

Schlussbericht, 1. Dezember 2005

# Projekt

# Handbuch Erdwärmekörbe

## Dokumentation, Auslegung und

## Anwendungsbeispiele

Autor und Koautoren	Simone Bassetti, Ernst Rohner
Beauftragte Institution	Geowatt AG
Adresse	Dohlenweg 28
Telefon, E-Mail,	01 242 14 54, bassetti@geowatt.ch, rohner@geowatt.ch
Internetadresse	www.geowatt.ch
BFE-Nummern	Projekt: 100'196 Vertrag: 150'275
Dauer des Projekts	vom 01.04.2005 bis 31.12.2005

### Zusammenfassung

Erdwärmekörbe sind eine relativ neue Methode zur Gewinnung geothermischer Energie für Heizungs- und Kühlzwecke. Für Planer und Installateure fehlen Empfehlungen zur Dimensionierung und zum Bau solcher Anlagen. Mit diesem Projekt will man diese Lücke füllen, wobei im wesentlichen folgende Punkte bearbeitet wurden:

- Beschreibung von Prinzip, Funktion und Anwendungsmöglichkeiten von Erdwärmekorbanlagen.
- Dokumentation des Einbaus und von Anwendungsbeispielen.
- Beschreibung von einfachen Regeln zur Auslegung.

Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass Erdwärmekörbe als gute Alternative zu Erdwärmesonden bei Einfamilienhäusern sowie kleineren MFH Anlagen verwendet werden können.

### Résumé

Les « corbeilles géothermiques » sont une méthode relativement nouvelle d'exploitation de l'énergie géothermique pour des fins de chauffage et de refroidissement des bâtiments. Pour les projeteurs et les installateurs manquent des recommandations pour le dimensionnement et le montage de ce système. Le but de ce projet est de couvrir ces lacunes en élaborant les points suivants :

- Description du principe, fonction et possibilité d'application des « corbeilles géothermiques »
- Documentation du montage et des applications possibles
- Description de règles du pouce pour le dimensionnement

Ces investigations ont montrés, que les « corbeilles géothermiques » représentent une bonne alternative aux sondes géothermiques verticales, dans le domaine des habitations individuelles et aussi des immeuble collectifs.

## 1 Projektziele

Erdwärmekörbe sind eine relativ neue Methode zur Gewinnung geothermischer Energie für Heizungs- und Kühlzwecke. Sie sind eine Alternative zu Erdwärmesonden bei kleineren Heizleistungen oder dort, wo für Erdwärmesonden keine Bewilligung erhalten werden kann. Erdwärmekörbe sind auch eine gute Möglichkeit, zu kurze Erdwärmesonden zu kompensieren.

Für Planer und Installateure fehlen Empfehlungen zur Dimensionierung und zum Bau solcher Anlagen. Mit diesem Projekt will man einerseits die Anwendungsmöglichkeiten und den Einbau von Erdwärmekörben dokumentieren. Andererseits sollen einfache Auslegungsmethoden untersucht und beschrieben werden. Damit kann die Dokumentation von Erfahrungswerten, Leistungszahlen und Auslegungsregeln für künftige Installationen als Richtlinien verwendet werden.

## 2 Vorgehen

Zur Durchführung dieses Projektes wurden folgende Bearbeitungsschritte festgesetzt:

- Sammlung und Beschreibung von bestehendem Material (Photos, Berichte)
- Beschreibung von Prinzip, Funktion und Anwendungsmöglichkeiten
- Dokumentation des Einbaus
- Dokumentation von Anwendungsbeispielen
- Beschreibung von einfachen Regeln zur Auslegung
- Analyse der Kosten und der Wirtschaftlichkeit von Erdwärmekörben im Vergleich mit Erdwärmesonden

### 3 Prinzip und Funktion

Ein Erdwärmekorb (EWK) besteht aus einem Polyethylen-Rohr, der spiralförmig aufgewickelt wird (siehe Abbildung 1). Es werden PE-100 Rohre mit einem Aussendurchmesser von 25 mm und einem Innendurchmesser von 20.4 mm verwendet. Der gesamte Korb hat einen Durchmesser von ca. 50 cm und eine Höhe von ca. 2 Metern. Das Rohr hat eine Gesamtlänge von 55 m und hat ca. 35 Umgänge. Der Korb wird dann in einer Tiefe zwischen 1.5 und 3.5 m eingebaut (siehe Abbildung 2).



Abbildung 1



Abbildung 2

Das Prinzip der Erdwärmenutzung mit Erdwärmekörben ist dem der Erdwärmesonden sehr ähnlich. Im Heizbetrieb zirkuliert das Fluid durch das gewickelte Rohr und extrahiert Wärme aus dem Erdreich. Die damit gewonnene geothermische Energie wird zur Wärmepumpe gefördert, die dann daraus die gewünschte Heizungstemperatur produziert. Im Sommer kann mit dem relativ kalten Fluid aus den Erdwärmekörben das Gebäude gekühlt werden.

Das Fluid zirkuliert im spiralförmigen Rohr nach unten und dann in der Mitte des Korbes nach oben zurück zur Wärmepumpe. Mit dieser Fliessrichtung werden die höchstmöglichen Fluidtemperaturen im Winter (Heizbetrieb) bzw. die tiefstmöglichen Fluidtemperaturen im Sommer (Kühlbetrieb) zur Wärmepumpe geliefert. Wie die Abbildung 3 zeigt, ist das Erdreich im Winter am Korbfuss wärmer und im Sommer kälter als der Korbkopf.

Ein gewisser Unterschied zu Erdwärmesonden besteht in den Temperaturverhältnissen, die in der Einbautiefe herrschen. In der Schweiz hat die Mehrheit der installierten Erdwärmesonden eine Tiefe zwischen 50 und 300 m. Sie nutzen somit die von der Lufttemperatur unbeeinflusste Zone des Erdreiches, wo die Temperatur während des ganzen Jahres konstant bleibt und mit dem lokalen Gradient mit der Tiefe zunimmt (im allgemein  $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ).

Die Erdwärmekörbe werden hingegen oberflächennäher eingebaut und befinden sich deshalb in einer Tiefe, wo saisonale Temperaturschwankungen vorhanden sind. Oberflächennah werden die Erdreichtemperaturen tatsächlich praktisch 100 % von der Sonne und den Witterungsverhältnissen beeinflusst. Tagesschwankungen der Temperatur sind bis in eine Tiefe von ca. 0.3 bis 0.7 Metern und saisonale

Schwankungen bis in eine Tiefe von 20 m messbar. Die Abbildung 3 zeigt, wie sich die Bodentemperatur in den ersten 20 Metern des Untergrundes während des Jahres verhält. Es zeigt sich, dass die Temperatur in der Einbautiefe der Erdwärmekörbe eine beträchtliche Phasenverschiebung zu der Lufttemperatur hat. Die höchsten Temperaturen sind im November vorhanden und die tiefsten Anfangs Sommer. Diese Phasenverschiebung hat im Prinzip zwei Ursachen: einerseits ist der Untergrund ein schlechter Wärmeleiter und andererseits besitzt er eine grosse Wärme- bzw. Speicherkapazität. Damit bleibt die Sonnenwärme - die in den ersten Metern im Sommer eindringt - für mehrere Monate erhalten und die Erdreichtemperatur nimmt langsamer als die Lufttemperatur ab.

Diese Phasenverschiebung ist ein wesentliches Element der Funktion der Erdwärmekörbe. Gemäss Abbildung 3 sind die höchsten Temperaturen im Erdreich im November zu Beginn der Heizperiode vorhanden. Die tiefsten Temperaturen kommen Anfangs Sommer vor, wenn die Heizung nicht mehr benötigt wird und die Anlage eventuell für Kühlzwecke eingesetzt wird.

Die gezeigte Beeinflussung der Lufttemperatur auf die Erdreichtemperatur kann aber als relativ gering betrachtet werden. In der Einbautiefe der Erdwärmekörbe herrscht eine relativ konstante Temperatur über das ganze Jahr im Bereich zwischen ca. 7 und 13 °C. Erdwärmekörbe entsprechen deshalb einer idealen Energiequelle für Wärmepumpen, da die produzierten Temperaturen gleichmässig sind. Dies erhöht die Lebensdauer der Wärmepumpe.

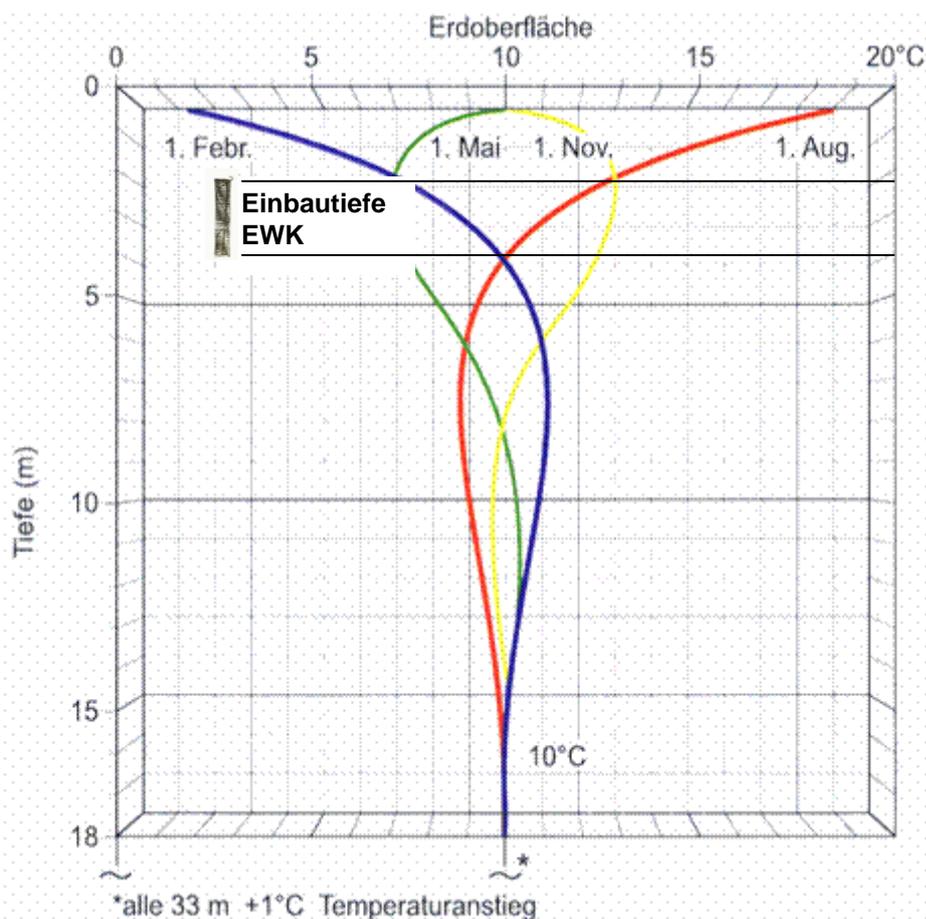


Abbildung 3: saisonale Schwankungen der Erdreichtemperatur in den ersten 20 Metern. Gezeigt ist auch die Einbautiefe der Erdwärmekörbe.

