



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 25.04.2013

Entwicklung einer neuartigen Koaxial- Erdwärmesonde

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
EnergieSchweiz/Forschungsprogramme Gebäude und Geothermie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

ETH Zurich
Chair of Building Systems
Schafmattstrasse 32 / CH-8093 Zurich
www.busy.arch.ethz.ch

Autor:

Hansjürg Leibundgut, leibundgut@arch.ethz.ch

BFE-Bereichsleiter:

Andreas Eckmanns und Gunter Siddiqi

BFE-Programmleiter:

Rudolf Minder

BFE-Vertragsnummer:

SI/500'775-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

/ ITA

Institute of Technology in Architecture
Faculty of Architecture / ETH Zurich

ENTWICKLUNG EINER NEUARTIGEN KOAXIAL- ERDWÄRMESONDE

Schlussbericht Forschungsvertrag SI/500775-01

25. April 2013

Vers 1.1

Bu | Sy

Chair of Building Systems
Prof. Hansjürg Leibundgut
ETH Zurich / Building HPZ / Floor G
Schafmattstrasse 32 / CH-8093 Zurich
www.busy.arch.ethz.ch

Inhalt

1	Ausgangslage.....	3
2	Das Projekt	3
2.1	Motivation	3
2.2	Forschungsziel	6
2.2.1	Hintergrund	6
2.2.2	Hypothese	6
2.2.3	Hauptziel.....	6
2.2.4	Meilensteine	6
2.3	Vorgehen	7
2.3.1	Bauliche Machbarkeitsüberprüfung der neuartigen kEWS	7
2.3.2	Nummerische Simulation	7
2.4	Die neuartige Koaxial-Erdwärmesonde	8
3	Stand der Arbeiten per Mitte April 2013.....	12
3.1	Studentenarbeiten.....	12
3.2	Patentlage	12
3.3	Versuchseinrichtung	12
3.4	Membran/Gewebe-Evaluation.....	13
3.4.1	Fazit	16
3.5	Nummerische Simulation.....	16
3.5.1	Analyse der Qualität der EWS von Gebäude B35	16
3.5.2	Validation des analytischen Modells in Erdwärmesonden-Simulationsprogramm <i>EWS</i>	20
3.5.3	kEWS Thermal Response Simulation mit Finite Elements and <i>EWS</i>	22
3.5.4	Untersuchung der Qualität der EWS von Haus Gisel.....	24
3.5.5	Fazit	26
4	KTI-Projekt.....	27
5	Ausblick	27
5.1	Probebohrung, Prototyp	27
5.2	Bauliche Machbarkeitsüberprüfung der neuartigen kEWS.....	27
5.2.1	Mantelrohr/Membran	27
5.2.2	Zentralrohr	27
5.2.3	Sondenkopf	28
5.2.4	Sondenfuss	28
5.2.5	Sondeneinbau.....	28
5.3	Nummerische Simulation.....	28

1 Ausgangslage

Das Bundesamt für Energie (BFE) hat mit der Professur für Gebäudetechnik der ETH Zürich einen Vertrag abgeschlossen mit dem die Leistungserbringung der ETH einerseits und die finanzielle Unterstützung durch das BFE andererseits geregelt wird. Ein erster Zwischenbericht wurde durch die ETH Mitte November 2012 eingereicht. Vor der Überweisung der zweiten Betragshälfte von CHF 28'000 ist durch die ETH ein weiterer Bericht im April 2013 einzureichen. Das vorliegende Dokument ist dieser zweite Bericht.

Forschungsvertrag	TP Nr.:	8100083
	Bestell Nr.:	810000100
	Vertrag Nr.:	SI/500755-01

2 Das Projekt

2.1 Motivation

Der Energieverbrauch eines Gebäudes ist stark von der Gebäudetechnik abhängig, welche selbst mit Energie versorgt werden muss. Dabei dominieren die Raumklimatisierung und die Warmwasserbereitung¹.

In den ersten Analysen zur Reduktion des Energiebedarfs wurde jedes System einzeln untersucht und hinsichtlich des Energieverbrauchs verbessert. Die Anlagen, welche die Haustechnik bildet, wurden von Ingenieuren immer effizienter entwickelt. Parallel wurde vom Anlagehersteller versucht der Energieverbrauch der einzelnen Komponente selbst zu reduzieren. Dieser getrennte Prozess dauert bis heute an, häufig gebremst durch die individuellen Komponentenkosten und ohne Abstimmung innerhalb des Systems. Generell gibt es eine Grenze, wie energieeffizient jede einzelne Komponente werden kann. Um in Zukunft eine weitere signifikante Reduktion des Energiebedarfs zu erzielen muss diese Beschränkung wegfallen. Es sind Systeme erforderlich, die das Engineering (Betrachtung Gesamtsystem) und das Design (Ausbildung einzelner Komponente) beinhalten. Es ist wichtig zu erkennen, dass nicht nur die Quantität der verwendeten Energie, sondern auch ihre Qualität sowie Potential in das Konzept der Exergie aufgenommen werden muss².

Die Professur für Gebäudetechnik BuSy an der ETH Zürich forscht seit mehr als 7 Jahren auf diesem Gebiet. Das Ergebnis ist das System Sol²ergie (siehe dazu www.solergie.org). Das Herzstück dieses Systems bildet eine Wärmepumpe (WP) mit einer grossen Effizienz

¹ Energy Efficiency in Buildings: Transforming the Market, World Business Council for Sustainable Development Publication.

² Meggers, Forrest – Exergy Analysis of Building Systems: Improved Exergetic Performance Through Systems Integration, PhD Thesis.

(COP>10). Um diesen hohen Wert zu erreichen sind der Gütegrad der WP, die Verdampfungs- und Kondensationstemperatur parallel zu optimieren. Die letzten beiden sind direkt von der Vorlauftemperatur der WP sowie der Heizungsanlage abhängig. Die Beziehung zwischen COP und Verdampfungs- sowie Kondensationstemperatur ist nicht linear. Je kleiner der Temperaturhub ist, desto grösser wird der COP. Das Problem war, dass bei der Mehrheit der auf dem Markt verfügbaren WP der Gütegrad abnimmt, je kleiner der Temperaturhub ausfällt und daher die Erhöhung des COP kompensiert.

Die Firma BS2 AG, ein Spin-Off der ETH, hat sich zusammen mit der Hochschule Luzern (HSLU) diesem Problem angenommen und vermelden einen Gütegrad gegenüber dem idealen COP von 0.6 für kleine Temperaturhübe (ca. 20K). Dies impliziert, dass die Vorlauftemperatur der WP so nah wie möglich an der Zieltemperatur sein muss. Aus exergetischer Sicht heisst dies, nahe der realen Nachfragetemperatur.

Im Idealfall sind drei infinite Energiequellen mit der folgenden Temperatur erforderlich: zum Kühlen 17°C, zum Heizen 30°C und für Warmwasserbereitung 45°C. Das Problem besteht darin, die richtige Quelle zu finden und entweder eine natürliche oder eine künstliche Regeneration zu realisieren. Häufig werden Quellen wie die Luft, Grundwasser, Seen oder Untergrund verwendet, allerdings mit einer riesigen Differenz zur gewünschten Vorlauftemperatur.

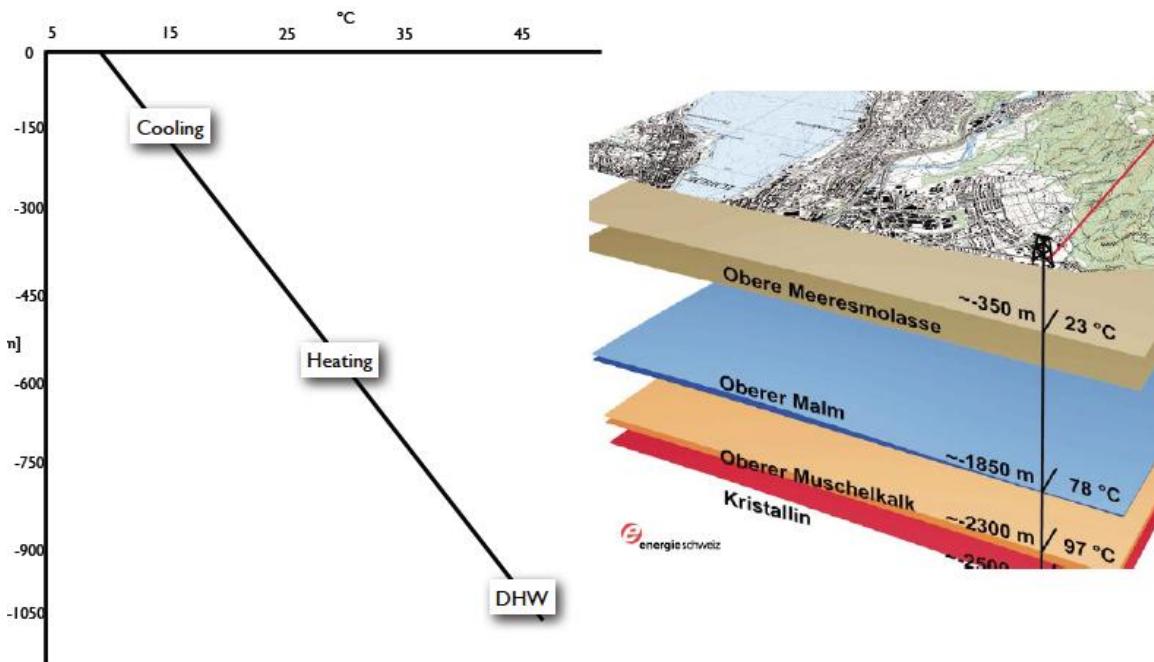


Abbildung 1: Temperaturverlauf im Erdreich unter Zürich in Abhängigkeit der Tiefe³.

Es scheint, dass für die Schweiz und an jedem anderen Ort mit kontinentalem Klima mit vier ausgeprägten Jahreszeiten die beste Quelle der Untergrund ist. Abbildung 1 zeigt das Temperaturprofil im Untergrund von Zürich und gibt an, wo die drei unterschiedlichen Quellen ent-

³ Quelle Bild: Kälin, W. (2008). Auf dem Weg zur Erdwärmennutzung, Zeitschrift der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie SVG 45: 16-18.

sprechend ihrer Temperatur zu finden sind. Das Problem besteht darin, wie die Wärme zu extrahieren.

Die Erdwärmesonde (EWS) stellt eine von vielen Möglichkeiten dar, diese Wärmequelle zu nutzen. Die heute weit verbreite Bauart der EWS besteht aus zwei Rohren (meist gefertigt aus PE), welche typischerweise an der tiefsten Stelle (200 bis 300m) schlaufenähnlich miteinander verbunden sind. Namensgebend ist die typische U-Form. Zum Heizen wird dem einen Rohr das kalte Trägermedium zugeführt, welches anschliessend im Rohr nach unten zum Sondenfuss und über das zweite Rohr wieder zurück fliesst. Auf dem Weg nach unten nimmt das Trägermedium Energie in Form von Wärme vom wärmeren Erdreich auf. Über das rückführende Rohr gelangt die Wärme an die Oberfläche, wo sie eine Wärmepumpe speist.

Häufig werden pro Bohrloch zwei U-Rohre verlegt. Entsprechend wird zwischen einfachen und doppelten U-Sonden unterschieden, wobei die letztere Variante zwei einfachen U-Rohren entspricht.

Nach dem Einbringen der U-Rohre wird heute das Bohrloch hinterfüllt, das heisst, der Ringspalt zwischen Sonde und Bohrloch wird mit einem Zement-Bentonit-Gemisch aufgefüllt. Der Markt bietet unterdessen einen speziellen, wärmeleitfähigen Beton.

Hat das Trägermedium eine zu tiefe Temperatur bei der Einspeisung der Wärmepumpe, besteht die Gefahr, dass die Wärmepumpe dem Trägermedium so viel Temperatur abnimmt, dass die Temperatur des Trägermediums nach der Wärmeabgabe unter 0°C fällt. Aus diesem Grund besteht das Trägermedium häufig aus Wasser und einer Zugabe von Glykol, welches als Frostschutzmittel fungiert und so sicherstellt, dass die Trägerflüssigkeit nicht gefriert.

Bedingt durch die Konstruktion des U-Rohrs liegen die beiden Rohre der Sonde sehr nahe nebeneinander und beim rückführenden Rohr wird ein Teil der Wärme wieder an das kältere Erdreich sowie an das ebenfalls kältere zuführende Rohr abgegeben (Verschmierung). Die gewonnene Wärme aus der Tiefe verbleibt teilweise im System und kann nicht vollständig und wirkungsvoll genutzt werden.

Weiter wird die Tiefe durch den Druckverlust und somit durch die aufzubringende Pumpleistung der EWS begrenzt. Der zu überwindende Druckverlust ist systembedingt und wächst linear zur Rohrlänge an. Durch eine Vergrösserung der Durchflussfläche kann unter anderem dem Verlust entgegengewirkt werden.

Die Temperatur im Erdreich nimmt mit steigender Tiefe stetig zu (3K pro 100m). Mit einer grösseren Tiefe kann eine höhere Temperatur des Trägermittels in der Sonde erreicht werden, was zu einer höheren Einspeiseterminatur der Wärmepumpe führt.

Mit der erhöhten Tiefe muss das System entsprechend adaptiert werden, damit die gewonnene Wärme möglichst ohne Verluste und in ihrer Qualität genutzt werden kann. Mit den U-Sonden ist dies nur eingeschränkt möglich (Verschmierung).

2.2 Forschungsziel

2.2.1 Hintergrund

Im Mai 2012 wurde durch die Firma Broder AG ein Patentantrag an das Bundesamt für Geistes Eigentum eingereicht, in dem die neue Idee ausführlich beschrieben ist. Das Ziel ist es, dank der neuen Konstruktion der Erdwärmesonde einen wesentlich besseren saisonalen Wärmespeicher bauen zu können, als es bisher möglich war. Mehrere technische Probleme müssen gelöst werden. Das entscheidende Element der Idee ist die elastische und permeable Membran, mit der das Bohrloch vor Einsturz gesichert und der hydraulische Kurzschluss zwischen unterschiedlichen wasserführenden Schichten verhindert werden soll. Die neue Konstruktion wird in Zusammenarbeit mit Schweizer Firmen entwickelt. Neben der Broder AG aus Sargans SG, welche das Projekt seit Beginn begleitet, wurde mit HakaGerodur AG aus Gossau SG ebenfalls eine Zusammenarbeit vereinbart. Zeitgleich mit diesem Bericht wird beim Eidgenössischen Volkswirtschaftsdepartement (EVD) ein KTI-Beitragsgesuch eingereicht. Der vorliegende Bericht wird dem Antrag ebenfalls angehängt.

2.2.2 Hypothese

Die zentrale Hypothese hinter diesem Forschungsvorhaben ist eine tiefere und bessere EWS mit besseren thermischen Eigenschaften und vergrösserter Wärmeaustauschfläche, welche den Exergiebedarf der Wärmepumpe sowie der Pumpe der EWS vermindert. Zusätzlich soll die EWS die Abwärme zur Regeneration der Quelle verwenden. Dies hat mit ungefähr der gleichen Temperatur wie bei der Entnahme zu erfolgen.

2.2.3 Hauptziel

Entwicklung und Beurteilung der Leistung einer neuartigen 500m langen Koaxial-Erdwärmesonde (kEWS) mit isoliertem Innenrohr zur Speisung einer Wärmepumpe.

2.2.4 Meilensteine

- Analyse der baulichen Machbarkeit der kEWS.
- Evaluation der Leistung der neuartigen Koaxial-Erdwärmesonde (kEWS).
- Validierung der Simulationsmodelle der kEWS mit experimentellen Daten.
- Wirtschaftliche Optimierung der kEWS.

2.3 Vorgehen

Die Prozesse um die gesteckten Ziele zu erreichen beinhalten experimentelles Arbeiten, insbesondere im Hinblick auf die bauliche Machbarkeit. Begleitet wird dies von einer numerischen Simulation. Eine Überprüfung der heutigen analytischen Modellen soll feststellen, welches Modell für die weitere Arbeit verwendet werden kann oder ob ein neues entwickelt werden muss. Schlussendlich wird die Konstruktion der neuartigen kEWS die Leistung massgeblich bestimmen.

2.3.1 Bauliche Machbarkeitsüberprüfung der neuartigen kEWS

Die Bauform der kEWS besteht aus vier Elementen: das umgebende äussere Rohr (Mantelrohr), das Zentralrohr, der Sondenfuss und -kopf. Weiter muss der Einbau untersucht werden. Sie alle bieten verschiedene technische Herausforderungen, die optimal gelöst werden müssen.

