



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 20. 12. 2014

Optimierung von Erdwärmesonden

Effizienzsteigerung für kleinere Anlagen

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Geothermie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Axpo Naturstrom Fonds, vertreten durch Axpo Trading AG, CH-5080 Laufenburg
Störi AG, CH-8804 Au ZH

Auftragnehmer:

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW
Grüntal
CH-8820/Wädenswil
www.zhaw.ch/ifm

Autoren:

Markus Hubbuch, ZHAW, markus.hubbuch@zhaw.ch

Mit Beiträgen von:

Arthur Huber, Huber Energietechnik AG, arthur.huber@hetag.ch (Anhang A5)

Andri Bargetzi, dipl. Phys. ETH, temporärer Mitarbeiter ZHAW (Kapitel 5.9, 5.10)

BFE-Bereichsleiter: Gunter Siddiqi

BFE-Programmleiter: Rudolf Minder

BFE-Vertragsnummer: SI/500 256-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Die Resultate finden sich auch auf der Homepage www.erdsondenoptimierung.ch .

Zusammenfassung

Das Projekt Optimierung von Erdwärmesonden (EWS) hatte zum Ziel, das Optimierungspotential bei kleineren Erdwärmesonden-Anlagen (bis max. 4 EWS) zu erforschen. Dazu wurden Interviews geführt, theoretische Untersuchungen und Berechnungen durchgeführt, eine umfangreiche Literaturstudie gemacht und Berechnungstools erstellt. Die Resultate zeigen, dass es bei vielen EWS-Anlagen ein Optimierungspotential gibt. Dieses ist vor allem mit folgenden Punkten zu realisieren:

Genügende Tiefe der EWS, bessere Hinterfüllung, Auslegung für den Betrieb mit reinem Wasser statt mit Sole, korrekte Auslegung der Umwälzpumpen, ein Heizsystem mit tiefen Vorlauftemperaturen, Regeneration des Bodens, Verzicht auf einen technischen Speicher, Warmwasser-Erwärmung im Durchlaufverfahren und Verzicht auf elektrische Nacherwärmung. Bei einer Kombination mit einer PV-Anlage kann heute praktisch jahreskostenneutral ein Null-Wärmeenergie-Haus errichtet werden.

Résumé

Le projet l'optimisation des sondes géothermiques verticale (SGV) devait explorer le potentiel d'optimisation pour les petits systèmes des SGV (jusqu'à max. 4 SGV). Pour cela des entrevues ont été réalisées, des analyses théoriques et des calculs effectués, une étude approfondie de la littérature a été faite et des outils de calculs ont été créés. Les résultats montrent qu'il existe un potentiel d'optimisation dans de nombreux systèmes SGV. Ceci est réalisé surtout avec les points suivants:

Longueur suffisante de SGV, meilleure injection du coulis, conception pour le fonctionnement avec de l'eau pure à la place d'antigel, dimensionnement correcte des pompes de circulation, system de chauffage avec des faibles températures du fluide de chauffage, permettre une régénération du sol, pas de réservoir technique, chauffage de l'eau chaude en continu et pas de réchauffage électrique. En cas de combinaison avec une installation PV, une maison de zéro énergie thermique peut être construite à un coût par an pratiquement neutre.

Abstract

The goal of the project optimization of borehole heat exchanger (geothermal probes, BHE) was to explore the optimization potential of small systems of BHEs (up to a maximum of 4 BHEs). For that, interviews have been conducted, theoretical studies and calculations performed, an extensive study of literature done and calculation tools have been created. The results show, that in a lot of BHE systems there is a potential for optimization. This is to be realized especially with the following points:

Sufficient depth resp. length of the BHE, better backfill quality, design for use with pure water instead of brine, correct design of the circulating pumps, heating system with low supply temperatures, enabling a regeneration of the ground, no technical storage, hot water heating by continuous flow and no electrical peak heating. Today a zero heat energy house can be built at virtually neutral annual cost if combined with a PV installation.

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	4
RÉSUMÉ	4
ABSTRACT	4
2 AUSGANGSLAGE.....	9
3 ZIEL DES PROJEKTES	11
4 VORGEHEN / METHODE	12
5 ERGEBNISSE / ERKENNTNISSE	13
5.1 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE	13
5.2 LITERATURSTUDIE	15
5.3 EXPERTEN-INTERVIEWS	18
5.4 BEFRAGUNG VON UNTERNEHMERN	32
5.5 OPTIMIERUNG UND QUALITÄTSSICHERUNG HINTERFÜLLUNG	44
5.6 TRENNUNG VOR- UND RÜCKLAUF IN DER EWS	47
5.7 ERARBEITUNG PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN DER SONDENFLUIDE	49
5.8 ETHANOL ALS SONDENFLUID	49
5.9 OPTIMIERUNG DER STRÖMUNG IM SONDENROHR	54
5.10 EINFLUSS VON ERDWÄRMESONDEN AUF DIE BODENTEMPERATUR	70
6 WIRTSCHAFTLICHKEITSTOOL	82
6.1 EINLEITUNG	82
6.2 INFORMATION (EINFÜHRUNG)	82
6.3 ALLGEMEINE INFORMATIONEN (HEIZENERGIE)	83
6.4 INPUTPARAMETER VARIANTENSTUDIE (WIRTSCHAFTLICHKEIT).	84
6.5 GRAFISCHER OUTPUT	86
6.6 SOLARKOLLEKTOR MODELL	89
6.7 INTERPRETATION DER RESULTATE DES TOOLS WIRTSCHAFTLICHKEIT	91
7 GESAMTOPTIMIERUNG DER ANLAGEN	92
7.1 JAHRESARBEITSAHLE	92
7.2 GESAMTOPTIMIERUNG BEI NEUBAUTEN	93
7.3 GESAMTOPTIMIERUNG BEI ALTBAUTEN	94
8 DISKUSSION DER ERKENNTNISSE.....	97
9 AUSBLICK	98
9.1 OFFENE FRAGEN UND FORSCHUNGSBEDARF	98
9.2 NÄCHSTE SCHRITTE NACH PROJEKTABSCHLUSS	98
10 LITERATURVERZEICHNIS	100
11 ANHANG.....	104
11.1 ANHANG A1: LITERATURLISTE FÜR DIE ERSTELLUNG DER STOFFDATEN-DIAGRAMME SONDENFLUIDE	104
11.2 ANHANG A2: WERTE UND DIAGRAMME DER STOFFDATEN	106
11.3 ANHANG A3: CHECKLISTE FÜR NEUBAUTEN	109
11.4 ANHANG A4: CHECKLISTE FÜR ALTBAUTEN	113
11.5 ANHANG A5: BERICHT EINFLUSS BESSER WÄRMELEITENDE HINTERFÜLLUNG	117

BILDVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1: VERKAUFTE WÄRMEPUMPEN PRO JAHR IN DER SCHWEIZ [4]	9
ABBILDUNG 2: ART DER VERKAUFTEN WÄRMEPUMPEN IM JAHR 2013 IN DER SCHWEIZ [4]	9
ABBILDUNG 3: ART UND ANZAHL DER VERKAUFTEN WÄRMEERZEUGER IM JAHR 2013 IN DER SCHWEIZ [4]	10
ABBILDUNG 4: ANZAHL DER ABGETEUFTE BOHRMETER ERDWÄRMESONDEN IM JAHR 2013 IN DER SCHWEIZ [4]	10
ABBILDUNG 5: HEIZENERGIEKENNWERTE INKLUSIVE DER NUTZBAREN WÄRMEABGABE VON ROHRLEITUNGEN [42]	44
ABBILDUNG 6: WARMWASSERVERBRAUCH DER EINZELHÄUSER, AUFSTEIGEND SORTIERT (MESSWERTE WARMWASSERZÄHLER) [42]	45
ABBILDUNG 7: SCREENSHOT DES EXCEL-PROGRAMMS FÜR BAUHERREN	46
ABBILDUNG 8: ABSTANDSHALTER DER FIRMA FRANK GMBH.....	47
ABBILDUNG 9: ZENTRIERHILFE DER FIRMA MÜLLER.....	47
ABBILDUNG 10: VORSCHLAG TRENNUNG VOR- / RÜCKLAUF ZUM SONDENKOPF.....	48
ABBILDUNG 11: WERBUNG VON ALCOSUISSE FÜR PUMPETHA.....	51
ABBILDUNG 12: GEFRIERVERSUCH BEI -20 °C.....	52
ABBILDUNG 13: GEFRIERVERSUCH MIT 12 % VOL.-MISCHUNG: ES IST EINE KLEINE VOLUMENZUNAHME FESTSTELLBAR, ES ENTSTEHT ABER KEIN FESTER EISBLOCK, SONDERN ÜBERFLÜSSIGES GEL TRITT ALS PFROPFEN UND FLÜSSIGKEIT AUS EINER PET-FLASCHE.	52
ABBILDUNG 14: BEI AUCH NUR GERINGER SÄUREBILDUNG, ABHÄNGIG VOM SAUERSTOFFGEHALT, FÄLLT DER PH-WERT SOFORT AUF WERTE UNTER 4.....	53
ABBILDUNG 15: BOHRLOCHGEOMETRIE EINER DOPPEL-U ERDWÄRMESONDE [47].	56
ABBILDUNG 16: INFINITESIMALER ROHRABSCHNITT ZUR DRUCKVERLUSTBERECHNUNG	57
ABBILDUNG 17: UMWÄLZPUMPENLEISTUNG NACH 50 JAHREN, BEI AUSLEGETEMPERATUR VON -1,5 °C (GEMÄSS SIA 384/6) UND $\Delta T = 3$ °C.....	60
ABBILDUNG 18: UMWÄLZPUMPENLEISTUNG NACH 50 JAHREN, BEI AUSLEGETEMPERATUR VON -1,5 °C (GEMÄSS SIA 384/6) UND $\Delta T = 4$ °C.....	60
ABBILDUNG 19: UMWÄLZPUMPENLEISTUNG NACH 50 JAHREN, BEI AUSLEGETEMPERATUR VON -1,5 °C (GEMÄSS SIA 384/6) UND $\Delta T = 5$ °C.....	61
ABBILDUNG 20: UMWÄLZPUMPENLEISTUNG NACH 50 JAHREN, BEI AUSLEGETEMPERATUR VON 3,5 °C UND $\Delta T = 3$ °C.	61
ABBILDUNG 21: UMWÄLZPUMPENLEISTUNG NACH 50 JAHREN, BEI AUSLEGETEMPERATUR VON 4 °C UND $\Delta T = 4$ °C.	61
ABBILDUNG 22: UMWÄLZPUMPENLEISTUNG EINER NEUEN ANLAGE, BEI DURCHSCHNITTSTEMPERATUR VON 8,5 °C UND $\Delta T = 3$ °C.	62
ABBILDUNG 23: UMWÄLZPUMPENLEISTUNG EINER NEUEN ANLAGE, BEI DURCHSCHNITTSTEMPERATUR VON 8,5 °C UND $\Delta T = 4$ °C.	62
ABBILDUNG 24: UMWÄLZPUMPENLEISTUNG EINER NEUEN ANLAGE, BEI EINER DURCHSCHNITTSTEMPERATUR VON 8,5 °C UND $\Delta T =$ 5 °C.	62
ABBILDUNG 25: WÄRMEÜBERTRAGUNG ZWISCHEN ROHRWAND UND SONDENFLUID	63
ABBILDUNG 26: COP' NACH 50 JAHREN, BEI AUSLEGETEMPERATUR VON -1,5 °C (GEMÄSS SIA 384/6) UND $\Delta T = 3$ °C.	66
ABBILDUNG 27: COP' NACH 50 JAHREN, BEI AUSLEGETEMPERATUR VON -1,5 °C (GEMÄSS SIA 384/6) UND $\Delta T = 4$ °C.	66
ABBILDUNG 28: COP' NACH 50 JAHREN, BEI AUSLEGETEMPERATUR VON -1,5 °C (GEMÄSS SIA 384/6) UND $\Delta T = 5$ °C.	67
ABBILDUNG 29: COP' NACH 50 JAHREN, BEI AUSLEGETEMPERATUR VON 3,5 °C UND $\Delta T = 3$ °C.	67
ABBILDUNG 30: COP' NACH 50 JAHREN, BEI AUSLEGETEMPERATUR VON 4 °C UND $\Delta T = 4$ °C.	68
ABBILDUNG 31: COP' EINER NEUEN ANLAGE, BEI DURCHSCHNITTSTEMPERATUR VON 8,5 °C UND $\Delta T = 3$ °C.	68
ABBILDUNG 32: COP' EINER NEUEN ANLAGE, BEI DURCHSCHNITTSTEMPERATUR VON 8,5 °C UND $\Delta T = 4$ °C.	69
ABBILDUNG 33: COP' EINER NEUEN ANLAGE, BEI DURCHSCHNITTSTEMPERATUR VON 8,5 °C UND $\Delta T = 5$ °C.	69
ABBILDUNG 34: ZEIT- UND TIEFENABHÄNGIGES TEMPERATURPROFIL BEI KONSTANTEM WÄRMEENTZUG	71
ABBILDUNG 35: BERECHNETE MITTLERE TEMPERATUR NACH 50 JAHREN, BEI EINEM ABSTAND IN EINEM SONDENFELD VON 32 M ZWISCHEN DEN EWS, MIT DEN WERTEN GEM. TABELLE 3 GERECHNET	74
ABBILDUNG 36: BERECHNETE MITTLERE TEMPERATUR NACH 200 JAHREN, MIT DEN SONST GLEICHEN WERTEN.....	74
ABBILDUNG 37: TEMPERATUR NACH 50 JAHREN BZW. IM BEHARRUNGSZUSTAND FÜR VERSCHIEDENE ANZAHL SONDEN.	75
ABBILDUNG 38: VERHÄLTNISS DER PRO EWS BENÖTIGTEN BODENFLÄCHE ZU WOHNFLÄCHE	76
ABBILDUNG 39: 500 M x 500 M AUSSCHNITT AUS DEM WÄRMENUTZUNGSATLAS DES GIS-BROWSERS.....	77
ABBILDUNG 40: 500 M x 500 M AUSSCHNITT SCHWERZENBACH.....	80
ABBILDUNG 41: 500 M x 500 M AUSSCHNITT BRÜTTEN	80
ABBILDUNG 42: 500 M x 500 M AUSSCHNITT HÜNIKON	80