Erdwärmekörbe werden üblicherweise bei kleineren Anlagen oder als Alternative zu Erdwärmesonden in Grundwasserzonen eingebaut. Bis zu Heizleistungen von ca. 12 kW können sie üblicherweise etwas kostengünstiger als Erdwärmesondenanlagen erstellt werden. Ausserdem können Erdwärmekörbe als Ergänzung für zu kurze Erdwärmesonden eingebaut werden (alte Anlagen, Sanierungen).

## 4 Einbau

Der Einbau von Erdwärmekörpern ist eher für Neubauten geeignet, weil sie im Gegensatz zu Erdwärmesonden, wesentlich mehr Grabarbeiten benötigen. Da ein Bagger aber wesentlich beweglicher als ein Bohrgerät ist, können EWK auch eingesetzt werden, wenn keine Zufahrtsmöglichkeiten für Bohrmaschinen bestehen. Nachfolgend werden die verschiedenen Schritte des Einbaus eines Korbes beschrieben. Pro Tag können mit diesem Verfahren pro Equipe ca. 9 Körbe versetzt werden.

### 1. Grabarbeiten



Ein Bagger mit einer 60 cm breiten Schaufel hebt ein Loch bis in eine Tiefe von 3.5 Meter aus.

Abbildung 4: Grabarbeiten

### 2. Einbau eines Schutzrohres

Ein Schutzrohr wird in Loch abgesetzt. Darin wird später der Korb eingebaut. Ausserhalb des Schutzrohres wird normalerweise mit dem Aushubmaterial wieder hinterfüllt und mit einem Grabenstamper verdichtet. Das Aushubmaterial muss verdichtbar sein, sonst wird es gegen besseres Material ausgetauscht.



Abbildung 5: Einbau des Schutzrohres (links) und Hinterfüllung mit dem Aushubmaterial (rechts)

### 3. Korbeinbau

Im Schutzrohr wird anschliessend der Korb eingebaut.



Abbildung 6: Einbau des Erdwärmekorbes im Schutzrohr.

Abbildung 7: Einbau des Erdwärmekorbes im Schutzrohr. Rechts ist der eingebaute Korb mit aufsteigendem Innenrohr sichtbar.



#### 4. Hinterfüllung mit Sand



Abbildung 9: Sandhinterfüllung innerhalb des Erdwärmekorbes

Innerhalb des Schutzrohres wird der Korb mit Sand hinterfüllt, der durch ein Vibrationsverfahren verdichtet wird. Anschliessend wird das Schutzrohr entfernt.

#### 5. Verrohrung und Anschluss am Verteiler

Die ganze Verrohrung im Erdreich wird nach den Richtlinien des VKR verschweisst und abgepresst. Aus hydraulischen Gründen, d.h. um eine turbulente Strömung zu erhalten, werden 3 bis 4 Körbe in Serie hintereinander geschaltet. (siehe Abbildung 28 und Abbildung 29). Bei laminarer Strömung ist der Wärmeübergang schlechter, was zu einer um ca. 1.5K tieferen Soletemperatur führt (ca. 4% höherer Energiebedarf).



Abbildung 10: Beispiele für die horizontale Verrohrung der Erdwärmekörbe. Die Zuleitungen werden eingesandet.

Als Material wird nur qualitativ hochwertiges Kunststoffmaterial (PE-100, SDR 11) verwendet. Das verwendete Polyethylen ist für einen Nenndruck von 16 bar (20 °C 50 Jahre) ausgelegt. Die effektive Belastung ist wesentlich geringer (1.5 bis 2.5 bar, ca. 12°C). Auf eine schwächere Rohrqualität auszuweichen ist nicht zu empfehlen weil dann die notwendige Robustheit auf der Baustelle nicht mehr gewährleistet werden kann. Mit der Rohrqualität PE-100 SDR, die frostsicher und UV stabilisiert ist, weisen die EWK eine Lebensdauer auf, die mindestens gleich lang wie die des Gebäudes ist. Rechnerisch lässt sich eine Lebensdauer von mehreren hundert Jahren nachweisen. Anschliessend werden die Körbe mit dem Verteiler verbunden, abgepresst und mit Frostschutzlösung gefüllt.



Setzen des Verteiles für 9 Erdwärmekörbe in Lichtschacht an der Hauswand oder innen im Heizungsraum (links Anlage mit 18 EWK inkl. Wärmepumpe).

Kompaktheizzentrale (Wärmepumpe mit integriertem Boiler und kontrollierter Wohnungslüftung) und im Lichtschacht montiertem Erdwärmekorb-Verteiler



Abbildung 11: Verteiler und angeschlossene Wärmepumpen

## 5 Anwendungsbeispiele

### 5.1 BEISPIEL 1

In Alberswil wird ein Einfamilien-Minergiehaus durch eine Erdwärmekorb-Wärmepumpe-Anlage seit dem Herbst 2001 geheizt. Das Heizungssystem wird von einer kontrollierten Wohnungslüftung unterstützt. Die Wärmepumpe übernimmt ausserdem die Warmwasserbereitung. Die Tabelle 5-1 fasst die Hauptdaten dieser Anlage zusammen. Die Abbildung 13 zeigt das Anlageschema mit der Kompaktheizzentrale, ein Fabrikat der Firma Calmotherm.

Tabelle 5-1: Hauptdaten der Erdwärmekörbe-Wärmepumpe-Anlage in Alberswil

Wärmebedarf nach SIA 384/2	3750 W
Beheizbare Fläche	160 m <sup>2</sup>
Warmwasserbedarf	Ø 300 l/d
Anzahl Personen im Haushalt	4
Anzahl Erdwärmekörbe	8 Stück, ø 50 cm à je 200 cm Länge
Wärmepumpe	Calmotherm KHZ 50 (B0W35 Qh 5.3 kW, Qk 4.05 kW), COP 4.24
Baujahr	Herbst 2001

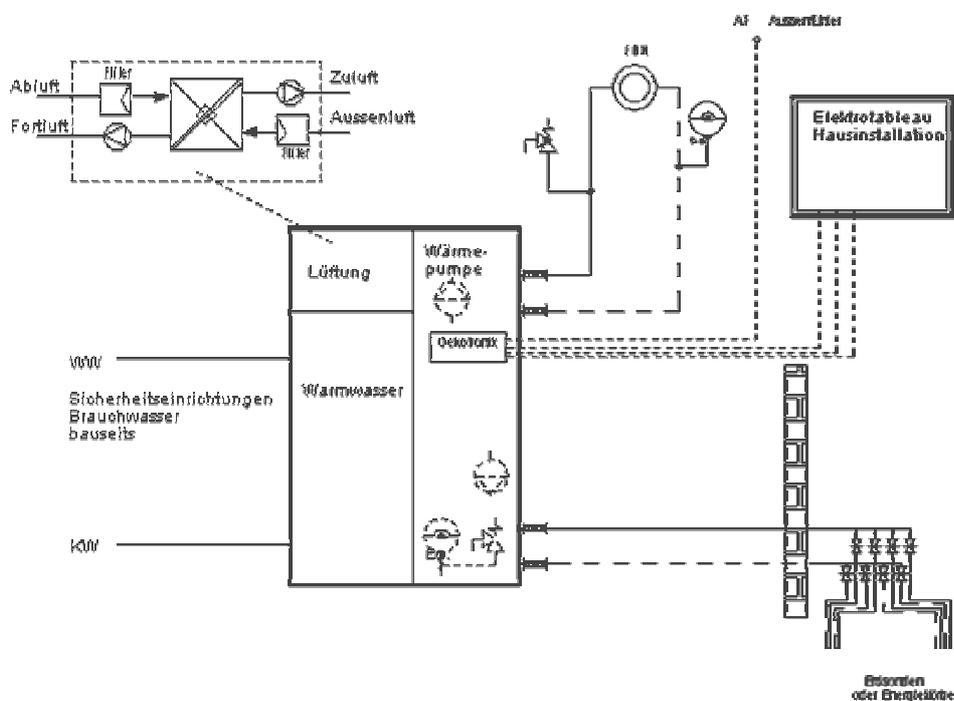


Abbildung 13: Schema Heizungsanlage des Minergiehaus in Alberswil

Der Betrieb der Anlage wurde im Januar und im Mai 2002 ausgemessen. Gemessen wurden die Betriebstemperaturen vom Erdwärmekorb- und Heizungskreislauf und die elektrische Aufnahme der Wärmepumpe. Die erste Messung fand am 16. Januar 2002 statt, nach einer längeren Kälteperiode. Aus den Daten wurde der Tag mit den tiefsten EWK-Temperaturen herausgefiltert (siehe Abbildung 14). Die Rücklauftemperatur aus den Erdwärmekörben sank knapp auf 0°C ab. Die zweite Messung erfolgte am 20. Mai 2002, wobei bereits wieder eine Temperatur von 8°C gemessen wurde (siehe Abbildung 15). Die Regeneration erfolgt somit relativ rasch.