2.3.2 Nummerische Simulation

- Analyse der Qualität der EWS von Gebäude B35

Bei einer EWS ist die Wärmeübertragung vom Fluid zum Untergrund oder umgekehrt beeinflusst durch den Wärmewiderstand zwischen dem Fluid und der Oberfläche der EWS.

Vom Gebäude B35 stehen Daten von über einem Jahr Betriebszeit zur Verfügung. Diese Daten sollen verwendet werden um ein Bewertungstool von EWS zu entwickeln.

- Validation des analytischen Modells in Erdwärmesonden-Simulationsprogramm *EWS*

EWS ist eine bewährte Erdwärmesonden-Simulationsprogramm, welche die Lösungen analytisch errechnet. Der jährliche Wärmeentzug aus dem B35 soll das im *EWS* erstellte Modell validieren, indem die neuen Resultate mit den gemessenen verglichen werden.

- kEWS Thermal Response Simulation mit Finite Elements and *EWS*

Eine erste Version der neuartigen kEWS soll mit *COMSOL Multiphysics* und *EWS-Programm* modelliert werden. Der thermal response Test wird mit konstanter Eintrittstemperatur und konstantem Massenstrom durchgeführt. Abschliessend werden die Ergebnisse beider Modelle verglichen.

- Untersuchung der Qualität der EWS von Haus Gisel

Das Objekt Haus Gisel verfügt über eine tiefe kEWS. Die Leistung wird mit dem gleichen Bewertungstool wie bei B35 untersucht und die beiden EWS werden einander übergestellt.

- Simulation und Modell der kEWS Haus Gisel

Der aufgezeichnete Wärmeentzug (1 Monat) wird dynamisch mit beiden Softwares, *COMSOL* und *EWS*, untersucht.

2.4 Die neuartige Koaxial-Erdwärmesonde

Die koaxiale Bauweise unterscheidet sich deutlich von der U-Rohr-Sonde. Ein äusseres Rohr umgibt ein kleineres Innenrohr, welches isoliert ist. Durch die Isolation ist der Rücklauf thermisch vom Vorlauf getrennt. Dies steigert die energetische Qualität des verwertbaren Wärmestroms und bei einem Verzicht auf die Hinterfüllung nimmt der Nettoquerschnitt ebenfalls zu (vgl. Abbildung 2 bis Abbildung 4).

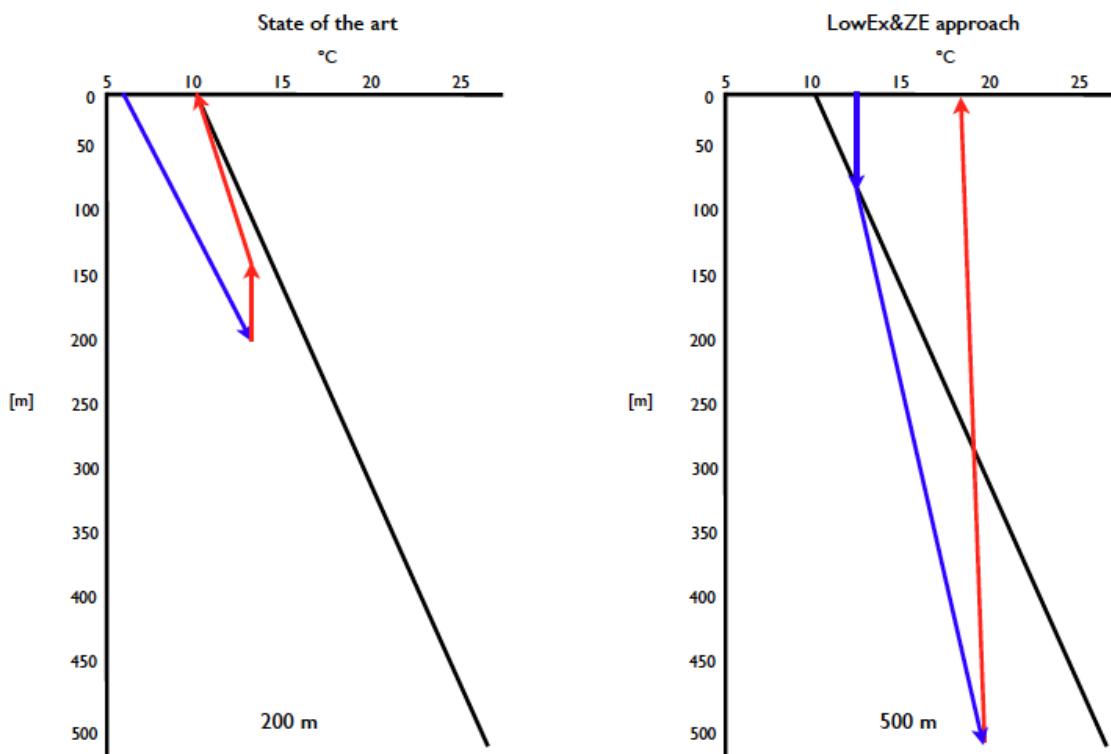


Abbildung 2: Herkömmliche EWS im Vergleich mit der neuartigen kEWS.

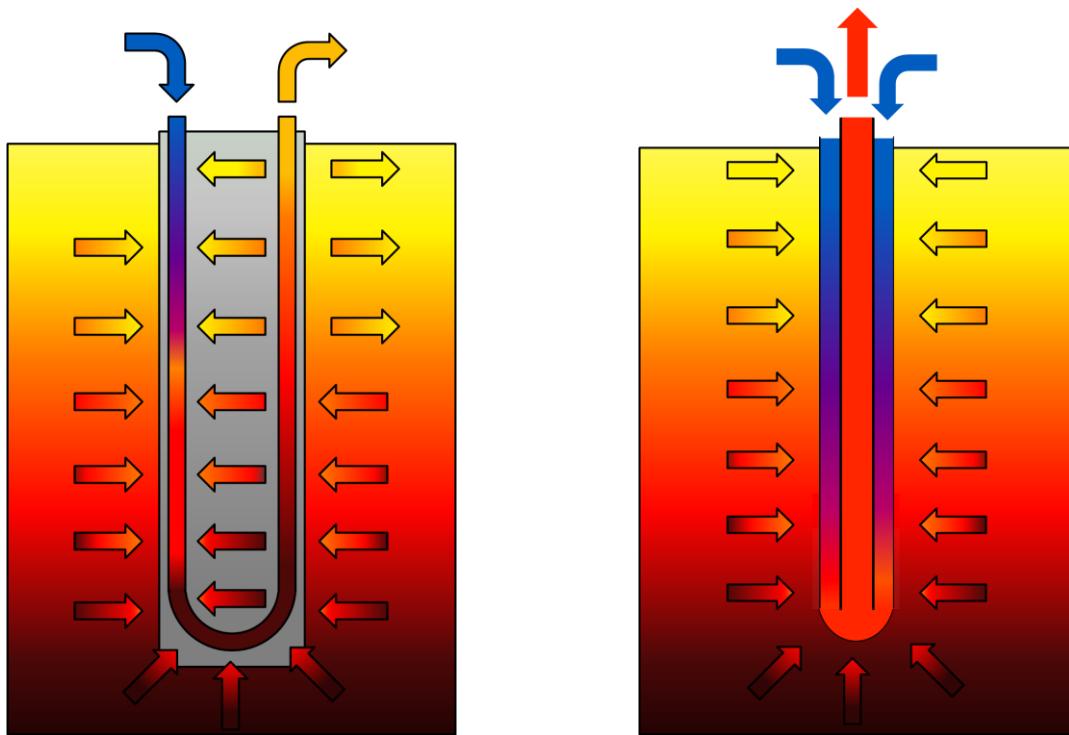


Abbildung 3: Aufnahme und Abgabe der Wärme bei herkömmlichen U-Rohren mit Hinterfüllung (links) und Koaxial-Rohr ohne Hinterfüllung.

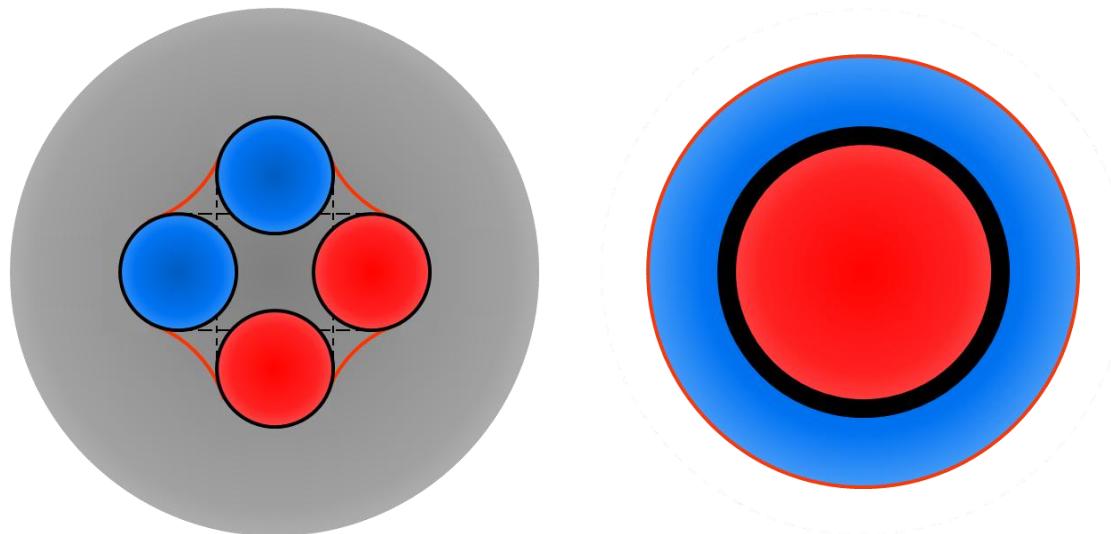


Abbildung 4: Vergleich der Querschnitte einer herkömmlichen Doppel-U-Rohr-Erdwärmesonde mit der neuartigen Koaxial-Erdwärmesonde mit isoliertem Innenrohr ohne Hinterfüllung.

Dieser Sachverhalt ist allgemein in der Branche bekannt und verschiedene Unternehmen haben stets versucht eine Lösung zu entwickeln. Allerdings konnte sich bis anhin kein System durchsetzen (z.B. Amasond von der gleichnamigen Firma aus Vorarlberg, Österreich) oder aber die angebotenen Produkte sind in ihrer Länge stark begrenzt (GEROtherm Koax von HakaGerodur). Dass bisher keine Lösung gefunden werden konnte, liegt an den Anforderungen an die kEWS. Bei einer Tiefe von 500m und ohne Grundwasservorkommen beträgt der Druck in der Sonde 50bar. Der gleiche Druck herrscht beim Einbringen der Sonde im Grundwasser, da sie mit Wasser gefüllt wird um den Auftrieb zu reduzieren. Die Wand der EWS muss in diesem System entsprechend ausgebildet sein, was die Herstellungskosten vervielfacht. Zusätzlich muss die Sonde einfach und preisgünstig von der Produktion zur Baustelle transportiert werden können. Ein Rohr mit der obengenannten Anforderung an den Wandaufbau weist einen grossen Wickelradius auf.

Die Kernpunkte der Innovation, welche über ein Patent geschützt wurde (Patentinhaber Broder AG, siehe Kapitel 3.2), betreffen einerseits die Einbindung der Bohrlochwandung ins System und anderseits die druckabhängige Undichtheit der Sonde. Durch die Integration der Bohrlochwandung kann auf ein stabiles, festes Sondenrohr verzichtet werden. Die Aussenhülle der neuartigen kEWS sorgt zusammen mit dem anstehenden Fels für die erforderliche Stabilität. Die Wand der EWS steht im direkten Kontakt mit der Wandung der Bohrung. Zusätzlich fällt dadurch die Hinterfüllung weg.

Das äussere Rohr der neuartigen kEWS besteht aus einer schlauchähnlichen, dünnwandigen Membran, welche im Betrieb direkt auf der Felswandung aufliegt.

Die Bohrlochwand weist als durchörterter Fels eine gewisse Rauheit auf. Die Membran soll die kleineren Kavitäten ausfüllen, was den besten Wärmetransfer ergibt. Die grösseren Kavitäten werden hingegen überspannt. Damit das Material vor dem Versagen geschützt ist, ist die Aussenhülle druckabhängig permeabel ausgebildet. Bis zu einer gewissen Druckdifferenz zwischen innen und aussen bleibt das Material wasserundurchlässig. Anschliessend lässt das Material Wasser parieren und die Kavität füllt sich langsam bis zum Druckausgleich. Auf diese Weise wird das Material nicht weiter beansprucht. Die Abbildung 5 zeigt diesen Prozess auf.

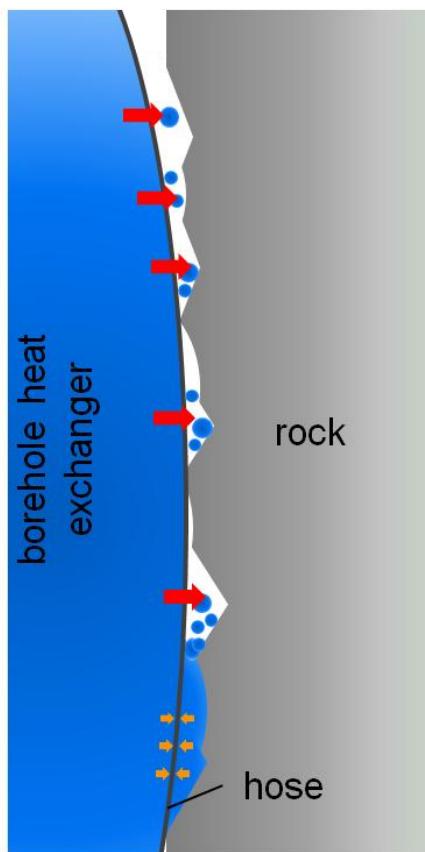


Abbildung 5: Druckabhängig permeable Membran

Wahrscheinlich handelt es sich bei der Aussenhülle um ein schlauchähnliches Kompositmaterial, welches aus Kunststoff, technisches Gewebe und eventuell einem Metall zusammensetzt.

3 Stand der Arbeiten per Mitte April 2013

3.1 Studentenarbeiten

In der Masterarbeit von Michael Schiess, MSc ETH Bau-Ing., abgegeben Anfang Juli 2012, werden theoretisch die Eigenschaften der neuen Konstruktion ausgewiesen. „Untersuchungen an einer neuartigen Koaxial-Erdwärmesonde mit einer Tiefe von 450 m“. In einem ersten einfachen Versuch wurden erste Konstruktionsideen für die Membran getestet.

In der Masterarbeit, abgegeben Mitte September 2012, „Analyse der exergetisch optimierten Auslegung der ZeroEmission-LowEx Systeme und der Regeneration des Erdreichs“ zeigt Lester Ullmann, MSc ETH Energy Science and Technology, die exergetischen Nachteile der tiefen U-Rohrsonde auf.

Georg Putzi, MSc ETH Energy Science and Technology, hat in seiner Masterarbeit (Abgabe Mitte April 2013) „Numerical Simulation of a novel Coaxial Borehole Heat Exchanger with COMSOL Multiphysics“ die thermische Leistung der neuartigen Koaxial-Erdwärmesonde mit CFD simuliert. Das Modell gibt die gemessenen Daten gut wieder. Im Anhang ist ein Auszug der Arbeit eingefügt.

3.2 Patentlage

Die bisherigen Antworten des Patentamtes zeigten, dass die Idee neuartig ist und mit grosser Wahrscheinlichkeit patentrechtlich geschützt werden kann. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die Kommerzialisierung der Idee. Das Patent gehört der Broder AG in Sargans.

3.3 Versuchseinrichtung

Am 1. September 2012 nahm Michael Schiess seine Tätigkeit am Lehrstuhl für Gebäudetechnik auf mit dem Ziel, bis Ende März 2012 das KTI-Projekt eingereicht und erste Versuche abgeschlossen zu haben. Die Versuchseinrichtung wurde am 30. Oktober 2012 funktional erstmals getestet und die Tauglichkeit nachgewiesen. Es konnten bereits zahlreiche Membranproben analysiert werden.

Das Versuchsrohr wurde laufend verbessert und weiterentwickelt. So konnte der Anschluss sowie die Innendichtungen und der Aufbau (Kavität) weiter optimiert werden.