ABBILDUNG 43: 500 M X 500 M AUSSCHNITT TANNEN	81
ABBILDUNG 44: 500 M X 500 M AUSSCHNITT KREIS 9 (ZÜRICH)	81
ABBILDUNG 45: MODELLGRENZEN UND INVESTITIONSKOSTEN FÜR DAS TOOL WIRTSCHAFTLICHKEIT.....	82
ABBILDUNG 46: SCREENSHOT BLATT EINGABEN UND BERECHNUNG WÄRMEBEDARF NEUBAU (OHNE VORHANDENE BERECHNUNG WÄRMEBEDARF)	83
ABBILDUNG 47: SCREENSHOT BLATT EINGABEN HAUSTYP UND WÄRMEBEDARF FÜR ALTBAUTEN	84
ABBILDUNG 48: SCREENSHOT BLATT WIRTSCHAFTLICHKEIT, NOTWENDIGE EINGABEN DURCH DEN BENUTZER	84
ABBILDUNG 49: SCREENSHOT BLATT WIRTSCHAFTLICHKEIT, BERECHNUNG DER INVESTITIONEN.....	85
ABBILDUNG 50: SCREENSHOT BLATT WIRTSCHAFTLICHKEIT, BERECHNUNG DER ENERGIEBILANZ	85
ABBILDUNG 51: SCREENSHOT BLATT WIRTSCHAFTLICHKEIT, BERECHNUNG DER JAHRESKOSTEN.....	86
ABBILDUNG 52: DARSTELLUNG DER WIRTSCHAFTLICHKEIT BEI EINMALVERGÜTUNG IN KOSTEN PRO JAHR.....	86
ABBILDUNG 53: DARSTELLUNG DER ENERGIEBILANZ (ENDENERGIE) UND DES GESAMTEN PRIMÄRENERGIEBEDARF PRO JAHR.....	87
ABBILDUNG 54: DARSTELLUNG DER UMWELTBELASTUNG IN ÄQUIVALENTEN CO ₂ -EMISSIONEN UND UMWELTBELASTUNGSPUNKTEN PRO JAHR	87
ABBILDUNG 55: GRAFIKEN IM TABELLENBLATT TRANSFORMATIONSPFAD.	88
ABBILDUNG 56: ERKLÄRUNGEN AUF DEM TABELLENBLATT TRANSFORMATIONSPFAD	89
ABBILDUNG 57: DARSTELLUNG SOLARKOLLEKTOREN MODELL	90
ABBILDUNG 58: DEFINITION JAZ.....	92
ABBILDUNG 59: GESAMTOPTIMIERUNG BEI NEUBAUTEN	93
ABBILDUNG 60: GESAMTOPTIMIERUNG BEI BESTEHENDEN BAUTEN	95
ABBILDUNG 61: DYNAMISCHE VISKOSITÄT η DER FLUIDE	107
ABBILDUNG 62: DICHTE ρ DER FLUIDE.....	107
ABBILDUNG 63: WÄRMELEITFÄHIGKEIT λ DER FLUIDE	108
ABBILDUNG 64: SPEZIFISCHE WÄRME c DER FLUIDE	108

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 1: MESSUNGEN PH-WERTE AN BESTEHENDEN EWS-ANLAGEN	53
TABELLE 2: EIGENSCHAFTEN VERSCHIEDENER FLUIDE.....	54
TABELLE 3: PARAMETER IM TOOL BODENTEMPERATUR.....	73
TABELLE 4: RESULTATE FÜR UNTERSCHIEDLICHE VARIANTEN DER SONDEN-ANZAHL UND -TIEFE	75
TABELLE 5: ZUSTAND HEUTE	76
TABELLE 6: ZUSTAND WENN ALLE GEBÄUDE MIT EWS BEHEIZT WERDEN	76
TABELLE 7: RESULTATE VERSCHIEDENER GEMEINDEN.	78
TABELLE 8: GEFRIERPUNKTE DER FLUIDE	106

2 Ausgangslage

In der Schweiz werden momentan jährlich etwa 16'000 neue Anlagen mit Wärmepumpen installiert (zusätzliche werden verkauft, als Ersatzgeräte für bestehende Wärmepumpen). Der totale Bestand an Wärmepumpen-Anlagen betrug Ende 2013 ca. 224'650 Stück. Diese verbrauchten im Jahr 2013 1737 GWh Elektrizität und damit ca. 3 % des inländischen Stromverbrauchs [1]. Die Zahl der Wärmepumpen-Anlagen könnte sich bis im Jahr 2020 etwa verdoppeln, da vermehrt auch Wärmepumpen im Sanierungsmarkt eingesetzt werden sollen [2], [3].

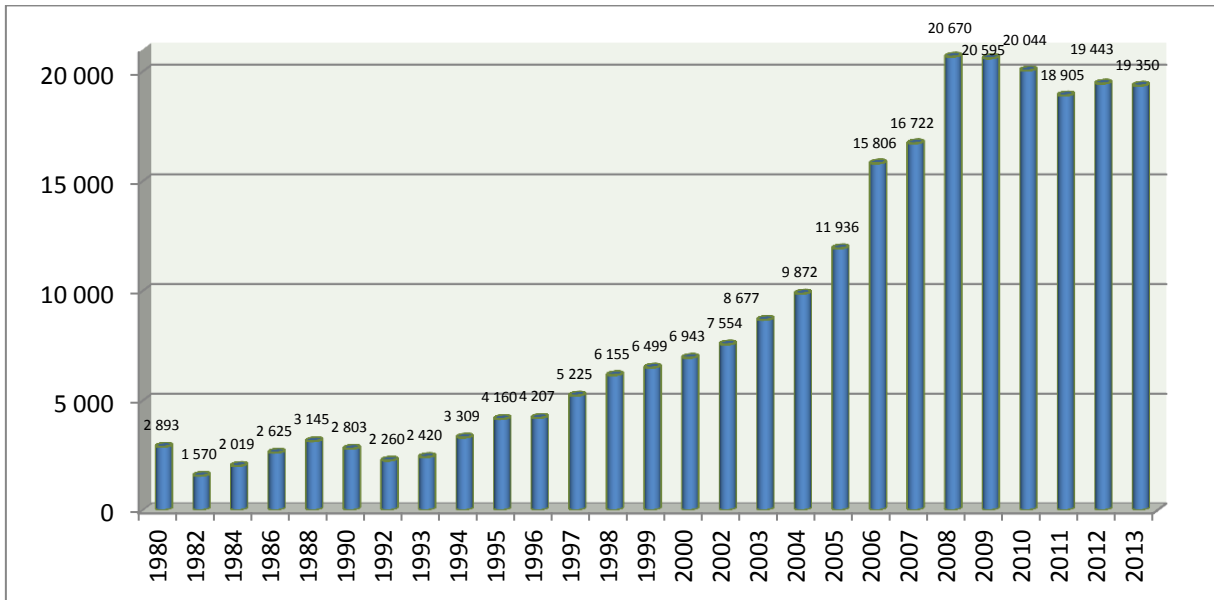


Abbildung 1: Verkaufte Wärmepumpen pro Jahr in der Schweiz [4]

Bei Neubauten werden Schätzungen zufolge gegen 80 % mit einer Wärmepumpe als Wärmeerzeugung ausgestattet. Allerdings seien diese nicht immer optimal geplant, installiert und betrieben. [5] Zudem werden nach wie vor viele Luft/Wasser-Wärmepumpen verkauft, was sich in schlechteren Jahresarbeitszahlen und vor allem in einem deutlich höheren Leistungsbedarf an Strom an kalten Tagen auswirkt. Damit werden die Ziele der Energiestrategie 2050 des Bundes [6], insbesondere der Ausstieg aus der Kernenergie, erschwert. Deswegen soll die Effizienz der Stromverwendung gefördert werden und es soll mehr Strom (und Energie insgesamt) aus regenerierbarer Energie erzeugt werden. Insbesondere aus diesem Grund müssen neue Wärmepumpenanlagen so effizient wie möglich sein, was sich in einer möglichst hohen Jahresarbeitszahl ausdrückt. Damit kann der Mehrbedarf an Strom mit Massnahmen zur Effizienzsteigerung und dem Ersatz von Elektro-Direktheizungen, die heute knapp 9 % des Stromverbrauches verursachen [7], kompensiert werden.

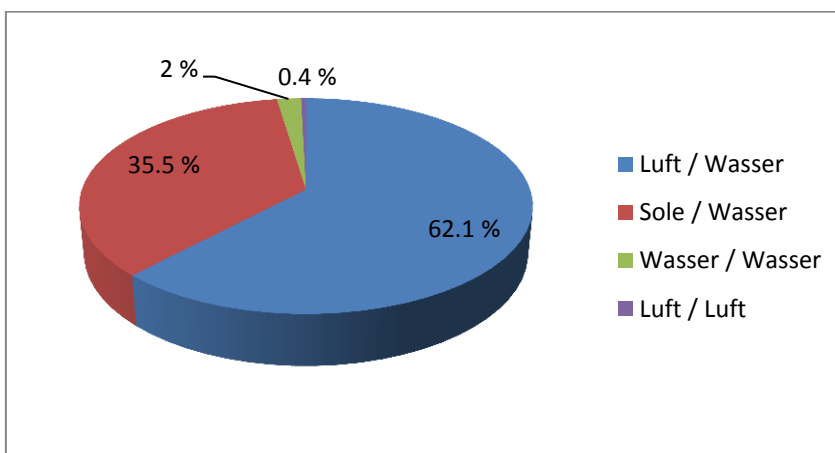


Abbildung 2: Art der verkauften Wärmepumpen im Jahr 2013 in der Schweiz [4]

Bei Altbauten werden nach wie vor viele Öl- und Gaskessel ersetzt, ohne die Kesseleratz als Chance für eine Umstellung auf Erdwärme zu nutzen. Hier besteht ein nach wie vor grosses Potential. Deswegen werden nach wie vor viele Öl- und Gaskessel verkauft, was die Erreichung der Zielsetzungen des Bundes [8] im Bereich Treibhausgasemissionen erschwert.

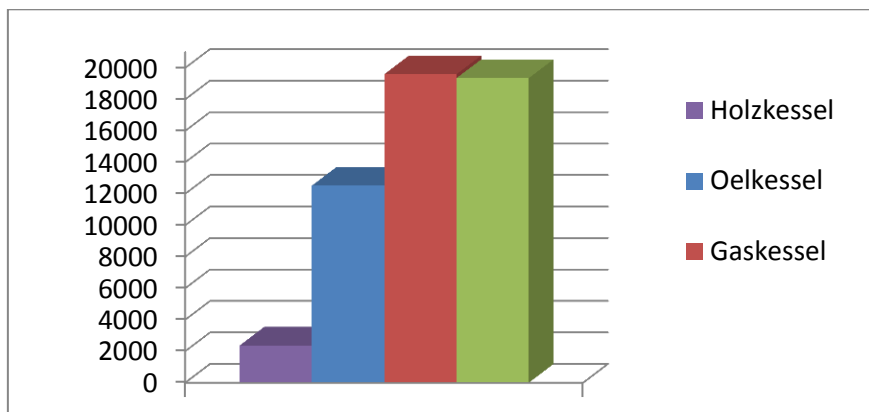


Abbildung 3: Art und Anzahl der verkauften Wärmeerzeuger im Jahr 2013 in der Schweiz [4]

Mit der Publikation der SIA-Norm 384/6 Erdwärmesonden (2010) wurde eine Basis für die Auslegung mit dem Ziel geschaffen, nach dem Stand der Technik funktionierende Erdwärmesonden zu garantieren. Der Zielhorizont ist dabei auf eine 50-jährige Betriebszeit gelegt. Diese Norm kann zweifellos eine Sicherstellung der Qualität bei der Planung von Erdwärmesonden erreichen. Aufgrund des Inhalts und der Zielsetzung der Norm wird damit aber nicht sichergestellt, dass energetisch optimierte Anlagen erstellt und diese im Betrieb optimal betrieben werden. In der Praxis werden zudem viele, wenn nicht die meisten kleinen Anlagen nach wie vor aufgrund von Erfahrungswerten, Faustregeln oder mittels Angaben der Lieferanten der Wärmepumpen geplant. Die SIA-Norm 384/6 wird wohl nur bei grösseren Anlagen eingesetzt, aber sobald Erdwärmesonden-Felder geplant werden, ist die Norm wiederum nicht ausreichend. Dann sind Simulationsrechnungen erforderlich und es braucht Spezialisten-Wissen, um solche Anlagen korrekt auszulegen. Zudem zeigt sich, dass die Berechnungsmethode nach SIA 384/6 recht kompliziert ist und es viele Fehlermöglichkeiten gibt.

In der Praxis zeigen sich weiter Herausforderungen bei der Sicherstellung der Qualität der erstellten Erdwärmesonden. Diese Probleme betreffen insbesondere die Hinterfüllung.

Bisher wurde davon ausgegangen, dass Erdwärme eine regenerative und unbegrenzt zur Verfügung stehende Energiequelle ist (z.B. [9], Seiten 4 und 5). In Wirklichkeit ist der geothermische Wärmestrom von unten nur klein, und von oben strömt nur Wärme nach, wenn der Untergrund stark abgekühlt wird. Dann aber funktioniert eine Erdwärmesonde nicht mehr, weil es Frost geben würde. In letzter Zeit ist ein zunehmender Konsens in der Fachwelt zu erkennen, dass es mittel- und längerfristig Probleme geben könnte, wenn zu viele Erdwärmesonden in einem Gebiet erstellt werden [10].

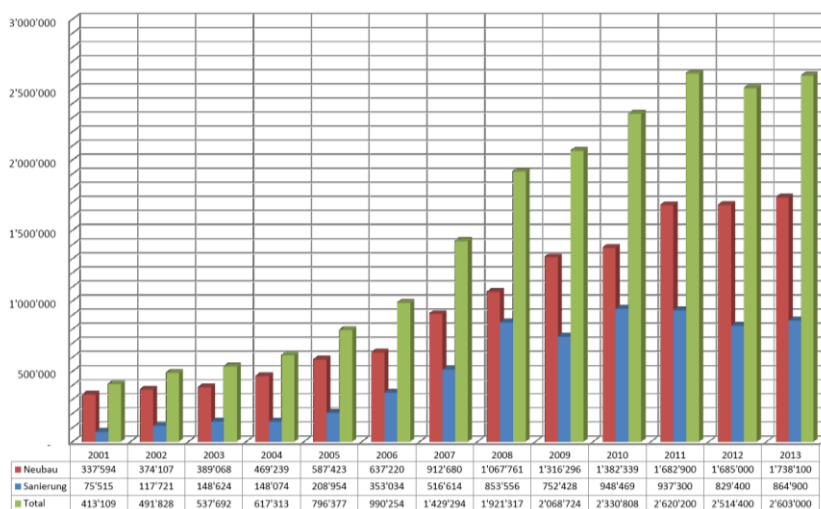


Abbildung 4: Anzahl der abgeteuften Bohrmeter Erdwärmesonden im Jahr 2013 in der Schweiz [4]

3 Ziel des Projektes

Das Ziel des Projekts ist, das Optimierungspotential bei kleinen Wärmepumpen-Anlagen mit Erdwärmesonden klar heraus zu schälen und für die Praxis umsetzbar zu machen. Unter Optimierung wird dabei vorrangig die energetische Optimierung verstanden. Der Fokus bei diesem Projekt liegt dabei auf den Erdwärmesonden als solches. Der Strom-Mehrbedarf, der durch (viele) zusätzliche Wärmepumpen-Anlagen verursacht wird, soll so klein wie möglich bleiben.

