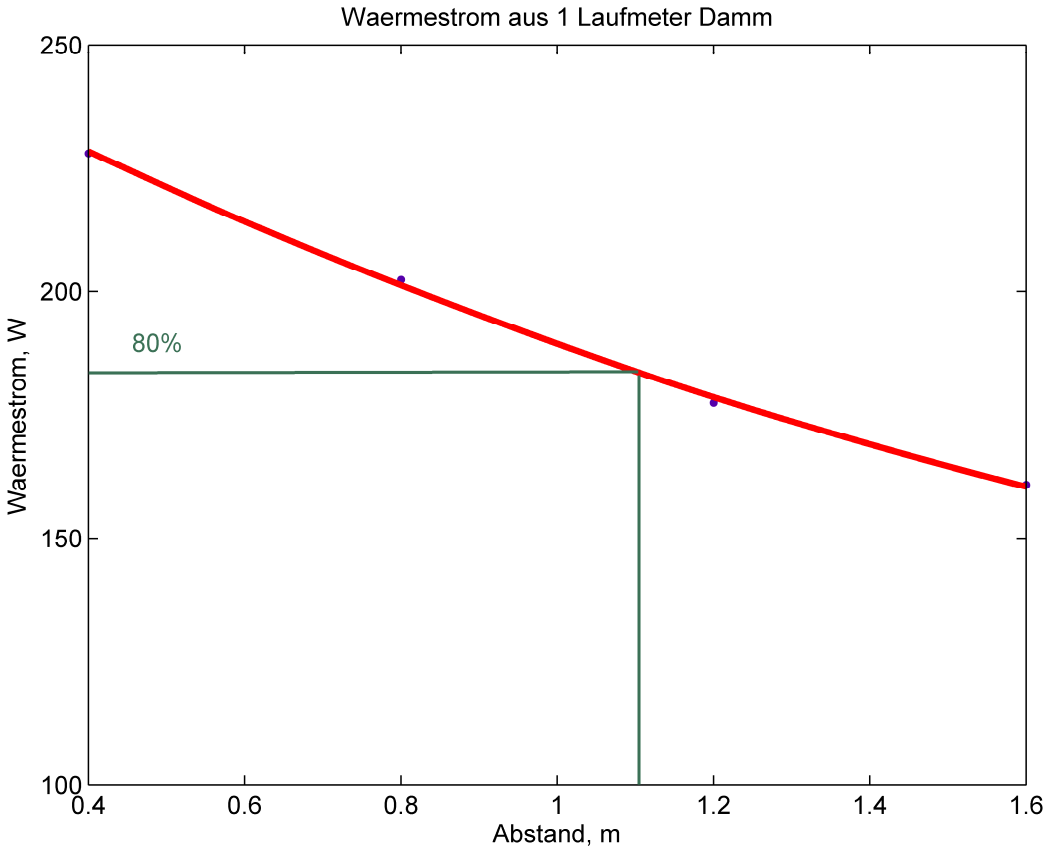


Abb. 58 Wärmestrom – Variation Abstand(1)

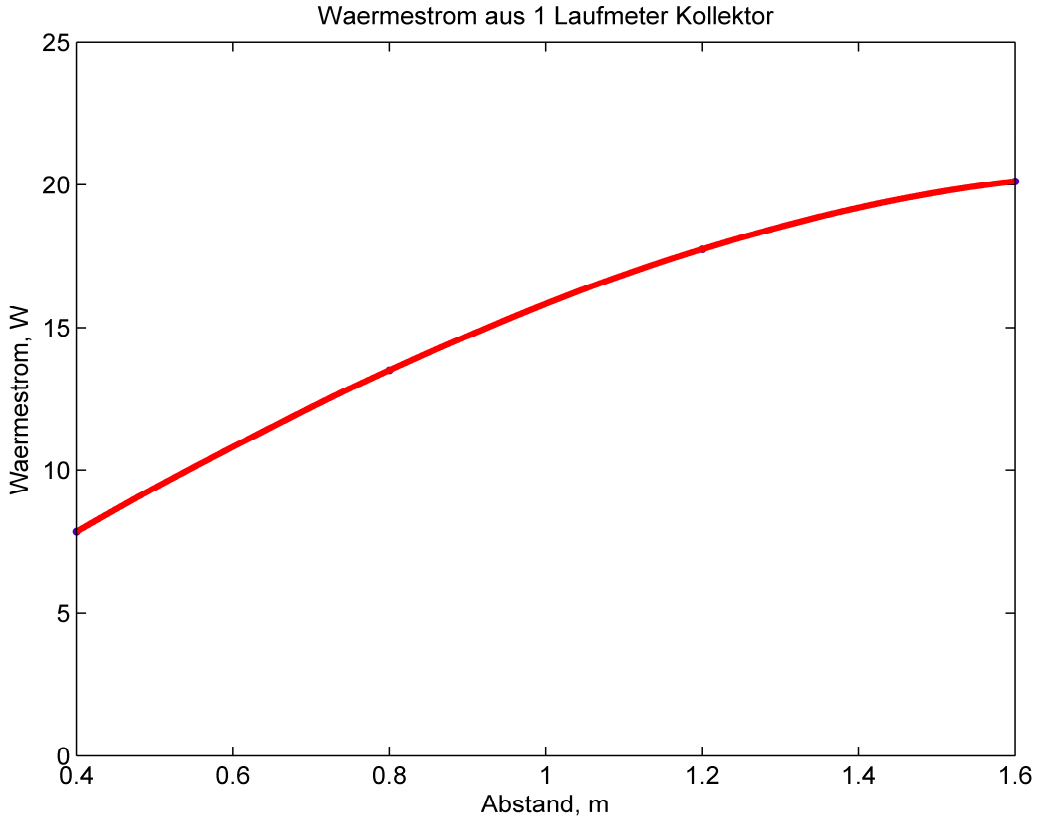


Abb. 59 Wärmestrom – Variation Abstand(2)

Seitenabstand

Für den Seitenabstand wird 1 m als minimaler Wert angenommen. Weniger als 1 m Oberflächenabstand wird für Vorlauftemperaturen über 0 ° C als nicht relevant betrachtet. Die Variationen sind auf Abb. 60 bis Abb. 63 dargestellt.

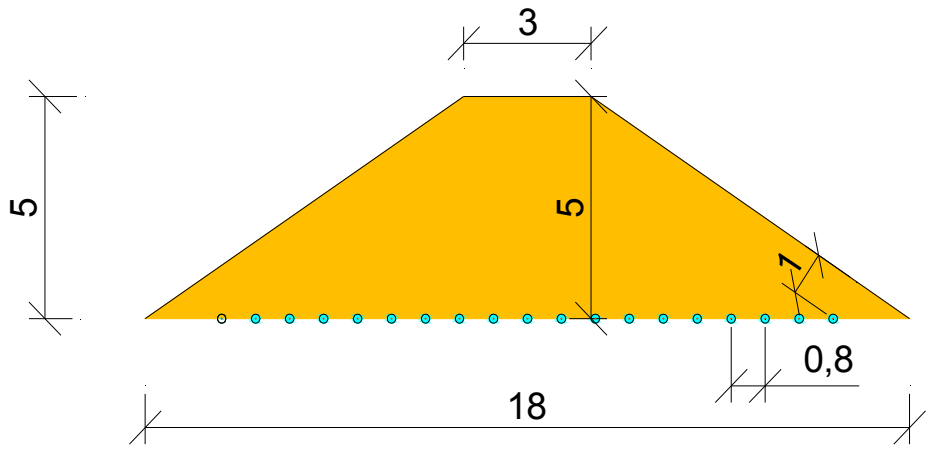


Abb. 60 Geometrie Seitenabstand 1 m

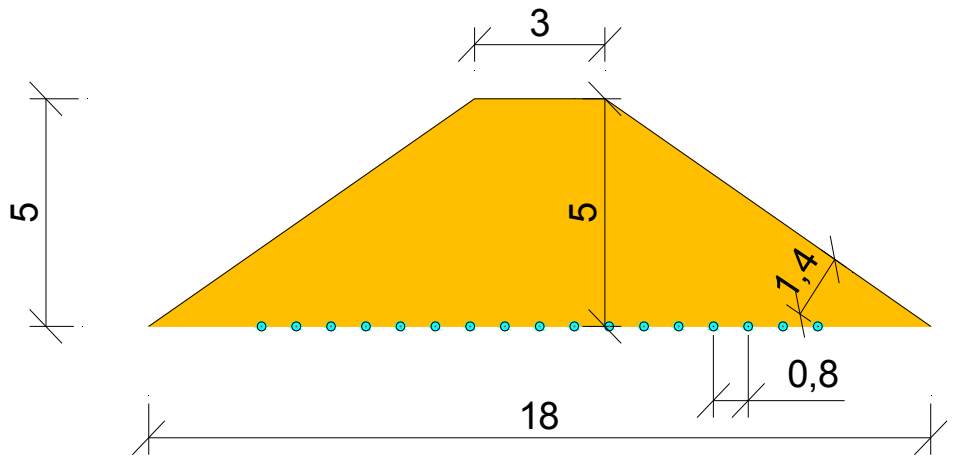


Abb. 61 Geometrie Seitenabstand 1.4 m

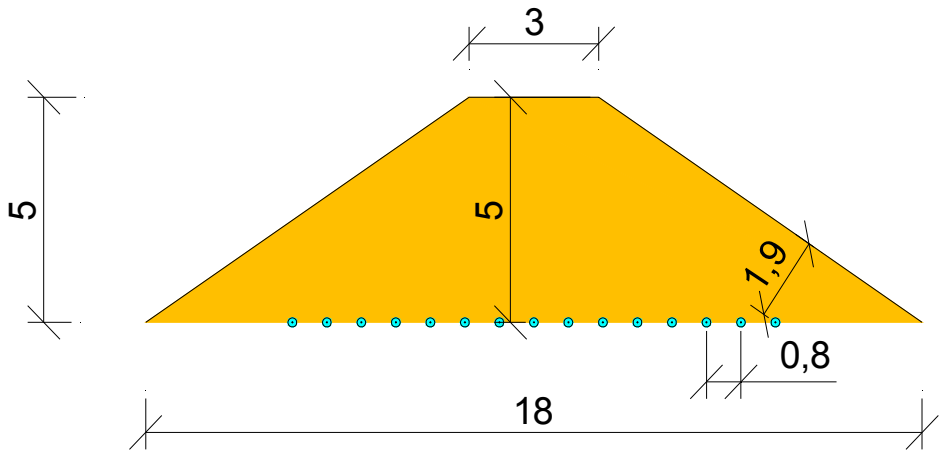


Abb. 62 Geometrie Seitenabstand 1.9 m

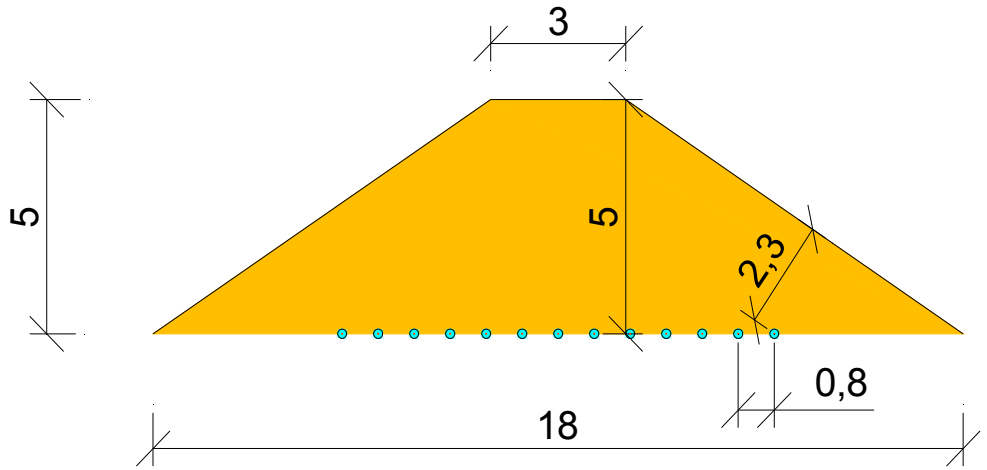


Abb. 63 Geometrie Seitenabstand 2.3 m

Die Ergebnisse der Variation sind in Tab. 18 gegeben.