Der Bau einer längeren, 2m langen Versuchseinrichtung wurde vorerst verschoben.

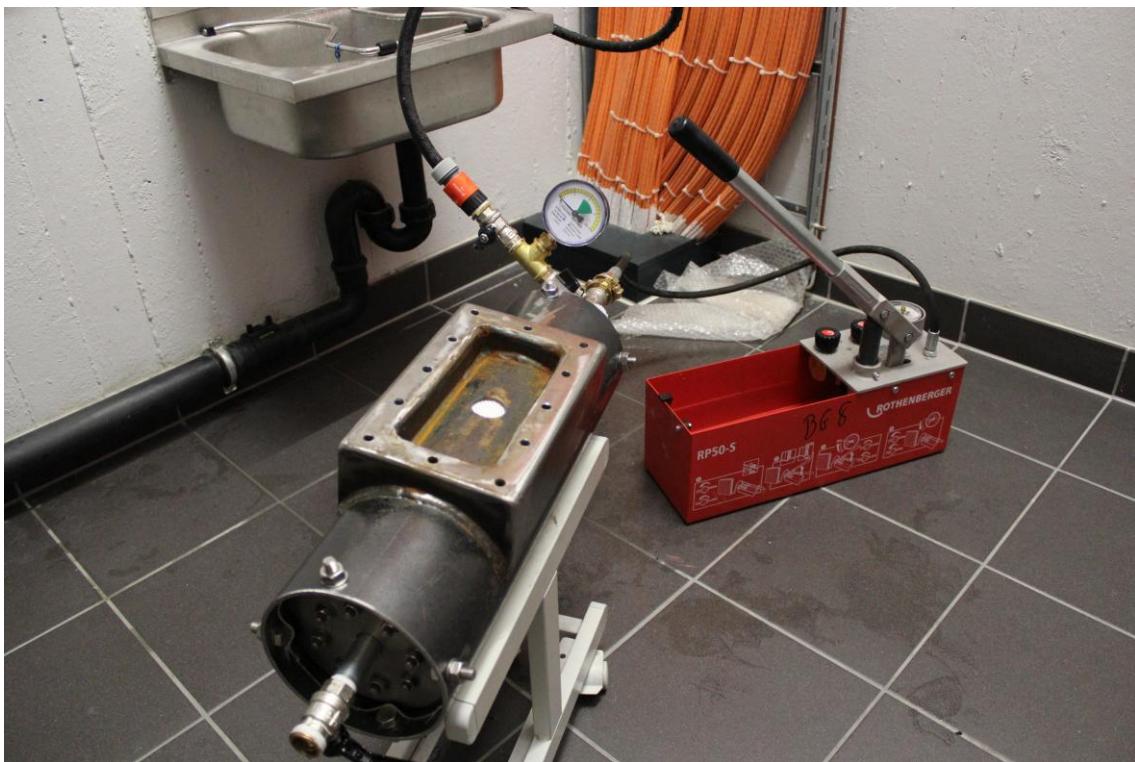


Abbildung 6: Versaufbau mit Versuchsröhre L=0.5m

3.4 Membran/Gewebe-Evaluation

Auf Einladung der ETH fanden sich am 19. Oktober Vertreter von mehreren Herstellerfirmen technischer Gewebe zu einer Projektbesprechung ein. Zusätzlich wurden Gespräche mit Membranhersteller (Filtertechnik) und Folienverarbeiter und Schlauchweber geführt. Im November bis Januar konnten Produkte der Firmen Guba Tex AG, Meyer-Mayor AG, TTS Inova AG, Swisstulle auf der Versuchsanlage getestet werden. Hierbei handelte es sich um Gewebe aus der herkömmlichen Produktion sowie um speziell angefertigte Proben. Die Bandbreite der eingesetzten Materialien sowie deren Eigenschaften sind sehr breit.

Zusätzlich wurde an der Professur weiteres Materialien analysiert. Hierbei wurde auf eine breite Produktvielfalt geachtet. Die Proben reichten von einer 1.5mm starker Gummi-Membran bis zu Gewebeschläuchen aus Polyester-Garn und Beschichtungen mit Kontaktgummierung. Sämtliche Materialien waren handelsübliche Produkte, die als Meterware innerhalb kurzer Frist erhältlich sind.

Die Versuche mit den technischen Textilien alleine zeigten, dass die gewünschte Dichtigkeit nicht erbracht werden konnte. Hingegen reicht die Festigkeit aus und auf eine weitere Verstärkung wie ein allfälliges Metallgitter kann verzichtet werden. Dies war anfangs vorgesehen um für eine zusätzliche Stabilisierung mittels lokaler Reckung zu sorgen.

Weiter zeigte sich, dass die Gummimembran zwar die Dichtigkeit erfüllt, jedoch nicht genügend

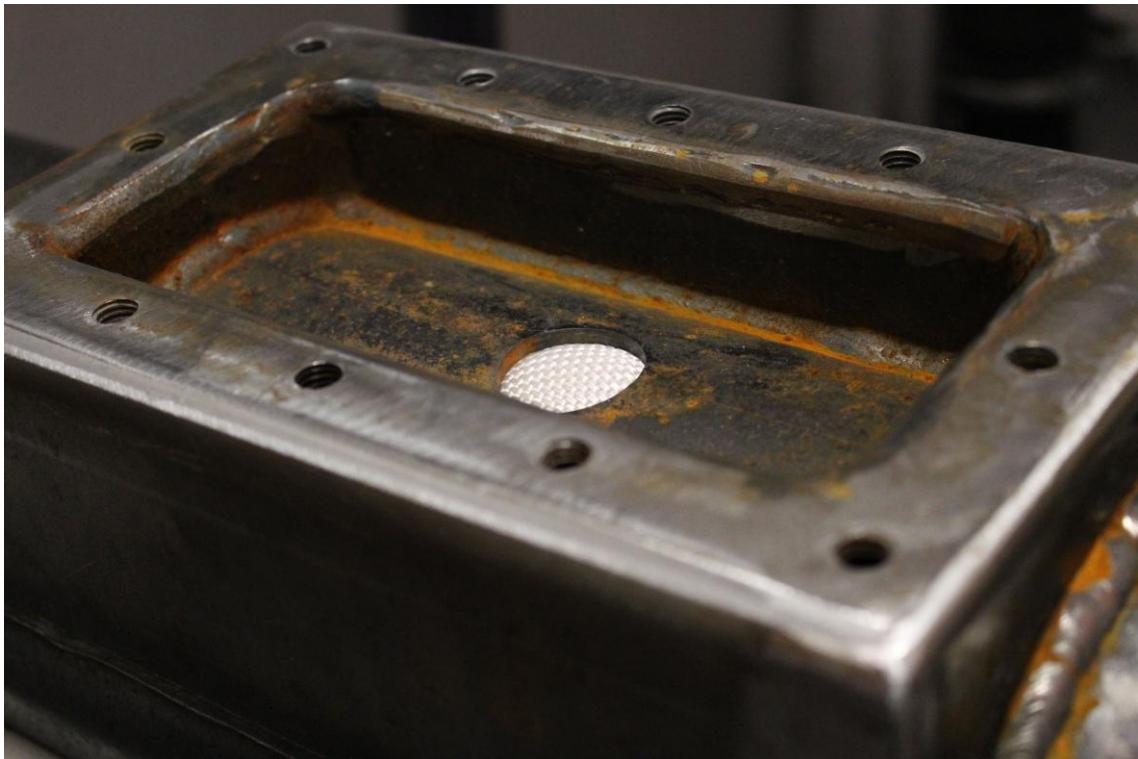


Abbildung 7: Gewebeschlauch in der Versuchsanlage bei 3bar Innendruck

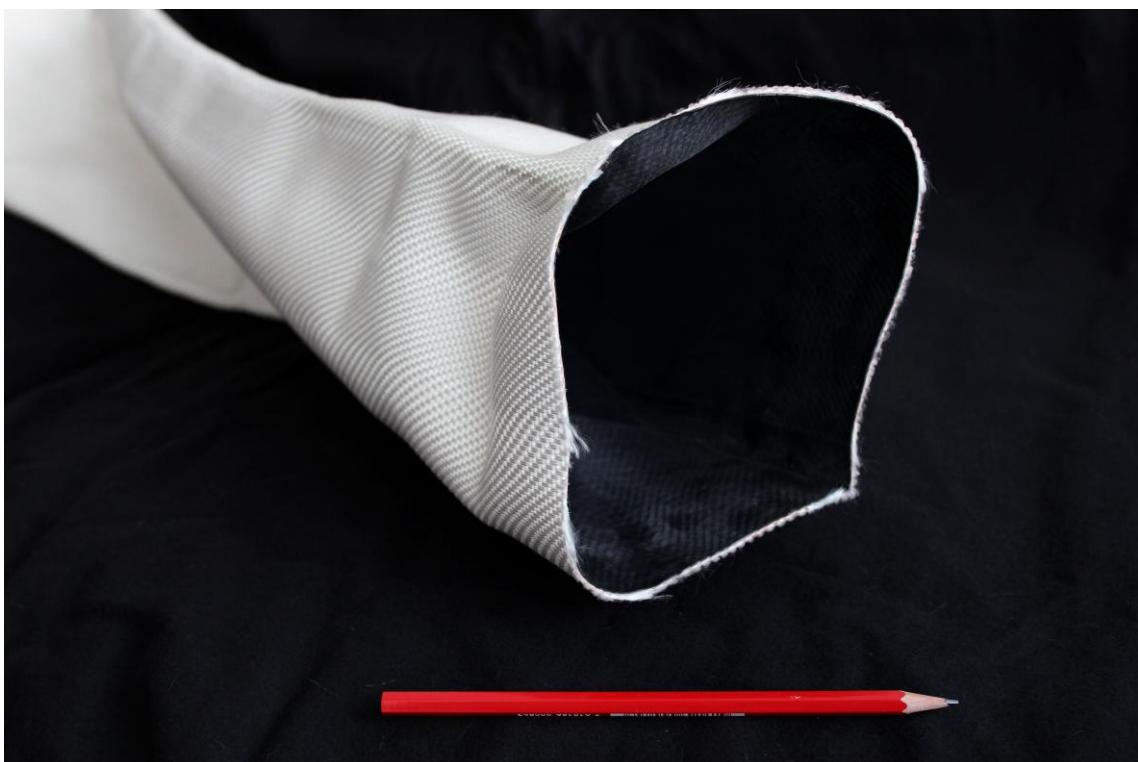


Abbildung 8: Gewebeschlauch

fest ist und bei entsprechendem Druck reist. Allerdings konnte mit der Kombination von Gewebe und Membran die gewünschte Dichtigkeit inklusive der entsprechenden Festigkeit erreicht werden (Abbildung 7).

Ein Kompositmaterial aus Gewebe und Beschichtung erfüllt bereits die gestellten Anforderungen an Dichtigkeit und Festigkeit. Auf dem Markt wird ein entsprechendes Produkt angeboten. Sie zeichnen sich durch ein Gewebe mit innenliegender Beschichtung aus. Versuche mit verschiedenen handelsüblichen Schläuchen zeigten, dass mit einer Perforation eine gewünschte Leckage erzeugt werden kann (Abbildung 9).



Abbildung 9: Perforiert Schlauch (drei Einstiche innerhalb des Kreises)

In weiterführenden Versuchen wurden die Verformungen bei steigendem Innendruck analysiert. Das Material weist ein lineares Verformungsverhalten in Längs- sowie in Radialrichtung auf. Vor allem die Verformung in radialer Richtung ist von grosser Bedeutung. Mit dem Anschmiegen des Schlauchs an die Bohrlochwandung wird der Kontakt für den Wärmetransfer sichergestellt. Weiter kann dadurch der horizontale Wassertransport an der Bohrlochwandung unterbunden werden.

In Zusammenarbeit mit einer Textilweberei wurden mehrere beschichtete Gewebe bestellt. Die Beschichtung liegt entgegen der bisherigen Versuchspräparate aussen. Aufgrund der Herstellung ist eine innenliegende Gummierung in der Länge und Durchmesser begrenzt und kostenintensiver als eine aussenliegende Beschichtung. Durch die erstaunlich geringe Materialstärke grenzen sie sich weiter von den herkömmlichen Produkten ab. Die ersten Proben mit einer gewissen Bandbreite an Spezifikationen werden nächsten Monat erwartet.

3.4.1 Fazit

Mit den durchgeföhrten Analysen und Versuchen konnte ein Material für die Aussenwand der neuartigen kEWS gefunden werden. Es erfüllt die gestellten Anforderungen. Das Material existiert bereits und ist als Meterware erhältlich.

Diese Gewebeschläuche sind allerdings noch an den neuen Einsatzbereich zu adaptieren und zu optimieren.

Die sehr dünnen, beschichteten Gewebeproben sollen ebenfalls genauer analysiert und auf der Versuchsanlage getestet werden.

Die im Patent formulierte Idee der Leckage konnte ebenfalls mit den handelsüblichen Produkten umgesetzt werden und funktioniert. Wie die Leckage ausgebildet wird und wie gross sie sein wird, muss noch untersucht werden.

3.5 Nummerische Simulation

3.5.1 Analyse der Qualität der EWS von Gebäude B35

Die EWS des Gebäudes B35 ist eine Doppel-U-Sonde (Durchmesser 40mm) mit je einer unterschiedlicher Länge. Ein U-Rohr reicht bis auf eine Tiefe von 150m, die zweite auf 380m, wovon die ersten 150m isoliert ausgebildet wurden (siehe Abbildung 10).

Die Funktionsweise des Gebäudes steht in Beziehung mit den zwei Wärmelastungen: Heizen und Kühlen. Abbildung 11 zeigt neben der Kühl- und Wärmeleistung während des Jahres 2012 auch die Wärmemenge, welche dem Erdspeicher entzogenen und eingespeist wurde.

Es gilt zu beachten, dass die Daten von ungefähr drei Wochen (Mitte Januar bis erste Woche Februar) fehlen.

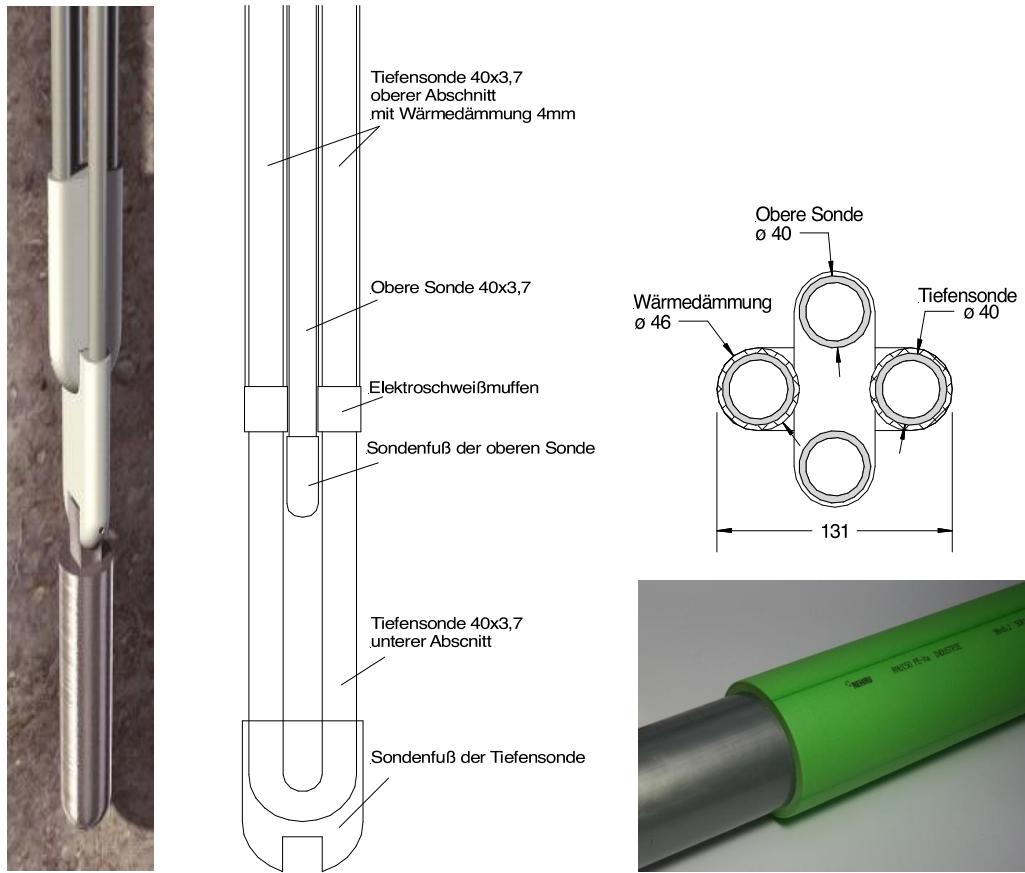


Abbildung 10: Aufbau der EWS von B35



Abbildung 11: Leistungsprofil von B35

Ein LowEx-Gebäude wie das B35 stellt sicher, dass die Zieltemperatur der WP an die Nachfrage-temperatur angepasst wird. Abbildung 12 zeigt das Temperaturprofil für das Warmwasserbereitstellung, Fussbodenheizung, Erdspeicher und Umgebungstemperatur und wiedergibt ebenfalls die hohe Komplexität der Leistungsanalyse des Systems.