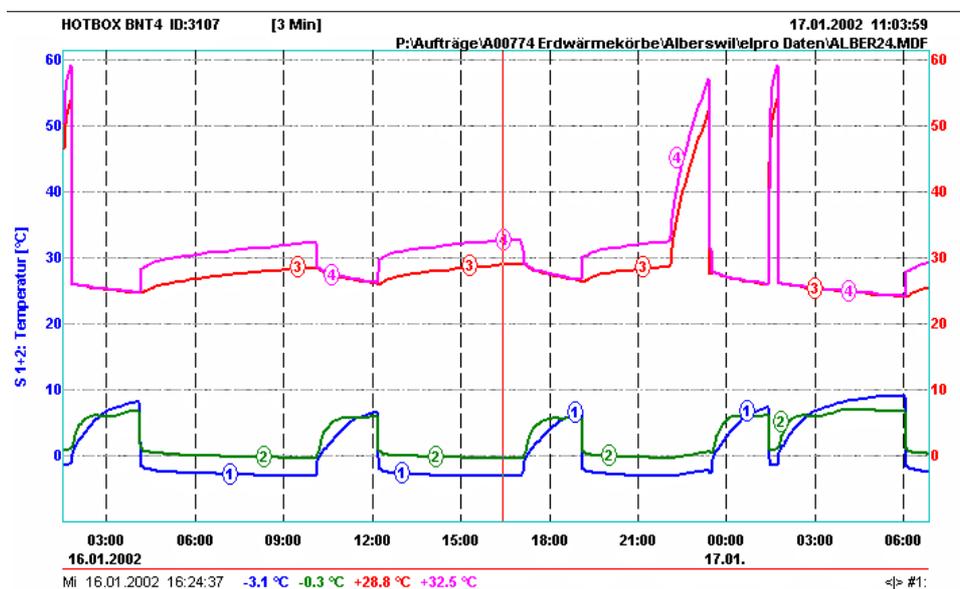


Abbildung 14: gemessene Betriebstemperaturen des Erdwärmekörbe-Kreislaufes (blaue und grüne Kurve) und des Heizungskreislaufes (rote und rosa Kurve) am 16.01.2002.

In den Diagrammen sind nur diejenigen Temperaturen relevant, während dem die Wärmepumpe gelaufen ist, d.h. die eine signifikante Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf aufweisen. Die anderen Temperaturen zeigen nur die Keller, resp. Rohrtemperaturen an, sind also ungültig. Dies ist besonders bei Abbildung 15 gut erkennbar.

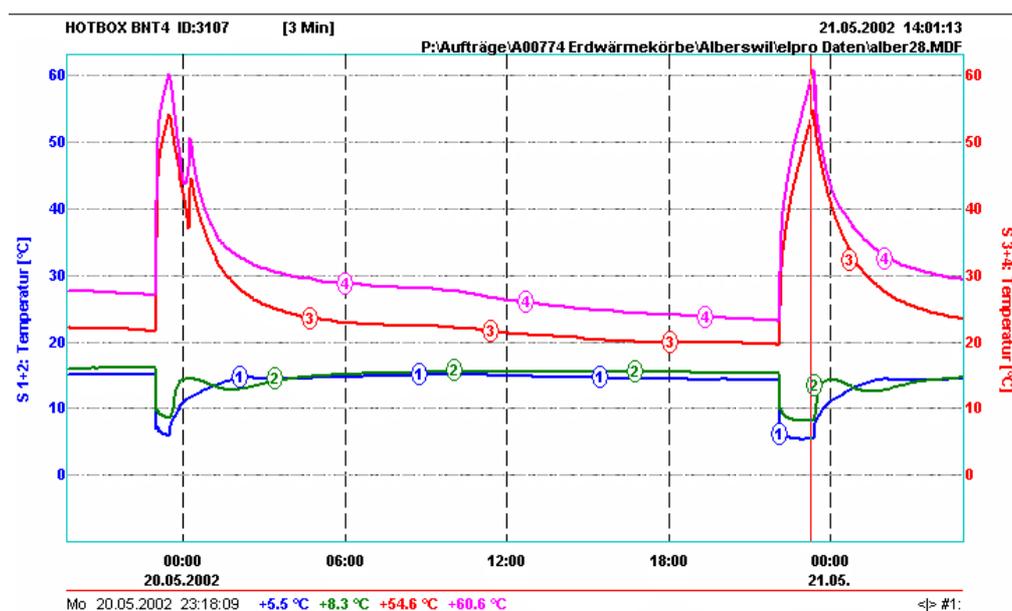


Abbildung 15: gemessene Betriebstemperaturen des Erdwärmekörbe-Kreislaufes (blaue und grüne Kurve) und des Heizungskreislaufes (rote und rosa Kurve) am 20.05.2002.

Zusätzlich wurde die Anlage für ein Betriebsjahr simuliert. Die Abbildung 16 und die Tabelle 5-2 zeigen die simulierten und gemessene Daten.

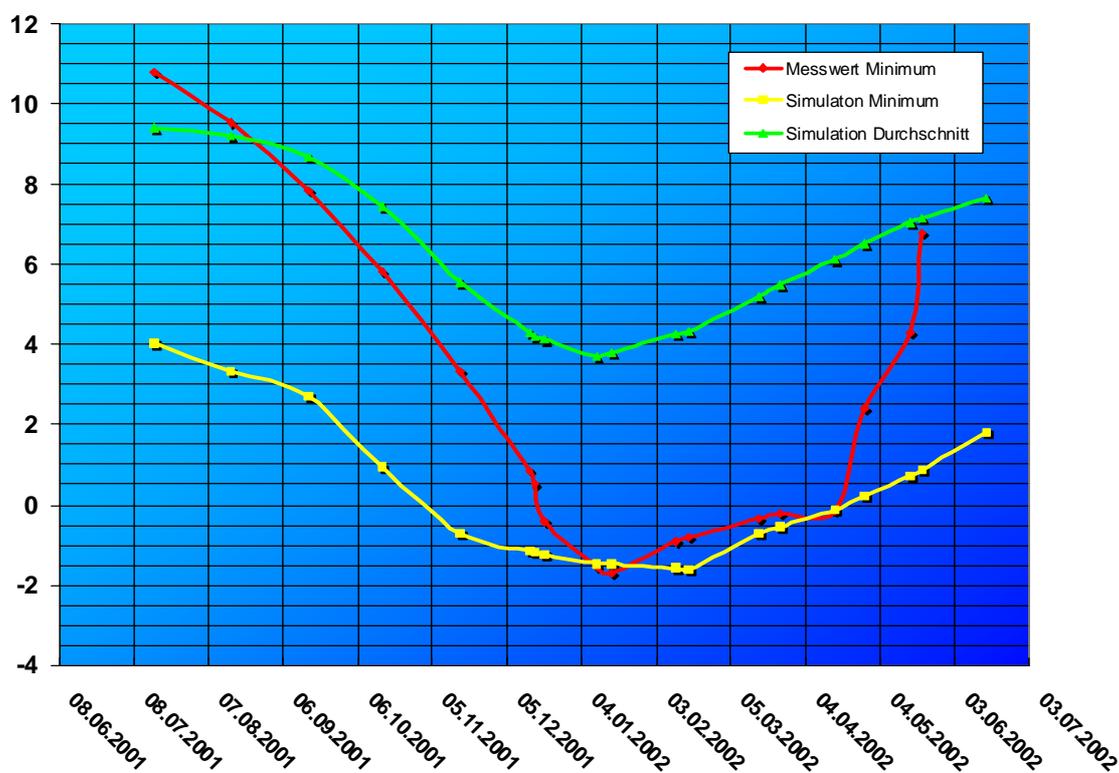


Abbildung 16: gemessene und simulierten Soletemperaturen

Tabelle 5-2: simulierte und gemessene Daten

	Qh	Qk	Strom	Betriebsd.	mittlere	minimale
	kWh	kWh	kWh	Std	EWK-Temp	EWK-Temp
Januar	1364	1031	368	240	1.12	-2.80
Februar	1177	889	318	206	1.39	-2.92
März	964	718	271	187	2.19	-2.02
April	762	662	221	129	2.93	-1.43
Mai	696	414	186	100	3.77	-0.62
Juni	486	338	162	82	4.60	0.50
Juli	468	328	152	75	6.42	2.70
August	469	327	164	76	6.02	2.02
September	481	338	166	79	6.46	1.38
Oktober	697	510	205	116	4.03	-0.37
November	1048	791	283	179	2.36	-2.02
Dezember	1288	976	346	225	1.48	-2.50
<b>Summe</b>	<b>9776</b>	<b>7213</b>	<b>2821</b>	<b>1674</b>		
<b>Sole-UP</b>	<b>161</b>	<b>kWh</b>	<b>simuliert</b>	<b>gemessen</b>		
<b>WP Aufnahme</b>	<b>2'670</b>	<b>kWh</b>	<b>Juni-Sept</b>			
<b>E-Aufnahme</b>	<b>2'821</b>	<b>kWh</b>	<b>623 kWh</b>	<b>645 kWh</b>		
<b>COP</b>	<b>3.66</b>	<b>-</b>	<b>Juni-März</b>			
<b>JAZ</b>	<b>3.47</b>	<b>-</b>	<b>2414 kWh</b>	<b>2315 kWh</b>		

Die gemessenen Daten stimmen sehr gut mit den berechneten Werten überein. **Das Betriebsverhalten ist der einer Erdwärmesonde sehr ähnlich.** Bei dieser Anlage wird für die Warmwasserbereitung mehr Energie benötigt als für das ausgezeichnet isolierte Haus. Unter Berücksichtigung dieses Umstandes fällt die dennoch sehr gute Jahresarbeitszahl (JAZ 3.5) auf und der geringe Stromverbrauch von rund 2900 kWh/Jahr.