Wärmestrom Damm, W	Wärmestrom Kollektor, W	Seitenabstand, m	Anzahl der Leitungen
230,10	12,11	1,00	19
217,41	12,79	1,40	17
202,39	13,49	1,90	15
185,45	14,27	2,30	13

Tab. 18 Wärmestrom – Variation Seitenabstand

Bei der Verwendung der 80%/20% Regel, wird der folgende Seitenabstand als Optimum genommen:

$80\%.W_{\max} = 80\%.230.1 = 184$, W Wärmestrom aus 1lfm Damm. Seitenabstand etwa 2.3 m (Abb. 65)

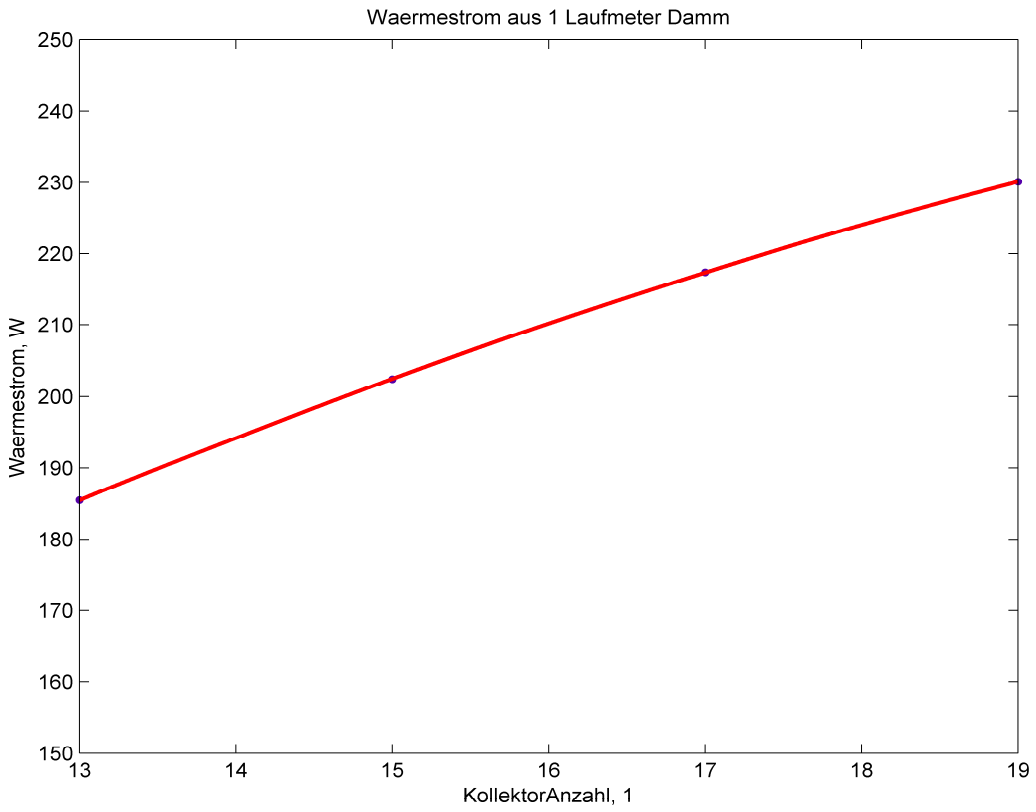


Abb. 64 Wärmestrom Seitenabstand und Anzahl der Leitungen(1)

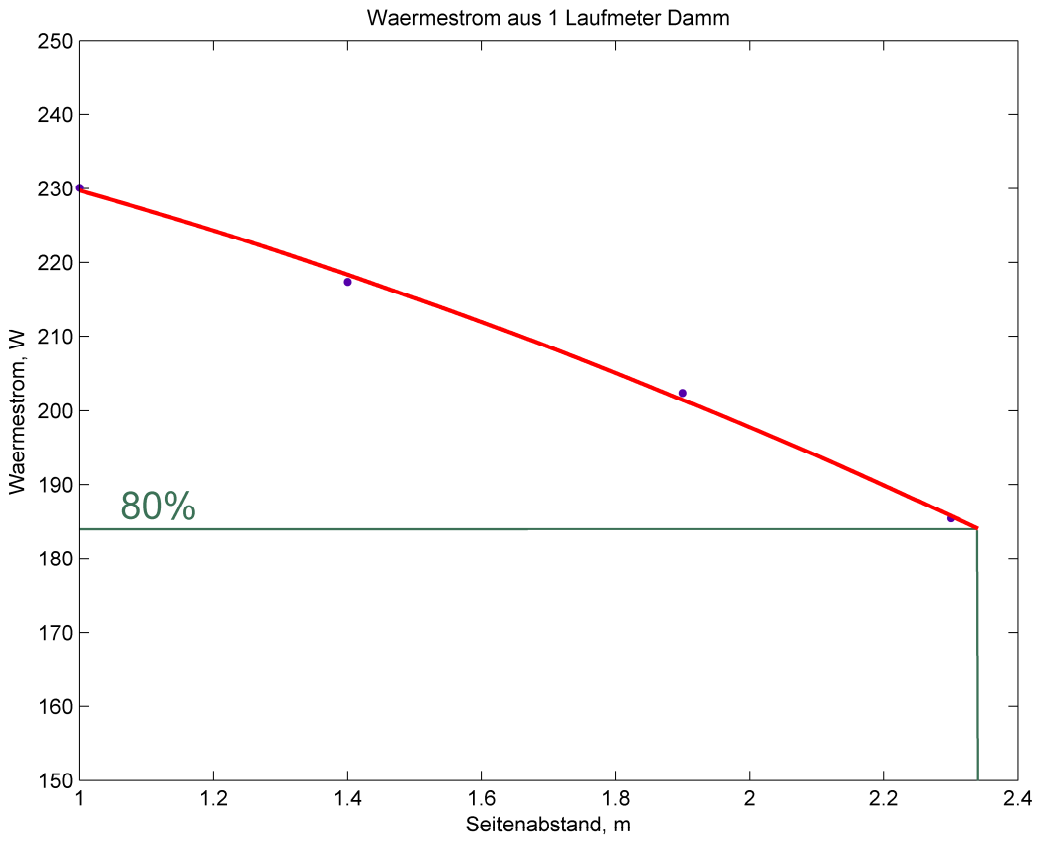


Abb. 65 Wärmestrom Seitenabstand und Anzahl der Leitungen(2)

4.3.5.4 Variation Bodenparameter

Es werden nur zwei Bodenparameter variiert. Das sind die Wärmeleitfähigkeit λ und die spezifische Wärmekapazität c des Bodens. Die Abmessungen des verwendeten Modells sind auf Abb. 66 zu entnehmen. Tab. 19 stellt die in dem Modell verwendete Werte dar.

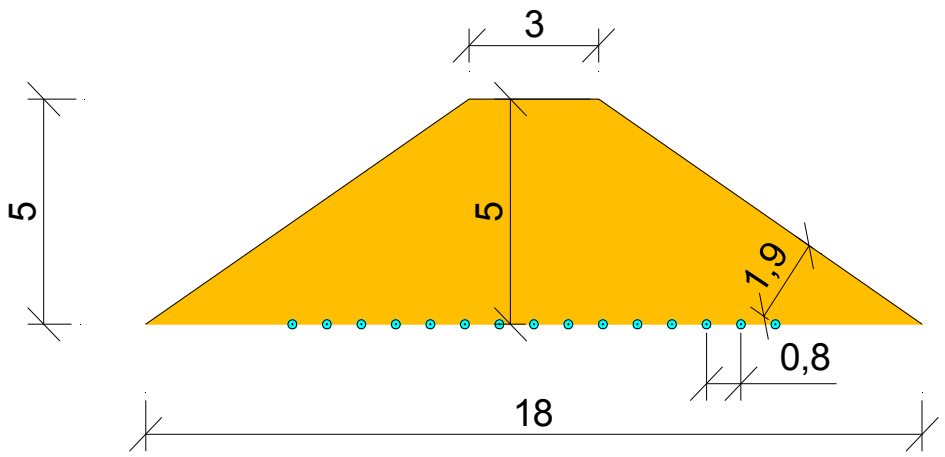


Abb. 66 Geometrie - Variation Bodenparameter

Wärmestrom aus 1 Laufmeter Damm, W				
Wärmeleitfähigkeit	Spezifische Wärmekapazität, Ws/(kg*K)			
W/(m*K)	1200	1600	2000	2400
1,00	144,26	158,95	169,40	177,16
1,50	179,94	202,39	219,33	232,45
2,00	206,41	235,11	257,71	275,67

Tab. 19 Wärmestrom – Variation Bodenparameter

Eine räumliche Darstellung der Wärmeparameter ist auf Abb. 67 dargestellt. Weiter sind die Ergebnisse auf Abb. 68 in 2D-Sicht presentiert.