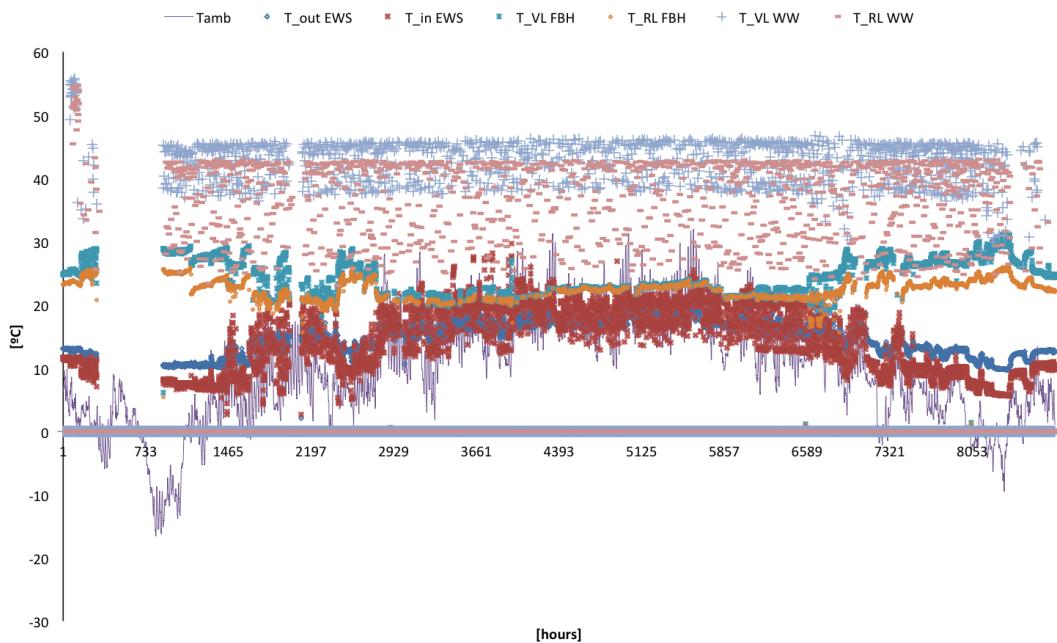


Abbildung 12: Temperaturprofile von Warmwasser, Heizung, EWS von B35

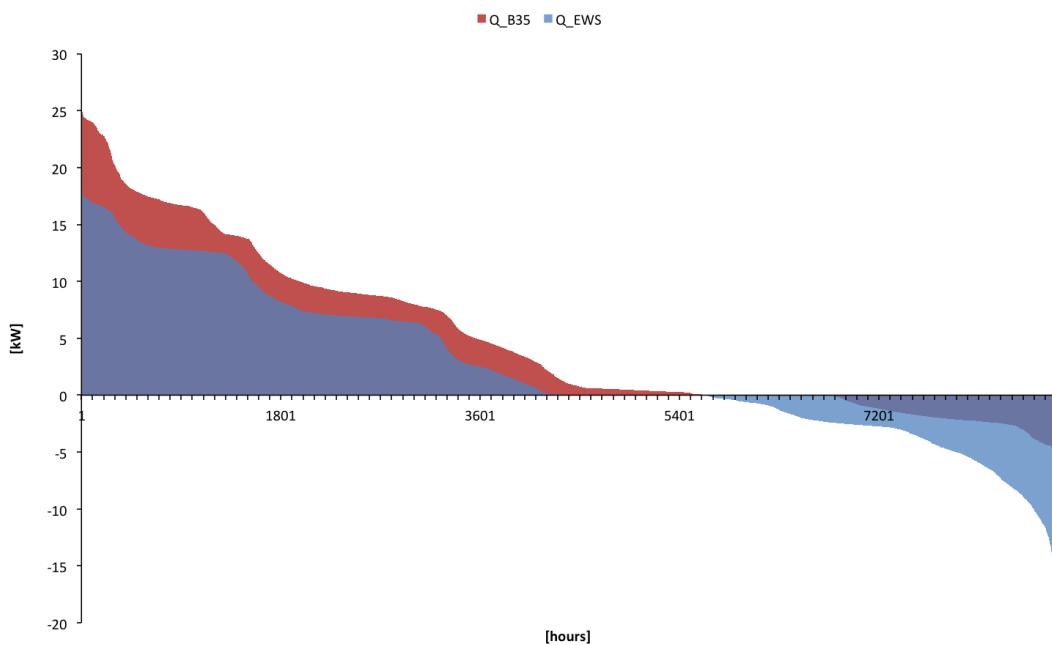


Abbildung 13: Vollaststunden B35

Bereits durch die Organisation der Lastprofile kann eine Schlussfolgerung gezogen werden. Abbildung 13 zeigt die durchschnittliche Differenz von 3kW zwischen Nachfrage und der extrahierten Wärme. Ebenfalls ersichtlich ist, dass nur mit „free cooling“ die Regeneration des Erdreichs nicht ausreichend ist. Im B35 wird die Abwärme von Hybridkollektoren dafür genutzt. Aufgrund der Komplexität von B35 können die EWS gleichzeitig für mehrere Aufgaben arbeiten. Vereinfachend wurde die Eintritts- und Austrittstemperatur jeder EWS mit der entzogenen bzw. eingespeisten Wärmemenge gewichtet, siehe Abbildung 14.

Aus den obigen Erfahrungen ist die Untersuchung der Vollaststunden das vielversprechendste EWS Beurteilungstool. Vier Parameter sind dabei von Interesse: der Wärmeentzug pro Meter EWS, die entsprechenden Einspeise- und Zieltemperatur sowie der Druckverlust.

Abbildung 15 ist das vorläufige grafische und dynamische EWS Beurteilungstool. Mit der Grafik kann auf mehrere Elemente hingewiesen werden. Der Druckverlust ist nicht enthalten, dafür die Umgebungstemperatur. Für den Fall, dass die WP das Kältemittel bei entsprechender Aussen-temperatur verdampft, zeigt die Abbildung, dass die Temperatur der WP von B35 höher ist als die Umgebungstemperatur, bei einer Entzugsrate von 10W/m. Der maximale Temperaturhub beträgt 20K.

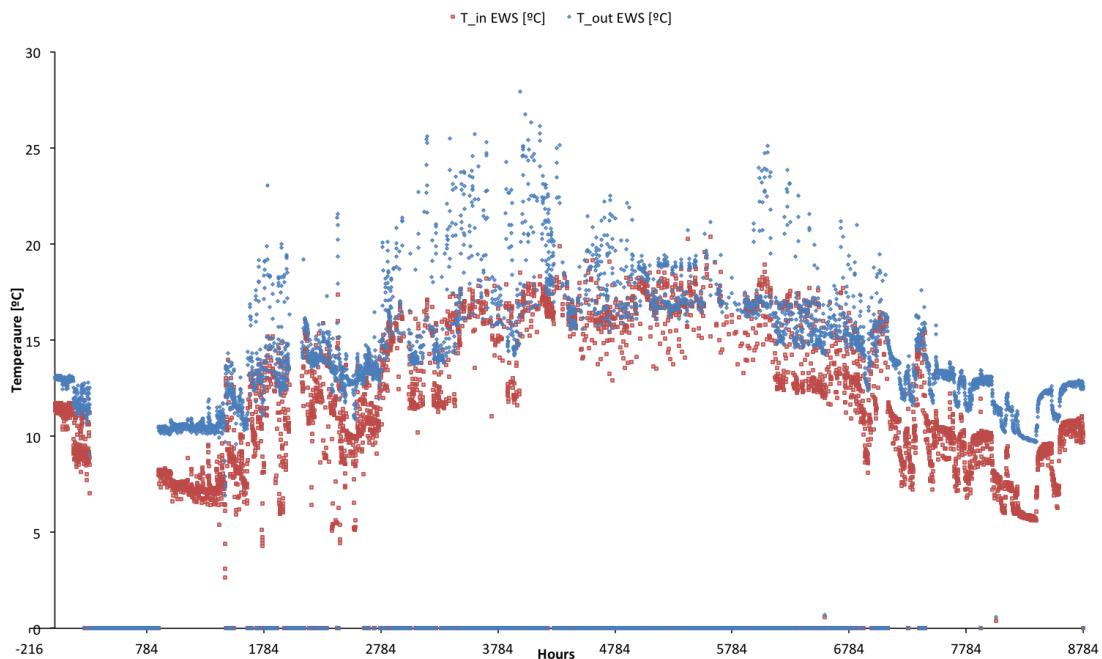


Abbildung 14: Eintritts- und Austrittstemperatur EWS B35 im Jahr 2012

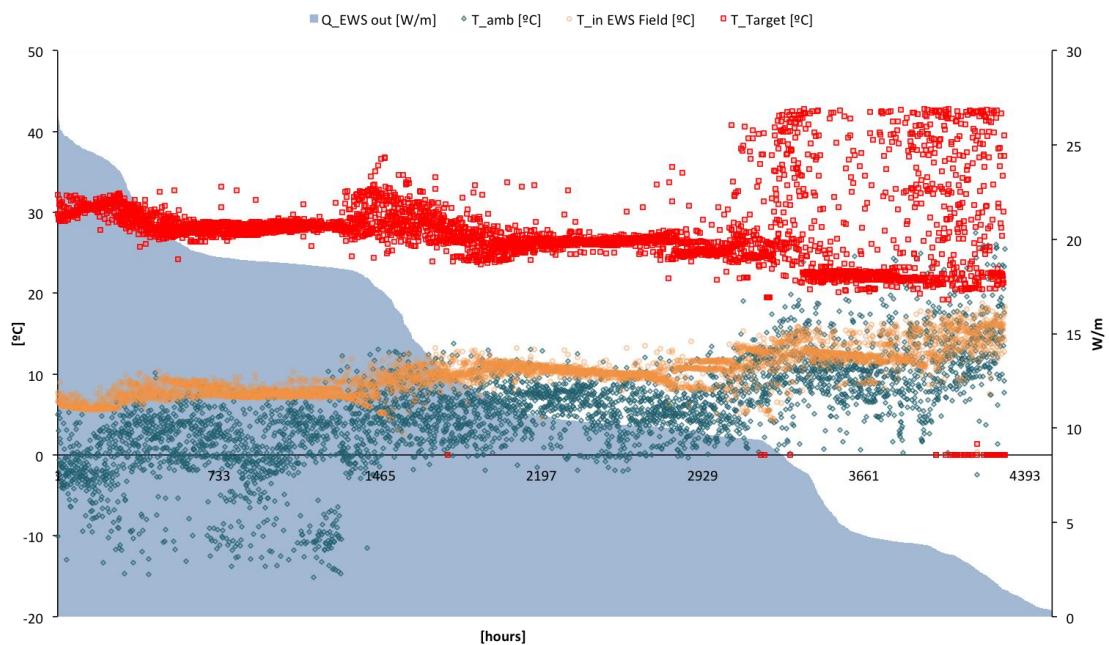


Abbildung 15: B35: EWS Volllast Wärmeentzug pro Meter

3.5.2 Validation des analytischen Modells in Erdwärmesonden-Simulationsprogramm *EWS*

Analytische Tools, wie die *EWS*-Software, sind in den letzten Jahren zu Dimensionierungszwecken für herkömmliche EWS verwendet worden. Die vollständige Regeneration fehlt und dadurch wird die Tiefe der EWS minimalisiert um den Boden nicht übermäßig zu entladen und den Betrieb von über 50 Jahren bei abnehmender Leistung zu ermöglichen.

Die Dynamik und Aufbau einer LowEx-EWS entspricht nicht dem Standardfall. Daher muss die Genauigkeit der analytischen Lösung validiert werden. Speziell bei erhöhter Länge sowie Wärmetauschefläche nimmt die Kapazität der EWS zu, wodurch der Einschwingeffekt ebenfalls ansteigt. Die analytische Lösung nimmt entweder ein „fully develop fluid“ oder „steady state“ Zustand im Innern der EWS an.

Abbildungen Abbildung 16 und Abbildung 17 folgen der Idee des grafischen EWS-Beurteilungstools. Die mit *EWS* berechneten Vor- und Rücklauftemperaturen im Heiz- und Kühlfall entsprechen den gemessenen. Die Resultate lassen den Schluss zu, dass es möglich ist mit *EWS* eine LowEx-EWS ähnlich wie im B35 zu simulieren.

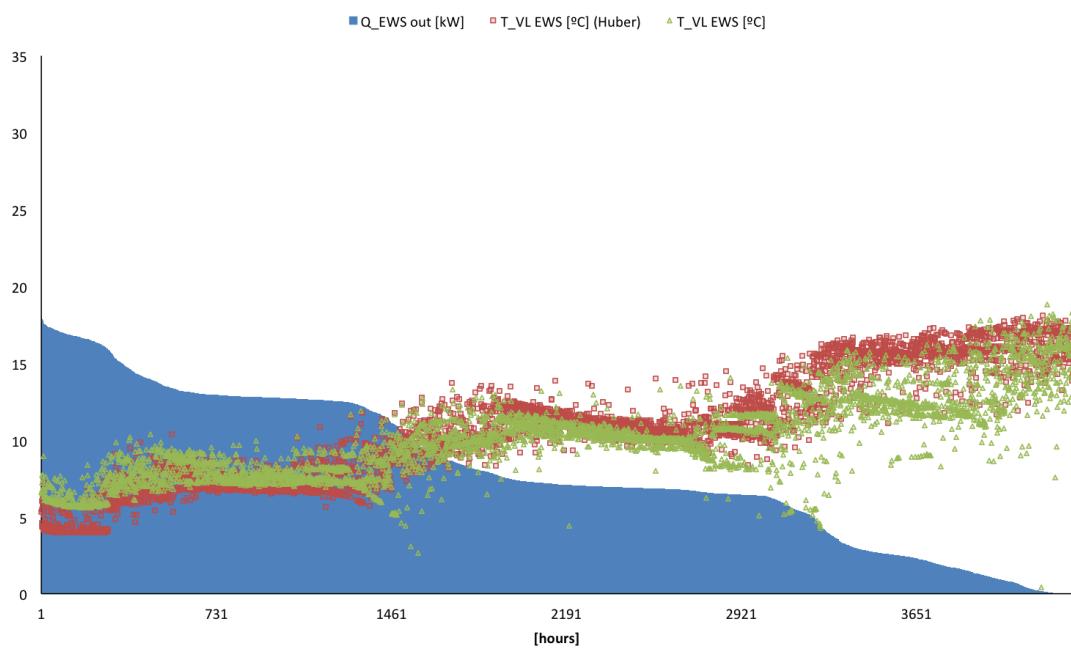


Abbildung 16: Vollast Heizstunden verglichen mit den empirischen Resultaten von *EWS*

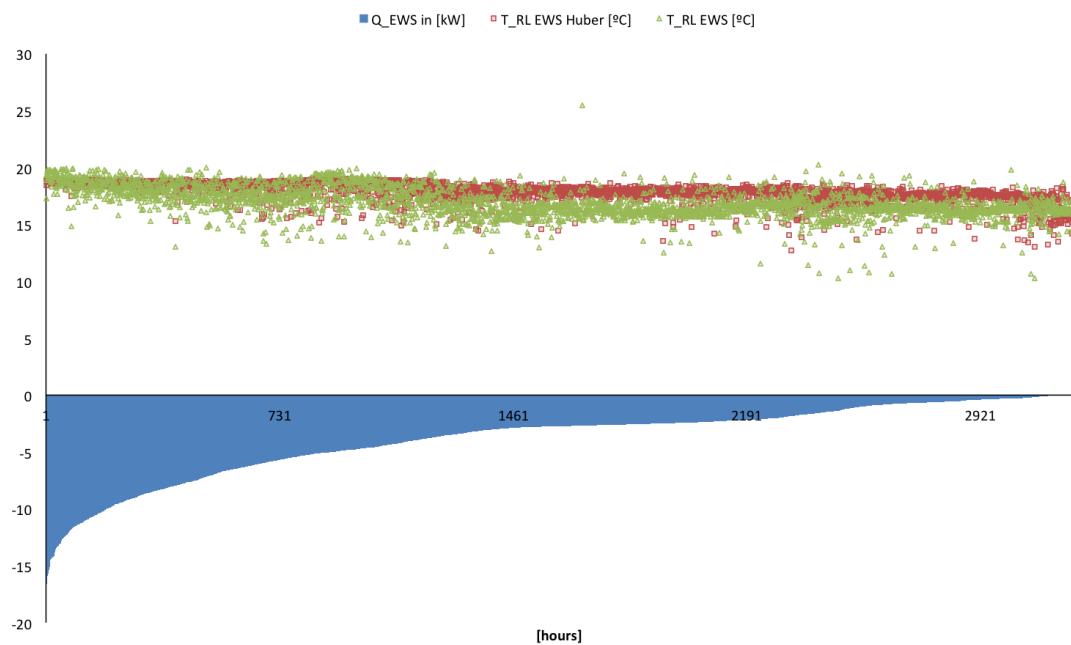


Abbildung 17: Vollast K  hlstunden verglichen mit den empirischen Resultaten von *EWS*

3.5.3 kEWS Thermal Response Simulation mit Finite Elements and *EWS*

Ein weiterer Meilenstein war, die neuartige kEWS mit Finiten Elementen oder CFD zu modellieren. Die gewählte Software war *COMSOL Multiphysics*, vor allem weil es bereits an der KTH Stockholm, Schweden für eine kEWS verwendet wurde. In dieser Vorstufe wurde ein einfacher thermal response Test durchgeführt. Das Ziel dahinter war, die Ergebnisse von *COMSOL* und *EWS* zu vergleichen. Weil bei einem thermal response Test die Kapazität der EWS keine Bedeutung hat, war dies eine erste mögliche Validation von *EWS*.