Gleichzeitig müssen solche Wärmepumpen-Anlagen und insbesondere auch die Erdwärmesonden qualitativ einwandfrei erstellt werden. Dazu gehört die Sicherstellung der erforderlichen resp. gewünschten Funktionalität, aber auch die Sicherstellung einer langen Lebensdauer. Insbesondere die Erdwärmesonden sollten so erstellt und genutzt werden, dass eine mindestens 50 Jahre dauernde Lebensdauer, besser aber eine noch längere Lebensdauer von bis zu 100 Jahren, sicher erreicht werden kann.

Die Sicherheit und Vermeidung von Risiken sind weitere Ziele, die zu beachten sind. Hierzu gehören Risiken bei der Bohrung, technische Risiken welche die Lebensdauer der EWS verkürzen oder deren Funktionalität oder Effizienz verringern, sowie Risiken für Natur und Umwelt. Sicherheitsaspekte betreffen insbesondere die Vermeidung von Legionellen bei der Warmwasser-Erwärmung. Risiken für Natur und Umwelt betreffen vor allem das Grundwasser. Hier muss sichergestellt werden, dass weder der Bohrvorgang als solches, noch die (sehr lange dauernde) Existenz der Bohrung und der Betrieb der EWS Risiken verursachen, welche die chemischen oder physikalischen Eigenschaften des Grundwassers heute oder in Zukunft negativ beeinflussen.

Ein weiteres Ziel ist die Systemoptimierung von Gebäude, Solarenergienutzung, Wärmeverteilsystem, Kühlsystem und Wärmepumpe, sowie der Warmwasser-Erwärmung, mit der Wärmeerzeugung und der Erdwärmesonde.

Nicht zuletzt müssen auch wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden. Die gesamten Jahreskosten einer Wärmeerzeugungsanlage mit EWS sollen tragbar sein und im Vergleich zu anderen Systemen der Wärmeerzeugung nicht höher werden. Hier ist es das Ziel aufzuzeigen, dass resp. ob sich Investitionen in Erdwärmesonden und Massnahmen zur Optimierung wirtschaftlich lohnen oder nicht.

4 Vorgehen / Methode

Das Vorgehen im Projekt umfasste folgende Schritte:

Mit einer umfangreichen Literaturstudie wurde das bestehende Wissen im In- und Ausland über die Optimierung von Erdwärmesonden zusammen getragen.

Mit Experteninterviews und Befragungen bei Bohrfirmen sowie in Gesprächen mit Fachleuten wurde weiteres Wissen über den Stand der Technik und das mögliche Optimierungspotential erhoben.

Aufgrund der Resultate wurde dann nach möglichen Fluiden für die Nutzung in Erdwärmesonden gesucht. Für die empfehlenswerte Mischung von Wasser und Ethanol wurden die erforderlichen Stoffdaten aus der internationalen Literatur erhoben und umgerechnet, sowie im Vergleich mit heute üblichen Fluiden dargestellt. Mit verschiedenen Bundesstellen wurden Gespräche geführt, um eine Sole auf Ethanol-Basis anbieten zu können, welche nicht der VOC-Abgabe unterliegt.

Um den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials auf die Fluidtemperatur berechnen zu können, wurde durch den Partner Huber Energietechnik AG eine vertiefte theoretische Studie erarbeitet [11]. Für die Hinterfüllung wurde nach empfehlenswerten Produkten gesucht und diese mit deren Eigenschaften in einer Tabelle dargestellt. Es wurde, für die Qualitätssicherung, ein Excel-Tabellenblatt erstellt, um die erforderlichen Mengen an Hinterfüllungsmörtel einfach berechnen zu können. Ansatzweise wurde nach weiteren Möglichkeiten gesucht, eine Qualitätsüberprüfung bei der Hinterfüllung vorzunehmen.

In diesem Zusammenhang wurde auch eine Übersicht über die kantonalen Formulare für die Bewilligung von Erdwärmesonden erstellt. Damit sollte eruiert werden, wie weit mit der Bewilligung eine Qualitätskontrolle vorgenommen werden kann.

Um die hydraulischen Verhältnisse in den Sonden-Rohren optimieren zu können, wurden detaillierte theoretische Berechnungen der Strömungsverhältnisse und des Wärmeübergangs im Rohr und die daraus folgende Berechnung der Leistungszahl der Wärmepumpe vorgenommen.

Für die Frage der Notwendigkeit der Regeneration des Bodens wurde ein vereinfachtes Modell erstellt, welches eine zylindrische, zweidimensionale Berechnung erlaubt. Mit diesem Modell wurde ein Excel-Berechnungsblatt erstellt, um für unterschiedliche mittlere EWS-Abstände die Abkühlung des Bodens über beliebige Zeit berechnen zu können. Anhand von 5 Ausschnitten aus den GIS-Daten des Kantons Zürich wurde ermittelt, was erwartet werden muss, bei den heute vorhandenen EWS und falls in Zukunft alle Gebäude mit EWS beheizt würden.

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit wurde ein nutzerfreundliches Excel-Tool erstellt. Diese kann verschiedene Varianten berechnen, auch die Kombination einer Wärmepumpe mit EWS mit einer solarthermischen oder einer Photovoltaik-Anlage. Die Berechnung der Jahreskosten berücksichtigt bei PV-Anlagen auch den Verkauf des PV-Stromes (KEV-Modell oder Solarstrom-Börse) oder die Eigennutzung. Daneben nimmt das Tool auch einen Vergleich der Ökologie der verschiedenen Variante vor.

5 Ergebnisse / Erkenntnisse

5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die wesentlichsten Ergebnisse sind in den folgenden 24 Thesen zusammen gefasst:

1. Jedes neue und bestehende Gebäude ist für eine Wärmepumpe geeignet.
2. Wärmepumpen sind ein zentrales Element der Energiewende und sollen immer eingesetzt werden, ausser wo Nah- oder Fernwärme vorhanden ist oder falls mit Holz oder zu 100 % mit thermischer Solarenergie geheizt werden soll.
3. Falls Erdwärmesonden gebohrt werden dürfen, sollten solche erstellt werden. Sie stellen, neben Wärmepumpen-Anlagen mit Grundwasser- oder Abwärmenutzung, langfristig das beste System dar (insbesondere im Vergleich mit Luft/Wasser-Wärmepumpen).
4. Erdwärmesonden (wie auch Grundwasser) können wirtschaftlich zum Heizen, für Warmwasser und idealerweise auch zum Kühlen genutzt werden. Dazu soll wo möglich eine Flächenheizung, zum Kühlen vorteilhaft in der Decke, geplant werden.
5. Eine zusätzliche elektrische Spitzenlastabdeckung oder elektrische Warmwasser-Aufwärmung muss in jedem Fall vermieden werden.
6. Erdwärmesonden (EWS) müssen sorgfältig geplant werden (→ SIA 384/6) und mit genügend Laufmeter Länge gebohrt werden. Die SIA 384/6 sollte aber aktualisiert und das Berechnungsverfahren vereinfacht werden.
7. Ein Längen-Zuschlag von ca. 20 % ist sinnvoll, um die zukünftige Verbesserung der Leistungsziffer einer nächsten Wärmepumpen-Generation zu berücksichtigen, da EWS deutlich länger halten als eine Wärmepumpe.
8. Bis ca. 120 m Tiefe sind Sonden-Rohre DN 32 ideal, danach sollte auf DN 40 gewechselt werden. Es soll eine turbulente Strömung im Rohr erreicht werden. Die Temperaturspreizung Vor-/Rücklauf in der EWS soll bei wenig tiefen EWS 3 °C sein, ab 200 m EWS-Tiefe wird vorteilhaft eine höhere Spreizung (bis 5 °C) gewählt.
9. Ab ca. 250 m Tiefe ist eine Aufteilung auf mehrere Erdwärmesonden zu empfehlen. Andernfalls müssen die Bohrrisiken geprüft und ev. druckfeste Sonden-Rohre (höher als PN 16) gewählt werden.
10. Die Umwälzpumpe für das Sonden-Fluid soll nicht mehr als 3 % der elektrischen Leistung der Wärmepumpe (Kompressor) benötigen, eine leichte Unterdimensionierung gibt keine Probleme, eine Überdimensionierung (ein "Angstzuschlag") ist unnötig und kontraproduktiv.
11. Um beim Warmwasser trotz Temperaturen unter 60 °C hygienische Probleme (Legionellen) zu vermeiden, soll das Warmwasser nicht gespeichert, sondern im Durchlaufverfahren resp. mit einer Frischwasser-Station erwärmt werden. Dazu ist ein technischer Speicher sinnvoll, um die Energie (Wärme) für die Spitzen der WW-Erwärmung bereit zu stellen.
12. Auf einen technischen Speicher für die Heizung (Warmwasser siehe Pt. 11) ist wenn möglich zu verzichten, dieser kostet unnötig Geld und verschlechtert die Jahresarbeitszahl. Er kann höchstens bei Altbauten mit Heizkörpern Sinn machen, um Stromversorgungsunterbrüche und Abschaltungen in Spitzenlastzeiten des Stromnetzes zu überbrücken.
13. Für eine bessere Jahresarbeitszahl und um das Kühlen und/oder Regenerieren zu verbessern, sollten Erdwärmesonden mit thermisch gut leitendem Mörtel hinterfüllt werden (Wärmeleitfähigkeit $\lambda \geq 2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$).
14. Um langfristige Probleme sicher zu vermeiden, muss dieser Mörtel frost- und erosions sicher sein. Bei üblicher Auslegung und Sole als Fluid in der Erdwärmesonde kann ein Betrieb in den Frostbereich nicht ausgeschlossen werden, was heute übliches Hinterfüllmaterial irreversibel schädigen kann.

15. Mit thermisch verbesserter Hinterfüllung und 30 % Zuschlag auf die übliche, nach SIA 384/6 erforderliche Sondentiefe bei Sole kann reines Wasser als Sondenfluid genutzt werden. Damit ergibt sich eine wesentliche Verbesserung der Jahresarbeitszahl, was die Mehrinvestition amortisiert. Die Wärmepumpe muss gegen Frost im Verdampfer geschützt werden.
16. Alternativ kann ein Wasser/Ethanol-Gemisch mit max. 20 % Vol. Ethanol gewählt werden, welches neu unter dem Markennamen *Pumpetha* angeboten wird und ökologische wie energetische Vorteile aufweist.
17. Sonden-Rohre aus PE (PE100, PE100-RC) sollten mit nicht mehr als 20 °C beaufschlagt werden, sonst nimmt deren Druckfestigkeit und Lebensdauer ab. Soll mit höheren Temperaturen regeneriert (oder Wärme gespeichert) werden, sind Rohre aus temperaturbeständigem Material (vernetztes PE, z. B. PE-Xa, PE100-RT) zu wählen.
18. In dicht überbauten Gebieten muss langfristig damit gerechnet werden, dass die Erdwärmesonden regeneriert werden müssen. Ideal dazu eignen sich Hybrid-Solarkollektoren, welche Strom (Photovoltaik) und gleichzeitig Niedertemperatur-Wärme für die EWS-Regeneration gewinnen.
19. Mit Photovoltaik und einer effizienten Wärmepumpe kann in vielen Fällen und praktisch kostenneutral (Jahreskosten) ein Null-Wärmeenergie-Haus in der Jahresbilanz erreicht werden.
20. Die Kombination einer Wärmepumpe mit einer konventionellen thermischen Warmwasser-Solarkollektoren-Anlage macht ökonomisch und ökologisch keinen Sinn.
21. Die Hydraulik der Heizung (Wärmeverteilung) und der Warmwasser-Aufbereitung (mittels einer Frischwasserstation oder im Durchlaufprinzip) ist so zu wählen, dass auf Mischventile verzichtet werden kann. Die Wärmepumpe lädt entweder den (technischen) Speicher für das Warmwasser oder ist im Heizbetrieb bei tiefer Vorlauftemperatur. Die Regulierung erfolgt über die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe (elektronisches Expansionsventil) und mit Durchgangs- und Umstellventilen.
22. Alle Umwälzpumpen müssen korrekt, d. h. nicht überdimensioniert sein, wo sinnvoll mit einer stufenlosen Regulierung der Durchflussmenge (insb. bei geregelten Wärmepumpen und im Vorlauf Heizsystem).
23. Bei Wärmepumpen mit Erdwärmesonden ist eine Nachtabsenkung kontraproduktiv, da eine erhöhte Vorlauftemperatur erforderlich wird. Hingegen kann eine Überdimensionierung der Anlage um ca. 20 % eine Anpassung des Betriebes an kurzzeitige Versorgungsengpässe im Netz ermöglichen (Demand Side Management, um temporär die Netzbelastung zu reduzieren).
24. Für die Kontrolle des Betriebes und dessen Optimierung sollten eine Messung des Stromverbrauches der Wärmepumpe (inkl. Umwälzpumpe des Sonden-Fluides) und der gelieferten Nutzwärme vorhanden sein, um die Jahresarbeitszahl berechnen zu können. Diese sollte jährlich erhoben und verglichen werden, genauso wie der Wärmeenergie-Verbrauch.

Mit der Berücksichtigung dieser Empfehlungen könnte mittelfristig sehr effizient ein grosser Teil des Wärmeenergiebedarfes der Schweiz mit Erdwärmesonden nachhaltig abgedeckt werden. Dank erreichbaren Jahresarbeitszahlen von bis zu 6 bei Neubauten und 4 bis 5 bei Altbauten könnte ein grosser Teil des fossilen Brennstoffbedarfes substituiert werden, ohne einen grossen Mehrbedarf an elektrischer Energie zu erzeugen. Auch die zusätzlich notwendige elektrische Spitzenleistung an kalten Tagen könnte in einem abdeckbaren Bereich bleiben. Dies insbesondere, wenn bei Altbauten auch die Wärmedämmung moderat verbessert wird, wodurch in der Kombination einer wärmetechnischen Sanierung und dem Einsatz einer guten Wärmepumpe mit optimierten Erdwärmesonden anstelle eines Öl- oder Gaskessels der Endenergiebedarf für Wärme etwa um den Faktor 10 reduziert werden kann (siehe dazu das Beispiel in [12]). Bei Neubauten kann, wie in These 19 gesagt, ohne die Jahreskosten zu erhöhen, mit der heutigen Technik und bei den heutigen Finanzierungskosten, ohne weiteres ein Null-Heizenergiehaus erreicht werden.

Sowohl die Branche wie auch die Endkunden müssen entsprechend informiert und motiviert werden. Dabei ist den Kunden aufzuzeigen, dass eine Mehrinvestition in eine nachhaltige Wärmeerzeugung eine höhere Rendite und eine bessere Sicherheit bietet als die meisten Anlageprodukte der Finanzbranche.