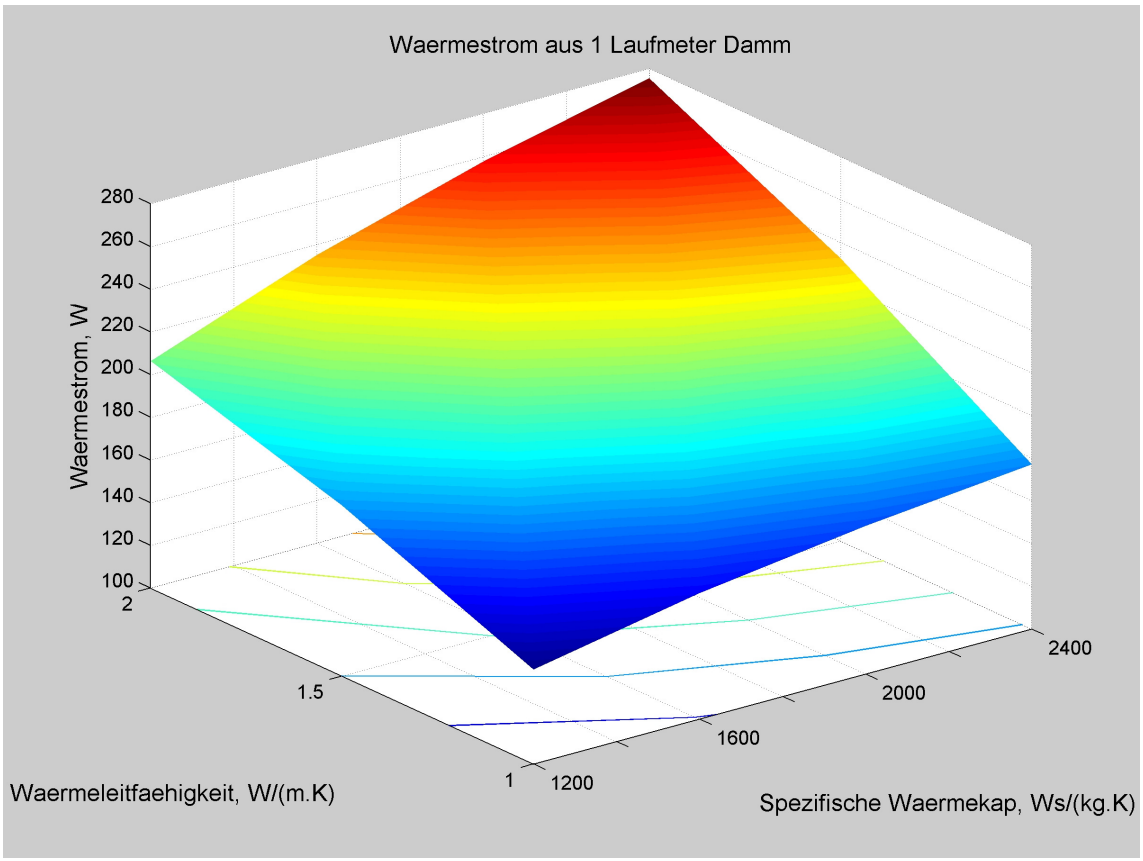


Abb. 67 Wärmestrom – Variation Bodenparameter 3D

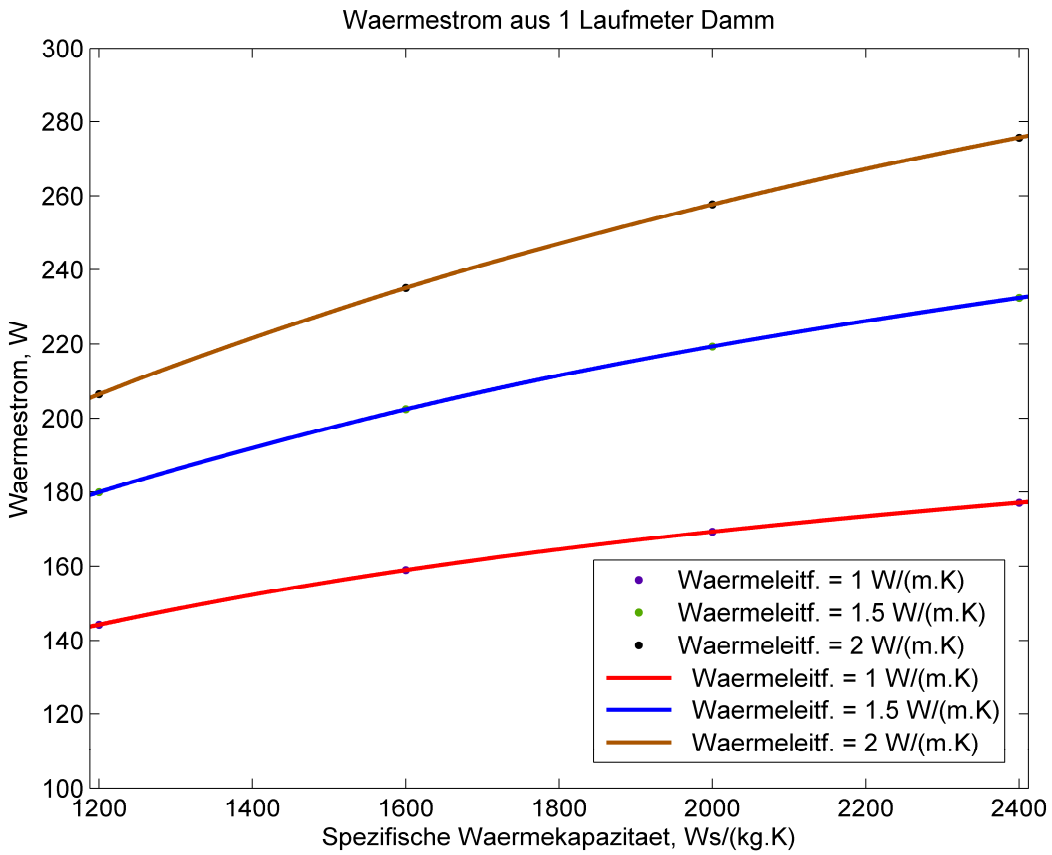


Abb. 68 Wärmestrom – Variation Bodenparameter

4.3.5.5 Endgültiges Modell

Im Folgenden wird ein endgültiges Modell verwendet, welches als „optimales Modell“ aufgrund der vorhergehenden Parameterstudien betrachtet werden kann. Für die wirtschaftliche Optimum wurde dabei mehrmals die 80%/20% Regel angewendet (siehe P.4.3.5.2 und P.4.3.5.3). Als Kollektorabstand wird 1 m angenommen, was bei 11 Kollektoren im einlagigen Aufbau im Damm einen Seitenabstand von 2.2 m sichert. Die Kollektoren bedecken eine Breite von 10 m im 18 m breite Dammfuß (Abb. 69).

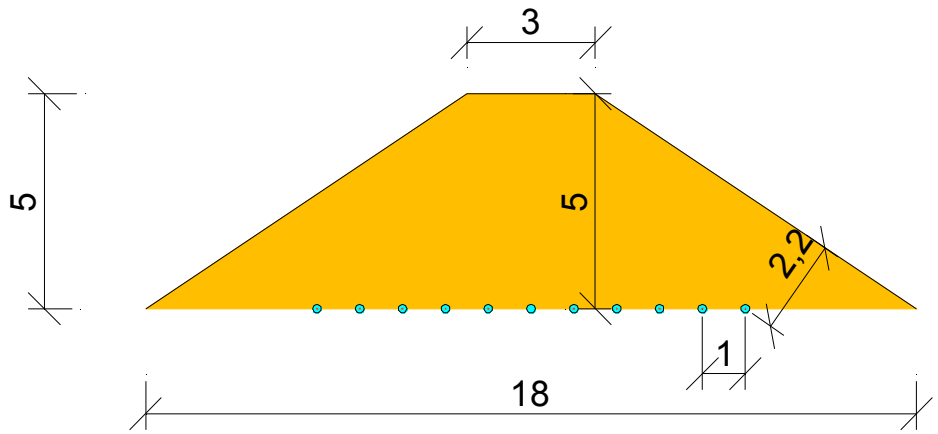


Abb. 69 Geometrie – endgültiges Modell, Kollektorabstand 1m, Seitenabstand 2.2m

Das Modell liefert 179.32 W/lfm Damm und 16.3W/lfm Kollektorlänge, innerhalb von 2400 Stunden im jährlichen Betrieb.

4.4 Interpretation

4.4.1 Temperaturverlauf im Dammkörper

Die Temperaturfelder des Dammkörpers für verschiedene Zeitschritte sind auf Abb. 71 bis Abb. 77 veranschaulicht. Für das Verständnis sollte man zuerst die Abb. 70 betrachten. „Time=“ in den obengenannten Abbildungen entspricht der Zeit in Tagen von Abb. 70.

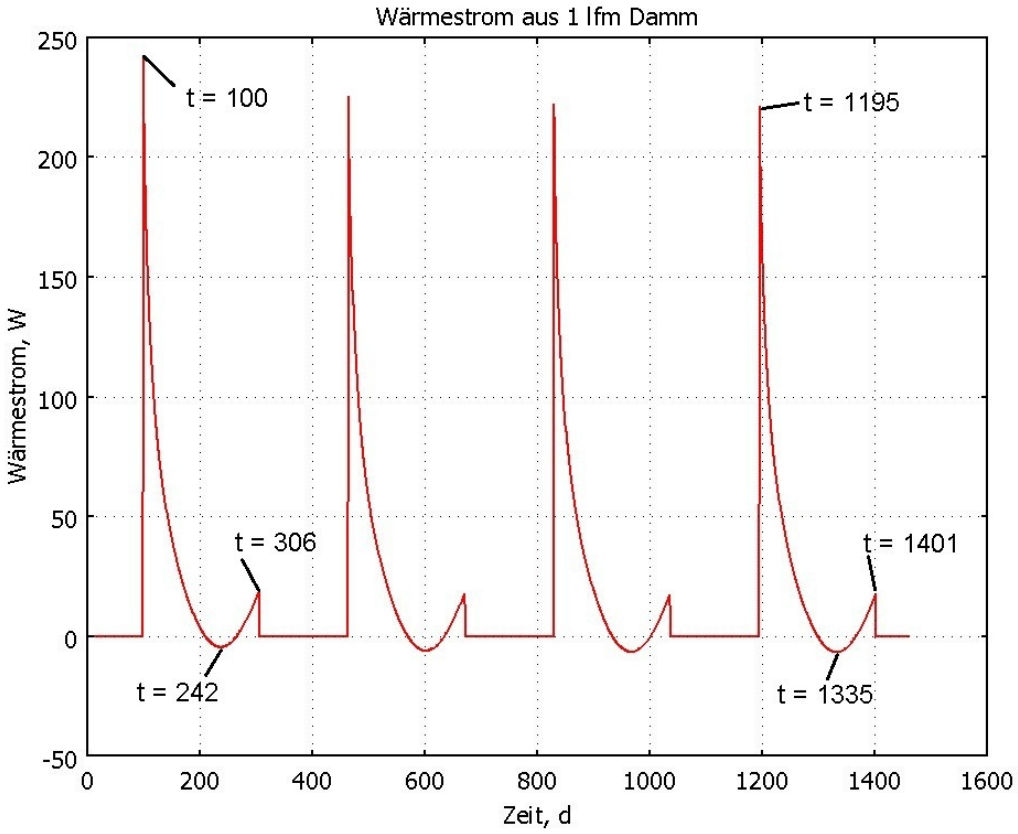


Abb. 70 Wärmestrom der durch die Kollektorwände für 4 Jahre fließt (Basismodell). Zeitpunkte