## 5.2 BEISPIEL 2

In diesem Fall handelt es sich um ein Einfamilien-Minergiehaus, wobei der Warmwasserbedarf und der Heizbedarf von 4.5 kW durch 9 EWK gedeckt werden. Die Tabelle 5-3 fasst die wichtigsten Daten dieser Anlage zusammen. Die Soletemperatur (Austritts- und Eintrittstemperatur in die Erdwärmekörbe) wurde im Juli 2005 gemessen. Die Abbildung 17 stellt den gemessenen Wert dar. Signifikant sind nur die tiefsten Werte, da die Temperatur an der Rohrwand des Solekreises gemessen wurde und so während der Stillstandszeit nur die lokale Rohrtemperatur wiedergegeben wird. Es zeigt sich, dass sich das Erdreich sehr gut regeneriert (13/10°C im Betrieb für die WW Bereitung), so dass sich die Soletemperaturen jedes Jahr in etwa wiederholen wird (siehe auch Kapitel 6). Ein langfristiger Betrieb ist somit gewährleistet.

Tabelle 5-3: Hauptdaten der Erdwärmekorb-Wärmepumpe-Anlage in Burgdorf

Wärmebedarf nach SIA 384/2	4'500 W
Warmwasserbedarf	Ø 300 l/d
Höhenlage	550 M.ü.M.
Anzahl Personen im Haushalt	4
Anzahl Erdwärmekörbe	9 Stück
Wärmepumpe	Calmothem SW-50 (B0W35 Qh 5.3 kW, Qk 4.05 kW), COP 4.24
Baujahr	Juli 2003

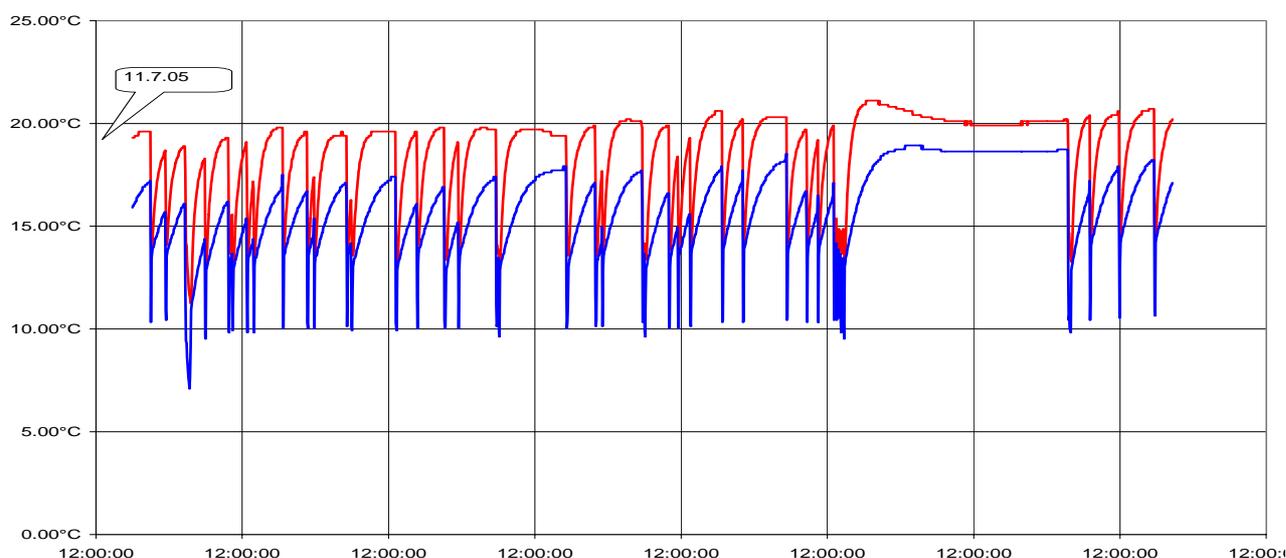


Abbildung 17: gemessene Eintritts- (blau) und Austrittstemperatur (rot) aus den Erdwärmekörbe.

### BEISPIEL 3

In diesem Fall handelt es sich um eine Erdwärmekörbanlage für ein Doppel Einfamilienhaus in 8614 Sulzbach. Bei dieser Anlage decken 24 Erdwärmekörbe ein gesamte Heiz- und Warmwasserbedarf von über 14 kW (siehe Tabelle 5-4). Von den 24 EWK wurden jeweils 3 in Serie geschaltet und der Abstand zwischen die EWK beträgt 4 m (siehe Abbildung 18)

Tabelle 5-4: Hauptdaten der Erdwärmekörbe-Wärmepumpe-Anlage in Sulzbach

Wärmebedarf nach SIA 384/2	2 X 6.8 kW
Warmwasserbedarf	Ø 400 l/d
Höhenlage	500 M.ü.M.
Anzahl Personen im Haushalt	8
Anzahl Erdwärmekörbe	24 Stück, ø 50 cm à je 200 cm Länge
Wärmepumpe	2 x Calmothem SWC-70 (B0W35 Qh 6.8 kW Qk 5.2 kW), COP 4.3
Baujahr	Sept. 2005

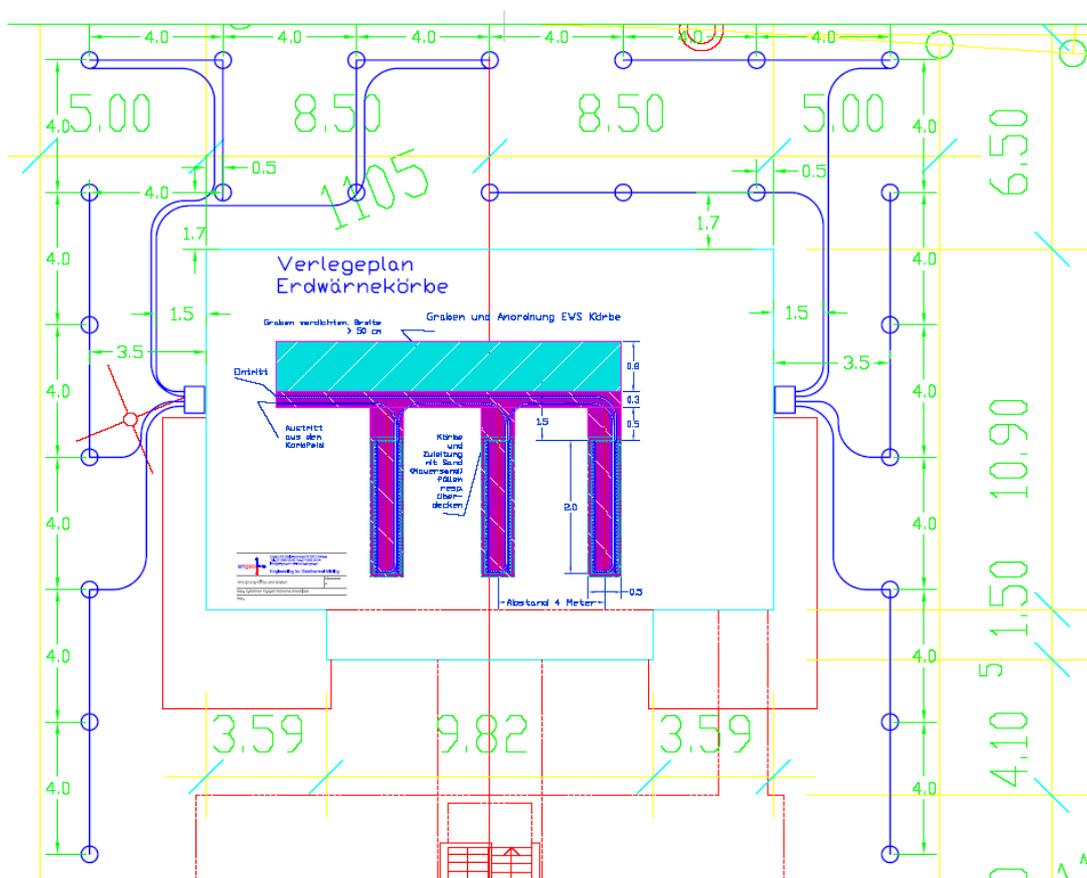


Abbildung 18: Schema der Erdwärmekörbanlage in Sulzbach

## 5.4 BEISPIEL 4

In diesem Beispiel wird gezeigt, dass Erdwärmekörbe nicht nur für Ein- oder Doppelfamilienhäuser sondern auch bei grösseren Anlagen verwendet werden können. In diesem Fall wird ein Mehrfamilienhaus in 6312 Steinhausen mit 72 Erdwärmekörbe beheizt werden, wobei ein Heiz- und Warmwasserbedarf von über 40 kW gedeckt wird. Es handelt sich um ein 6-stöckige Wohnhaus aus Holz der Renggli AG (Sursee) im Minergie-Standard, mit acht Eigentumswohnungen sowie Büro-, Atelier- und Gewerberäume im Erdgeschoss (siehe Abbildung 19). Zusätzlich werden im Sommer die Räume über die Bodenheizung gekühlt.



Abbildung 19: das Mehrfamilienhaus der Renggli AG in Steinhausen

Bei diesem Objekt wurden jeweils 4 Erdwärmekörbe in Serie geschaltet. Die Leitungen wurden in 3 Verteiler im Korbfeld zusammengefasst und von dort auf einen Hauptverteiler im Heizungsraum geführt (siehe Abbildung 20 und Abbildung 22).

Für ein solches EWK-Feld wird relativ viel Platz benötigt. Mit einem Abstand zwischen EWK von 4 m und einem daraus resultierenden Platzbedarf von 16 m<sup>2</sup> pro Korb besteht für diesen spezifischen Fall ein gesamter Platzbedarf von ca. 1'150 m<sup>2</sup>. Wie die Abbildung 20 zeigt, wurden in diesem Fall sämtlicher Umschwung des Objekts für die Erdwärmekörbe verwendet. Der Platz kann aber weiterhin anderweitig genutzt werden.