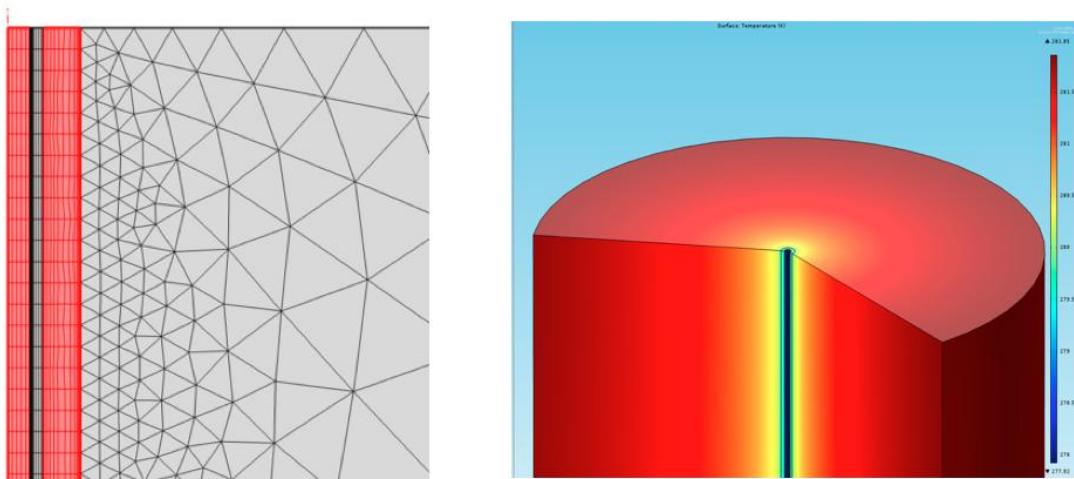


Abbildung 18: *COMSOL* finite elements model views

Abbildung 18 zeigt eine 3D-Ansicht sowie eine axiale Ansicht des Netzes, welches für das Modell der neuartigen kEWS verwendet wurde. In der ersten Version der kEWS hat das Innenrohr einen Radius von 0.04m mit einer Isolationsstärke von 0.01m und einer Wärmeleitfähigkeit von 0.02W/mK. Bei der Aussenhülle beträgt der Radius 0.065m Der Massenstrom wurde zu 0.38kg/s oder 1.4m³/h gewählt. Schliesslich wird die Vorlauftemperatur konstant bei 12°C gehalten um einem COP>10 der WP zu erhalten. So konnte die erforderliche Wärmemenge errechnet werden.

Der Graph in Abbildung 19 zeigt die Rücklauftemperatur aus der neuartigen kEWS für einen 1000 Stunden thermal response Test, simuliert mit *COMSOL*. Erkennbar ist ein schneller Abfall der Rücklauftemperatur in den ersten 60 Stunden. Ab diesem Zeitpunkt ist die logarithmische Abnahme der Temperatur mild und erreicht schliesslich nach 1000 Stunden eine Temperatur von 16.5°C und somit 4.5°C über der Eintrittstemperatur.

Die Resultate mit *EWS* (Abbildung 20) sind fast gleich wie diejenigen von *COMSOL* bei einer leicht tieferen Temperatur.

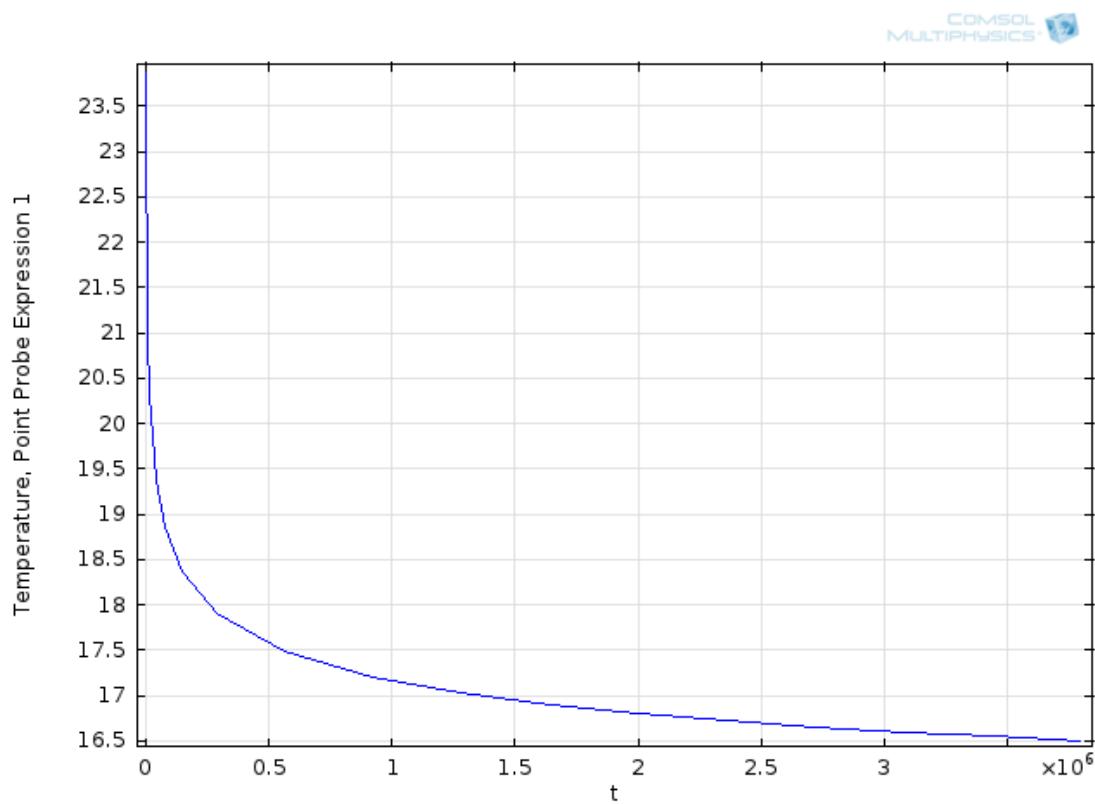


Abbildung 19: *COMSOL* thermal response Test

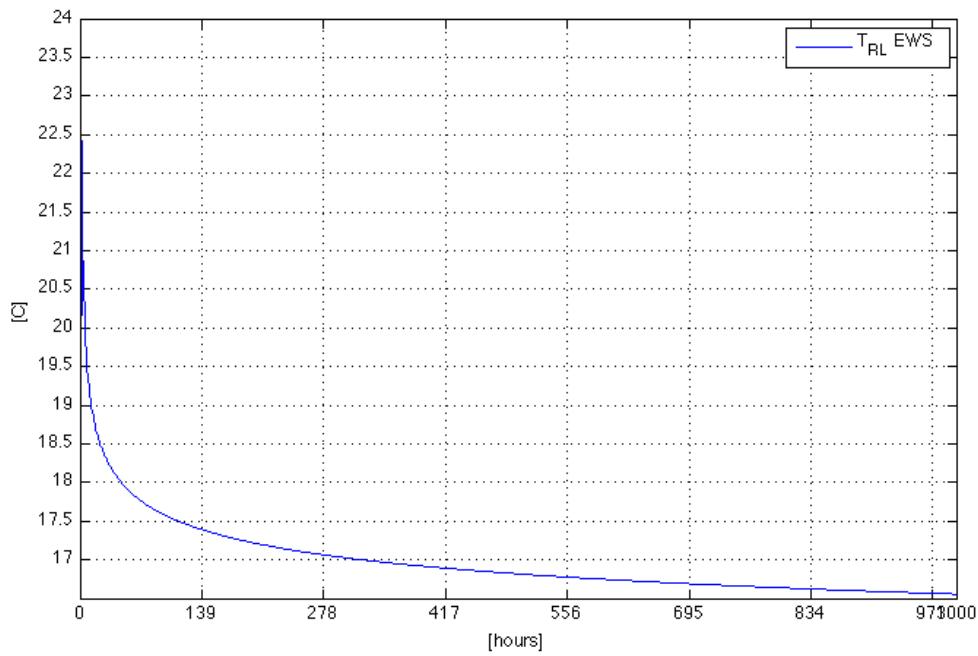


Abbildung 20: *EWS* thermal response Test

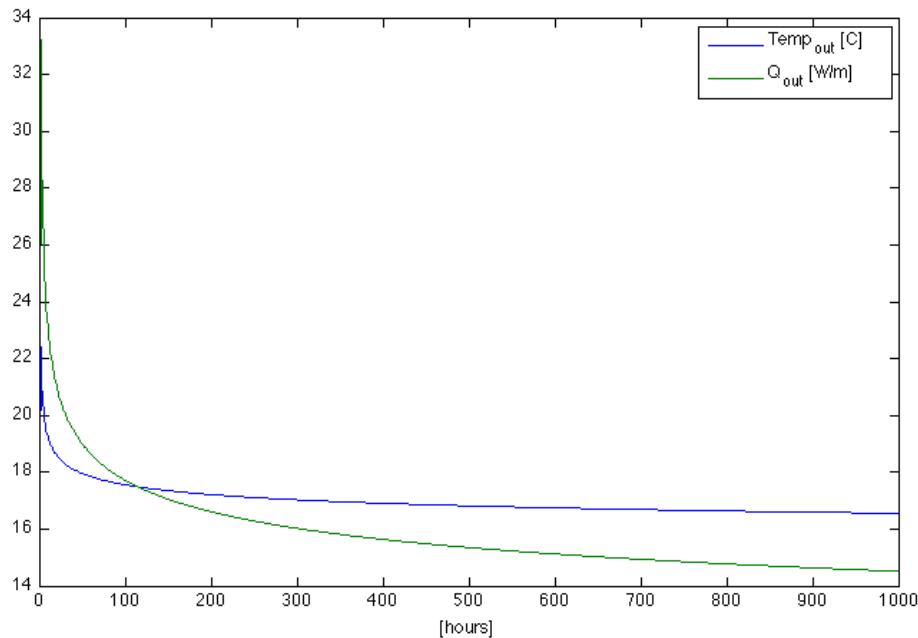


Abbildung 21: kEWS Leistung pro Meter und Rücklauftemperatur für den thermal response Test mit EWS

Das logarithmische Verhalten des Leistungsabfalls ist bemerkenswert, wie in Abbildung 21 dargestellt. Es fällt von 33W/m in der ersten Stunde auf 18W/m nach 90 Stunden, von wo es nur noch auf 14W/m am Ende des Tests fällt.

Wenn diese Resultate mit den empirischen der EWS B35 verglichen werden, ist ersichtlich, dass die neuartige kEWS mit 14W/m geladen werden kann ($COP > 10$) und die EWS von B35 lediglich mit 10W/m. Die kEWS ist also 50% effizienter.

3.5.4 Untersuchung der Qualität der EWS von Haus Gisel

Das Haus Gisel hat eine 450m lange Koaxial-Sonde, bei welcher die ersten 300m das äussere Rohr isoliert ist. Die Durchmesser betragen aussen 0.10m und innen 0.05m.

Es wurde ein Tag mit hoher Zeitauflösung gewählt um die Leistung von kEWS Haus Gisel zu beobachten, wie Abbildung 22 dargestellt. Erkennbar ist eine hohe Schwingfrequenz. Etwa alle 37min schaltet die Maschine ab und startet neu. Dies ist ein Beispiel für ein System, welches nicht richtig betrieben wird. Daher sind gestreute Ergebnisse zu erwarten.

Wie erwartet sind die Ergebnisse für die Tageswerte nicht schlüssig. In Abbildung 23 ist zu erkennen, dass die Vorlauftemperaturen, welche die Verdampfungstemperaturen des Systems darstellen, gleich sind, egal ob mit 10W/m oder 40W/m Wärme aus dem Boden extrahiert wird.

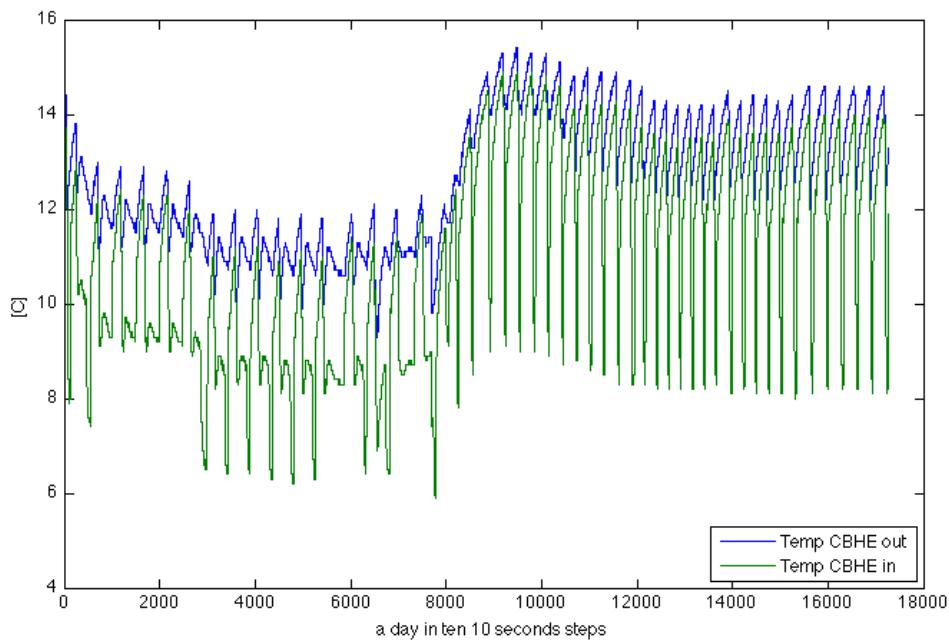


Abbildung 22: Eintritts- und Rücklauftemperatur kEWS Haus Gisel (31.01.2013)

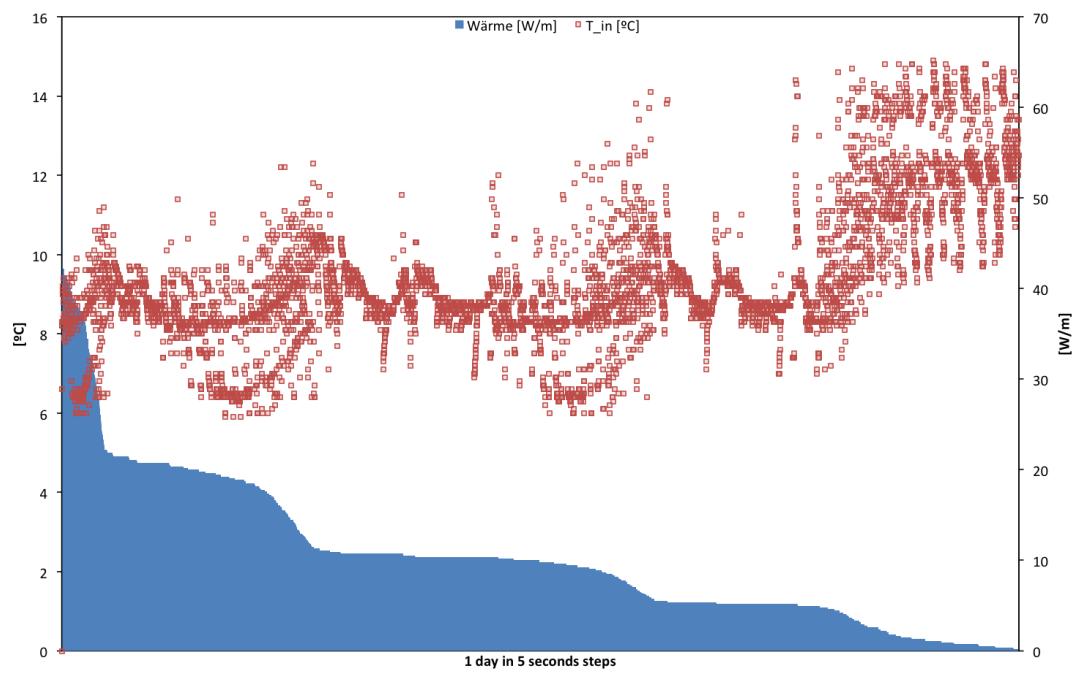


Abbildung 23: Volllast kEWS Haus Gisel (31.01.2013)

Das Volllastprofil (Abbildung 24) wiedergibt, was bereits gefolgert wurde. Die Verdampfungs-temperatur der WP streut im Bereich von etwa 4K, mit einer steigenden Tendenz bei abnehmender Leistung pro Meter. Ausgehend von einem Durchschnitt von 6°C bei 33W/m ist der Anstieg auf 12°C bei 10W/m.