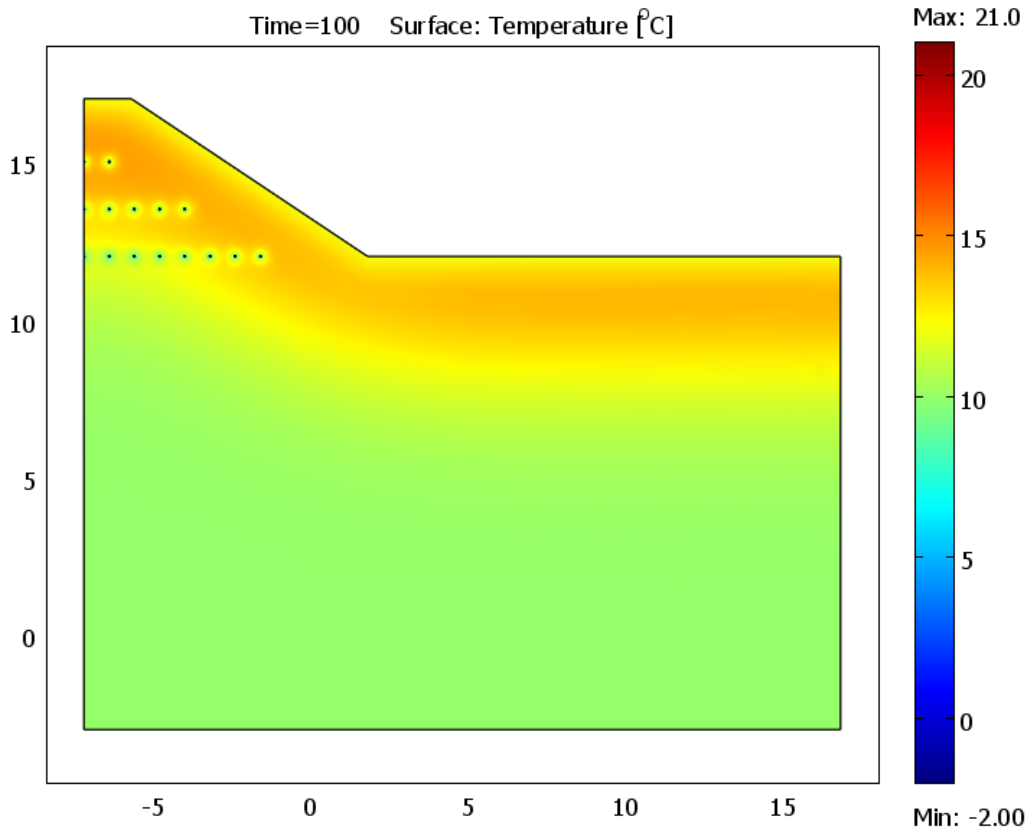


Abb. 71 Jahr 1 - t = 100, Beginn Heizperiode

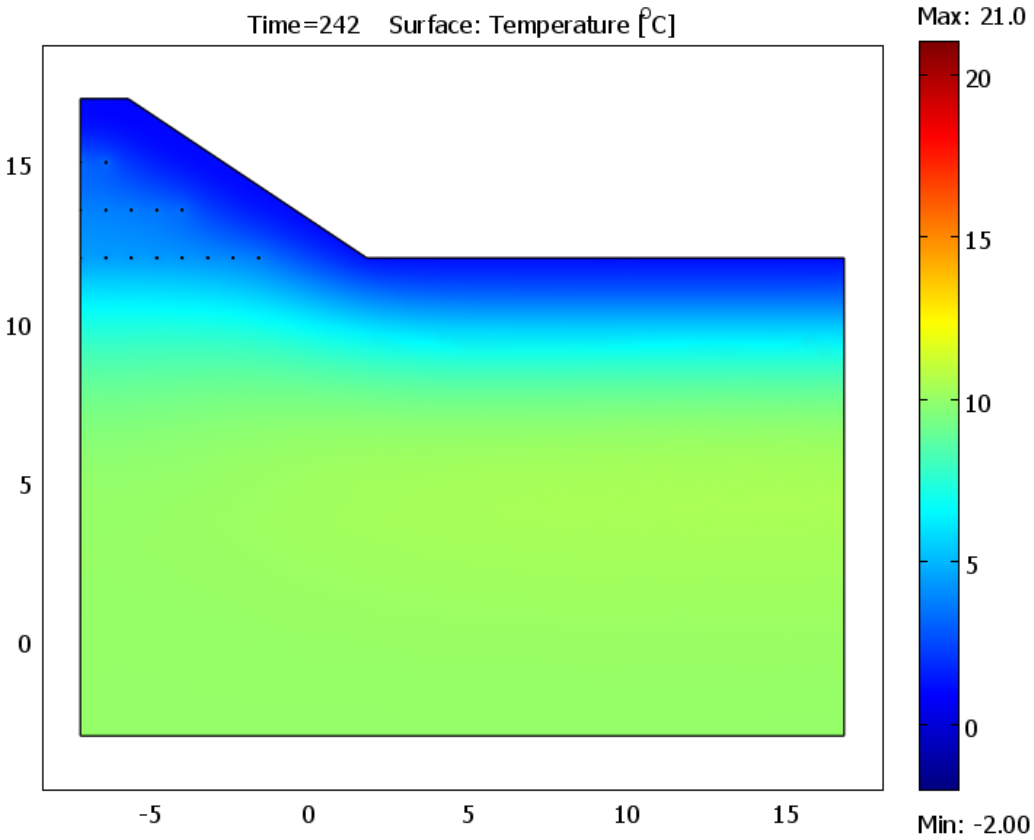


Abb. 72 Jahr 1 - t = 242, kältester Zeitpunkt

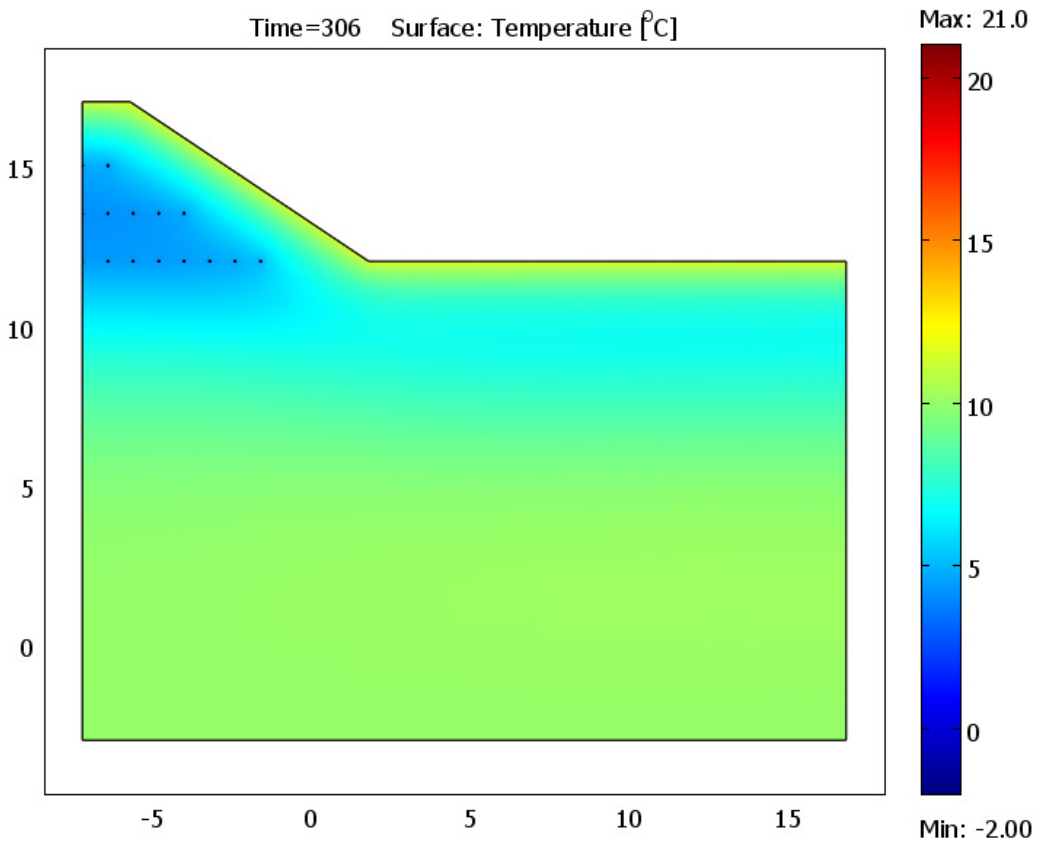


Abb. 73 Jahr 1 - t = 306, Ende Heizperiode

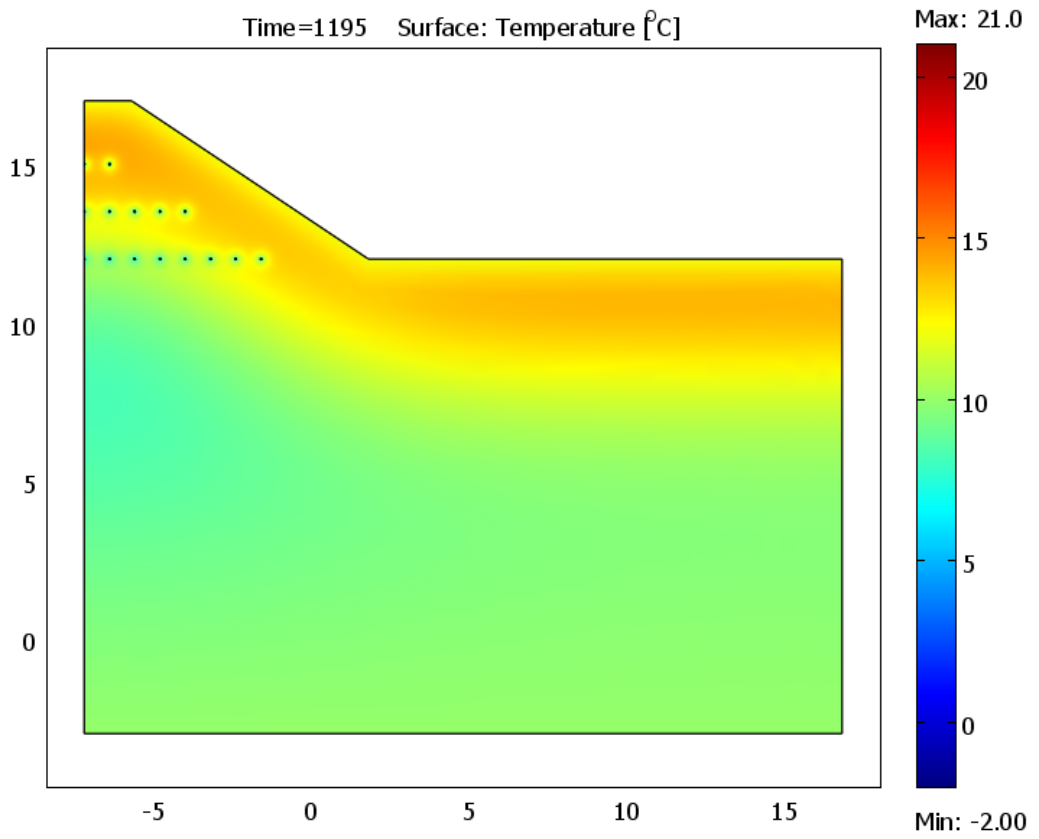


Abb. 74 Jahr 4 - t = 1195, Beginn Heizperiode

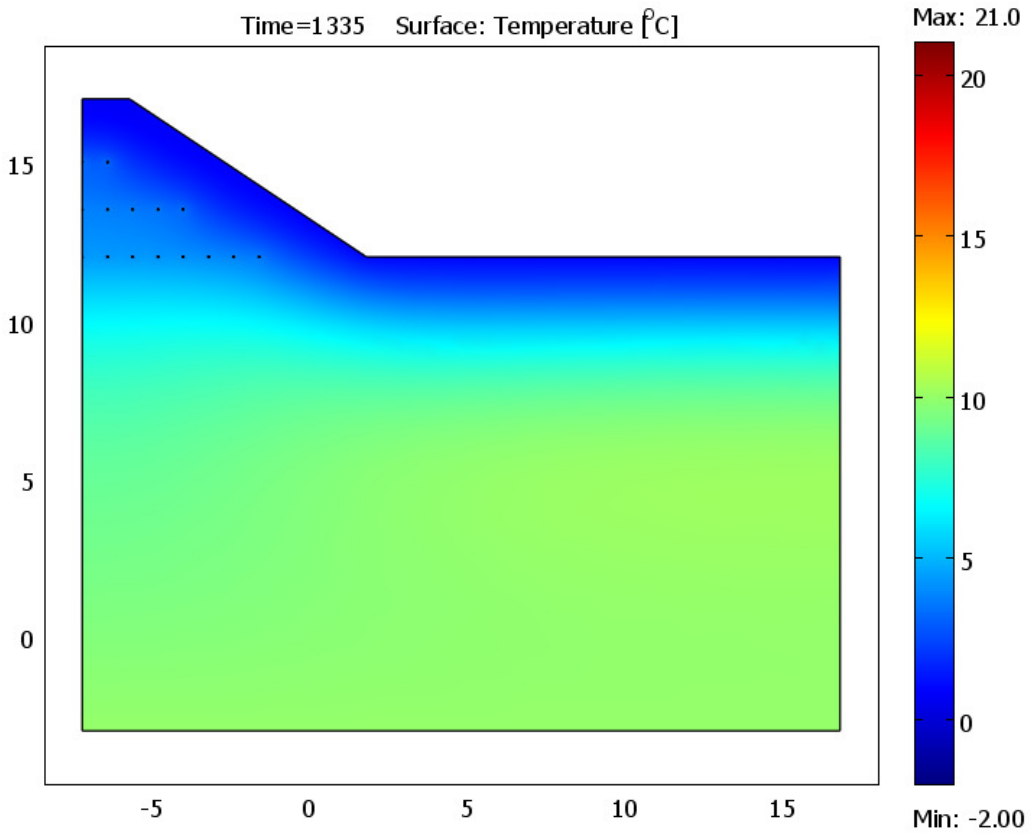


Abb. 75 Jahr 3 - t = 1335, kältester Zeitpunkt

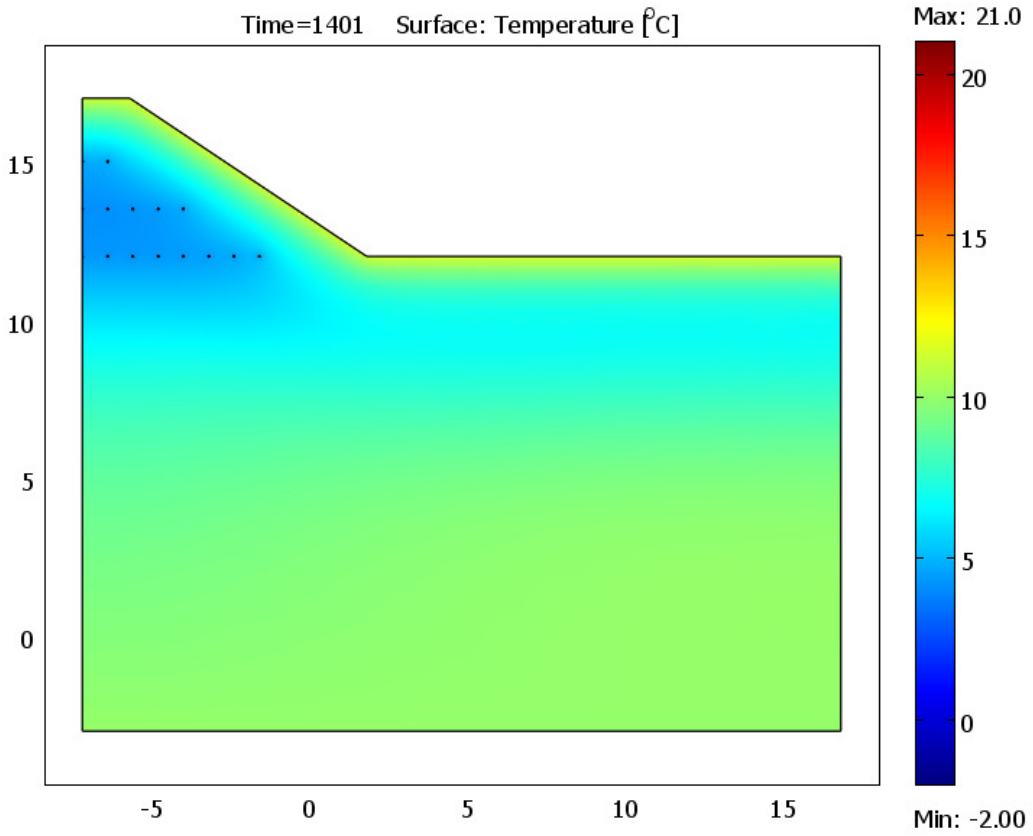


Abb. 76 Jahr 4 - t = 1401, Ende Heizperiode

Der Wärmestrom am Anfang des Winters ist viel größer als in der Mitte des Winters (siehe Abb. 70). Daraus folgt, dass der Wärmestrom nicht nur von der Wärmemenge im Boden, sondern auch stark von der Außentemperatur abhängt. Die Tiefe geht als wesentliche Größe für den Wärmeentzug an dieser Stelle ein.

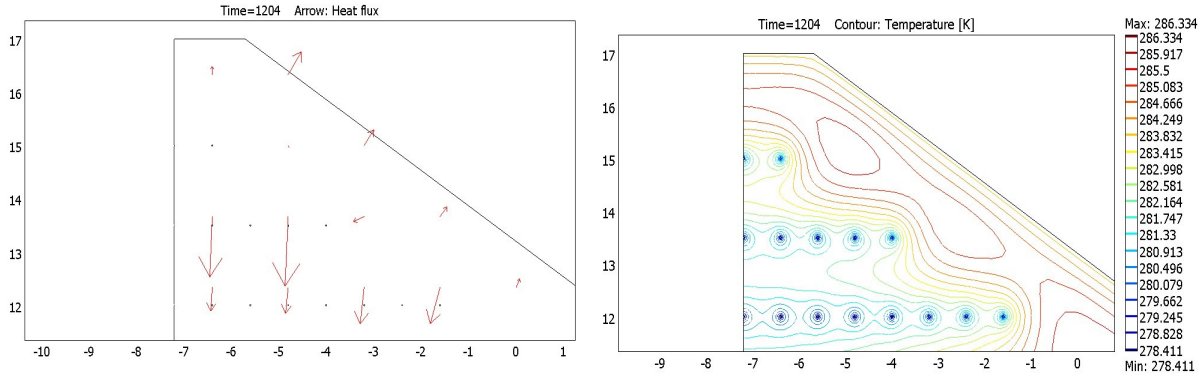


Abb. 77 Jahr 4 - t = 1204, Anfang Heizperiode – Wärmestrom – Richtungen, Isolinien gleicher Temperatur

4.4.2 Berechnung der Wärmeleistung für Straßenbeheizung

Das Modell wurde für eine Gebäudeheizung erstellt, weil der Betrieb immer bei einer Außentemperatur unter 12 °C stattfindet. Nach (VDI4640) wird der Wärmestrom auf 2400 h/a umgerechnet. Ein System, das für die Straße entwickelt ist, braucht weniger Stunden eingeschaltet zu sein. Je nach dem Anlagentyp (mit oder ohne Wärmepumpe) benötigt dieses System aber mehr Spitzenleistung.

Aus den Klimadaten (Tagesmittelwerte) der Messstation Mariabrunn Punkt (4.3.3), werden die Tage mit Temperaturen kleiner als 2 °C bestimmt. An diesen Tagen erscheint eine Beheizung der Straße jedenfalls sinnvoll. Die dem Damm entzogene Energie wird dann auf diese Tage bzw. Stunden umgerechnet.