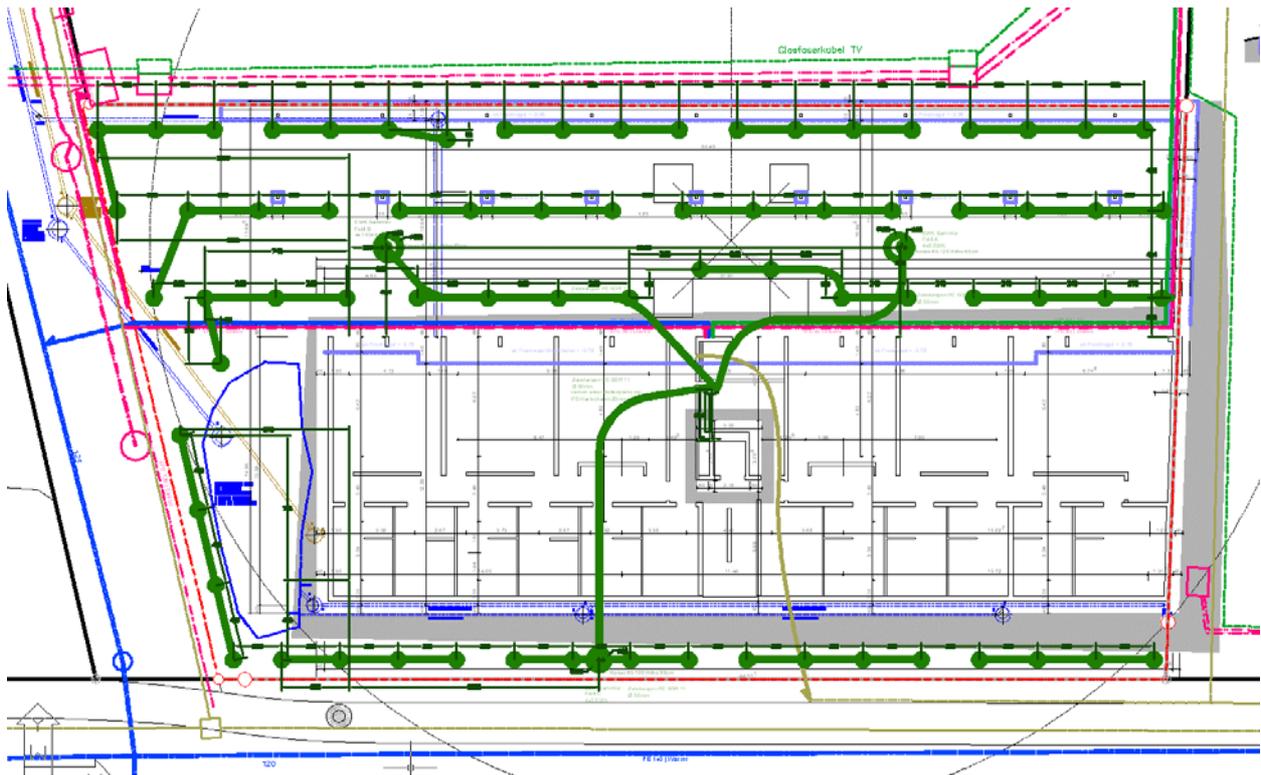


Abbildung 20: Schema der Anordnung der 72 Erdwärmekörbe (kleine grüne Kreise). Jeweils 4 Erdwärmekörbe sind in Serie geschaltet und in drei Subverteilern zusammengefasst. Die Subverteiler sind dann an den Hauptverteiler im Heizraum angeschlossen.

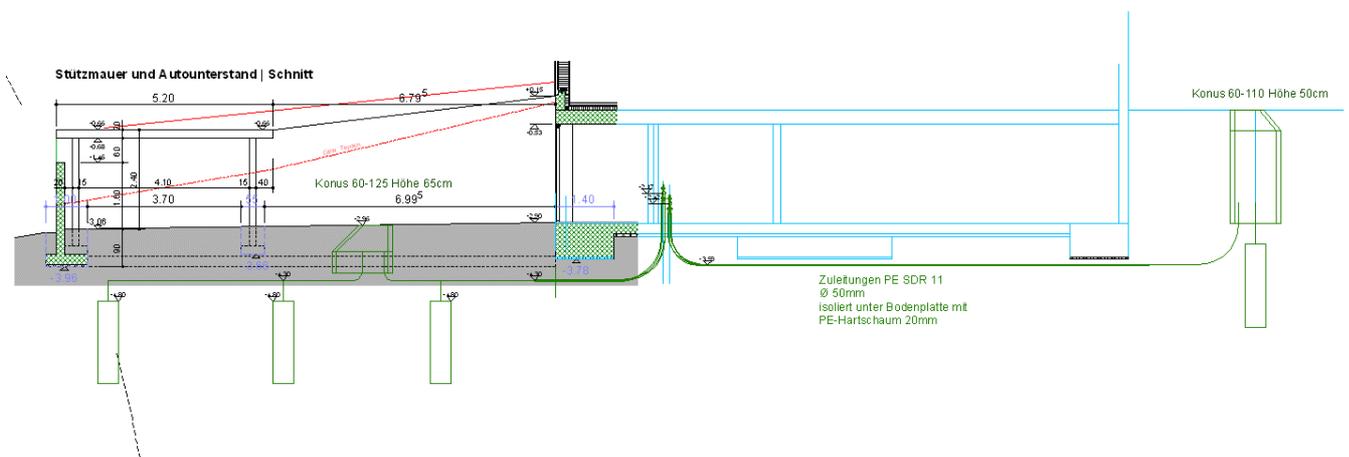


Abbildung 21: Querprofil durch die Erdwärmekörbe-Anordnung. Von den Subverteilern führen die isolierten Sammelleitungen auf den Hauptverteiler im Heizraum.



Gesetzte Erdwärmekörbe im Randbereich gegen die Strasse hin gemäss Abbildung 20



Subverteiler: Die Anlage wird schrittweise abgepresst und die Leitungen mit Warnband gekennzeichnet



Hauptverteiler mit wasserdichten Durchführungselementen im Heizungsraum

Abbildung 22: Teil des Erdwärmekorbfeldes mit Sub- und Hauptverteiler.

## 6 Dreidimensionale FE-Simulation

Mit dem Ziel den Betrieb einer Erdwärmekorbanlage zu simulieren und deren Wärmeaustausch mit dem Untergrund darzustellen, wurde eine einfache dreidimensionale numerische Simulation mit der Software FRACture (Kohl and Hopkirk, 1995) durchgeführt. FRACture basiert auf der Methode der Finiten Elemente (FE) und bietet komplette dreidimensionale, stationäre und transiente Lösungen bei der Bearbeitung von hydraulischen, thermischen und elastischen Transportprozessen sowie deren Kopplungen an. Der FE-Ansatz erlaubt eine flexible Gittergestaltung.

Für diesen speziellen Fall wurde ein einfaches Zylindermodell aufgebaut, wobei die Grundmaterialien eines Erdwärmekorbes diskretisiert wurden (Fluid, Hinterfüllung und Gesteinsmatrix, siehe Abbildung 24). Dabei wurde der Erdwärmekorb mit einer Länge von 2 m und einem Radius von 25 cm in 1.5 m Tiefe unter die Oberfläche modelliert. In Bereichen, wo das Temperaturfeld komplexer wird (im Nahbereich des EWK), wurde eine feinere Diskretisierung des Maschengitters verwendet. In der vertikalen und horizontalen Richtung wurde das Modell bis 100 m ausgedehnt, um Randeffekte auszuschliessen. In diesem einfachen Modell wird ein einziger Erdwärmekorb simuliert und deshalb der gegenseitige Einfluss von benachbarten Körben nicht berücksichtigt. Um das prinzipielle thermische Verhalten besser verstehen zu können genügt aber dieser Ansatz.

Als Randbedingungen der Simulation werden eine monatlich variierende Oberflächentemperatur (siehe Abbildung 3), ein konstanter Basiswärmefluss von  $0.09 \text{ W/m}^2$  und eine monatlich variierende Entzugsleistung (konstant über die ganze Erdwärmekorblänge) angenommen. Dabei wurde die im Kapitel 5.1 beschriebene Anlage nachsimuliert und das in der Tabelle 5-2 aufgelistete Entzugsprofil als so genannte „Base Load“ verwendet. Das heisst, dass die Entzugsleistung homogen auf einem Monat verteilt wurde.

Die Simulation fängt in September an und wurde für 5 Betriebsjahre durchgeführt. Die Abbildung 25 stellt das Temperaturfeld um den EWK für ein Betriebsjahr dar. Als Hauptresultat dieser Simulation kann die sehr gute Regeneration des Untergrundes genannt werden. Wie man sieht, regeneriert sich der Untergrund nach der Abkühlung während der Heizperiode im Sommer vollständig, so dass Ende September ein praktisch identisches Temperaturfeld wie im vorherigen Jahr sich einstellt. Die Simulation unterstreicht somit die Messungen (Abbildung 17) und zeigt die langfristige Nachhaltigkeit der Anlage auf.