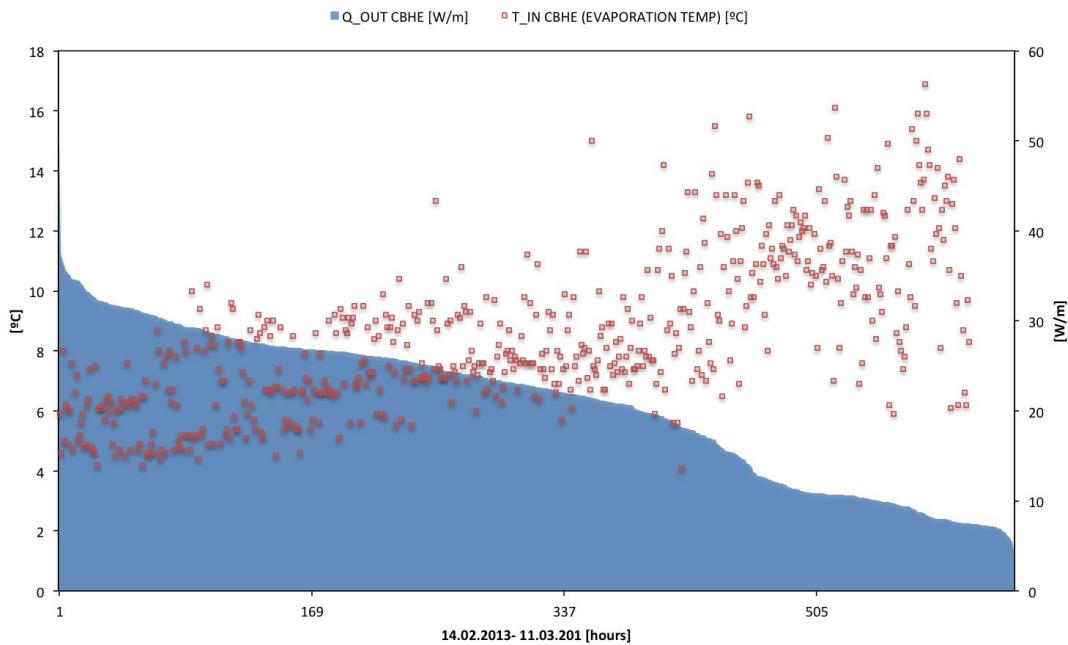


Abbildung 24: Volllastprofil kEWS zwischen 14.02.2013 und 11.03.2013 Haus Gisel

3.5.5 Fazit

Die Leistung der EWS sollte nicht von der Leistung des Wärmepumpensystems entkoppelt werden. Ein einfacher Weg um die ganze Systemleistung zu beurteilen, ist die Aufzeichnung der Volllast über ein Jahr mit den entsprechenden Werten der EWS (Vorlauftemperatur, WP-Zieltemperatur, Leistung pro Meter). Im Wesentlichen erlaubt dies die tatsächliche Vorlauftemperatur mit der erforderlichen für einen bestimmten COP zu vergleichen. Gleichzeitig ermöglicht dies zu erkennen, welcher Wärmeentzug pro Meter dauerhaft ist und optimiert somit den saisonalen COP.

Die EWS von B35 wurde mit einem bekannten Tool beurteilt und mittels *EWS* validiert. EWS kann für diesen Typ von EWS für eine Bewertung verwendet werden.

Die kEWS in *COMSOL* zu modellieren ist nicht trivial und erfordert Rechenressourcen. Probleme wie das hohe Längenverhältnis erfordern eine gute Wahl der Maschenweite und eine iterative Vorgehensweise, begonnen mit einem vereinfachten Modell. Für das einfache Zeitverhalten wird die Fluidodynamik getrennt von der Wärmeübertragung berechnet: zuerst „steady state“ mit fixem Massenstrom und anschliessend eine zeitabhängige Simulation.

Die Ergebnisse aus dem thermal response Test der neuartigen kEWS, berechnet mit *COMSOL* sowie *EWS*, sind sehr ähnlich. Beide zeigen, dass bei 1000 Stunden stetiger Wärmeentnahme für ein LowEx-System eine Leistung von 10W/m bei COP>10 gehalten werden kann.

Die Daten aus dem Haus Gisel sind wertvoll und für die Validierung des Modells unerlässlich. Für eine Erarbeitung einer kEWS-Leistungsbeurteilung reichen sie jedoch nicht aus.

4 KTI-Projekt

Gleichzeitig zu diesem Bericht wird beim Eidgenössischen Departement für Wirtschaft, Bildung und Forschung (WBF) ein KTI-Beitragsgesuch eingereicht. Das Bohrunternehmer für Erdwärmesonden und der Inhaber des Patents, die Firma Broder AG aus Sargans SG und einer der grössten Hersteller von extrudierten Erdwärmesonden Europas, die Firma HakaGerodur AG aus Gossau SG übernehmen die Rolle des Industriepartners. Das Team besteht aus insgesamt zwölf Personen. Zusammen mit der Professur für Gebäudetechnik soll in den nächsten 18 Monaten die neuartige kEWS entwickelt werden.

5 Ausblick

5.1 Probebohrung, Prototyp

Innerhalb des KTI-Projekts ist der Bau von mehreren Prototypen vorgesehen. Um die Originaltiefe von 530m zu erreichen wird stufenweise vorgegangen. Zuerst mit einer Bohrung auf 200m, erstellt durch die Firma Broder AG. Dies soll die Machbarkeit des Aussenhülle (Membran) sowie grundsätzlich des Systems zeigen.

Anschliessend wird mit den gewonnenen Erkenntnissen zwei Bohrungen auf 530m erstellt. Mit den Bohrungen auf diese grosse Tiefe wird das System massstabsgetreu getestet.

5.2 Bauliche Machbarkeitsüberprüfung der neuartigen kEWS

5.2.1 Mantelrohr/Membran

Die bisher durchgeföhrten Untersuchungen führten zu den richtigen Materialien. Eine Adaption an das System sowie Optimierung soll in enger Zusammenarbeit mit der Industrie erfolgen.

5.2.2 Zentralrohr

Das Wichtigste beim Zentralrohr ist die Isolation, welche einen Druck von über 50bar standhalten muss. Weiter sind der Einbau und der Transport auf die Baustelle von grosser Bedeutung. Vorgestellt wird entweder ein gekoppeltes oder ein wickelbares System. Bereits existieren erste Entwürfe für das Innenrohr.

5.2.3 Sondenkopf

Es fanden bereits erste Vorversuche bezüglich des Sondenkopfs statt. So konnte bei einer zentralen Komponente die Dichtigkeit bei erhöhtem Druck (15bar) nachgewiesen werden. Dieser Druck ist ausreichend bei einem Betriebsdruck von max. 6bar. Der Entwurf muss noch weiter ausgearbeitet werden.

5.2.4 Sondenfuss

Bezüglich dem Sondenfuss sind im Patent Ideen aufgezeigt. Eine genauere Untersuchung sollen jetzt durchgeführt werden. Das System kann mit dem ersten Prototyp geprüft werden.

5.2.5 Sondeneinbau

Auch bezüglich des Einbaus der kEWS sind erste Ideen vorhanden. Sie wurden im Patent ausformuliert. Eine genaue Untersuchung und Ausarbeitung wird jetzt durchgeführt und mit dem ersten Prototyp angewandt.

5.3 Nummerische Simulation

Mit den bisherigen Simulationen wurde der Druckverlust noch nicht untersucht. Dies wird Bestandteil der kommenden Arbeit sein.

Am 15. April 2013 beendete Georg Putzi seine Masterarbeit (Note 6.0) in der auch die Messdaten aus dem Haus Gisel mit den berechneten Daten verglichen wurden. Die Übereinstimmung ist gut. Im Anhang sind die Seiten 16-29 dieser Masterarbeit einkopiert (nur für den internen Gebrauch im BFE und der KTI).

Anhang

Im Folgenden sind die Seiten 16-29 der Masterarbeit „Numerical Simulation of a Novel Coaxial Borehole Heat Exchanger with COMSOL Multiphysics“ von Georg Putzi eingefügt. Eingereicht am 15. April bei Prof. Dr. Hansjürg Leibundgut, Professur für Gebäudetechnik, ETH Zürich. Nur zum internen Gebrauch im BFE und der KTI bestimmt.

3 Results

3.1 Steady-State Simulations

The steady-state model proposed by Guillaume 2011 with conjugated heat transfer (turbulent flow and heat transfer) was tested in the beginning to reproduce experimental data and validate the model. It was seen that the model can reproduce the experimental data very well, but that the results were strongly dependent on the position of the FTB created in the rock. The steady-state solution of one thermal boundary position represents one time point in the thermal evolution of the borehole. The temperature of the fluid on its way through the BHE is presented in Fig. 15.

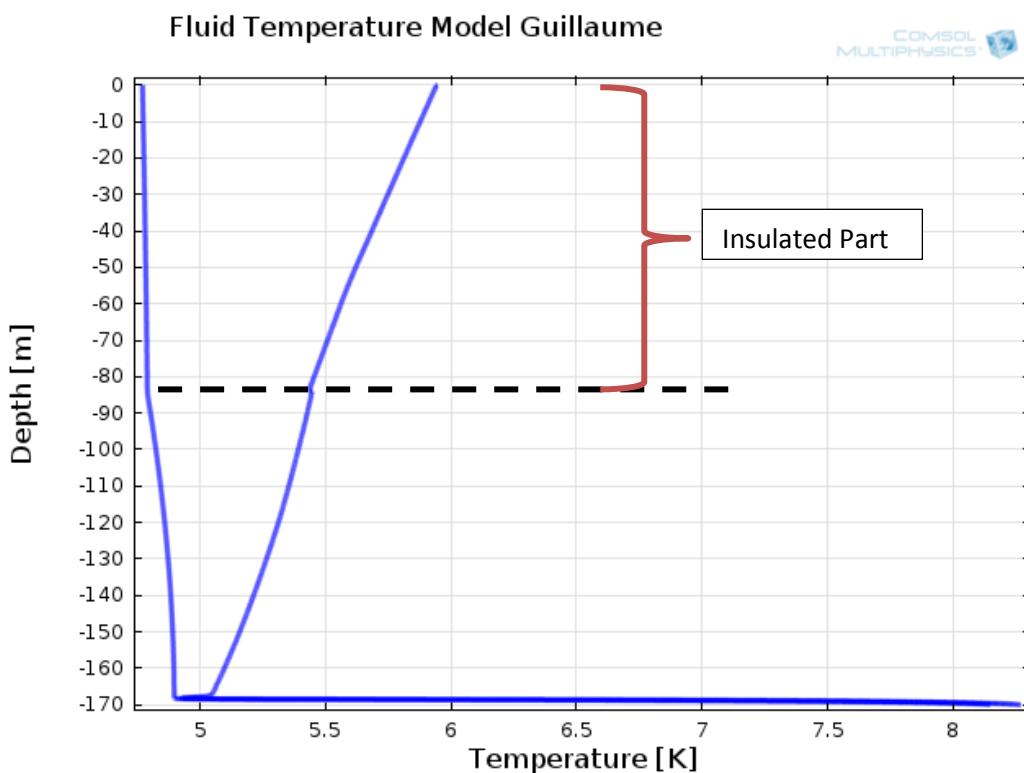


Fig. 15: Fluid temperature along the flow channel model Guillaume 2011

The effect of the insulation is recognizable. A temperature peak occurs at the bottom of the borehole where a water zone is not well mixed with the flow and becomes warmer. The temperature rise is low due to cold ground temperatures in Stockholm.

The larger the modeled borehole was, the more difficult it became to get the differential equations to converge. The high aspect ratio of deep borehole compared to the thin layers the BHE is composed of results in a system that is difficult to solve numerically. The gravitational force is high at the bottom of the borehole with pressures over 50 bar and the vortices resulting from the change in flow direction are complex and difficult to resolve. Successful approaches to solve the problem were mesh refinement, damping factor adjustment (a solver algorithm parameter) and better initial

conditions. The simulations for borehole deeper than 500 m converged only when neglecting the gravitational effect on the flow, what had in test simulations of smaller boreholes little effect on the fluid temperature.

The steady model was used for BHE system parameter comparisons, once the position of the FTB was validated by corresponding borehole data from Zumikon ZH. The position of the FTB inside the rock after a borehole operation time of around 1000 h was located at a distance of 1.2 m from the borehole wall (Appendix B). Various inner tubes with different thicknesses and thermal conductivities and their effect on the thermal evolution of the working fluid were investigated (Fig. 16).

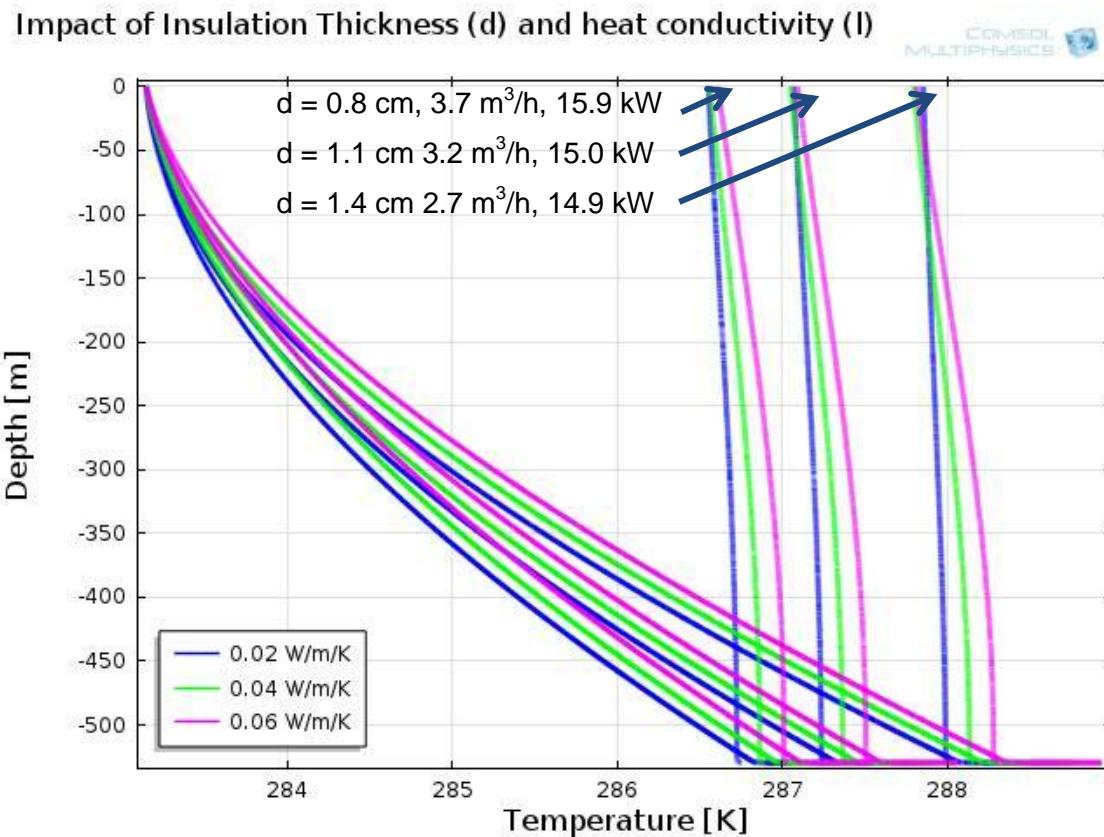


Fig. 16: Comparison of inner tubes for the new system

Thicker insulation had the effect that there was less space for the fluid in the annular inflow tube and the mass flow rate was reduced preserving the inlet velocity. The effect on the thermal power output was small because a reduced mass flow rate leads to higher output temperatures. The importance of the thermal conductivity at low values is marginal because the heat loss through the tubing is conserved in the inflow tube, letting the fluid arrive at the bottom at a higher temperature. This is primarily possible because the temperature over the cross section of the annular tube is non-uniform (Fig. 17).