Die Anzahl der Tage pro Jahr, die einen Tagesmittelwert niedrigerer als 2 °C aufweisen sind 86 d. Wenn diese Tage in Stunden umgerechnet werden, ergeben sich 2064 Betriebsstunden. Das Basismodell liefert 247.22 W/lfm Damm für 2400 Betriebsstunden. Bei Umrechnung des Wärmestroms in 2064 Betriebsstunden, ergibt sich 287 W/lfm Damm.

$$\frac{q_{2064}}{2064} = \frac{q_{2400}}{2400}; \qquad \frac{q_{2064}}{2064} = \frac{247.22}{2400};$$
$$q_{2064} = 287, \qquad W/lfm$$
$$q_{2400} = 247,22 \qquad W/lfm$$

Das endgültige Modell liefert etwa ¾ der Basismodellenergie (179W/lfm gegen 247W/lfm) mit 2.3 mal weniger Kollektoren (11 gegen 27). Die Spitzenleistung ist jedoch proportional zu der Kollektoranzahl, weshalb eine Verminderung der Kollektoranzahl mit einer mehr als 2-fachen Verminderung der Spitzenleistung verbunden ist. (Vergleich zwischen Abb. 34 und Abb. 78)

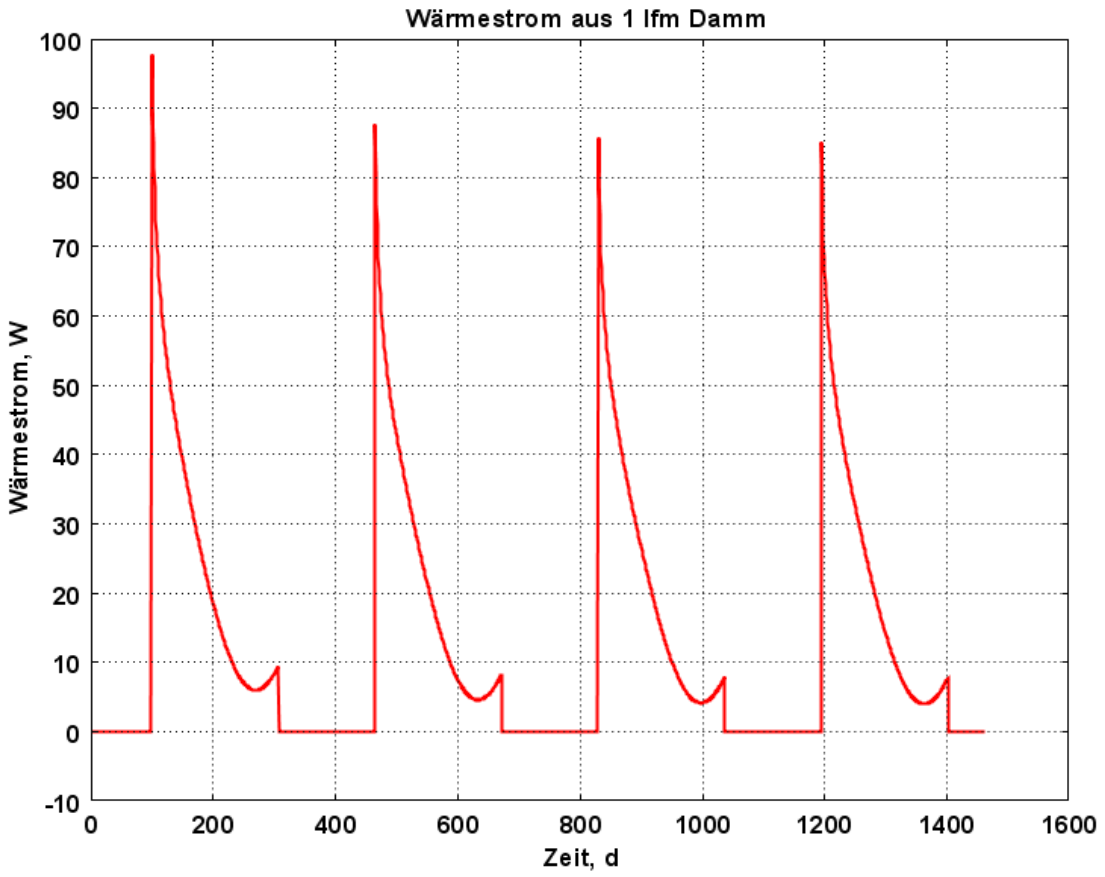


Abb. 78 Wärmestrom der durch die Kollektorwände für 4 Jahre fließt (Endgültige Modell)

5 Nutzung der Erdwärme aus Dämmen

5.1 Straßenheizung

Die Straßenheizung könnte als erster Nutzbereich der von dem Damm entzogenen Energie betrachtet werden. Wie die Berechnungen vermuten ließen, kann jedoch 1 Laufmeter Damm nicht so viel Energie zur Verfügung stellen, wie 1 m langer durchschnittlicher Straßenabschnitt benötigen würde. Daraus folgt, dass die Dämme nur zusätzliche Wärme zur Straßenheizung bieten können. In Kombination mit Erdwärmesonden könnte aber die aus dem Damm entzogene Energie eine sehr hohe Spitzenleistung sichern, was vor allem für das Schneeschmelzen benötigt wird. Das endgültige Modell gemäß Punkt 4.3.5.5 ist jedoch in der Regel nur für Gebäudeheizung geeignet, da eine wirtschaftlich bemessene Kollektoranzahl zu niedrig ist, um eine ausreichend hohe Spitzenleistung zu sichern. Untersuchungen über die Wärmemenge, die die Straße braucht, wurden schon in der Diplomarbeit von Kaller (Kaller, 2007) durchgeführt.