5.2 Literaturstudie

Aus der Literaturstudie konnten die Grundlagen für die nachfolgende Befragung der Experten gewonnen werden. Es wurden neben Literatur aus der Schweiz auch Berichte aus Deutschland ausgewertet. Die Zusammenfassung der Ergebnisse aus den ausländischen Studien:

Die Optimierung von Erdwärmesonden kann demnach insbesondere in den Bereichen Sonden-Fluid, Regeneration, Hinterfüllung und Rohrmaterial erfolgen. Daneben wurden noch Heat pipe-Erdwärmesonden untersucht.

Sonden-Fluid

Gemäss dem Anhang A6 der BAFU-Schrift Wärmenutzung aus Boden und Untergrund ist eine ganze Liste von Wärmeträgerflüssigkeiten für Erdwärmesonden zugelassen [13]. In der Praxis wird bis heute jedoch überwiegend, wenn nicht fast ausschliesslich, eine Sole aus Wasser und 20 bis 25 % Ethylenglykol eingesetzt. Aus Gründen des Korrosionsschutzes müssen Inhibitoren beigegeben werden. Meist wird die Sole auch eingefärbt. Diese Mischung ist weitaus genügend frostsicher, und erlaubt ein Betrieb der Anlage auch in den Minusbereich auf Seite Wärmequelle und deutlich unter die minimale Temperatur, welche gemäss Auslegung nach SIA 364/6 [14] nach 50 Jahren nicht weniger als $-1,5\text{ °C}$ betragen sollte. Eine Mischung mit Konzentrationen unter 20 % ist nicht möglich, da sonst der Korrosionsschutz nicht mehr gewährleistet werden kann, da die Inhibitoren zu stark verdünnt wären. Clariant z.B. schreibt deshalb eine minimale Volumenkonzentration von 20 % (entspricht einer Frostsicherheit von -9 bis -10 °C) vor [15]. Neben dieser Mindest-Konzentration sind Nachteile dieser Fluide die Erhöhte Zähigkeit und die verminderte Wärmekapazität, im Vergleich mit reinem Wasser. Dies erhöht den Energiebedarf für die Umwälzpumpe. Daneben kostet diese Sole natürlich mehr als reines Wasser, sie muss bereits vor dem Einfüllen in die Erdwärmesonden-Rohre gemischt werden und die Konzentration muss gelegentlich überprüft werden. Nach ca. 20 Jahren, typischerweise also wenn die Wärmepumpe auch gegen ihr Lebensende kommt, muss die Sole ausgetauscht werden. Eine einmal mit solcher Sole gefüllte Erdwärmesonde kann nicht mehr mit reinem Wasser gefüllt werden, da die verbleibenden Ethylenglykol-Reste zu einer Korrosivität des Fluides führen würden.

Regeneration des Bodens

Ob es eine Regeneration des Bodens braucht und bei welchen Bedingungen war bis heute umstritten. Aufgrund der Dissertation Eugster [16] konnte angenommen werden, dass eine Erdwärmesonde zu einem bleibenden Temperaturtrichter führt, der sich nach 3 bis 5 Betriebsjahren stabilisiert und dann zu einer um ca. 1 °C tiefere Bodentemperatur um die Sonde führt. Die gewonnenen Daten stammen von einer Einzelsonde, bei der in weitem Umfeld keine weiteren Erdwärmesonden vorhanden waren. Zudem war die Leitfähigkeit des Erdreiches vergleichsweise hoch, eventuell auch infolge Grundwassers.

Liegen die Erdwärmesonden dagegen nahe beieinander (kleiner als 15 m Abstand), so muss gemäss SIA 384/6 [14] eine Verlängerung der Erdwärmesonde geplant werden, um die geringere Leistung infolge gegenseitiger Beeinflussung kompensieren zu können. Eine theoretische Untersuchung kam aber schon 1999 zum Schluss, dass sich auch 30 m auseinanderliegende Erdwärmesonden langfristig beeinflussen [17]. In dieser Arbeit wird postuliert, dass langfristig aber Energie von der Erdoberfläche nach unten nachfliesse, was eine natürliche Regeneration ermögliche.

Ebenso ist es unwidersprochen, dass Erdwärmesonden-Felder regeneriert werden müssen und können, ansonsten kann in grossen Feldern eine Temperaturabsenkung bis zu einem Grad Celsius pro Jahr erfolgen [18]. Erdwärmefelder sind Anordnungen von 4 oder mehr Erdwärmesonden in einem Abstand unter 15 m. Solche Erdsondenfelder können auch als saisonale Speicher betrachtet resp. genutzt werden, wenn etwa gleich viel Wärmebedarf im Winter und Kühlbedarf im Sommer besteht [19]. Erdwärmefelder werden heute mit Abständen von 6 bis 8 m geplant, und mit bis zu 60 und mehr Erdwärmesonden. Der optimale Abstand wird mit 8 m angegeben.

Infolge der zunehmenden Anzahl an Erdwärmesonden kommt es heute zu ungeplanten Anordnungen vieler Erdwärmesonden an einem Ort. Hier stellt sich die Frage, ab wann sich diese Erdwärme-

sonden gegenseitig beeinflussen und wie sich dies auswirkt. Die Fachwelt ist sich einig, dass die Zeitdauer, in der eine gegenseitige Beeinflussung spürbar ist, stark zunimmt, je grösser der Abstand zwischen den Erdwärmesonden ist. Ebenso verlängert sich diese Zeit deutlich, je tiefer die Erdwärmesonden sind. Deswegen ist es bis heute schwierig, diese Beeinflussung zu messen resp. deren Einflüsse beobachten zu können, weil die meisten der heute vorhandenen Erdwärmesonden erst wenige Jahre bis max. 30 Jahre alt sind und die Bildung der Erdwärmesonden-Felder neu ist.

In der theoretischen Untersuchung [20] wurde schon 2002 festgestellt, dass bereits bei 3 Erdwärmesonden mit 100 m Tiefe und mit Abstand 10 m eine Verringerung der möglichen Entzugsleistung von ca. 50 % nach 80 Jahren eintritt, wenn nicht regeneriert wird. Dieser Leistungsabfall wird deutlich verringert, wenn ein Aquifer (Grundwasserstrom) von mehr als 20 m vorhanden ist. Mit weiteren Berechnungen wird festgestellt, dass eine Einzelsonde einen Temperaturabfall an der Bohrlochwand von bis zu 5 K verursacht, gegenüber einem ungestörten Boden. Ein Temperaturabfall um ca. 2 K stellt sich dabei fast sofort (im ersten oder zweiten Jahr) ein, der grösste Teil dieses Temperaturabfalls wird in den ersten 20 Jahren erreicht, der Gleichgewichtszustand stellt sich je nach Bohrlochtiefe erst nach 100 bis 200 Jahren ein. Diese Resultate stehen etwas im Gegensatz zu den Messungen von Eugster [16]. Die Berechnungen in [20] zeigen auch, dass bereits bei drei Erdwärmesonden eine Regeneration einen positiven Einfluss hat.

Neuere Berechnungen zeigen, dass bei Heiz- und Kühlsystemen nicht 100 % der dem Boden entzogenen Energie regeneriert werden muss (resp. als Kühlenergie genutzt werden kann). Es erfolgt ein Wärmeeintrag in geringem Mass von unten (geothermischer Wärmefluss), von der Seite und eventuell von oben. Deswegen erhält man das beste System, wenn 50 bis 70 % der entzogenen Wärme wieder eingebracht werden [21].

Eine ganz neue Untersuchung [10] kommt nun zum Schluss, dass sich in städtischen Gebieten Erdwärmesondenfelder bilden, wenn ein grosser Teil der Wärme über Erdwärmesonden gewonnen werden soll. Diese müssen langfristig regeneriert werden, oder es droht eine zu starke Abkühlung der oberen Erdschichten. Sonnenenergie von oben kann dabei nur nachfliessen, wenn sich ein negativer Temperaturgradient nach unten einstellt. Dies würde aber zu viel zu tiefen Temperaturen im Untergrund führen. Langfristig müssen deswegen viele der Erdwärmesonden, auch einzelne, regeneriert werden. Dabei haben Erdwärmesonden bereits einen gegenseitigen Einfluss, wenn sie weniger als die Hälfte der Tiefe voneinander entfernt sind. Mit zunehmender Nähe wird der Einfluss grösser und er macht sich vor allem deutlich rascher bemerkbar. Nach SIA 384/6 [14] ausgelegt können Erdwärmesonden 50 Jahre lang betrieben werden. Im ungünstigen Fall ist dann aber die Wärmereserve des Bodens aufgebraucht und die Anlage muss ohne Regeneration stillgelegt werden.

Hinterfüllung (Verpressung) der Erdwärmesonden

Bei der Hinterfüllung muss ein frostsicheres Material angewendet werden [22], [23]. Die Wärmepumpe, kombiniert mit einer solegefüllten Erdwärmesonde, stellt ein technisch bestens geeignetes System dar, um im Kältekreis Temperaturen unter Null Grad Celsius zu erzeugen. Dies kann erfolgen, wenn die Nutzer mehr Wärme verbrauchen als der Durchschnittsnutzer (ein sehr häufiger Fall), die Auslegung falsch gemacht wurde, die EWS ungenügend hinterfüllt wurde, das Gebäude erweitert wird oder wenn an eine bestehende EWS eine neue Wärmepumpe mit besserem COP angeschlossen wird. Frost in der EWS kann zu irreversiblen Schäden führen [24], da die heute verwendeten Hinterfüllungsmaterialien meist nicht frostbeständig sind. Schon wenige Frostzyklen können zum kompletten Auseinanderbrechen des Mörtels führen [25], [26]. Bei starkem Frost könnte zudem das umliegende Gestein geschädigt werden, oder es treten Schäden an der Erdwärmesonde oder an der Oberfläche auf [27], [28]. Damit kann die Hinterfüllung ihre Funktionen [29] nicht mehr erfüllen.

Insbesondere wenn zusätzlich regeneriert oder gekühlt werden soll, ist ein thermisch verbessertes Hinterfüllmaterial vorteilhaft und klar zu empfehlen. Ideal ist eine Wärmeleitfähigkeit, welche etwa der Leitfähigkeit des umgebenden Erdreiches entspricht [30]. Damit kann die Effizienz des Gesamtsystems merklich erhöht werden [31], [32], da der thermische Bohrlochwiderstand hin zum umgebenden Erdreich signifikant reduziert werden kann.

Die Untersuchung [32] zeigt auch, mit realen Versuchskörpern, dass in der Hinterfüllung kleinere oder auch grössere Fehlstellen auftreten können. Diese können mit heutigen Messmethoden in bestehenden Erdwärmesonden nur teilweise nachgewiesen werden. Die Ursache ist nicht klar, vermu-

tet werden Wasser-Einschlüsse. Die Qualitätssicherung der Hinterfüllung muss weiter untersucht und verbessert werden.

Heat pipe-Erdwärmesonden (auch: Phasenwechsel-Sonden, CO₂-Sonden)

In der Literaturstudie wurde auch untersucht, inwieweit Erdwärmesonden, welche auf dem Heat pipe-Prinzip beruhen, Vorteile haben könnten. Solche Erdwärmesonden wurden in Deutschland [33] und Österreich untersucht und in einigen Fällen realisiert. Die Technik befindet sich im Pilotstadium für Erdwärmesonden bis ca. 100 m Tiefe und in Entwicklung für tiefere EWS [34].

In der Schweiz ist nur eine Anlage bekannt [35], ansonsten hat sich das System bisher nicht durchgesetzt. Dies mag an der bisher begrenzten Tiefe auf max. 100 m solcher Anlagen liegen, was nicht den in der Schweiz üblichen Tiefen von Erdwärmesonden entspricht. Tiefere Heat pipe-Sonden sind mit CO₂-Füllung nicht ohne weiteres möglich, da der Druck im Rohr zu gross wird. Auch so sind entweder Rohre aus Edelstahl notwendig, oder druckfeste PE-Rohre. Solche Rohrmaterialien sind teuer, deren Beständigkeit ist unklar (Korrosion je nach Bodenbestandteilen bei Edelstahlrohren) oder sie waren bisher nicht auf dem Markt. Andere Fluide wie Ammoniak ergeben tiefere Drücke, haben aber wesentliche Nachteile wie Giftigkeit und Geruch. Ein weiteres bisher in der Praxis nicht gelöstes Problem ist die Nutzung der Heat pipe-Sonden zur Kühlung oder zur Regeneration des Erdreiches. Hier sind Lösungsansätze denkbar, deren Umsetzung ist aber schwierig und bleibt für praxisingerechte Lösungen zu zeigen.

Hauptvorteil der Heat pipe-Sonden ist der Wegfall der Sondenfluid-Umwälzpumpe und die damit verbundene Stromeinsparung.

Ebenso können sich Vorteile im Verdampfer ergeben, dessen Grädigkeit kleiner wird, weil der Wärmeübergang des kondensierenden CO₂ besser ist als bei flüssiger Sole [36]. Hier kann eine grosszügige Dimensionierung des Verdampfers aber auch bei konventionellen Erdwärmesonden helfen. Zudem kann dieser Vorteil nur genutzt werden, falls das verdampfte CO₂ bis in den Verdampfer der Wärmepumpe geführt werden kann, oder (Normalfall) wenn eine gesplittete Wärmepumpe installiert wird und oben an der Heat pipe-Sonde der Verdampfer installiert wird. Dann wird aber die Füllmenge des Kältemittels deutlich vergrössert, was wiederum ein Problem darstellen kann. Falls ein Wärmetauscher oben an der Heat pipe-EWS installiert wird und ein Zwischenkreis zur (dann handelsüblichen) Wärmepumpe genutzt wird, fällt dieser Vorteil ganz weg. Gemäss [36] ergibt sich bei einer EWS mit dem Heat pipe-Prinzip im Stillstand auch eine Verschiebung von Wärme aus tieferen Erdschichten in höhere Erdschichten, da der Heat pipe-Effekt weiter wirkt. Dies ergebe eine bessere Regeneration der EWS. Aus unserer Sicht ist dies aber ein vorübergehendes Phänomen, sobald die tiefen Erdschichten genügend abgekühlt und die oberen genügend aufgewärmt sind, hört dieser Effekt logischerweise auf. Es wäre zu klären, wie lange dieser Effekt anhält und was der effektive Vorteil über eine lange Zeit ist.

Aus heutiger Sicht, infolge der sich abzeichnenden Notwendigkeit einer Regeneration in wohl recht vielen Fällen [37], sind Heat pipe-Erdwärmesonden nicht zu empfehlen, solange keine praxistaugliche Lösung nachgewiesen werden kann, welche auch die Nutzung zu Kühlung resp. Regeneration mit Heat pipe-Sonden ermöglicht. Zudem ist der energetische Vorteil bei korrekt dimensionierter Umwälzpumpe für das Sondenfluid und mit den heute vorgeschriebenen effizienten Umwälzpumpen nur noch sehr klein. In diesem Projekt wurde diese Technik denn auch nicht weiter verfolgt.