Results

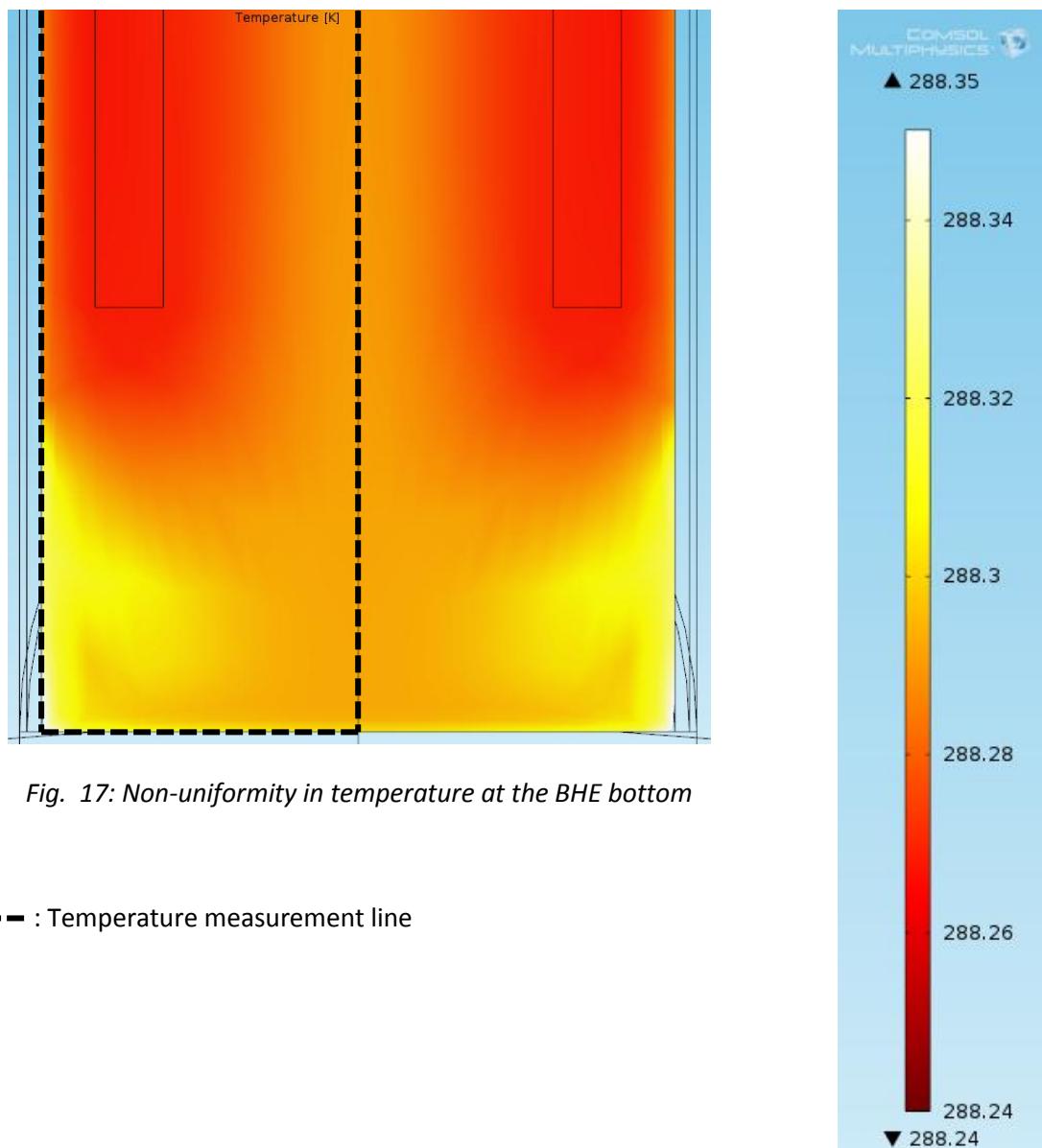


Fig. 17: Non-uniformity in temperature at the BHE bottom

— : Temperature measurement line

Fig. 17 illustrates the origin of the temperature peak at the BHE bottom (Fig. 16). It arises from a hot water zone that is not well mixed with the flow. The average bottom temperature in the axial tube is around 0.1 °C higher than in the annular tube, depending on the flow rate.

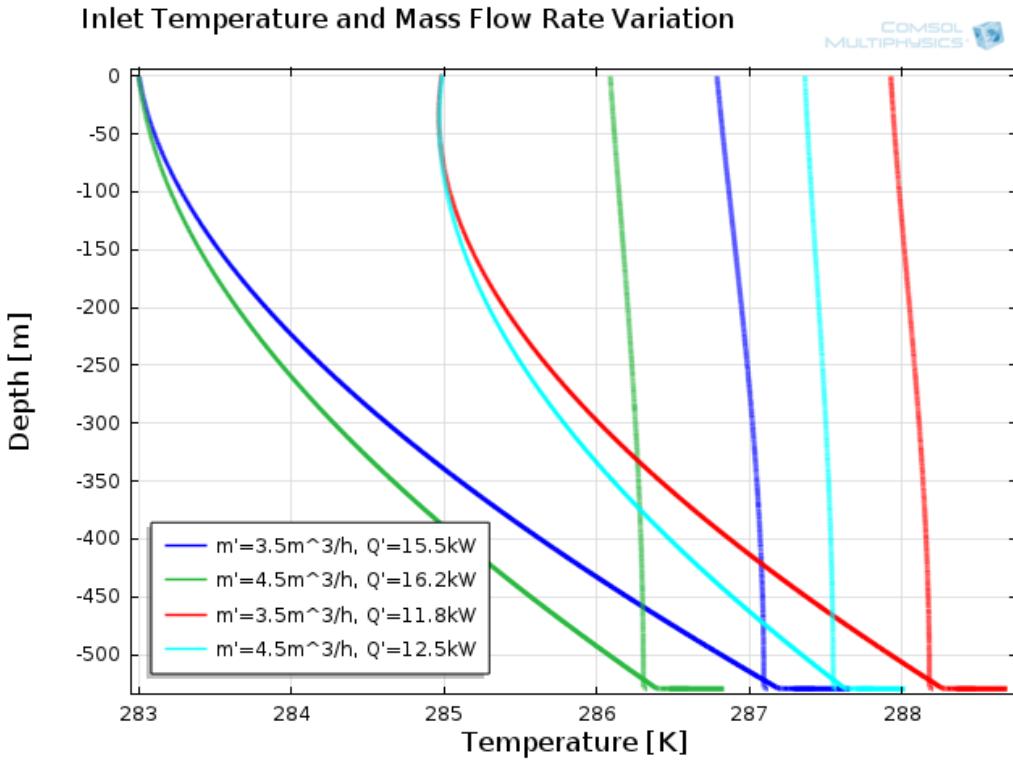


Fig. 18: Analysis of Inlet Temperature and Mass Flow Rate Effects

The higher the inlet temperature is chosen, the smaller the temperature rise becomes and the thermal power output decreases. An inlet temperature of 12 °C results in a heat pump COP of 10. It is a trade-off between desired heating power output and COP when designing the system. A comparison of inlet temperature and mass flow rate combinations is illustrated in Fig. 18.

A backfilled coaxial BHE of the same size, the same ground temperature profile and the same input temperature and mass flow rate as the new system was simulated. A comparison revealed advantages of the new system regarding the thermal performance compared to coaxial BHE with

Results

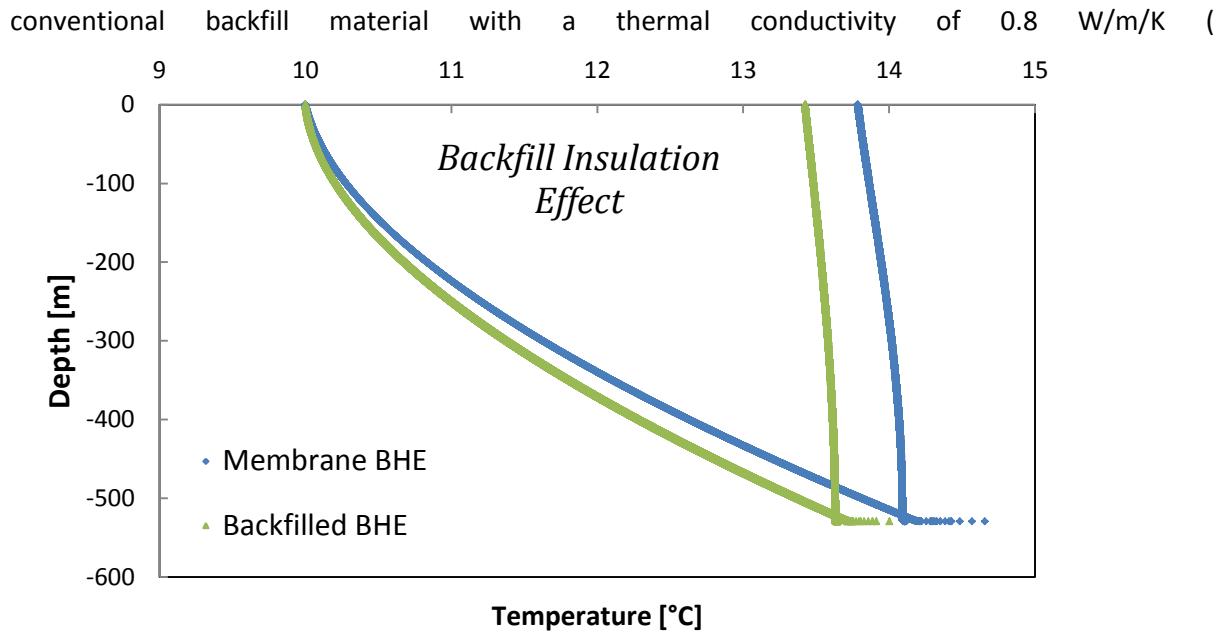


Fig. 19). BHE with high quality backfill material (1.8 W/m/K) result in a similar thermal performance as the new system but are expensive.

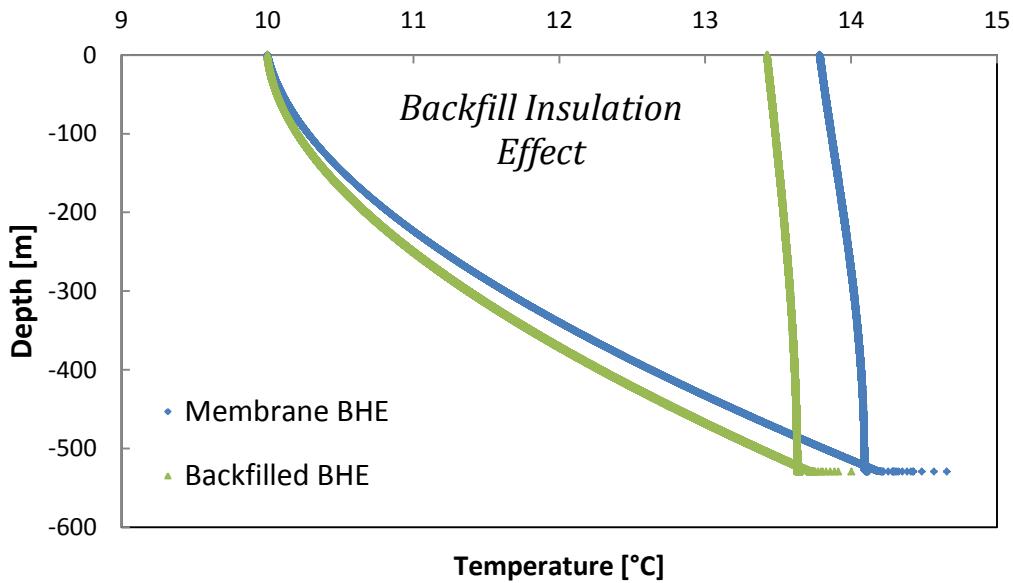


Fig. 19: Comparison of 530 m BHE with grout and with membrane

3.2 Transient Simulations

For the transient simulation, a steady-state study of the turbulent flow inside the tubing was performed. The solution of it was given as input parameter to the transient study, which solved heat transfer in the entire system. A transient simulation including the turbulent flow would be desirable

for the possibility to dynamically vary the fluid inlet velocity, but was not within the scope of this thesis.

The transient studies proved to be very useful for two purposes: Varying input temperatures could reproduce the thermal output of the borehole during a winter with oscillating heating energy demands (see Chap. 3.3). The ground cooling with increasing BHE operation time was investigated and its impact on the borehole output temperature analyzed. Fig. 21 shows a cycle of heat extraction and ground recharge where solar heat recovers the ground temperature ($m' = 3.5 \text{ m}^3/\text{h}$). Soil cooling can be prevented in long-term view in this scenario. The isotherms and the heat flux direction in the soil after 500 hours cooling at $T_{in} = 10^\circ\text{C}$ and $m' = 3.5 \text{ m}^3/\text{h}$ are shown in Fig. 20.