Für die Straßen-/Brücken-Heizungsanlage des Fluss-Kraftwerkes Freudenau in Wien zeigt eine analytische Lösung einen deutlich höheren Bedarfs des erforderlichen Wärmestroms, als eine FE Modellberechnung. Nach (Kaller, 2007), braucht die Heizanlage 502 W/m^2 (analytische Berechnung) und 244 W/m^2 (FE Modell). Diese Zahlen wurden dem ausgeführten Projekt entnommen.

In Rahmen einer Untersuchung wird der Einfluss der Reduzierung der Vorlauftemperatur (auf 14 °C) für das Modell KW Freudenau untersucht. Unter der Annahme einer Straßenoberflächentemperatur = 2 °C ergibt eine entsprechende Berechnung des FE-Modells eine Wärmestromdichte von 155 W/m². Eine analytische Berechnung ergibt 347 W/m². (Kaller, 2007)

Nach Punkt 4.4.2 liefert die Erdwärmeanlage im Damm einen mittleren Wärmestrom von 287 W/lfm Damm. Dieser Wert wird mit den oben genannten Werten für das

Straßenheizsystem verglichen. Daraus ergibt sich, dass 1 lfm Damm nur den Wärmebedarf von 1 bis 2 m^2 Straße (Straßenbreite 10m) decken kann.

Basismodell			
Parameter	Variation	Wärmestrom aus 1 lfm Damm*, W	Wärmestrom aus 1 lfm Kollektor*, W
Netz (Kollektor-wand)	e = 1 mm	247,22	9,16
	e = 2.5 mm	246,74	9,14
	e = 5 mm	244,57	9,06
	e = 10 mm	237,76	8,81
Jahresanzahl	1 Jahr	287,58	10,65
	2 Jahr	254,38	9,42
	3 Jahr	247,46	9,17
	4 Jahr	244,57	9,06
Kollektor-Temperatur	T = 0 °C	473,92	17,55
	T = 2 °C	359,26	13,31
	T = 4 °C	244,57	9,06
	T = 6 °C	130,05	4,82
Wärmedurch-laßkoeffizient des Rohres	Λ = 10 W/(m2.K)	164,95	6,11
	Λ = 50 W/(m2.K)	232,21	8,60
	Λ = 100 W/(m2.K)	244,57	9,06
	Λ = 150 W/(m2.K)	249,01	9,22

* 2400 Stunden järlicher Betrieb

Tab. 20 Basismodell - Tabelle

Einlagige Modell			
Parameter	Variation	Wärmestrom aus 1 lfm Damm*, W	Wärmestrom aus 1 lfm Kollektor*, W
Horizontal-abstand	b = 0.4 m	228,06	7,86
	b = 0.8 m	202,43	13,50
	b = 1.2 m	177,49	17,75
	b = 1.6 m	160,92	20,12
Seitenabstand	c = 1 m	230,10	12,11
	c = 1.4 m	217,41	12,79
	c = 1.9 m	202,39	13,49
	c = 2.3 m	185,45	14,27

* 2400 Stunden järlicher Betrieb

Tab. 21 Einlagige Modell - Tabelle

Endgültige Modell			
Parameter	Variation	Wärmestrom aus 1 lfm Damm*, W	Wärmestrom aus 1 lfm Kollektor*, W
Horizontal-abstand	b = 1 m	179.32	16,30
Seiten-abstand	c = 2.2 m		

* 2400 Stunden järlicher Betrieb

Tab. 22 Endgültige Modell - Tabelle

5.2 Betriebsgebäude und Familienhäuser

Im Punkt 2.3.1 werden einige ausgeführte Erdwärmesysteme von Häusern genannt. Diese Daten werden hier mit der dem Damm entzogenen Energie verglichen.

Das Mehrfamilienhaus in Vorarlberg hat nach der Sanierung einen Heizlast von 14kW. Für das Basismodell beträgt der Wärmeentzug 247W/lfm Damm. Die Arbeitszahl ist mit 4 angenommen. Berechnet man die Leistung der Erdwärmeanlage mit 10.5kW (3/4 der benötigten Heizlast), gibt sich 42 lfm nötige Dammlänge um dieses Gebäude zu heizen. Die Fläche unter diesem Damm beträgt etwa 750 m^2. Eine Umrechnung in m^3 Damm ergibt 2192 m^3 Boden (davon 270 m^3 aktiviert – Kernzone):

$$\frac{Dammfläche}{Nutzfläche} = \frac{750m^2}{359m^2} = 2.08m^2 Damm / m^2 Nutzfläche$$

$$\frac{Dammkörper}{Nutzfläche} = \frac{2192m^3}{359m^2} = 6.1m^3 Boden / m^2 Nutzfläche$$

Diese Werte wurden für das 3-lagige Basismodell gerechnet. Bei dem endgültigen Modell werden sie sich unterscheiden, da das 1-lagige Modell noch weniger Heizenergie liefern kann. Für das endgültige Modell beträgt der Wärmeentzug 179.32W/lfm Damm. Mit 10.5kW, gibt sich 58 lfm nötige Dammlänge um dieses Gebäude zu heizen. Die Fläche unter diesem Damm beträgt etwa 1156 m^2 (davon 580m^2 mit Kollektoren Belegt).

$$\frac{Dammfläche}{Nutzfläche} = \frac{1156m^2}{359m^2} = 3.22m^2 Dammfläche / 1m^2 Nutzfläche$$

$$\frac{BelegteFläche}{Nutzfläche} = \frac{580m^2}{359m^2} = 1.6m^2 BelegteFläche / 1m^2 Nutzfläche$$

6 Zusammenfassung

Für die Erzielung eines ökologischeren Gleichgewichtes sucht die Menschheit nach alternativen Energiequellen. Weltweit beträgt die Heizung ca. ¾ vom Energieverbrauch in den Haushalten. Die alternativen Wärmequellen sind ein entscheidender Faktor der zu Minimierung der schädlichen Emissionen führt. Die Erdwärme ist eine neue Alternative zur Heizung und Kühlung von Gebäuden und auch von anderen Systemen, wie z.B. für das Schneeschmelzen bei Brücken und bei Straßen.

Die in dieser Diplomarbeit betrachteten Dämme stellen eine neue Richtung für die Erdwärmenutzung dar. Auf dem Gebiet der Erdwärmenutzung sind Erdwärmesonden, Flächenkollektoren, erdberührte Bauteile und Energievliese bereits umfangreich untersucht werden. Die Erdwärmenutzung von Dämmen soll an dieser Stelle ebenfalls untersucht werden. Dabei entstehen keine hohen Kosten, da Dämme ohnehin für einen primären Zweck (Lärmschutzdamm Straßendamm, Hochwasserschutzdamm, etc.) gebaut werden. Die entziehbare Wärmemenge kann jedoch recht unterschiedlich ausfallen. Das Rechenmodell beweist, dass aufgrund der oberflächennahen Lage pro Laufmeter verlegter Kollektorlänge in einem Dammkörper verhältnismäßig weniger Wärmemenge entziehbar ist, als bei Erdwärmesonden. Erdwärmekollektoren in Dämmen sind damit hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit naturgemäß vielmehr mit den bereits bekannten oberflächennahen Flächenkollektoren vergleichbar. Bei Verwendung der 80%/20%-Regel als ersten Optimierungsprozess wird klar, dass das 1-lagige Modell zur Heizung oder zum Kühlen von Gebäuden am wirtschaftlichsten ist.

Dämme befinden sich meist neben oder unter der Straße. Daraus ergibt sich unmittelbar die Nutzungsmöglichkeit der entzogenen Wärmemenge zum Schneeschmelzen bei Straßen und Brücken. Nach den durchgeführten Berechnungen und dem Vergleich mit den schon vorhandenen Daten in (Kaller, 2007) ist ein Faktor von ca.10 zwischen der gewonnenen und der notwendigen Energie festzustellen. Sogar bei einem mehrlagigen Modell sichern die Dämme nur 10 bis 15 % der Wärme, die das Schneeschmelzen bei einer Straße erfordert. Ein Damm (Höhe 5 m, Breite der Grundfläche 18 m) kann zwischen 150 und 300 W/lfm

Energie liefern. Dieser Energieentzug ist für durchschnittliche wärmetechnische Bodeneigenschaften gemäß VDI4640 gültig. Vom Prinzip und von der Wärmemenge sind Dämme mit Flächenkollektoren vergleichbar. Der große Vorteil der Dämme ist die hohe Spitzenleistung und die Möglichkeit sie als Hilfsanlage in Schneeschmelzsystemen verwenden zu können. Hinsichtlich der Gebäudeheizung kann 1 m^2 Nutzfläche mit 1.6 m^2 im Damm belegter Fläche geheizt werden. Das ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn die Entfernung der Gebäude zum Damm gering ist.

7 Anhang - Tabelle zur Beschreibung der Modell- und der Variationsparameterstudie

Netzvariation

Versuch1

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	1194.00	d
Ende der Integration	1402.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	296.66	kWh/Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	118.85	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	247.22	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	9.16	W/lfmRohr

Elementgröße 0.1cm

Versuch2

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	1194.00	d
Ende der Integration	1402.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	296.09	kWh/Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	118.63	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	246.74	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	9.14	W/lfmRohr

Elementgröße 0.25cm

Versuch3

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	1194.00	d
Ende der Integration	1402.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	293.48	kWh/Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	117.58	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	244.57	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	9.06	W/lfmRohr

Elementgröße 0.5cm

Versuch4

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	1194.00	d
Ende der Integration	1402.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	285.31	kWh/Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	114.31	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	237.76	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	8.81	W/lfmRohr

Elementgröße 0.5cm

Untersuchung Laufzeit (Jahre)

Versuch1

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	99.00	d
Ende der Integration	307.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	345.09	kWh/Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	138.26	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	287.58	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	10.65	W/lfmRohr

Jahr 1

Versuch2

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	464.00	d
Ende der Integration	672.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	305.26	kWh/Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	122.30	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	254.38	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	9.42	W/lfmRohr

Jahr 2

Versuch3

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	829.00	d
Ende der Integration	1037.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	296.95	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	118.97	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	247.46	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	9.17	W/lfmRohr

Jahr 3

Versuch4

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	1194.00	d
Ende der Integration	1402.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	293.48	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	117.58	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	244.57	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	9.06	W/lfmRohr

Jahr 4

Kollektortemperatur

Versuch1

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	0.00	°C
Zeitstritt	1.00	d
Anfang der Integration	1194.00	d
Ende der Integration	1402.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	568.70	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	0.23	kW/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	473.92	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	17.55	W/lfmRohr

T = 0 °C

Versuch2

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	2.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	1194.00	d
Ende der Integration	1402.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	431.11	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	172.72	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	359.26	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	13.31	W/lfmRohr

T = 2 °C

Versuch3

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	1194.00	d
Ende der Integration	1402.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	293.48	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	117.58	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	244.57	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	9.06	W/lfmRohr

T = 4 °C

Versuch4

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	6.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	1194.00	d
Ende der Integration	1402.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	156.06	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	62.52	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	130.05	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	4.82	W/lfmRohr

T = 6°C

Kollektor Wärmedurchlaß

Versuh1

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	10.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	1194.00	d
Ende der Integration	1402.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	197.93	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	0.08	kW/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	164.95	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	6.11	W/lfmRohr

Wärmedurchlaß, Λ = 10 W/(m^2.K)