Rohrmaterial

In der Praxis werden heute überwiegend Sondenrohre der Grössen 32 x 2,9 mm und 40 x 3,7 mm aus PE-100 eingesetzt. Diese erreichen eine Druckstufe PN 16, entsprechend 16 bar. Dieses Material ist schweisssbar, beständig gegen alle heute eingesetzten Frostschutzmittel und die Einflüsse der Hinterfüllung und des Erdbodens. Es wird heute in der besser Rissfesten und zäheren Qualität PE 100-RC ("Resistance to crack") angeboten. Bei korrektem Einbau, Temperaturen im Fluid unter 20 °C und einer Druckbelastung unter 16 bar (Differenz Innen/Aussen) sollten Erdwärmesonden mit diesem Material erstellt 100 Jahre und länger halten [38]. Kurzzeitig und nicht wiederholt, z.B. während dem Einbau oder bei der Druckprüfung, können diese Rohre mit bis 21 bar Druck belastet werden.

Für Erdwärmesonden, die wiederholt höheren Temperaturen als 20 °C ausgesetzt werden, z.B. weil mit der Erdwärmesonde auch gekühlt werden soll oder weil eine Regeneration des Bodens ermöglicht werden soll, sollte ein temperaturfestes Material verwendet werden. Hierzu eignet sich vernetztes Polyethylen PE-Xa-100. Diese Rohre haben dieselben Eigenschaften und Abmessungen wie Erdwärmesonden aus PE-100, ausser dass dieses Material nicht geschweisst werden kann und eben höhere Temperaturen bis 50 °C aushält ohne an Lebensdauer zu verlieren. Der Sondenfuss ist bei diesen Sondenrohren nicht werkseitig geschweisst, sondern gebogen, was den Vorteil hat, dass keine Schweissbrauen innen den Durchgang verengen [32]. Für Verbindungen auf der Baustelle sind nichtlösbare Klemmfittiche möglich, diese sollten wenn möglich zugänglich bleiben.

Für tiefere Erdwärmesonden (zu empfehlen ab 250 m) kann eine sichere Erstellung mit Rohren der Druckstufe PN 16 nicht mehr immer gewährleistet werden. Hier sind Rohre mit höherer Druckstufe zu empfehlen. Heute sind zwei Lösungen auf dem Markt erhältlich: Sondenrohre aus PE 100-RC in der Druckstufe PN 20. Diese Rohre sind in den Abmessungen 40 x 4,5 mm erhältlich. Nachteil hier ist die dickere Wandstärke, welche infolge der geringeren Wärmeleitfähigkeit von PE den thermischen Bohrlochwiderstand erhöht, sowie der geringe Innendurchmesser, was zu einem höheren Druckverlust im Fluid führt. Dieser ist bei tiefen Erdwärmesonden infolge der höheren Durchsatzmengen ohnehin schon erhöht. Diese Rohre können bis max. 350 m Tiefe eingesetzt werden. Neu werden auch PE-Rohre aus einem verbesserten Material PE 100-RC/PA mit PN 32 angeboten, welche bis 320 m eingesetzt werden können [39].

Für tiefe Erdwärmesonden ab 300 m sind heute stahlarmierte Hochdrucksonden erhältlich. Diese sind innen aus PE-Xa gefertigt und dank der Stahldrahtarmierung bis zu Tiefen von 800 m und Temperaturen von 80 °C einsetzbar [40]. Aussen sind diese Rohre mit PE ummantelt. Für die Verbindung sind Edelstahlfittiche erforderlich. Nachteil dieser Sonden ist der hohe Preis. Diese Sonden sind als Dopple-U-Rohr-Ausführung in den Durchmessern 40, 50 und 63 mm und als Koaxialsonden erhältlich, mit einer Druckfestigkeit bis zu 100 bar.

Daneben wurden viele Quellen ausgewertet, welche in den einzelnen Teilen des Berichtes aufgeführt werden.

5.3 Experten-Interviews

Mit einer Befragung von Experten Ende 2009 und anfangs 2010 wurden zu Projektbeginn die beabsichtigten Forschungsthemen verifiziert. Die befragten Experten sind am Schluss des Kapitels aufgeführt. Die Antworten sind nachfolgend zusammengefasst:

- **Haben Sie Messwerte zu Erdwärmesonden, die wir nutzen können?**

Viele Experten haben keine, keine neuen oder nur vereinzelt Messdaten. Ausnahme ist die FAWA-Studie von Herrn Hubacher, die von der Uni Karlsruhe ausgewertet wurde.

Teilweise sollen neue spezielle Anlagen ausgemessen werden.

Zugang zu nicht publizierten Daten zu erhalten ist schwierig.

- **Welche Jahresarbeitszahlen werden heute durchschnittlich, minimal und maximal erreicht?**

Hier ist eine klare Tendenz festzustellen: Ziel müsste eine 4 oder besser sein, dies müsste mit Auslegung nach der neuen SIA-Empfehlung möglich sein.

In der Praxis sind heute viele Anlagen zwischen 3,2 und 4. Gute Werte sind über 4, max. möglich sind Werte bis 5.

Bei Neubauten sollte 4,5 oder besser angestrebt werden, dies ist möglich mit tiefer Vorlauftemperatur. Bei Sanierungen müsste 4 bis 4,5 das Ziel sein, sicher aber mehr als 3,5. Auch bei Sanierungen ist nur selten eine Vorlauftemperatur über 55 °C erforderlich.

Es wird auch unterschieden zwischen Heizung und Warmwasser: beim Heizen sollten Werte von bis 5 möglich sein, bei Warmwasser liegen die Werte bei 3 bis 3,5. Das Warmwasser soll aber mit der WP erwärmt werden.

Grosse Wärmepumpen hatten in der FAWA-Feldstudie eine um ca. 0,5 tiefere JAZ, weil die Wärmeverteilung ab Zentrale viel Hilfsenergie benötigt (Durchschnitt 3.15).

Die JAZ ist ca. 0,3 tiefer als der COP bei Auslegung.

In Deutschland erhalten nur WP mit $JAZ > 3$ eine Förderung. Dies ist der Minimalwert, damit Wärmepumpen aus Sicht Primärenergie sinnvoll sind.

Neue Wärmepumpen haben teilweise einen Wärmezähler eingebaut, nur dann kann die JAZ bestimmt werden. Sonst ist sie meist unbekannt.

- **Welches Optimierungspotential sehen Sie bei Erdwärmesonden?**

Auslegung der Sonden:

Eine korrekte Dimensionierung der Sonden ist notwendig. Die Dimensionierung mit 45 oder 50 W/m ist oft problematisch. Gemäss SIA Norm 384/6 sind solche Faustformeln nicht mehr zulässig. Die Planer sind zu schulen, wie die Auslegung der Sonden zu machen ist betr. Sondenlänge, Anzahl, Tiefe, Abstand und hydraulische Auslegung.

Bohrtiefe:

Je tiefer Sonden bei Anlagen nur zur Wärmegegewinnung gebohrt werden desto besser für die Effizienz der Wärmepumpe. Jedoch steigt dann der Pumpenenergiebedarf leicht. Eine tiefe Sonde ist als Beispiel also besser als zwei halb so tiefe. Dazu herrscht weitgehend Einigkeit.

Tiefere Sonden (400 m und mehr) wären besser für Sanierungen und MFH. Tiefere Sonden würden das wärmere Gestein nutzen und in städtischen Verhältnissen wären solche Anlagen aus Platzgründen vorteilhaft.

Ein Problem mit zunehmender Tiefe sind die Druckverhältnisse. Ab 250 m Tiefe muss der Bohrunternehmer gute Kenntnisse haben. Die Hinterfüllung muss sorgfältig eingebracht werden. Das Sondenmaterial kommt an seine Grenzen. Heikel sind vor allem Bohrungen in trockenem Gestein, wo Hohlräume und Klüfte vorhanden sein können. Auch in lockerem Gestein (Kies) ist eine tiefe Bohrung (ab 100 m) schwierig und teuer, solche Verhältnisse sind in der Schweiz aber selten. Im kompakten Fels ist es einfacher, Sonden tiefer als 250 m zu bohren. Ab 250 m bestehe ein Risiko von Stauchungen, wenn die Hinterfüllung zu schwer oder die Dichte zu hoch ist. Mit einer mit Wasser gefüllten Sonde sei dies aber beherrschbar. Umgekehrt kann eine Ausbuchtung oder können Risse entstehen, wenn der Innendruck zu hoch wird und die Hinterfüllung mangelhaft ist (z.B. bei Klüften im Gestein: Kalk oder Nagelfluh).

Wo die max. Tiefe liegt ist umstritten, mit heutigem Material (PE 100 SDR 16 mit Nenndruck 16 bar) sind Sonden bis 350 m im Allgemeinen machbar, aber es ergeben sich bereits Risiken. In Ausnahmefällen kann auch tiefer gebohrt werden, wenn der Gegendruck stimmt und sofern Unternehmer das kann.

Jemand sagt, in gutem Gestein (fest ohne Klüfte) sei eine Tiefe bis 700 m machbar, aber erfahrene Unternehmer sind nötig. Jemand wünscht Sonden bis 1000 m Tiefe: diese sollten effizienter sein, aber besseres Sondenmaterial als heute verfügbar sei erforderlich (Drücke).

Weiter sei die Ausführungsqualität zentral. Die Bohrunternehmer arbeiteten nicht immer gut genug.

Jemand schlägt vor, bei mehreren langen Sonden diese schräg zu bohren. Dadurch wird Tiefe verringert und so wird auch der Druck kleiner. Zudem kann bei mehreren Sonden ev. der Abstand vergrössert werden, was insbesondere ohne Regeneration Vorteile bietet.

Tiefere Sonden (bis 700 m) werden in Deutschland mit Subventionen gefördert. Es ist noch keine Tiefbohrtechnik nötig. Aber: das Bohren wird teurer.

Sondenabstand:

Der Abstand bei mehreren Sonden sollte grösser als 6 m gewählt werden.

Sondenmaterial:

Die Druckstufe der Sonden ist heute PN 16, dies ist meist OK, mehr wäre besser. Insbesondere um tiefere Sonden (Ziel 400 bis 700 m oder mehr) bauen zu können müsste besseres Sondenmaterial zur Verfügung stehen (höhere Druckfestigkeit). Wohl besser wäre PEX, hier stellt sich die Frage der Schweissbarkeit. Wenn eine höhere Druckfestigkeit zu höheren Wandstärken führen würde, wäre dies nicht erwünscht wegen der eher schlechten Wärmeleitfähigkeit von PE.

Das Sondenmaterial sollte auch besser wärmeleitfähig sein. Ideal wäre also eine Sonde mit geringen Wandstärken (auch um gut biegsam zu sein), guter Wärmeleitfähigkeit und hoher Druckfestigkeit von innen und aussen.

Jemand schlägt auch Rohre mit vergrößerter Oberfläche für besseren Wärmeübergang vor.

Beim Sondenmaterial habe PE (PE 100 SDR 16) den Vorteil, dass es reversibel überdehnt werden kann, diese Eigenschaft habe kein anderes Material.

Sonden könnten auch aus Chromstahl sein, dies würde aber teuer und sie könnten ev. langsam korrodieren. Bei Direkt-Verdampfer-Anlagen werden Sonden aus Kupfer verwendet. Sonden aus Kupfer können je nach Boden von aussen korrodieren.

Besseres Hinterfüllmaterial:

Die Wärmeleitfähigkeit (λ) des Hinterfüllmaterials sollte ca. wie das Gestein sein, das heisst 2 bis 2,5 W/mK. Dieses Material muss sich wie Bentonit-Zement-Suspension einbauen lassen, damit es Akzeptanz bei den Bohrfirmen findet. Das heisst, es muss dünnflüssig und gut pumpbar sein und sollte nicht eine zu hohe Dichte haben.

Besseres Hinterfüllmaterial sei ca. CHF 5 bis 7 pro Meter teurer. Ob sich der Mehrpreis rechnet ist umstritten. Ebenso könnte als Alternative tiefer gebohrt werden (Sonde länger auslegen).

Klarheit scheint zu herrschen, dass eine besser leitfähige Hinterfüllung die Fluidtemperatur etwas steigen lässt, wie viel das hilft ist umstritten. Theoretisch kann der Bohrloch-Widerstand mit besserer Hinterfüllung halbiert werden, ergibt eine ca. 2 °C höhere Temperatur im Sondenfluid. Pro 1 °C höhere Fluidtemperatur ergebe sich ca. 1,5 % Effizienzsteigerung der Wärmepumpe.

Einigkeit herrscht, dass das bessere Hinterfüllmaterial Vorteile beim Heizen und Kühlen oder bei einer Regeneration der Sonde hat, da die Wärme besser abgegeben werden kann. Bei Regeneration oder Kühlen mit Sonden, und bei saisonalen Speichern mit Sondenfeldern, ist gut leitfähiges Hinterfüllmaterial zu empfehlen.

Ob besseres Hinterfüllmaterial Sondenmeter sparen kann ist umstritten. Von der Berechnung und Theorie her schon, andererseits wird das Erdreich als limitierender Faktor bezeichnet. Besseres Hinterfüllmaterial solle nicht mit dem Argument verkauft werden, man könne Bohrmeter sparen, wie es in Deutschland üblich sei. Jemand sagt aber, bei wenig Platz ermöglichten Sonden mit besserer Hinterfüllung mehr Leistung.

Bezüglich Hinterfüllmaterial sind bei den Experten teilweise noch Fragen offen: Thermische Eigenschaften, Nutzen, Kosten, welches Material.

Wie verbreitet bessere Hinterfüllmaterialien oder auch fertige Produkte heute sind ist unklar. Thermocem etc. sei am Kommen. Heute sei die FWS-Mischung mit Bentonit mit $\lambda = 0,8$ W/mK Standard, bessere Materialien (z. B. Thermocem) haben $\lambda = 2$ W/mK.

Jemand sagt, es würden heute ca. in 25 % der Fälle selbst gemischte Zement/Bentonit-Mischungen verwendet. Der Rest seien Fertigmischungen. Bei selbst gemischten Mischungen ist die Qualitätssicherung und -prüfung ein Problem. Bei Fertigmischungen wird oft die Dichte zu hoch, wenn nach Vorschrift gemischt wird. Daher werde manchmal zu schwach dosiert. Zudem müsse gut gemischt werden.

Es gibt etwa 10 Produkte, in der Schweiz werde oft Kuchler Injekt Therm oder BTD-Füller (Heidelberg Zement) angewendet. Weitere Produkte aus Deutschland sind auf dem Markt, u.a. von Schwenk Baustoffe.

Die Frostsicherheit der Hinterfüllung wird als wenig wichtig angesehen, da wenn nach SIA dimensioniert, die Temperatur im Fluid nach 50 Jahren min. 0 °C/-3 °C sein darf, womit die Hinterfüllung gerade noch nicht gefriert. In Deutschland (VDI) werde weniger grosszügig dimensioniert, daher sei das dort eher ein Thema.