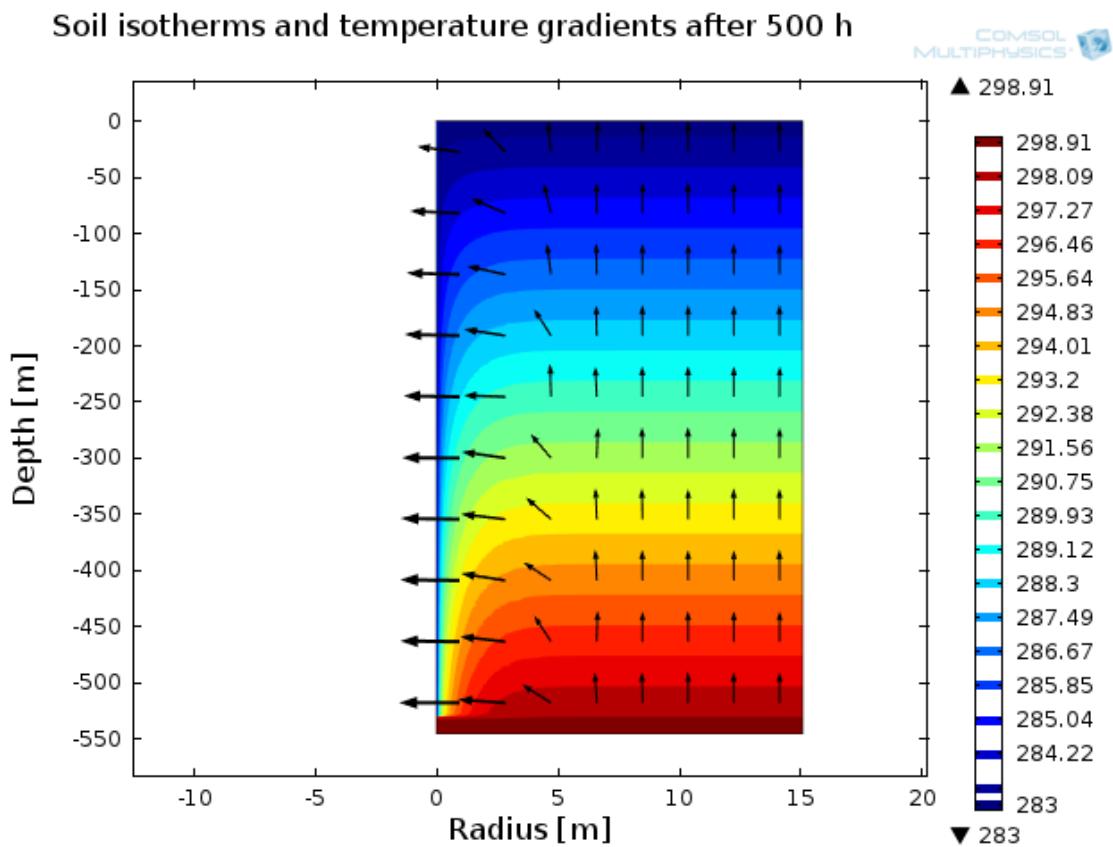


Fig. 20: Ground temperature after heat extraction

Results

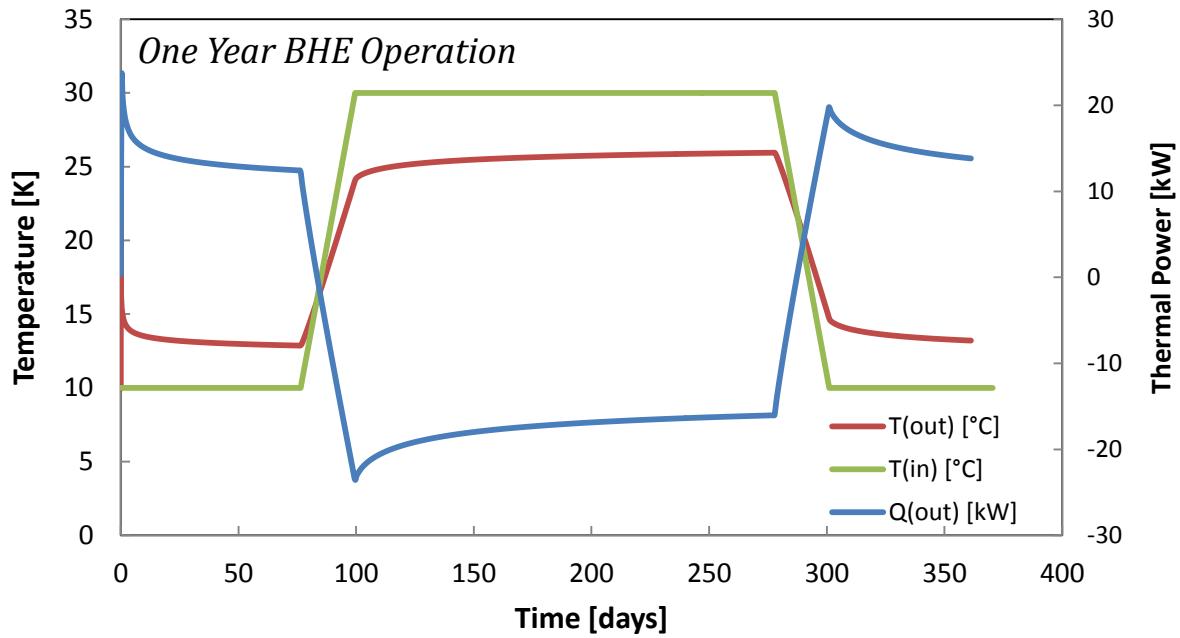


Fig. 21: Dynamic simulation of a heat extraction and heat storage cycle during one year

The theoretical solar soil recharge phase in this simulation is sufficient to recharge the ground above the undisturbed level before the first cooling cycle. In a real case, it depends on the installed hybrid solar collector power capacity and on the solar irradiation at the location. The simulation can be used - given the solar irradiation at the BHE site - as a planning tool for the thermal power required from hybrid solar collectors.

3.3 Comparison to Experimental Data

A comparison of dynamic experimental data of the borehole in Zumikon and the in- and output of the numerical simulations for the same borehole is shown in Fig. 22 (14.02. – 11.03.2013).

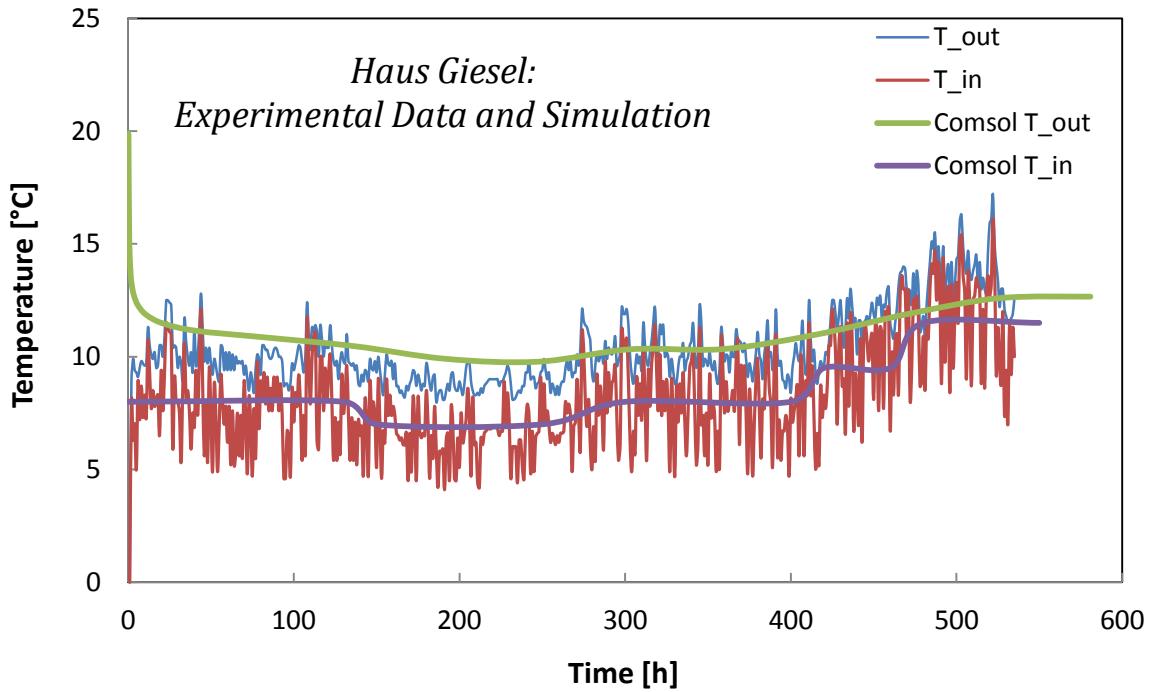


Fig. 22: Reproduction of dynamic experimental data from the borehole in Zumikon

At the beginning, the temperature of the simulation is higher because the undisturbed ground temperature profile was given as initial condition, while the installed BHE was already operated for heat extraction since winter started. The reproduction shows that the simulation is reliable even without exactly knowing the system parameters and the geologic profile.

4 Conclusion

Different simulation approaches can be pursued depending on the purpose of the study. Steady-state simulations with turbulent fluid flow inside the BHE and heat transfer in the entire system gave valuable opportunities to test various system and operation parameters as the thickness and heat conductivity of the inner tube or the inlet temperature and velocity. The BHE could be simulated in a short time through the construction of a fictive thermal boundary in the rock, the position of which needed to be calibrated with experimental data. A drawback is that it is difficult to find a steady-state solution for the fluid dynamics in the bottom part of the flow channel because of the high gravitational forces generating non-converging vortices.

Transient studies of the heat transfer with the input of the steady-state solution for the turbulent flow were successfully used to predict the cooling and reheating of the soil. Dynamic studies could be performed efficiently because they solve only the heat transfer differential equations and the model visualized long term thermal evolution of the ground in little time. The model needs no calibration and can simulate the operation of a BHE for any time period with varying inlet temperatures. A further step in the development of dynamic studies for the new BHE system will be to simulate all physics time dependent, giving the opportunity to vary the flow rate.

If steady-state simulations are run with a scaled geometry, the position of the FTB must be adjusted to compensate the heat transfer differences. Transient models are best run with a full scale geometry. Down-scaling by dimensional analysis can be used to preserve the flow properties, but disregards the thermal effects and may produce errors.

The advantages of the new system were demonstrated by running the same simulation with a conventional coaxial BHE. The comparison to the experimental data from Guillaume 2011 and from the BHE in Zumikon showed that the models achieve satisfying accuracy even with insecurely known system parameters as the unknown conductive heat transfer coefficients of the soil and in the case Zumikon also of the thickness and heat conductivity of the inner tube. This makes them an excellent tool to plan new borehole installations. The geologic structure of the soil, the amount of recharge heat gained from hybrid solar collectors and other location dependent factors can be given as input to a project simulation and the output will specifically represent the planned BHE. The desired power output can be achieved with the optimal inlet velocity, minimizing the pressure drop, and with the optimal inlet temperature to maximize the COP. The power consumption in fluid pump and heat pump is therewith minimized.

The insulating properties of the inner tube are important because without accurate insulation, the fluid can cool down by several degrees on its 530 m way from the bottom to the top. With an insulation thickness of 1 cm, an optimal value for the conductive heat transfer coefficient is 0.02 – 0.06 W/m/K. Materials with even lower values are usually too compressive and are not feasible for the use at over 50 bar pressures. Thicker insulation reduces the flow area and requires increased velocities to maintain the mass flow rate, what strongly increases the pressure drop and therewith the required pumping power and should be relinquished. If the velocity is kept constant and the mass flow rate reduced, thick insulation may however be a good solution because the output

temperature is increased, resulting in a higher achievable COP for the heat pump with a small compromise in the thermal power output. The pressure drop rises only marginally due to the reduction of the hydraulic diameter. An even lower flow rate can be used with thin insulation to achieve the same effect on the COP with minimized pressure drop.

The dynamic studies showed that the thermal storage system can be operated sustainably without significant soil cooling. The geothermal system is a financially attractive solution because its potential lifetime is large. The heat exchanger tubing can be removed in the case of damage since no grout backfill is used and the borehole can be reused after the lifetime of the tubing.

A new generation of borehole exchangers can be installed with significant improvements. The heat storage system is an important part of the building energy concept Sol2ergie and a step toward decentralized renewable and ecological building energy generation.

5 Acknowledgement

I would like to thank the following people that supported me during my master thesis project:

- Prof. Dr. Hansjürg Leibundgut* for leading the coaxial BHE development and financing and supporting this study.
- José Antonio Sanchez Ihl* for supervising this thesis and supporting the numerical simulations.
- Michael Schiess* for the support and cooperation regarding the new coaxial BHE system.
- My parents for their financial support during my study time.
- Patricia Meier for reviewing

*: Professorship for Building Technologies, ETH Zurich

6 References

- Acuña J. and Palm B., 2010: *A Novel Coaxial Borehole Heat Exchanger: Description and First Distributed Thermal Response Test Measurements*. Proceedings World Geothermal Congress 2010.
- Acuña J. and Palm B., 2011: *First Experience with Coaxial Borehole Heat Exchangers*. IIR conference on sources/sinks alternative to the outside air for heat pump and air-conditioning techniques.
- Al-Khoury R., Bonnier P.G. and Brinkgreve R.B.J., 2005: *Efficient Finite Element Formulation for Geothermal Systems*. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, Vol. 63, Pages 988-1013.
- Bauer D., Heidemann W. and Diersch H.J.G., 2011: *Transient 3D Analysis of Borehole Heat Exchanger Modeling*. **Geothermics**, Vol. 40, Pages 250-260.
- Bonin, J., 2009: *Handbuch Wärmepumpen*. Beuth Verlag GmbH.
- Diersch H.J.G., Bauer D., Heidemann W., Rühaak W. and Schätzl P., 2011: *Finite Element Modeling of Borehole Heat Exchanger Systems*. **Computers & Geosciences**, Vol. 37, Pages 1136-1147.
- Florides G.A., Christodoulides P. and Pouloupatis P., 2012: *An Analysis of Heat Flow through a Borehole Heat Exchanger Validated Model*. **Applied Energy**, Vol. 92, Pages 523-533.
- Guillaume F., 2011: *Analysis of a Novel Pipe in Pipe Coaxial Borehole Heat Exchanger*. Master Thesis at KTH Stockholm.
- Leibundgut H.J., 2012 [I]: *Von der Sonne zur Erde und wieder zurück*. **TEC21**, Vol. 45/2012, Pages 37-41.
- Leibundgut H.J., 2012 [II]: *Sol2ergie: System for ZeroEmission Architecture*. Chair of Building Systems ETH Zurich.
- Li Z. and Zheng M., 2009: *Development of a Numerical Model for the Simulation Vertical U-Tube Ground Heat Exchangers*. **Applied Thermal Engineering**, Vol. 29, Pages 920-924.
- Ozgener O. and Hepbasli A., 2007: *A Review on the Energy and Exergy Analysis of Solar Assisted Heat Pumps Systems*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 11, Pages 482-496.
- Rees S.J. and He M., 2013: *A Three-Dimensional Numerical Model of Borehole Heat Exchanger Heat Transfer and Fluid Flow*. **Geothermics**, Vol. 46, Pages 1-13.
- Rybäck L. and Eugster W.J., 2010: *Sustainability Aspects of Geothermal Heat Pump Operation, with Experience from Switzerland*. **Geothermics**, Vol. 39, Pages 365-369.
- Trillat V., Souyri B. and Achard G., 2007: *Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors*. **Applied Thermal Engineering**, Vol. 27, Pages 1750-1755.

- Wang H., Cui Y. and Qi C., 2013: *Effects of Sand-Bentonite Backfill Materials on the Thermal Performance of Borehole Heat Exchangers.* **Heat Transfer Engineering**, Vol. 34, Pages 37-44.
- Woloszyn J. and Golas A., 2013: *Modeling of a Borehole Heat Exchanger Using a Finite Element with Multiple Degrees of Freedom.* **Geothermics**, Vol. 47, Pages 13-26.
- Wood C.J., Liu H. and Riffat S.B., 2012: *Comparative Performance of 'U-Tube' and 'Coaxial' loop designs for use with a ground source heat pump.* **Applied Thermal Engineering**, Vol.37 , Pages 190-195.
- Zanchini E., Lazzari S. and Priarone A., 2010 [I]: *Effects of Flow Direction and Thermal Short-Circuiting on the Performance of Small Coaxial Ground Heat Exchangers.* **Renewable Energy**, Vol. 35, Pages 1255-1265.
- Zanchini E., Lazzari S. and Priarone A., 2010 [II]: *Improving the Thermal Performance of Coaxial Borehole Heat Exchangers.* **Energy**, Vol. 35, Pages 657-666.

Appendix A

Appendix A: Differential Equations

The following differential equations were solved for the dynamic studies of the new BHE system:

i) Fluid Dynamics

Differential equations

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[-pI + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\rho k I \right] + F$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0 \quad (\text{incompressible fluid})$$

$$\rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_k^*) \nabla k] + P_k - \rho \beta^* k \omega$$

$$\rho(u \cdot \nabla)\omega = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_\omega) \nabla \omega] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \rho \beta \omega^2$$

$$\mu_T = \rho \frac{k}{\omega}$$

$$P_k = \mu_T [\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T)]$$

Border conditions

- Wall:

$$u \cdot n = 0$$

$$\left[(\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\rho k I \right] n = -\rho \frac{u_\tau}{\delta_w^+} u_{tang}$$

$$u_{tang} = u - (u \cdot n)n$$

$$\nabla k \cdot n = 0$$

$$\omega = \rho \frac{k}{\delta_w^+ \kappa_v \mu}$$

- Inlet:

$$u = -v_{in}n$$

$$k = 3/2(v_{in}I_T)^2$$

$$\omega = \frac{k^{1/2}}{(\beta_0^*)^{1/4}L_T}$$

- Outlet:

$$p = p_{atm} = 10^5 \text{ [Pa]}$$

$$\nabla k \cdot n = 0; \nabla \omega \cdot n = 0$$

$$\left[(\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\rho k I \right] \cdot n = 0$$

ii) Heat Transfer

In solids:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

In fluids:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q + Q_{vh} + W_p$$

Boundary Conditions:

- Inlet:

$$T = T_{in}$$

- Outlet:

$$-n \cdot (-k \nabla T) = 0$$