Versuh2

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	50.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4.00	°C
Zeitschritt	1.00	D
Anfang der Integration	1194.00	D
Ende der Integration	1402.00	D
Zeitspanne	208.00	D
Int.Wärmemenge	278.66	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	0.11	kW/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	232.21	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	8.60	W/lfmRohr

Wärmedurchlaß, Λ = 50 W/(m^2.K)

Versuh3

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	1194.00	d
Ende der Integration	1402.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	293.48	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	0.12	kW/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	244.57	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	9.06	W/lfmRohr

Wärmedurchlaß, Λ = 100 W/(m^2.K)

Versuh4

Anzahl der Kollektoren	27.00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	150.00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4.00	°C
Zeitschritt	1.00	d
Anfang der Integration	1194.00	d
Ende der Integration	1402.00	d
Zeitspanne	208.00	d
Int.Wärmemenge	298.81	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	0.12	kW/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	249.01	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	9.22	W/lfmRohr

Wärmedurchlaß, Λ = 150 W/(m^2.K)

Variation Zeitschritt

Versuch1

Anzahl der Kollektoren	27,00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100,00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4,00	°C
Zeitschritt	0,50	d
Anfang der Integration	1194,00	d
Ende der Integration	1402,00	d
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	296,71	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	118,87	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	247,26	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	9,16	W/lfmRohr

Zeitschritt = 0.5 d

Versuch2

Anzahl der Kollektoren	27,00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100,00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4,00	°C
Zeitschritt	1,00	d
Anfang der Integration	1194,00	d
Ende der Integration	1402,00	d
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	293,48	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	117,58	kW/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	244,57	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	9,06	W/lfmRohr

Zeitschritt = 1 d

Versuch3

Anzahl der Kollektoren	27,00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100,00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4,00	°C
Zeitschritt	2,00	d
Anfang der Integration	1194,00	d
Ende der Integration	1402,00	d
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	287,35	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	115,12	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	239,46	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	8,87	W/lfmRohr

Zeitschritt = 2 d

Versuch4

Anzahl der Kollektoren	27,00	1
Wärmedurchlaßkoeff.Rohr	100,00	W/(m^2*K)
Rohrtemperatur	4,00	°C
Zeitschritt	4,00	d
Anfang der Integration	1194,00	d
Ende der Integration	1402,00	d
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	298,90	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	119,75	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	249,08	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	9,23	W/lfmRohr

Zeitschritt = 4 d

Variation Lage

Versuch1

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Lagenanzahl	1,00	1
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	243,16	kWh/Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	97,42	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	202,63	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	13,51	W/lfmRohrl

Anzahl Lage = 1

Versuch2

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Lagenanzahl	2,00	1
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	247,63	kWh/Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	99,21	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	206,36	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	13,76	W/lfmRohr

Anzahl Lage = 2

Versuch3

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Lagenanzahl	3,00	1
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	242,08	kWh/Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	96,99	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	201,73	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	13,45	W/lfmRohr

Anzahl Lage = 3

Variation Abstände

Versuch1

Anzahl der Kollektoren	29,00	1
Tiefe	5,00	m
Abstand	0,40	m
Seitenabstand	1,90	m
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	273,67	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	109,64	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	228,06	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	7,86	W/lfmRohr

Abstand b = 0.4 m

Versuch2

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Tiefe	5,00	m
Abstand	0,80	m
Seitenabstand	1,90	m
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	242,91	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	97,32	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	202,43	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	13,50	W/lfmRohr

Abstand b = 0.8 m

Versuch3

Anzahl der Kollektoren	10,00	1
Tiefe	5,00	m
Abstand	1,20	m
Seitenabstand	1,90	m
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	212,99	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	85,33	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	177,49	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	17,75	W/lfmRohr

Abstand b = 1.2 m

Versuch4

Anzahl der Kollektoren	8,00	1
Tiefe	5,00	m
Abstand	1,60	m
Seitenabstand	1,90	m
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	79,24	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	31,74	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	66,03	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	8,25	W/lfmRohr

Abstand b = 1.6 m

Variation Seitenabstand

Versuch1

Anzahl der Kollektoren	19,00	1
Tiefe	5,00	m
Abstand	0,80	m
Seitenabstand	1,00	m
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	276,12	kWh/Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	110,62	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	230,10	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	12,11	W/lfmRohr

Seitenabstand c = 1 m

Versuch2

Anzahl der Kollektoren	17,00	1
Tiefe	5,00	m
Abstand	0,80	m
Seitenabstand	1,40	m
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	260,90	kWh/Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	104,53	kW/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	217,41	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	12,79	W/lfmRohr

Seitenabstand c = 1.4 m

Versuch3

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Tiefe	5,00	m
Abstand	0,80	m
Seitenabstand	1,90	m
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	242,87	kWh/Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	97,30	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	202,39	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	13,49	W/lfmRohr

Seitenabstand c = 1.9 m

Versuch4

Anzahl der Kollektoren	13,00	1
Tiefe	5,00	m
Abstand	0,80	m
Seitenabstand	2,30	m
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	222,54	kWh/Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	89,16	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	185,45	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	14,27	W/lfmRohr

Seitenabstand c = 2.3 m

Variation Bodenparameter

Wärmeleitfähigkeit = 1 W/(m*K)

Versuch1

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Spezifische Wärmekap.	1200,00	Ws/(kg*K)
Wärmeleitfähigkeit	1,00	W/(m*K)
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	173,11	kWh /Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	69,36	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	144,26	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	9,62	W/lfmRohr

Spez.Wärmekapazität = 1200 Ws/(kg*K)

Versuch2

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Spezifische Wärmekap.	1600,00	Ws/(kg*K)
Wärmeleitfähigkeit	1,00	W/(m*K)
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	190,74	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	76,42	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	158,95	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	10,60	W/lfmRohr

Spez.Wärmekapazität = 1600 Ws/(kg*K)

Versuch3

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Spezifische Wärmekap.	2000,00	Ws/(kg*K)
Wärmeleitfähigkeit	1,00	W/(m*K)
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	203,28	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	81,44	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	169,40	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	11,29	W/lfmRohr

Spez.Wärmekapazität = 2000 Ws/(kg*K)

Versuch4

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Spezifische Wärmekap.	2400,00	Ws/(kg*K)
Wärmeleitfähigkeit	1,00	W/(m*K)
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	212,59	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	85,17	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	177,16	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	11,81	W/lfmRohr

Spez.Wärmekapazität = 2400 Ws/(kg*K)

Wärmeleitfähigkeit = 1.5 W/(m*K)

Versuch5

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Spezifische Wärmekap.	1200,00	Ws/(kg*K)
Wärmeleitfähigkeit	1,50	W/(m*K)
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	215,92	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	86,51	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	179,94	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	12,00	W/lfmRohr

Spez.Wärmekapazität = 1200 Ws/(kg*K)

Versuch6

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Spezifische Wärmekap.	1600,00	Ws/(kg*K)
Wärmeleitfähigkeit	1,50	W/(m*K)
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	242,87	kWh /Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	97,30	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	202,39	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	13,49	W/lfmRohr

Spez.Wärmekapazität = 1600 Ws/(kg*K)

Versuch7

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Spezifische Wärmekap.	2000,00	Ws/(kg*K)
Wärmeleitfähigkeit	1,50	W/(m*K)
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	263,20	kWh /Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	105,45	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	219,33	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	14,62	W/lfmRohr

Spez.Wärmekapazität = 2000 Ws/(kg*K)

Versuch8

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Spezifische Wärmekap.	2400,00	Ws/(kg*K)
Wärmeleitfähigkeit	1,50	W/(m*K)
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	278,94	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	111,76	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	232,45	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	15,50	W/lfmRohr

Spez.Wärmekapazität = 2400 Ws/(kg*K)

Wärmeleitfähigkeit = 2 W/(m*K)

Versuch9

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Spezifische Wärmekap.	1200,00	Ws/(kg*K)
Wärmeleitfähigkeit	2,00	W/(m*K)
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	247,70	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	99,24	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	206,41	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	13,76	W/lfmRohr

Spez.Wärmekapazität = 1200 Ws/(kg*K)

Versuch10

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Spezifische Wärmekap.	1600,00	Ws/(kg*K)
Wärmeleitfähigkeit	2,00	W/(m*K)
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	282,14	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	113,04	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	235,11	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	15,67	W/lfmRohr

Spez.Wärmekapazität = 1600 Ws/(kg*K)

Versuch11

Anzahl der Kollektoren	15,00	1
Spezifische Wärmekap.	2000,00	Ws/(kg*K)
Wärmeleitfähigkeit	2,00	W/(m*K)
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	309,26	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	123,90	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	257,71	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	17,18	W/lfmRohr

Spez.Wärmekapazität = 2000 Ws/(kg*K)

Versuch12

Anzahl der Kollektoren	15,00	1,00
Spezifische Wärmekap.	2400,00	Ws/(kg*K)
Wärmeleitfähigkeit	2,00	W/(m*K)
Zeitspanne	208,00	d
Int.Wärmemenge	330,81	kWh/ Zeitspanne
Mit.Wärmestrom	132,53	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Damm	275,67	W/lfmDamm
Mit.Wärmestrom 2400h Kollektor	18,38	W/lfmRohr

Spez.Wärmekapazität = 2400 Ws/(kg*K)

8 Literaturverzeichnis

Adam, D. (2006). *,,Intelligente Systeme der Erdwarmenutzung- regenerative Energie aus dem Untergrund" Expertenforum Beton 2006, hersg. Zement+ Beton Handels- und Werbeges.m.b.H. i.A.d. Osterreichischen Zement- industrie, 2006 [2].*

Adam, D. (2009). *Grundbau und Bodenmechanik Skriptum SS.*

Adam, D., & Markiewicz, R. (2002). *"Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauwerke – Teil 1:Theoretische Grundlagen",ÖIAZ, 147.Jg., Heft4/2002.* Wien.

Blab, R. (2008). *Straßenwesen - Scriptum 2008/2009.* Wien.

Brandl, H. (1998). *"Energy piles and diaphragm walls for heat transfer from and into the ground", Proceedings of the 3rd International Seminar Deep Foundations on Bored and Auger Piles (van Impe ed.), Ghent, A.A.Balkema, 37-60.*

Brandl, H. (2001). *„Energy foundations and other thermo-active ground structures", 41st Rankine Lecture, British Geotechnical Association, (veröffentlicht 2006: Geotechnique, London Vol.56, No.2,pp81-122).*

COMSOL. (2008). *„FEMLAB Modeling Guide", „FEMLAB Model Library", „FEMLAB Users Guide".*

COMSOL. (2008). *COMSOL Multiphysics Model Library.* © COPYRIGHT 1998–2008 by COMSOL AB.

COMSOL. (2008). *COMSOL Multiphysics Modeling Guide.* © COPYRIGHT 1998–2008 by COMSOL AB.

COMSOL. (2008). *COMSOL Multiphysics User's Guide.* © COPYRIGHT 1998–2008 by COMSOL AB.

Ennigkeit, A. (2002). *Energiepfahlanlagen mit Saisonalem Thermospeicher. Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt - Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik.Darmstadt, Deutschland.*

Heidenreich, B. (1999). *Modellierung des Spannungs-Dehnungsverhaltens eines Energiepfahls und des umgebenden Bodens unter Temperaturwechseln mittels numerischer Computersimulation nach der FEM. Technischen Universität Darmstadt Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik.* Darmstadt, Deutschland.

Hofinger, H., & Kohlböck, D. (2006). *WIRTSCHAFTLICHE OPTIMIERUNG VON TUNNELTHERMIE®- Magistratsabteilung 27 EU Strategie und Wirtschaftsentwicklung.* (i. c. GmbH, Hrsg.)