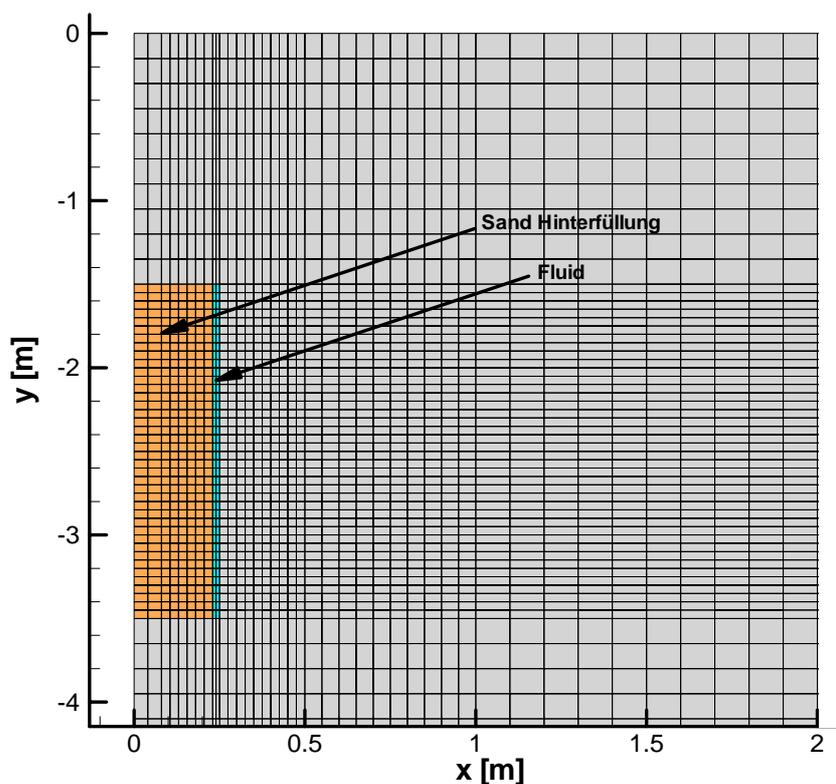


Abbildung 24: FE-Modell eines Erdwärmekorbes.

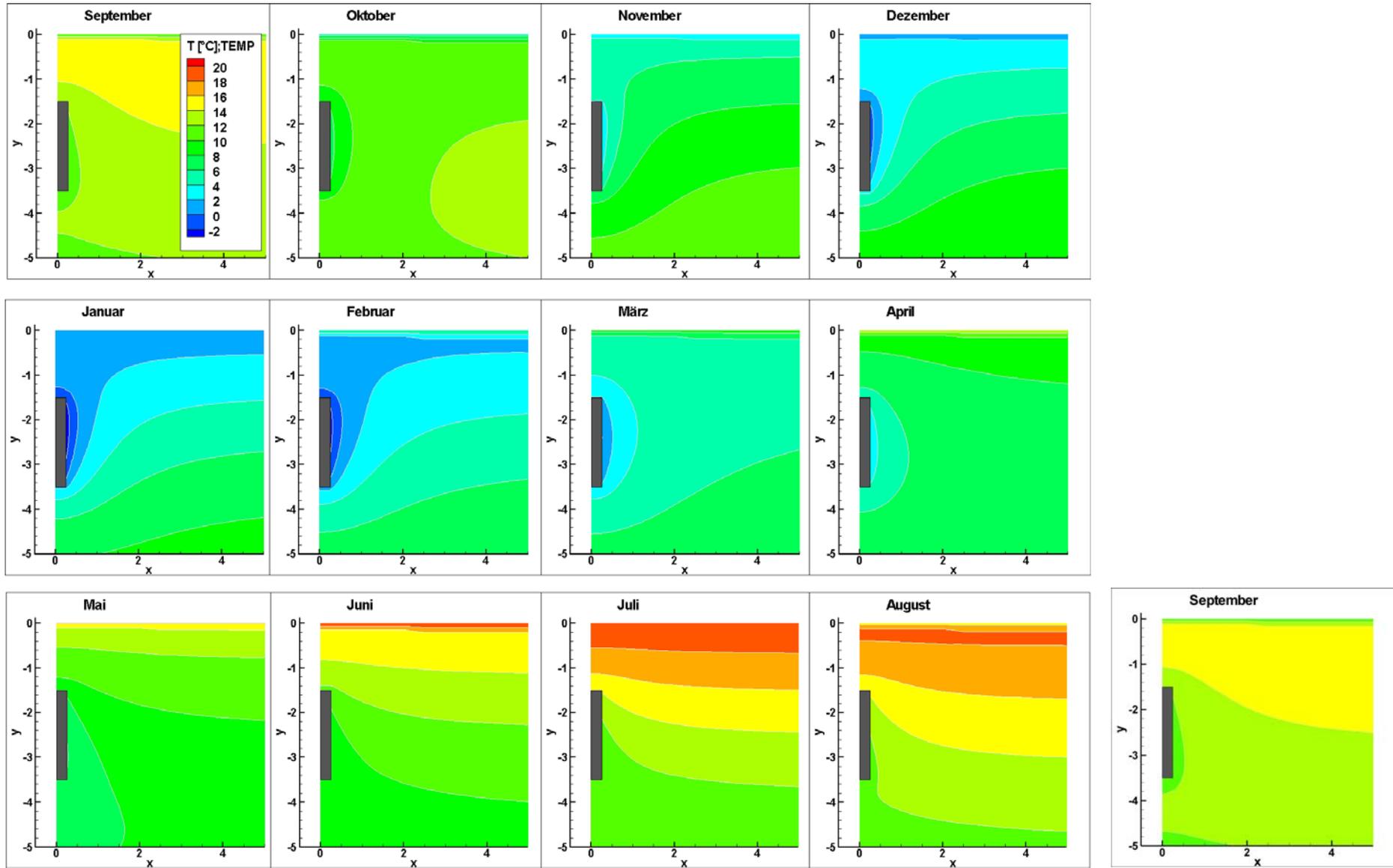


Abbildung 25: simuliertes Temperaturfeld um den Erdwärmekorb für ein Betriebsjahr

## 7 Einfachen Auslegungs- und Installationsregeln

Die bis jetzt gewonnene Erfahrung (siehe Kapitel 5 Anwendungsbeispiele) bei der Installation von Erdwärmekorbanlage ermöglicht einige einfache Grundregeln zur Auslegung und Installation von solchen Anlage festzusetzen:

- Für die Auslegung der benötigten Erdwärmekörbe-Anzahl kann als Richtlinie eine Standardleistung von **500 W pro Korb (Kälteleistung)** im Heizbetrieb verwendet werden. Diese Standardleistung gilt bei eine Höhenlage von 400 M.ü.M. im schweizerischen Mittelland und 1800 Betriebsstunden der Wärmepumpe.
- Die Anzahl Erdwärmekörbe muss dann gemäss einem linearen Zusammenhang auf die Höhenlage korrigiert werden:

$$\text{Mehrlänge [\%]} = 0.06 \times \text{Höhenlage [M.ü.M.]} - 24$$

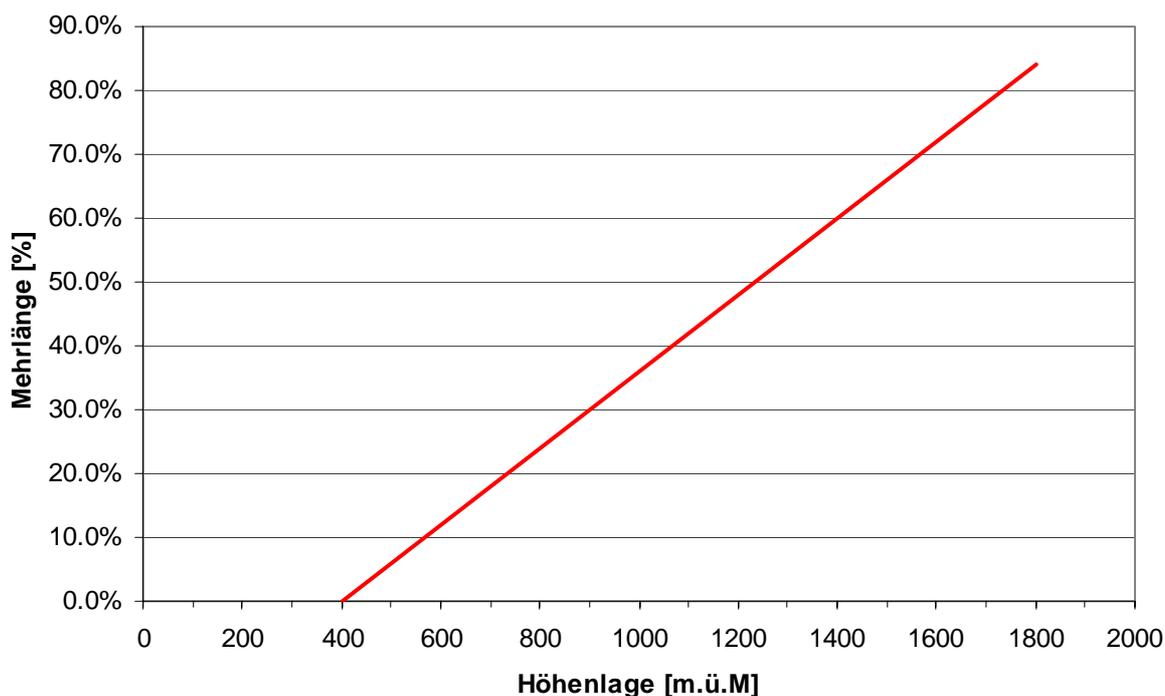


Abbildung 26: Korrektur der EWK-Gesamtlänge auf die Höhenlage bezogen. Die Standardleistung von 500 W pro Korb gilt bei 400 M.ü.M. (Klimaregion schweizerisches Mittelland).