Beim Hinterfüllen muss die Abbindewärme des Materials berücksichtigt werden, da diese das PE schwächt. Der Drucktest sollte deshalb erst einige Tage nach dem Einbau erfolgen.

Bei Sonden mit Regeneration resp. thermischer Aufladung: hohe Temperaturen können das Hinterfüllungsmaterial schädigen (Austrocknung, schwinden, die Sonde wird nicht mehr gestützt). Welche Materialien halten welche max. Temperaturen aus?

Wichtig ist, in der Praxis die Qualität der Hinterfüllung sicher zu stellen.

Hydraulische Auslegung:

Wichtig ist die Abstimmung der optimalen Durchflussrate in der Sonde und im Verdampfer der WP (eine Anpassung der WP an die Erfordernisse der Sonde ist zu wünschen).

Eine turbulente Strömung in der Sonde bringt etwas höhere Fluid-Temperaturen, es ist aber umstritten wie sich dies in der Praxis auswirkt, oder ob nicht ohnehin fast immer eine mehr oder weniger turbulente Strömung vorliegt.

Die Auslegung der Pumpe ist oft falsch, das ΔT wird nicht optimal gewählt. Die Ausbildung der Planer, insb. aber der Installateure ist oft mangelhaft. Diese sind in den Fragen der optimalen Dimensionierung (Wärmeleistungsbedarf und Sondenlänge), in der Auslegung der Hydraulik und der Auslegung der Sonden (Anzahl, Tiefe, Rohrdurchmesser) zu schulen. Da bestehe das grösste Potential.

Das ΔT im Fluid (Vor- zu Rücklauf zur Erdwärmesonde) soll nach SIA 384/6 3 K bis 4 K sein, in der Praxis zeige es sich aber dass 4 K gewählt werden kann, auch ein ΔT von 5 K ist noch möglich. Der Strombedarf für die Pumpe kann so deutlich reduziert werden. Bei zu hohem ΔT wird aber der Gegenstrom-WT-Effekt besser spürbar. Eine Optimierung ist notwendig.

Ein Problem ist die weit verbreitete Tendenz, Sicherheitszuschläge zu machen. Dies führt oft zu grossen Pumpen mit entsprechend hohem Strombedarf. Da auch ein ΔT von 5 K noch möglich ist, braucht es bei Auslegung auf 4 K keine Zuschläge, es muss auch nicht die nächst grössere Pumpe gewählt werden. Bei der FAWA-Studie wurde festgestellt, dass der spezifische Pumpenstrombedarf zwischen unter 1 und max. 6 W/m Sondenlänge schwankt.

Ab 120 m Sondenlänge sollte der Rohr-Durchmesser DN 40 sein. Für tiefe Sonden werden auch Rohre mit DN 50 vorgeschlagen. Mit eher kleinem ΔT kann dann doch Pumpenenergie gespart werden, dies sei vor allem bei Wasser als Fluid vorteilhaft.

Oft ist auch das Expansions-Gefäss zu klein, insb. bei tiefen Sonden. Nicht einberechnet wird die Dehnung der Sondenrohre.

Dämmung der Sonden:

Eine Dämmung der Sonden in den obersten Metern und der Verbindungsleitungen in den Keller ist umstritten. Bei tiefen Sonden mit rel. hohen Fluidtemperaturen und grossem ΔT ist der Nutzen besser gegeben als bei üblich ausgelegten Sonden. Ob sich die Kosten für eine Wärmedämmung rechnen ist umstritten, ev. ist es billiger tiefer zu bohren. Die Langzeitstabilität der Wärmedämmung wird

angezweifelt. Im Sommer (Erwärmung Warmwasser) könne die Dämmung ev. kontraproduktiv sein, da dann der Boden auch oben warm ist. Wie ist die Bilanz?

Die horizontalen Verbindungsleitungen zu dämmen verhindert insb. auch den Gegenstrom-WT-Effekt, und hat Vorteile bei tiefer Erdreichtemperatur im Winter. Auch hier ist der Nutzen bei hohen Fluidtemperaturen und grossem ΔT besser. Als Material werden Tubolit-Schläuche vorgeschlagen, eine werkseitige Dämmung durch den Rohrhersteller ist (zu) teuer.

Wenn gedämmt wird, muss diese Dämmung dauerhaft und dicht sein, wegen dem Gewässerschutz. Vertikale Verbindungen des Grundwassers sind dauerhaft zu vermeiden.

Trennung Vor- Rücklauf:

Eine bessere Trennung des Vor- Rücklaufs (Vermeidung Gegenstrom-Wärmetauscher-Effekt) wird als Verbesserung bezeichnet. Es könnten z. B. im oberen Teil der Sonde die Rohre mit dem Rücklauf (warme Seite) gedämmt werden, das sei besonders bei tiefen Sonden oder bei Sonden mit Wasser als Fluid wirksam.

Öfter werden Abstandshalter empfohlen, ev. nur im oberen Bereich. Solche Abstandshalter für die Doppel-U-Rohr-Sonden werden auf dem Markt angeboten. Der Einbau braucht aber Zeit, die Sonde kann beim Einbau eher klemmen und die Kontrolle ist schwierig. Die Umsetzung in der Praxis sei ungeklärt. Jemand empfiehlt, mit Unternehmer/Lieferanten ein praktikables System zu entwickeln. Der theoretische Nutzen sei unklar.

Sondenfluid:

Bei Direkt-Verdampfer-Anlagen ist als Fluid nur CO_2 und Propan/Buthan zulässig. Wärmepumpen mit CO_2 als Arbeitsmittel sind nur bei hohem Temperaturhub sinnvoll (für Warmwasser).

Bei den üblichen Glykol-Mischungen reichen max. 20 % Konzentration, darunter kann es Korrosionsprobleme geben, weil zu wenig Inhibitoren vorhanden sind. Wenn der ganze Sondenkreislauf mit korrosionsfesten Komponenten erstellt ist, kann auch auf Glykol-Konzentrationen unter 20 % gegangen werden. Es würden 10 % Glykol reichen, entsprechend einer Gefriertemperatur von -5°C .

Für die Sole würde besser Alkohol (Ethanol resp. denaturierter Sekundasprit) verwendet. Ethanol kann beliebig mit Wasser gemischt werden. Es ist eine Konzentration von 10 % bis max. 20 % erforderlich. Ein Problem sind unbekanntes Stoffwerte resp. fehlende offizielle Datenblätter.

Ethanol kostet CHF 1.30 pro l, aber plus CHF 3.- VOC-Abgabe. Damit wird Ethanol zu teuer.

Bei Sole mit Ethanol werde oft auf der Baustelle gemischt, besser wäre eine vorgemischte Sole.

Einige Experten haben mit Alkohol keine Erfahrungen.

Bei anderen Frostschutzmitteln muss auf die Aggressivität resp. den Korrosionsschutz geachtet werden.

Geologie:

Der Untergrund ist die grosse Unbekannte und kann auch lokal sehr unterschiedlich sein, z.B. betr. Arteser. Falls die Geologie anders als erwartet ist muss die erforderliche Länge sofort neu berechnet werden.

Bohrgeräte:

Kleinere Bohrgeräte wären erwünscht, sie verursachen weniger Landschafts- und ermöglichen eine einfachere Installation.

- **Was ist das Potential und wo sind die Risiken resp. Probleme bei Sonden mit Wasser?**

Sonden mit reinem Wasser sind zu empfehlen, bis 20 % bessere JAZ sind erreichbar. Wasser ist gut wegen des besseren Wärmeübergangs und wegen des tieferen Strombedarfs für die Pumpe infolge geringerer Viskosität. Es ist auch eine kleinere Umwälzpumpe möglich.

Probleme mit Wasser als Fluid sind:

Mit Wasser sind deutlich längere Sonde resp. tiefere Bohrungen nötig, in Abhängigkeit der min. zulässigen Temperatur. Jemand nennt eine Mehrlänge von 20 %. Jemand anderes sagt, mit Wasser: würden noch 30 – 33 W/m statt 45 W/m erreicht, d.h. die Sonde werde ca. 50 % länger.

Wenn auf min. Vorlauf +2 °C ausgelegt werden kann, werde die Sonde ca. 35 % länger (Auslegung auf 2 / 5 °C statt -3 / 0 °C). Bei höheren geforderten Wassertemperaturen (z. B. schon bei 3 / 6 °C) nimmt die erforderliche Sondenlänge rasch deutlich zu.

Eine sorgfältige Dimensionierung nach SIA ist sicher erforderlich, damit keine zu tiefen Temperaturen nach dem Verdampfer auftreten. Achtung: die Auslegungen für Anlagen "in der Breite" dürften nicht zu knapp sein: stimmt z. B. die Auslegung der erf. Heizleistung und des Wärmebedarfes? Die Zuverlässigkeit muss gross sein.

Wie tief die min. Temperatur nach dem Verdampfer sein darf ist umstritten. Die Aussagen gehen von minimal 2 °C über nicht unter 3 °C bis zur Vermutung, es müsse wohl auf ca. 4 / 7 °C ausgelegt werden oder zur Aussage, die Vorlauftemperatur dürfe nicht unter 6 – 7 °C fallen. Wenn die min. VL-Temperatur 4 °C nicht übersteigt, sei die Differenz nicht mehr so gross. (Preis 1 m Sonde ohne Installationspauschale sei ca. CHF 60, min. CHF 50, max. CHF 70). Grosse Verdampfer seien kritischer als kleine.

Die Geologie muss bekannt sein, um ein Risiko zu vermeiden.

Standardwerte für Auslegungstemperaturen und Mehrlänge der Sonden werden gewünscht.

Einigkeit herrscht, dass bei Wasser das Delta-T eher tief gewählt werden sollte, damit die untere Temperatur etwas höher bleibt.

Die WP-Hersteller müssten geeignete Produkte auf den Markt bringen, heute fehlen oft die nötigen Sicherheits-Einrichtungen: Es braucht einen Vorlauftemperatur-Fühler als Frostschutz-Thermostat, eine Frostschutzsicherung mit autom. Wiederanlauf, die genaue Messung der Temperaturen, eine Überwachung des Verdampfer-Durchflusses resp. der Pumpe. Dies ist analog wie bei Wasser/Wasser-Wärmepumpen. Nur eine Strömungsüberwachung reicht aber nicht aus.

Die Wärmepumpenhersteller mahnen teilweise ab! Wir sollen diese motivieren für die Zulassung von Wasser. Es wird gefordert, dass Standard-WP mit Wasser "umgehen" können.

Eine Niederdruck-Störung kann bei Wasser vorkommen und müsste in Kauf genommen werden. Die Gefahr einer Abschaltung ist am grössten in der kältesten Zeit, wenn zu klein dimensioniert wurde. Dann muss die Leistung der WP reduziert werden, ein Back-up ist notwendig oder es wird im Gebäude zu kalt.

In der Wärmepumpe wären Rohrbündel-WT als Verdampfer besser, da die Durchströmung gleichmässiger sei als bei Platten-WT. Gute Plattentaucher seien auch möglich. Rohrbündel-WT hätten auch Nachteile.

Beim Abschalten der WP bestehe Gefriergefahr, da das Kältemittel ist noch kalt ist.

Vom Gewässerschutz her wäre Wasser anzustreben.

Baden-Württemberg fördert Wasser statt Sole.

Sonden mit Wasser scheitern oft am Budget der Bauherrschaft.

- **Welche alternativen Sondenbauformen sollen untersucht werden?**

Koaxialsonden:

Koaxialsonden haben sich nicht durchgesetzt, da der Einbau aufwändiger ist. Sie blieben in der Entwicklung stehen. Das Problem ist das Handling auf der Baustelle: die Rolle wird zu gross und schwer, das Rohr bei tiefen Temperaturen zu starr.

Vorlauf und Rücklauf müssten thermisch getrennt sein, z.B. mit Vakuum oder Aerogel. Der Gegenstrom-WT-Effekt muss verhindert werden. Dann wären sie besser (höhere Fluid-Temperatur) als U-Rohr-Sonden. Koaxialsonden müssen aussen mit grosser Querschnitt und Fluss nach unten, innen mit kleinerem Querschnitt und Strömung nach oben konstruiert werden.

Die Anwendung ist insbesondere bei tiefen Sonden sinnvoll. Sie seien besser ab 500 m Länge wegen dem tieferem Δp .

Die Produktionskosten seien höher, insb. wenn Vorlauf und Rücklauf thermisch getrennt werden.

Einzelnen Experten ist der Vorteil von Koaxialsonden aber unklar. Es gebe keine Vorteile, das Handling sei schwieriger.

Amasond-Sonden:

Die Firma *Amasond* aus Oesterreich bot ein neues System mit mehreren kurzen Koaxialsonden an. Es liegen noch fast keine Erfahrungen vor.

Das System basiert auf Bauteilen mit steckbaren Verbindungen. Die Dauerhaftigkeit dieser Verbindungen wird angezweifelt (wir sollen testen). In Normen und Vorschriften werden unlösbare Verbindungen gefordert. Wenn diese steckbaren Verbindungen eine bessere oder gleichwertige Alternativen zu einer Schweißung sind, könnten diese auch akzeptiert werden. Amasond-System sei im Kt. ZH nicht zugelassen.

Das System sei nur im Lockergestein möglich, wenn mit dem Tracto-Technik GmbH-Bohrgerät gebohrt wird, welches bald an Grenzen stösst, oder bei Rammsonden (die eher besser sind).

Das System wäre für grössere Anlagen nicht geeignet.

Der Anbieter ging 2011 Konkurs. Die Technologie wurde offenbar nicht von einem Dritten übernommen.

- **Wie ist das Optimierungspotential bei den Sondenfluid-Umwälzpumpen?**

Einig sind sich alle: Wichtig ist korrekte Auslegung. Nicht zu gross dimensionieren, wie das oft der Fall ist.

Nach der FAWA-Studie benötigen die Pumpen durchschnittlich 13 % des Stroms. Die Werte gehen dabei von unter 1 W/m bis max. 6 W/m (!).

Von WP-Herstellern wird ein ΔT von 3 K gefordert. Die Auslegung auf $\Delta T = 3$ K ist nicht nötig und zu einschränkend, in Praxis ist ein ΔT 4 bis 4,5 oder 5 K ohne Probleme möglich und besser. Die dann theoretisch laminare Strömung hat in diesem Grenzbereich keinen spürbaren Einfluss. Das ΔT muss je nach Sondenlänge und Fluid festgelegt werden.

Die WP-Hersteller sollten das Δp über den Verdampfer verringern und die Verdampfer gross genug dimensionieren.

Für den Sondenkreislauf sollten Pumpen der Energieklasse A gewählt werden. Diese sind inzwischen (2014) Stand der Technik und vorgeschrieben.