Kaller, R. (2007). *WÄRMESTROMVERHALTEN VON FREIFLÄCHENHEIZUNGEN. Diplomarbeit am Institut für Grundbau Und Bodenmechanik, Technische Universität Wien.* Wien.

KEKELIT. (2005). K E K E L I T Kunststoffwerk GesmbH, © KE KELIT 01/05.

Kutzner, K. (1996). *Erd- und Schuttdämme für Stauanlagen.*

Markiewicz, R. (2004). *"Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von Geothermischer Energie mittels Erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau", Dissertation am Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität.*

Markiewicz, R. (2002). *,,Die Nutzung geothermischer Energie im Bauwesen", Zement und Beton 4/02, 2002.*

Mihaylova, B. (2008). *Bautechnische Maßnahmen zur Reduktion des Straßenverkehrslärms. Diplomarbeit am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien.* Wien.

Recknagel, H., Sprenger, E., & Schrameck, E. (2002). *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik.*

Staiß, F. (2001). *Jahrbuch Erneuerbare Energien. Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg. Bieberstein-Fachbuchverlag. Radebeul. Deutschland.*

Striegler, W. (1998). *Dammbau in Theorie und Praxias .*

VDI4640. *VEREIN DEUTSCHE INGENIEURE "VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrunds", Richtlinie, Blatt 1(2008) Blatt 2 (2001) Blatt 3 (2001) Blatt 4 (2004).*

Vogel, H. (1997). *„Gerthsen Physik“, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.*

www.dvw-bayern.de. (2009). *www.dvw-bayern.de/UserFiles/File/Ver%C3%B6ffentlichungen/Mitteilungen/2004_1/Hochwasser.pdf.*

www.gefga.de/geothermie.htm. (2009).

www.geothermie.de. (2009).

www.geothermie.de/oberflaechennahe/serso/serso.htm. (2009).

www.wikipedia.org. (2009).

Zauner, A. (2009). *Oberflächennahe Erdwärmenutzung in Österreich - Überblick und Statuserhebunhg. Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Wien.* Wien.

Алексиев, А., Стефанов, Г., & др. (1989). *Наръчник по земна механика и фундиране.*

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Erdwärmenutzung- Schema. (Zauner, 2009) 8
Abb. 2 Dominierende Wärmeübertragungsmechanismen in Abhängigkeit vom Korndurchmesser und Sättigungsgrad. (Markiewicz, 2004) 17
Abb. 3 Wärmeleitfähigkeit des Bodens (λ≡K) in Abhängigkeit von Trockendichte (ρ) und Wassergehalt. Zusammengestellt. (Heidenreich, 1999) 18
Abb. 4 Einfluss von Porenanteil und Poreninhalt (Wasser (W), Öl (Öl), Luft (L)) auf die Wärmeleitfähigkeit (λ) von Sandstein und Sand. (Ennigkeit, 2002) 19
Abb. 5 Temperaturverlauf in verschiedenen Jahreszeiten im Erde. (www.gefga.de/geothermie.htm, 2009)..... 22
Abb. 6. System der Erdwärmenutzung (Zauner, 2009)..... 23
Abb. 7 Wärmepumpenkreislauf mit Temperaturen und Drücken, beispielsweise für das Kältemittel R290 (Staiß, 2001)..... 24
Abb. 8 Idealer (links) und realer (rechts) Kreisprozess. (Markiewicz, 2004)..... 24
Abb. 9 Einfamilienhaus in Salzburg (Zauner, 2009) 27
Abb. 10 Warmepumpe und Pufferspeicher (Zauner, 2009) 27
Abb. 11 Mehrfamilienhaus Bregenz (Zauner, 2009) 28
Abb. 12 Fotoaufnahme vom Einbau der Heizrohre,..... 29
Abb. 13 Wärmebildaufnahme der Anlage in Betrieb,..... 29
Abb. 14 Energiepfähle Baulos LT24 (Hofinger & Kohlböck, 2006) 31
Abb. 15 Energiebrunnen Schema (Zauner, 2009)..... 32
Abb. 16 Lärmschutzdamm Schema (Mihaylova, 2008) 33
Abb. 17 Lärmschutzdamm Foto (Mihaylova, 2008) 34
Abb. 18 Hochwasserschutzdamm (www.dvw-bayern.de, 2009)..... 35
Abb. 19 Dammschnitt und Dammbaustoffe für Verkehrswege (Adam, Grundbau und Bodenmechanik Skriptum SS, 2009)..... 36
Abb. 20 Parallel- und Serienschaltung (Zauner, 2009)..... 38
Abb. 21 Kollektoranordnung – Energievlies (Markiewicz, 2004)..... 39
Abb. 22 Mögliche Kollektoranordnungen bei kleineren Dämmen (ein oder mehrlagig) (1) 39
Abb. 23 Mögliche Kollektoranordnungen bei kleineren Dämmen (ein oder mehrlagig) (2) 40
Abb. 24 Verkürzung der von einem Kollektor belegten Länge bei breiteren Dämmen 40

Abb. 25 Schüttvorgang bei verlegten Kollektoren in Dämmen (Blab, 2008) 41
Abb. 26 Geometrie des Modells (Einheiten in Meter) 43
Abb. 27 Geometrie der Kollektoren - Basismodell (Einheiten in Meter)..... 44
Abb. 28 Geometrie - Kollektor (Rohr) 44
Abb. 29 Anfangs- und Randbedingungen..... 46
Abb. 30 Auslegung der Temperatursinuskurve aus Tagesmittelwerte mit Hilfe von MATLAB 47
Abb. 31 Außentemperatur für die ganze Simulationszeit. 12° C Temperatur und 9.68 °C – mittlere Jahrestemperatur. 48
Abb. 32 Durchlaßkoeffitient *λ,* abhängig von Zeit *t* und der Oberflächentemperatur, 12 °C – Grenze als Kriterium für das Ein und Ausschalten des Systems. 49
Abb. 33 Modellnetz. (Einheiten in Meter)..... 50
Abb. 34 Wärmestrom der durch die Kollektorwände für 4 Jahre fließt (Basismodell) 52
Abb. 35 Elementgröße Kollektorrand..... 53
Abb. 36 Wärmestrom – Variation Elementgröße 54
Abb. 37 Wärmestrom – Variation Jahresanzahl 56
Abb. 38 Wärmestrom – Variation Rohrtemperatur..... 57
Abb. 39 Wärmestrom – Variation Wärmedurchlässigkeit des Rohres 58
Abb. 40 Wärmestrom für 4 Jahren - Einfluss der Rohrparameter..... 59
Abb. 41 Wärmestrom für 4 Jahre - Einfluss der Tempredatur des Fluids 59
Abb. 42 Wärmestrom aus 1 lfm Damm – Durchlaß der Rohrwände und Fluidtemperatur 60
Abb. 43 Geometrie Einlagig. Kollektoranzahl = 15 61
Abb. 44 Geometrie Zweilagig A, Kollektoranzahl = 18..... 62
Abb. 45 Geometrie Zweilagig B Kollektoranzahl = 24..... 62
Abb. 46 Geometrie Dreilagig Kollektoranzahl = 27 62
Abb. 47 Wärmestrom – Variation Lagenanzahl – Kollektoranzahl(1) 63
Abb. 48 Wärmestrom – Variation Lagenanzahl – Kollektoranzahl(2) 64
Abb. 49 Geometrie Einlagig, Kollektoranzahl = 15 64
Abb. 50 Geometrie Zweilagig, Kollektoranzahl = 15 65
Abb. 51 Geometrie Dreilagig, Kollektoranzahl = 15 65
Abb. 52 Wärmestrom – Variation Lagenanzahl(1)..... 66
Abb. 53 Wärmestrom – Variation Lagenanzahl(2)..... 66
Abb. 54 Geometrie Kollektorabstand 0.4 m, 25 Rohre 67

Abb. 55 Geometrie Kollektorabstand 0.8 m, 15 Rohre 68
Abb. 56 Geometrie Kollektorabstand 1.2 m, 10 Rohre 68
Abb. 57 Geometrie Kollektorabstand 1.6 m, 8 Rohre 68
Abb. 58 Wärmestrom – Variation Abstand(1) 69
Abb. 59 Wärmestrom – Variation Abstand(2) 70
Abb. 60 Geometrie Seitenabstand 1 m 70
Abb. 61 Geometrie Seitenabstand 1.4 m 71
Abb. 62 Geometrie Seitenabstand 1.9 m 71
Abb. 63 Geometrie Seitenabstand 2.3 m 71
Abb. 64 Wärmestrom Seitenabstand und Anzahl der Leitungen(1) 72
Abb. 65 Wärmestrom Seitenabstand und Anzahl der Leitungen(2) 73
Abb. 66 Geometrie - Variation Bodenparameter 73
Abb. 67 Wärmestrom – Variation Bodenparameter 3D 74
Abb. 68 Wärmestrom – Variation Bodenparameter 75
Abb. 69 Geometrie – endgültiges Modell, Kollektorabstand 1m, Seitenabstand 2.2m 75
Abb. 70 Wärmestrom der durch die Kollektorwände für 4 Jahre fließt (Basismodell). Zeitpunkte 76
Abb. 71 Jahr 1 - t = 100, Beginn Heizperiode 77
Abb. 72 Jahr 1 - t = 242, kältester Zeitpunkt 77
Abb. 73 Jahr 1 - t = 306, Ende Heizperiode 78
Abb. 74 Jahr 4 - t = 1195, Beginn Heizperiode 78
Abb. 75 Jahr 3 - t = 1335, kältester Zeitpunkt 79
Abb. 76 Jahr 4 - t = 1401, Ende Heizperiode 79
Abb. 77 Jahr 4 - t = 1204, Anfang Heizperiode – Wärmestrom – Richtungen, Isolinien gleicher Temperatur 80
Abb. 78 Wärmestrom der durch die Kollektorwände für 4 Jahre fließt (Endgültige Modell) 81

10 Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Wärmetechnische Bodenparameter (Markiewicz, 2004), modifiziert 20
Tab. 2 Böschungen von Dämmen und Einschnitten (Striegler, 1998) 35
Tab. 3 Mechanische und Thermische Eigenschaften von PEH (KEKELIT, 2005).... 37
Tab. 4 Termische Bodenparameter – Basismodell (aus Tab 1)..... 44
Tab. 5 Termische Kollektorparameter - Basismodell 45
Tab. 6 Anfangs- und Randbedingungen - Basismodell..... 46
Tab. 7 Zeitachse: Monat – Tag 47
Tab. 8 Variation grundlegender Modellparameter des Basismodells..... 51
Tab. 9 Variation der Elementgröße Kollektorrand – Basismodeldaten. Bemerkung: Verwendung von Symmetrie..... 52
Tab. 10 Wärmestrom – Variation Elementgröße 53
Tab. 11 Wärmestrom – Variation Jahresanzahl..... 55
Tab. 12 Wärmestrom – Variation Rohrtemperatur 56
Tab. 13 Wärmestrom – Variation Wärmedurchlässigkeit des Rohres 57
Tab. 14 Wärmestrom – Variation Zeitschritt 61
Tab. 15 Wärmestrom – Variation Lagenanzahl – Kollektoranzahl 63
Tab. 16 Wärmestrom – Variation der Lagenanzahl bei gleicher Kollektoranzahl..... 65
Tab. 17 Wärmestrom – Variation Abstand..... 69
Tab. 18 Wärmestrom – Variation Seitenabstand 72
Tab. 19 Wärmestrom – Variation Bodenparameter 74
Tab. 20 Basismodell - Tabelle 83
Tab. 21 Einlagige Modell - Tabelle 83
Tab. 22 Endgültige Modell - Tabelle 84