- Wie gesagt gilt die Standardleistung für 1800 Betriebsstunden der Wärmepumpe und bezieht sich auf einen reinen Heizbedarf. Bei zusätzlicher Warmwasserbereitung mit der Wärmepumpe muss ausserdem die Anzahl Erdwärmekörbe gemäss einem linearen Zusammenhang für die zusätzlichen Betriebsstunden korrigiert werden:

$$\text{Mehrlänge [\%]} = 0.029 \times \text{Betriebsstunden} - 52.4$$

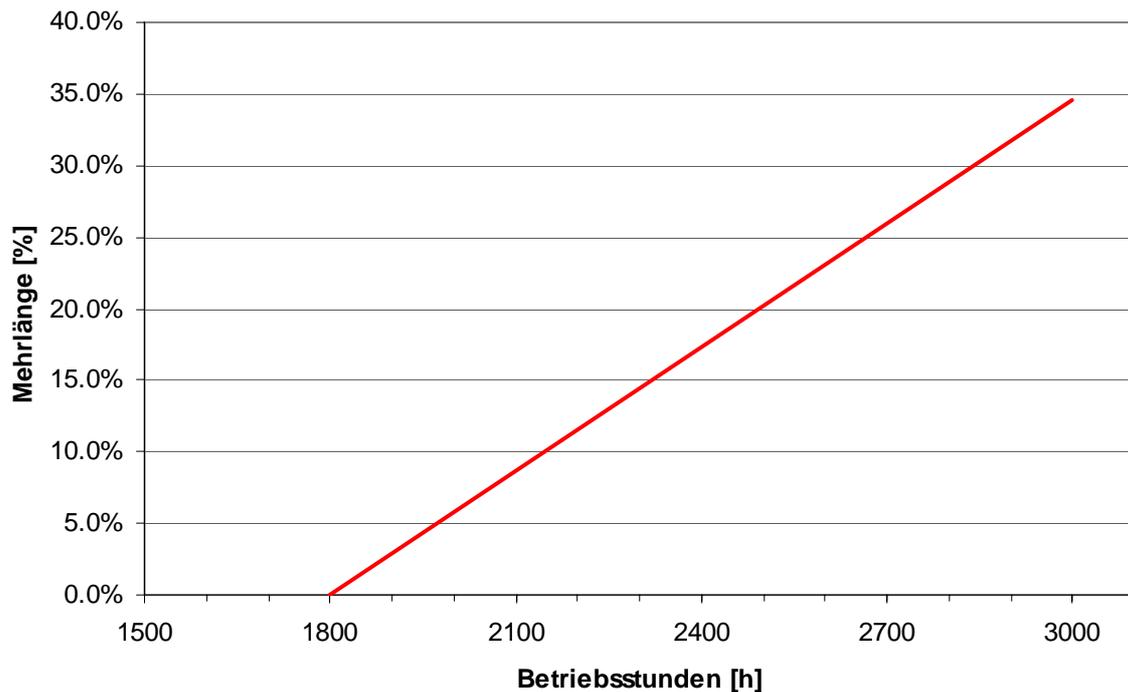


Abbildung 27: Korrektur der EWK-Gesamtlänge auf die Betriebsstunden der Wärmepumpe bezogen. Die Standardleistung von 500 W pro Korb gilt bei 1800 Betriebsstunden.

- Wenn die benötigte Anzahl Erdwärmekörbe bestimmt ist, muss man den Platzbedarf und deren Verfügbarkeit abklären. Der optimale **Abstand** zwischen zwei Erdwärmekörbe beträgt **4 m** (siehe Abbildung 29). **Pro Erdwärmekorb** besteht deshalb ein **Platzbedarf** von **16 m<sup>2</sup>**.
- Die Erdwärmekörbe werden dann in einer Tiefe von 1.5 m eingebaut. Optimalerweise werden je **drei Erdwärmekörbe in Serie** angeschlossen werden (siehe Abbildung 28). Somit kann man durch höhere Austrittstemperaturen (turbulente Strömung) die Effizienz der Anlage verbessern und ausserdem die Anschlusskosten verkleinern.
- Die Erdwärmekörbe werden mit Sand hinterfüllt und verdichtet
- Die PE-Leitungen werden in einen Graben ca. 85 cm unter die Erdoberfläche gelegt (siehe Abbildung 29). Die Leitungen werden anschliessend zum Schutz mit Sand überdeckt.
- Die Erdwärmekörbe sollten so angeschlossen werden, dass das Fluid im spiralförmigen Rohr nach unten und dann in der Mitte des Korbes nach oben zurück zur Wärmepumpe zirkuliert. Wie im Kapitel 3 erklärt wurde, werden mit dieser Fliessrichtung die höchstmöglichen Fluidtemperaturen im Winter (Heizbetrieb) bzw. die tiefstmöglichen Fluidtemperaturen im Sommer (Kühlbetrieb) zur Wärmepumpe respektive auf den „Kühlplattentauscher“ geliefert.
- Der Verteiler wird vorzugsweise im Lichtschacht installiert, so dass wenig Mauerdurchbrüche (Kernbohrungen) gemacht werden müssen.

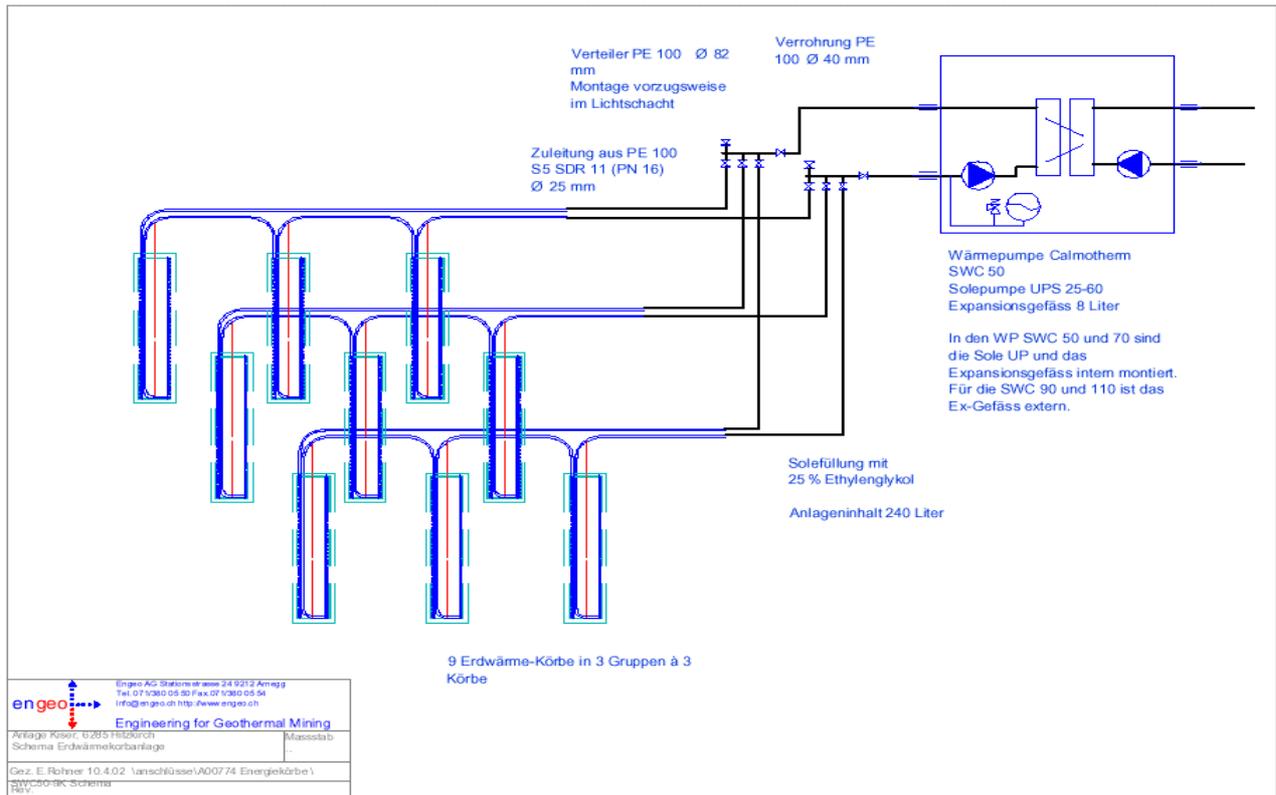


Abbildung 28: Schema Erdwärmekorbanlage (9 EWK Anlage mit je 3 Körben in Serie)