Unterscheiden müsse man zwischen Solepumpe und Heizungspumpe! Ev. sei eine korrekt ausgelegte Standardpumpe genau so gut wie eine falsch dimensionierte A-Klasse-Pumpe.

Bei grösseren Anlagen können Trockenläufer-Pumpen mit besserem Wirkungsgrad vorgesehen werden.

Bei Anlagen mit Leistungsregulierung sollten die Pumpen mit Drehzahlregelung gewählt werden. Bei Vollast ist die Strömung dann turbulent, bei Teillast laminar.

Bei Wasser statt Sole kleinere ΔT fahren, insb. bei Vollast. Ev. Drehzahlregelung vorsehen, um das ΔT der min. Temperatur anpassen zu können.

- **Welche Chancen haben Heat-Pipe-Sonden mit CO₂?**

Es können etwas bessere Temperaturen erreicht werden (ca. wie mit Wasser). Der Boden sei aber derselbe.

Es kann die Pumpe eingespart werden, was sicher ein gutes Ziel wäre. Umgekehrt wird gesagt, bei einer guten Pumpe (z. B. Trockenläufer) sei die Einsparung gering.

Problem sind die hohen Drücke in der Sonde.

Diese Sonden können nur zum Heizen genutzt werden.

Wenn eine Begrenzung auf 100 m Tiefe besteht, sind solche Sonden nicht interessant.

Einige Experten haben noch keine Erfahrung. Jemand wäre an einer Pilotanlage interessiert.

Der Einsatz wird als schwieriger beurteilt. Bei der Vermarktung könnte der schlechte Ruf von CO₂ als Klimagas negativ sein.

Für Berechnung Heat-Pipe-Sonden wäre ein neues Modell des inneren Wärmeübergang (resp. der Filmverdampfung) nötig, dann wären solche Sonden auch rechenbar.

Wenn CO₂-Sonden als Direktverdampfer-Sonden funktionieren, kann das Öl im Kältemittel ein Problem sein.

Brugg Rohrsysteme bieten solche Sonden an und könnten Auskunft geben.

- **Welche Chancen haben Heat-Pipe-Sonden mit Propan, Butan oder NH₃?**

Alle Experten haben keine Erfahrungen

Die Sicherheit und die Bewilligung seien zu beachten.

Als möglicher Einsatz von NH₃ werden sehr tiefen Sonden (bis 3000 m) genannt: die Energiedichte, die gefördert werden kann, wird grösser.

- **Haben Sie Erfahrungen mit Erdkörben, Erdkollektoren, Grabenkollektoren etc.?**

Erdwärmekörbe:

Viele Experten haben damit wenig Erfahrungen. Erdwärmekörbe seien noch wenig bekannt und in der Schweiz selten.

Erdwärmekörbe werden als Alternative bezeichnet, wo keine Sonde gebohrt werden kann. Die Leistung sei aber begrenzt, daher eher für kleine Anlagen geeignet.

Achtung: Wenn in den Gefrierbereich gefahren wird, sind Bodenhebungen und Senkungen die Folge.

Die Leitfähigkeit der oberen Bodenschichten sei eher schlecht (im Allgemeinen schlechter als im Festgestein). Das wisse man jedoch. Bei ausgeführten Anlagen sei die Leitfähigkeit zum Teil noch schlechter als angenommen gewesen, da Untergrund zum Beispiel sehr trocken war. Dafür könne von der jahreszeitlichen Phasenverschiebung in den oberen Schichten profitiert werden.

Erdkörbe werden als Lösung bezeichnet, falls eine zu kurze Sonde ergänzt werden muss (Sanierung), als alleinige Lösung seien sie fraglich, ausser wenn sie im Grundwasser erstellt werden.

Jemand sagt aber, Erdwärmekörbe dürften nicht im Grundwasser installiert werden und müssten gegen unten abgedichtet sein.

Achtung: bei Bauaustrocknung droht eine Überlastung der Körbe.

Erdkollektoren (inkl. Grabenkollektoren)

Viele Experten haben damit wenig Erfahrungen. Erdkollektoren sind heute in der Schweiz selten (anders in gewissen Gebieten in Deutschland).

Erdwärmekörbe wie Erdkollektoren könnten als Solarenergienutzung betrachtet werden. Jemand sagt auch, die Erdkollektoren würden auch Wärme des Regenwassers nutzen.

Die Kosten seien hoch, ebenso der Platzbedarf.

Der Wirkungsgrad sei schlecht, ähnlich wie eine Luft/Wasser WP.

Jemand berichtet von guten Erfahrungen mit Erdkollektoren, solange die Dimensionierung stimme. Erdkollektoren seien aber teuer wenn sie richtig dimensioniert sind. Erdkollektoren seien oft unterdimensioniert.

Erdwärmekörbe und Grabenkollektoren müssen genügend tief vergraben werden (ca. 2 m).

Es gibt DIN und VDI-Richtlinien zum Beachten, sowie eine alte SIA-Dokumentation.

Grabenkollektoren und Energiezäune: in Kombination seien höhere Soletemperaturen als mit Sonden erreichbar. Die Möglichkeiten einer Kombination mit Solarkollektoren seien noch nicht ausgeschöpft.

Erdwärmesonden seien besser rechenbar.

Für Häuser mit sehr tiefem Wärmeleistungsbedarf können diese Systeme eine gute Alternative sein. Zudem seien sie eine Lösung, falls nicht gebohrt werden kann.

- **Welches Optimierungspotential ist beim Betrieb einer Anlage mit Erdwärmesonden vorhanden?**

Die Umwälzpumpen und der Durchfluss in der Sonde sind optimal einzustellen. Das ΔT sollte nicht zu tief sein, die Pumpe eher auf eine kleinere Stufe stellen falls möglich. Umgekehrt wird gesagt, mit tiefem ΔT (2 – 3 °C) werde der Gegenstrom-WT-Effekt verringert und bei Wasser als Fluid ist man weniger schnell im Minusbetrieb.

Bei der Inbetriebnahme ist eine Optimierung vorzunehmen.

Zum Heizen muss eine möglichst tiefe Vorlauftemperatur wählen, zum Kühlen umgekehrt und ein tiefes ΔT im Kühlkreislauf ist besser. Dazu muss die Heizkurve im Winter optimal (möglichst tief) eingestellt werden. Auch in Altbauten sind selten 60 °C oder mehr erforderlich.

Die korrekte Handhabung der Thermostatventile ist wichtig.

Die Durchflüsse im Heiz- und Kühlsystem müssen stimmen, ein hydraulischer Abgleich ist notwendig. Auch die Heizkreispumpe ist richtig einzustellen.

Bei Wärmepumpen mit Leistungsregelung müssen die Stufen richtig kommen. Eine stufenlose Leistungsregulierung der WP ist vorteilhaft.

Bei bestehenden Gebäuden sollte die Gebäudehülle saniert werden, damit die Vorlauf-Temperaturen im Heizkreis sinken.

Ein technischer Speicher ist höchstens bei Radiatoren nötig.

Sperrzeiten der Stromversorgung sind bei WP-Tarif üblich und müssen berücksichtigt werden.

Eine Nachtabsenkung ist kontraproduktiv, da höhere Vorlauf-Temperaturen im Heizkreislauf erforderlich werden.

Es soll generell Energie gespart werden (korrekte Raumtemperatur, Lüftungsverhalten).

Beim Warmwasser sind Legionellen zu beachten und der Bedarf korrekt einzuschätzen.

Das Warmwasser immer mit der WP zu erwärmen ist zu empfehlen.

Falls eine Sommer-Umschaltung nötig ist: diese bewusst vornehmen.

Die Überströmer im Heizkreis soll richtig eingestellt werden (im Normalfall Vor- und Rücklauf nicht mischen). Das Heizungswasser soll generell nicht gemischt werden (Hydraulik!).

- **Welches Optimierungspotential ist bei den Wärmepumpen (in Zusammenhang mit Erdwärmesonden) vorhanden?**

Primär wird generell eine gute Effizienz (ein hoher COP) gefordert.

Weiter eine Optimierung des Durchflusses im Verdampfer betr. ΔT und Δp . (siehe oben)

Die Wärmepumpen (Baureihen) sollten eine feine Leistungsabstufung haben, um immer den richtigen Typ wählen zu können.

Es sollten Wärmepumpen angeboten werden, die mit reinem Wasser umgehen können statt mit Sole: Sicherheitseinrichtungen, möglichst tiefe Vorlauftemperatur. (siehe oben)

Die Werkeinstellungen sollten bezüglich Laufzeiten den Ausbaustandards der jeweiligen Gebäude angepasst werden. Dies gilt insbesondere in den Übergangszeiten.

Die Verdampfer und Kondensatoren sollten vergrößert werden (sind zu klein infolge Preiskampf). Eine Verschärfung des Gütesiegels wurde von den Herstellern abgelehnt, wäre aber sinnvoll. Die WP würden dann aber teurer.

Eine Leistungsregulierung sollte vorhanden sein. Mindestens wird eine 2-stufige Maschine (z.B. mit 2 Kompressoren) gefordert.

Ein besserer COP könne auch durch bessere Kältemittel oder bessere Kompressoren erreicht werden.

Die Anlagen sollten ohne Speicher geplant werden.

Der Regler der WP müsste für die WW-Aufladung am wasserseitigen Ausgang des Kondensators eine Temperatur-Überwachung haben als Sicherheit gegen Hochdruck-Störungen.

Messungen sollten ermöglicht werden, insb. auch die Wärmeproduktion (Wärmezähler), für Kontrolle und Betriebsoptimierung.

Bei grossen Wärmepumpen sollten Schallproblem vermindert und der Anlaufstrom reduziert werden.

- **Welche gesetzlichen oder behördlichen Regulierungen erschweren den Markt der Erdwärmepumpen?**

Die Meinungen gehen etwas auseinander. Während einige gut mit kantonalen Regelungen umgehen können, fordert eine Mehrheit einheitliche Regelungen und Bewilligungsverfahren über alle Kantone hinweg. Als besonders schwierig werden zusätzliche, sehr unterschiedliche Anforderungen der Gemeinden bezeichnet. So verlangen einzelne Gemeinden resp. Städte zusätzlich eine Baubewilligung, was fraglich sei, da an der Oberfläche nichts zu sehen ist. Die unterschiedlichen kantonalen Regelungen erschweren den Markt. In der Praxis seien in den kant. Regulierungen und unterschiedlichen Vorgaben pro Gemeinde teilweise "Fallen" eingebaut.

Einheitliche Regelungen wurden von BAFU und der Arbeitsgruppe angestrebt, die die BAFU-Vollzugshilfe "Wärmenutzung aus dem Boden und Untergrund" erarbeitete. Diese solle und werde die Einheitlichkeit unter den Kantonen in Zukunft verbessern. Bis heute haben die Kantone noch stark unterschiedliche Vorstellungen. Die BAFU-Vollzugshilfe sei aber nicht verbindlich, die Kantone bremsen eine rasche Vereinheitlichung.

In Kt. SG wird eine jährliche Konzessionsgebühr verlangt, dies sei einzigartig und sollte vermieden werden.

Viele Gemeinden stellten bei der Bewilligung auf den Kanton ab resp. delegieren an den Kanton.

Regelungen betr. Grenzabständen (üblich 3 m) sind zu hinterfragen, dafür gebe es keine Gesetzes-Grundlage.

Die Behörden sollten flexibler sein, z.B. würden Tiefenbeschränkungen oft zu pauschal festgelegt. Dasselbe gelte für Anhydrit-Gebiete. Mit geologischen Gutachten könnte von Fall zu Fall entschieden werden. Die Behörden vollziehen z.T. zu stark nach Buchstabe des Gesetzes, anstatt fallweise das Optimum bez. Gewässerschutz zu fordern resp. ermöglichen.

Jemand schlägt eine Kontrolle durch private Fachleute vor. Es könnten auch Standardauflagen formuliert werden.

Dafür fehlen Regelungen betr. dem Verlauf der Sonden im Untergrund (Nutzung der Erdwärme, Unterbohren des Nachbargrundstücks etc.).

Bei oberflächennahen Systemen (Erdkörbe etc.) fehlen teilweise klare Regelungen. Wenn keine Grundwasserzone besteht könnte auf eine Bewilligung verzichtet werden. Die Bewilligung ist mind. teilweise anders als bei Sonden (im Kanton Zürich z.B. wie Tankanlagen).

In klein parzellierten Gebieten müsste von den Behörden verlangt werden, dass die gegenseitige Beeinflussung von Erdwärmesonden berücksichtigt wird, also tiefer gebohrt werden muss.

Einerseits sollten die Bewilligungsverfahren generell vereinfacht werden, andererseits wird eine Regulierung und Qualitätskontrolle als nötig erachtet.

Der eher restriktiven Bewilligungspraxis stehe keine adäquate Kontrolle auf der Baustelle gegenüber. Eine Nachprüfung oder Qualitätskontrolle finde kaum je statt. Die Kantone seien teilweise unterdotiert bei den vielen Bewilligungen. In der Praxis sei die Qualität der Bohrung ein Problem (nicht die Sonde oder Erdwärmenutzung).

Heute haben bald alle Kantone die Ausscheidung der Grundwasser-Schutzzonen fertig. Dies ist die Grundlage für die Bewilligung. Genutzt werden darf nur technisch nicht nutzbares Grundwasser, die Interpretation was das heisst sei in der Praxis unterschiedlich. Weiter ist gegeben, dass das Grundwasser vor Verschmutzung und vor Temperatureinflüssen geschützt werden muss, Grundwasserstockwerke und Deckschichten nicht verbunden werden dürfen.

Der Grundwasserschutz ist wichtig, aber nur dort wo das Grundwasser wirklich genutzt wird (oder mind. genutzt werden kann). Die übrigen Gebiete sollten frei gegeben werden. Die Bewilligungen sollten auch da differenzierter vergeben werden, z.B. mit Tiefenbeschränkung, Auflagen zur Art der Sole, zur Bohrung etc.

Gefordert wird auch, alles mit gleicher Elle zu messen. So dürften z.B. viele Landwirte Grundwasser zur Bewässerung fördern, für Energiezwecke hingegen sind die Anforderungen viel strenger.

Beim Grundwasser wäre Forschung betr. Grundwassernutzung nötig: wo ist wie viel Grundwasser vorhanden. Wie fliesst es? Wie kann das Grundwasser genutzt werden (Trinkwasser, Bewässerung, Thermisch)? Wer darf wo und wie das Grundwasser nutzen?

Die Bohrprofile (geologische Daten) sollten öffentlich sein, z.B. auf dem Internet. Genf sei da beispielhaft. Gute Geologische Karten auf GIS werden als erforderlich bezeichnet. Erdwärmekarten auf GIS sollten in allen Kantonen vorhanden sein (Kt. Zürich sei da mustergültig).

- **Welche Möglichkeiten sehen Sie, um Erdwärme zu nutzen, wenn Erdsonden nicht gestattet werden?**

Siehe oben: Erdwärmekörbe oder Erdkollektoren, diese brauchen aber oft zu viel Platz. Die Leistung von Erdwärmekörben sei begrenzt.