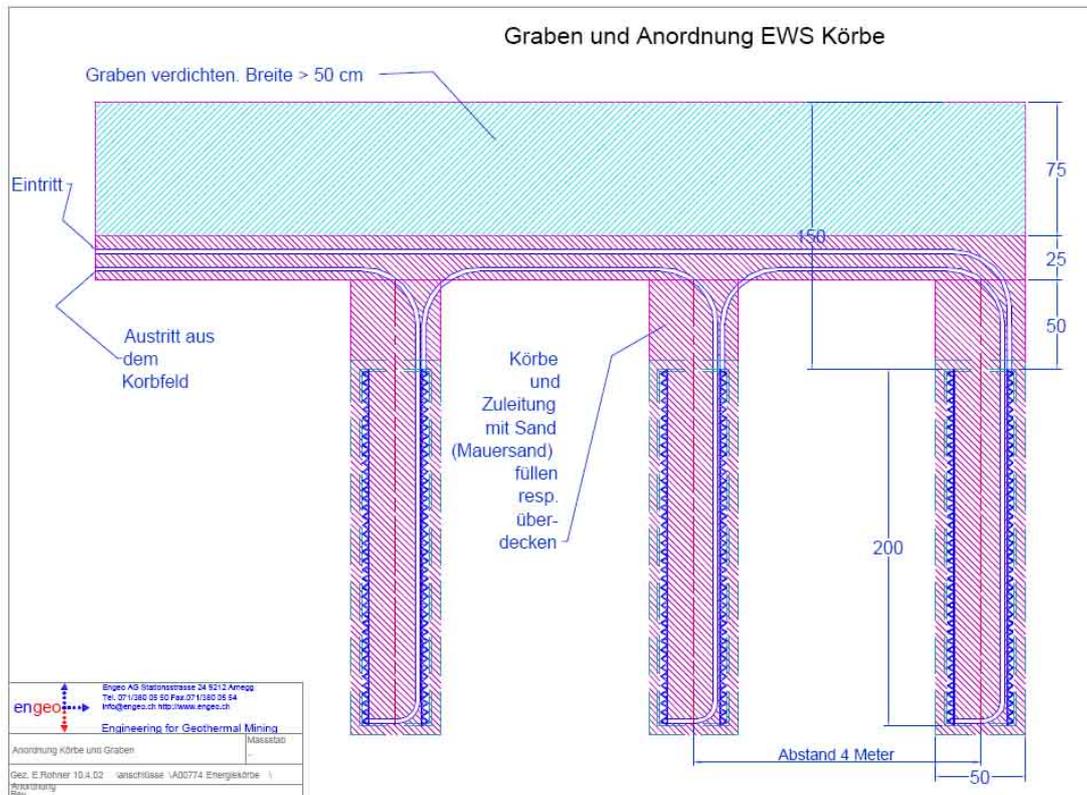


Abbildung 29: Graben und Anordnung der Erdwärmekörbe

## 8 Kosten und Wirtschaftlichkeit

Die Erdwärmekörbe sind unter EU Nr. 0931986 patentiert. Sie werden in der Schweiz durch die Firma Calmotherm ([www.calmotherm.ch](http://www.calmotherm.ch)) vertrieben und durch die Engeo AG ([www.engeo.ch](http://www.engeo.ch)) in Lizenz hergestellt. Die beiden Firmen haben das System an die Schweiz adaptiert und verbessert, so dass heute ein langlebiges (Grössenordnung identische dem Gebäude) Produkt angeboten werden kann. Die Tabelle 8-1 zeigt eine Schätzung der Investitionskosten einer Erdwärmekorbanlage für eine heutige Einfamilienhaus mit Minergie-Standard (9 Stück Erdwärmekörbe → Wärmebedarf ca. 4,5 kW). Diese Schätzung bezieht sich nur auf die Kosten der Wärmegewinnungsanlage (Erdwärmekörbe + Solekreis) und beinhaltet nicht die Kosten der Wärmepumpe.

*Tabelle 8-1: Schätzung der Investitionskosten einer EWK-Anlage und einschliesslich Leistungen.*

<b>Installationsleistungen</b>	
-	Feldberechnung (mit Verlegevorschlag auf Lageplan)
-	9 Stk. Erdwärmekörbe aus PE100 Rohr 25x2,3 vormontiert mittels Stützgerüst
-	300 m Anschlussrohrleitungen zu Energiekörben aus PE100 Rohr 25x2,3 (SDR11)
-	Verteiler aus Kunststoff für Energiekorbkreise, montiert im Lichtschacht oder im Haus, jeder Kreis beinhaltet 3 Energiekörbe, Kreise sind einzeln absperrbar
-	Solekreis vom Verteiler bis zur Wärmepumpe bis 4 m Verrohrung isoliert inkl. den notwendigen Absperrungen und Entlüftungen
-	Wärmeträgergemisch für den gesamten Solekreislauf
-	Installation des Energiekorbfeldes bis Anschluss an die Wärmepumpe
-	Füllen der Solekreise mit Wasser/Glykol und Entlüften
-	Druckwächter eingebaut
-	Bauleitung und Anweisung Grabenbauer. Mithilfe beim Aushub und Einbau. Einvibrieren der Sandfüllung
<b>Total Installationskosten (Schätzung)</b>	<b>7'900 Fr.</b>
<b>Bauseitige Leistungen</b>	
-	Einholen der Bewilligung oder Anzeige
-	Erstellen des Grabens vom Haus zu den Energiekörben für Anbindeleitungen mit einer Tiefe von ca. 1 m
-	Mithilfe beim Einbau der Erdwärmekörbe. Bereitsstellung Bagger mit Führer, eventuell Kleindumper, Stampfer. Lieferung Sand (pro Korb inkl. Zuleitung ca. 1.1 m <sup>3</sup> /Korb).
-	Baggerschlitze für die vertikale Verlegung der Energiekörbe in eine Tiefe bis ca. 4 m
-	Verfüllen der Energiekörbe mit Sand und Verdichten des Aushubes
-	Einbetten der Zuleitungen mit Schwemmsand und Verdichten der Zuleitungsgräben mit steinfreiem Aushubmaterial.
-	Zeitaufwand ca. 6 Maschinenstunden, 9 Geräteführerstunden
<b>Total Bauseitige Leistungen (Schätzung)</b>	<b>2'700 Fr.</b>
<b>Total Wärmegewinnung (Schätzung)</b>	<b>10'600 Fr.</b>

Um die Kosten einer Erdwärmekorbanlage mit denen einer Erdwärmesondenanlage zu vergleichen, wurden die Investitionskosten für verschiedene Heizbedarfe (bzw. verschiedene Wärmepumpenleistungen) geschätzt. Die Tabelle 8-2 fasst diese Analyse zusammen. Zu beachten ist, dass die aufgelisteten Kosten, wie für die Tabelle 8-1, nur den Kosten für die Wärmegewinnungsanlage entsprechen und keine Kosten der Wärmepumpen enthalten.

*Tabelle 8-2: Vergleich der Investitionskosten von Erdwärmekorb- und Erdwärmesondenanlage für unterschiedliche Wärmebedarfe bzw. Wärmepumpenleistungen.*

<b>Heizleistung Wärmepumpe (B0W35)</b>	<b>[kW]</b>	<b>5.3</b>	<b>6.8</b>	<b>9.1</b>	<b>11.4</b>	<b>14.4</b>
<b>Erdwärmekörbe</b>						
Total Solekreis mit EWK, exkl. Baumeister	[Fr.]	7'900.00	10'000	12'100	14'200	18'900
Baumeister Schätzung	[Fr.]	2'700	3'400	4'200	4'900	6'400
<b>Total Wärmegewinnung EWK</b>	<b>[Fr.]</b>	<b>10'600</b>	<b>13'400</b>	<b>16'300</b>	<b>19'100</b>	<b>25'300</b>
<b>Erdwärmesonden</b>						
Tiefe	[m]	80	100	130	155	190
EWS-Bohrung inkl. Begleitung und Schlammulden	[Fr.]	7'600	9'000	11'100	14'400	15'100
Total Solekreis ab EWS, exkl. Baumeister	[Fr.]	2'900	3'000	3'300	4'000	5'400
Baumeister Schätzung	[Fr.]	1'500	1'500	1'500	1'500	1'500
<b>Total Wärmegewinnung EWS</b>	<b>[Fr.]</b>	<b>12'000</b>	<b>13'500</b>	<b>15'900</b>	<b>19'900</b>	<b>22'000</b>

Wie die Tabelle 8-2 zeigt, können Erdwärmekorbanlage bis zu Heizleistungen von ca. 12 kW üblicherweise etwas kostengünstiger als Erdwärmesondenanlagen erstellt werden.

## 9 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die durchgeführten Arbeiten haben zu den folgenden Schlussfolgerungen geführt:

- Die jahreszeitliche Soletemperatur-Ganglinie für eine Erdwärmekorbanlage ist der einer Erdwärmesondenanlage sehr ähnlich. Damit lassen sich die gleichen Anlagentypen realisieren
- Erdwärmekörbe können erfolgreich bei folgenden Gegebenheiten verwendet werden:
  - Bei kleineren Anlagen für die Deckung von Heiz-, Warmwasser- und Kühlbedarf.
  - In Grundwasserzonen, wo Erdwärmesonden nicht erlaubt sind. Bei grösseren Anlagen, ist die Abklärung des Platzbedarfs ein wichtiger Punkt auf dem Weg der Realisation.
  - Als Ergänzung für zu kurze Erdwärmesonden (alte Anlagen, Sanierungen)
- Bis zu Heizleistungen von ca. 12 kW können Erdwärmekörbe üblicherweise etwas kostengünstiger als Erdwärmesondenanlagen erstellt werden. Der Preisunterschied ist aber gering.
- Für eine grobe Auslegung kann die Faustregel „1 Korb je 500 W Kälteleistung“ verwendet werden. Diese Faustregel gilt für eine Standorthöhe von 400 M.ü.M. und 1800 Betriebsstunden der Wärmepumpe. Die definitive Anzahl Körbe muss bezüglich Standorthöhe und Betriebsstunden der Wärmepumpe korrigiert werden. Ein minimaler Abstand von 4 m zwischen die Erdwärmekörbe muss vorhanden sein.

Das Wissen über die Funktionsweise von Erdwärmekörben könnte in Zukunft mit weiteren Forschungsprojekten erweitert werden. Zum Beispiel wären folgende Untersuchungen sinnvoll:

- Detaillierte Simulation des Wärmeaustausches zwischen Erdwärmekorb und Untergrund anhand eines Finite-Elemente Modells. Unter anderem könnte zum Beispiel der Einfluss von Wasserdampfdiffusion in der Nähe des Korbes untersucht werden. Eine solche Simulation würde zu detaillierteren Auslegungsregeln führen und die unterschiedlichen Lockerböden mit einbeziehen.
- Messkampagne von neuen und bestehenden Erdwärmekorbanlagen. Dabei wäre der Einbau von kleinen autonomen Temperatur-Datalogger an die Rohrwände oder/und im Untergrund denkbar. Die Messdaten könnten für eine detaillierte Analyse der Funktionsweise einer solchen Anlage und Verifikation der Finite-Elemente Berechnungen verwendet werden.

Dieses zusätzliche Wissen würde der Qualitätssicherung dieses erfolgsversprechenden Produktes dienen. Mit einem hohen Qualitätsniveau kann die Nachhaltigkeit sicher gestellt werden und damit sowohl ein Beitrag an die CO<sub>2</sub> Reduktion geleistet, wie auch einheimische Arbeitsstellen gesichert werden.

## 10 Literaturverzeichnis

Kohl T. and R.J. Hopkirk, 1995. „FRACtUre“ a simulation code for forced fluid flow and transport in fractured porous rock, *Geothermics*, 24(3), pp.345-359.

Zürich, den 1. Dezember 2005

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'S. Bassetti'.

Simone Bassetti

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'E. Rohner'.

Ernst Rohner