Grundwasser wird als eine sehr gute und bei grösseren Anlagen günstige Alternative bezeichnet. Die Bewilligungspraxis in den Kantonen sei allerdings sehr unterschiedlich. Mit Grundwasser kann eine JAZ bis 6 erreicht werden.

Alternativen werden in der BAFU-Vollzugshilfe Tabelle 1 aufgeführt.

Alternative Sonden/Kollektorensysteme oder eine Kombination mit Energiezaun oder Solaranlagen.

Zur Not wird auch Luft als Alternative bezeichnet.

- **Wann muss der Untergrund regeneriert werden?**

Die Meinungen gehen etwas auseinander:

Einerseits wird bei grösseren Anlagen (ab 4 Sonden) eine Regeneration als erforderlich bezeichnet (je nach Bedarf und Bewirtschaftung). Andererseits wird gesagt, in der Praxis sei eine Regeneration des Bodens kaum je nötig, der Boden sei "gutmütig".

Bei Einzelsonden sei eine Regeneration nicht notwendig, diese erreichen einen stabilen Zustand nach 2 - 3 Jahren. Gesagt wird auch, wenn nach SIA ausgelegt werde, müsse nicht regeneriert werden.

Wenn Sonden in von Grundwasser durchflossenen Lockergestein erstellt werden, sei keine Regeneration nötig (der Grundwasserfluss regeneriert). In Lockergestein sind aber nur 100 m Bohrtiefe möglich, tiefer wird die Reibung für die Verrohrung zu gross.

Unbestritten ist, je mehr Sonden nahe beieinander erstellt werden (weniger als 10 Meter Abstand), desto mehr können sich diese gegenseitig beeinflussen. Ev. müsse dies in Zukunft in den Bewilligungen geregelt werden: tiefer bohren oder eine Regeneration ist erforderlich. Heute wird typisch min. 3 m Abstand von der Grundstücksgrenze gefordert, das ergibt einen Abstand von min. 6 m. In Städten, wo sich Sondenfelder ergeben werden, muss zukünftig regeneriert werden, oder als Ausweg tiefer bohren.

Grosse Sondenfelder (Bsp. Andermatt) müssen regeneriert werden.

Eine Regeneration kann über Kühlung oder über Luftregister erfolgen.

Bei EFH im Sommer kann die Sonde zum Kühlen genutzt werden, das bewirkt eine teilweise Regeneration.

Wegen geplanter Regeneration sollte nicht Sondenlänge gespart werden, da ev. die Regeneration doch wegfällt, später ausfällt etc. Behörden verlangen zudem Auslegung auf max. 50 W/m.

Die Soletemperatur sollte überwacht werden. Wenn ein Absinken erkannt wird, dann sind Massnahmen zu ergreifen.

Die Idee einer Wärmespeicherung im Untergrund sei oft fraglich, weil die Wärme wegfließen kann. Umgekehrt wird gesagt, man könne oder müsse den Boden als Speicher nutzen, bei hoher Sonden-dichte, die sonst zu Problemen führt. Mit Regeneration werde ein Sondenfeld, auf 50 Jahre gerechnet, zudem kleiner.

Bei Neubauten, welche das Grundstück ausnutzen, wird die Grundstücksfläche je nach Bauzone eher knapp, trotz tieferem Wärmebedarf. Theoretisch sollen wir das Potential resp. die Grenzen der Bodennutzung rechnen.

Bei Erdregister in 1,2 bis 1,8 m Tiefe ist die Amplitudenverschiebung nutzbar, es erfolgt zudem eine Regeneration durch Regenwasser. Diese ist sehr effizient und sofort spürbar. Gefrieren muss aber vermieden werden, oder mit Regeneration wieder auftauen.

- **Welche Chancen und Probleme ergeben sich beim Heizen und Kühlen mit Erdwärmesonden?**

Dem Heizen und Kühlen werden gute Chancen eingeräumt, werde auch oft genutzt. Vorteil sei der bessere Komfort. Der Wärmeeintrag im Sommer führe dazu, dass anfangs Winter die Temperaturen höher sind und so die Arbeitszahl (und die JAZ) steigen. Andere bezeichnen den Nutzen der Regeneration durch Kühlung als fraglich.

Die Vorlauftemperatur in die Sonde dürfe max. 20 °C betragen, wegen dem PE.

Das Heizen und Kühlen kann über Bodenheizung/-kühlung erfolgen, ergebe aber kalte Füsse im Sommer. Besser sei über die Decke zu kühlen.

Bei Sanierungen mit Heizkörpern ist eine Kühlung oft nicht möglich. Im Wohnbau sei die Nachfrage selten.

Ev. sei auch eine Rückkühlung von Kältemaschinen möglich.

- **Wen müssten wir beeinflussen, um optimierte Sonden am Markt zu etablieren?**

Bohrfirmen. Für tiefe Sonden: Bohrtechnik.

Lobbieren bei Herstellern: sie sollen bessere Produkte anbieten.

Politiker

Behörden, die bewilligen müssen

Planer

Bauherren: Infomaterial ist erforderlich und Vorträge. Betont werden müssen auch die Kosten.

Hersteller von Sonden: EWS-Werkstoffe für höhere Drücke

Wärmepumpen-Hersteller: Wasser als Fluid, Grösse und Δp Verdampfer, Steuerung und Sicherheitseinrichtungen. Der CH-Markt sei aber klein, so dass ev. kein Einfluss möglich ist.

Gesamtsystem-Anbieter

Aus- und Weiterbildung fördern. Installateure und Planer müssen gut geschult werden.

- **Was sind Ihre weiteren Wünsche oder Bemerkungen zum Projekt?**

Das Projekt würde besser Erdwärme-Optimierung statt Erdsonden-Optimierung heissen.

Die Sachlage müsse klar sein, die Essenz müsse herausgeschält und formuliert werden. Dazu sollten neue Lösungen und Varianten in Test- resp. Pilotanlagen getestet und gemessen werden.

Eine Auslegeordnung und eine Bewertung der Systeme.

Auf dem Boden der Realität bleiben. Mit der FWS in Kontakt bleiben.

Bezeichnung Erdwärme-Wasser WP wäre viel besser als Sole-Wasser-WP.

Laien besser informieren.

Bei den Nachfragern wollen die Contractoren das Beste, die GU's das Billigste.

Für Ethanol-Gemisch: VOC-Gebühr wegbringen!

Publizieren in der Fachpresse.

- **Zusatzthema: Dimensionierung (Leistung) Wärmeerzeugung**

Die SIA 384/201 (Berechnung Wärmeleistungsbedarf) ist gesetzt, aber Theorie. Besser ist SIA 380/1, da die passive Solarenergie hier eingerechnet wird.

Gem. FAWA sind die Anlagen im Durchschnitt 35 % überdimensioniert.

Bei Neubauten wird nach SIA 384/201 gerechnet, dies führt zu Überdimensionierung. Dann werden noch "Angstzuschläge" gemacht und die nächst grössere Maschine gewählt. Mind. diese Zuschläge sollten wegfallen.

Besser ist es im Sanierungsfall, da kann nach dem bisherigen Heizenergieverbrauch dimensioniert werden.

- **Experten**

Mit folgenden Experten wurde ein Interview geführt:

Dr. Stefan S. Bertsch, Leiter Institut Energiesysteme IES, NTB Interstaatliche Hochschule für Technik
Buchs

Dr. sc. nat / Dipl. Natw. ETH Mark Eberhard, Aarau

Dr. sc. nat. ETH/SIA/VDI Walter J. Eugster, Zürich

Dipl. Ing. HTL Peter Hubacher, Engelburg

Dipl. Ing. ETH Arthur Huber, Zürich

Dr. sc. nat / dipl. Geophysikerin ETH Sara Signorelli, Zürich

Dipl. Ing. HTL Christoph Wehrli, Zürich

Dr. Geol. ETH Roland Wyss, Frauenfeld

5.4 Befragung von Unternehmern

Um die Situation in der Praxis beurteilen zu können, wurden auch Unternehmer der Erdwärmebranche befragt. Auch hier kamen halbstandardisierte Interviews zur Anwendung.

- **Welches Optimierungspotential sehen Sie bei Erdwärmesonden?**

Generell:

Die Geologie müsste bekannt sein: bei Grossprojekten wäre eine Sondierbohrung und ein Thermal Respond Test gut, um genau planen zu können, was aber selten gemacht werde. Es sei oft unbekannt, woher das Grundwasser komme und wohin es gehe.

Problem: Marktpreise sind zu tief, insb. bei Grossprojekten (statt 80.- /m bis < 40.-/m). Damit kann keine Qualität garantiert werden. Es werden Pauschalpreise resp. Durchschnittspreise offeriert.

Qualitätssicherung beim Bohren: Viele neue Bohrfirmen, wenig Erfahrung und Know-how, viel Konkurrenz, Schutz des Grundwassers (=Lebensmittel) ist schlecht gewährleistet. Qualitätskontrolle auf dem Bauplatz funktioniert schlecht: oft werde gar nicht oder unzulänglich hinterfüllt. Ein Prüfverfahren für eine einwandfreie Hinterfüllung fehlt (-> F+E-Bedarf).

Heizen und Kühlen steht im Vordergrund.

Das Gesamtsystem und die Optimierung der ganzen Anlage beachten: EWS, Wärmepumpe, Gebäude, Heiz-/Kühlsystem, auf Dach PV-Anlage und ggf. weitere Wärmequellen wie Solarkollektoren: Ziel ist ein Null- oder Plusenergiehaus. Die Gebäudeoberfläche zur Energiegewinnung nutzen. Die Photovoltaik wird immer günstiger.

Kernthema: welche Wärmequelle wo? Projekt würde besser Erdwärme-Optimierung statt Erdsonden-Optimierung heissen. Vorteil Erdwärme: ist zeit- und ortsunabhängig.

In Bezug auf die Erdwärmesonden:

Besseres Sondenmaterial wäre nötig: günstig und bessere Wärmeleitfähigkeit (entscheidend sei aber das Gestein), höhere Innendruckfestigkeit. PE 100, SDR 11, PN 16 ist nur bis 250 m gut, danach ist die Druckfestigkeit ungenügend. In geol. Formationen ohne (oder mit nur wenig) Wasser fehlt der Gegendruck. Die Luftspülung beim Imlochhammer-Verfahren trocknet das Bohrloch aus. Dann ist das Bohrloch trocken, wenn die Sonde eingebaut wird; es fehlt der Porenwasser-Gegendruck. Falls bei Sonden tiefer als 250 m der Gegendruck fehlt (kein Wasser und/oder ungenügende Hinterfüllung) hält das Rohr nicht. Es wird innert Stunden bis wenigen Jahren defekt. Oft ist die Geologie aber so, dass es geht.

Forderung für die Zukunft: höhere Drücke resp. besseres Material ist erforderlich. Dies ist aber schwierig. Um den Druck zu erhöhen, z.B. auf PN 25 oder 40, wären dickere Wandstärken möglich, aber: der Wärmeleitwiderstand der Rohre nimmt zu, die Flexibilität nimmt ab.

PE wird aber auch als positiv bezeichnet: gute Wärmeleitfähigkeit, die Flexibilität und chem. Beständigkeit ist gut, es ist umweltneutral, gut schweisssbar und günstig. PE bricht nicht, auch nicht bei kalten Temperaturen.

PE ist nicht ganz gasdicht: wenn Erdgas im Boden ist, kann dieses in die Anlage diffundieren und Gasblasen bilden, die z.B. im Verdampfer zu Problemen führen. Ein Entgaser wäre dann nötig.

Wasser in der Sonde wäre besser, ebenso Ethanol. Frage: ist Ethanol verträglich mit Dichtungen? Bei der Verwendung von Ethylen-Glykol: wie wird dieses entsorgt?

Die Umwälzpumpe des Sondenfluids wird bei 5 °C ΔT kleiner, weniger Hilfsenergie.

Eine Turbulenz in den Rohren bringe ca. 0,5 °C mehr Temperatur, aber es ist mehr Strom für die Pumpe erforderlich. Um das Δp zu verringern, müsste die Geschwindigkeit klein sein (grosser Innendurchmesser). Optimierung? Jemand gibt in Sonde und Verdampfer ein ΔT von 4 K vor. In der verwendeten DN 40 Sonde wird die Strömung dann laminar.

Ob turbulent oder laminar in der Sonde sei nicht relevant, da der Wärmewiderstand der Sonde, der Hinterfüllung und des Erdreiches dominierten.

Bez. Tiefe seien 2 mal 150 m besser als einmal 300 m, da so Pumpenenergie gespart werden kann. Zudem sind die tiefen Sonden nicht für Free-Cooling nutzbar. In Zukunft wird dies vermehrt nachgefragt, die Sonden sollten heute schon für die Zukunft ausgelegt werden.

Sonde bez. Durchmesser, ΔT , Gegenstrom-WT-Effekt optimieren. Ist ein Durchmesser 50 mm (statt üblich 40 mm ab 150 m) sinnvoll? Sonden mit DN 50 oder 65 hätten den Nachteil, dass die Wandstärke zu gross wird und damit der Wärmedurchgang erschwert wird.

Wie wird eine einwandfreie Entlüftung des Systems gewährleistet? Die Installateure können das oft nicht. Ev. müsste mit temporären Entlüftern gearbeitet werden. Sie machen auch den horizontalen Anschluss und die Befüllung. Die Sonde ist zuerst immer Wasser gefüllt, auch für den Drucktest.

Die Druckprüfung nach SIA ist ebenfalls ein Problem: die 12 bar wie in SIA gefordert sind zu hoch, es werden 5 bar vorgeschlagen. Der Drucktest kann die Sonde gefährden. Der Innendruck drückt das noch nicht abgebundene Hinterfüllmaterial weg (oder es ist ev. gar nicht überall vorhanden). Insb. tiefe Sonden werden zu stark belastet. Die Abbindewärme kann zudem das Material schwächen. Der Drucktest sollte erst nach dem Abbinden der Hinterfüllung gemacht werden. Dies braucht zu viel Zeit. In der Praxis möchte man aber den Test machen solange noch die Bohrmaschine auf Platz ist, um im schlimmsten Fall nochmals bohren zu können.

Fazit: Ein Drucktest werde oft gar nicht gemacht.

Es müsste ein automatischer Drucktest entwickelt werden (-> F+E). Auf dem Markt gebe es nichts Gutes (3 sind vorhanden). Der Drucktest muss Tiefe, Sondenmaterial, Hinterfüllmaterial etc. berücksichtigen, da sich all dies auf das Verhalten unter Druck auswirkt.

Jemand verwendet für das Testen der Dichtheit und des Durchflusses ein selbstentwickeltes Testgerät mit SPS-Steuerung und Datenausgabe auf USB-Stick.

Wunschcatalog Rohre:

- Druckfest bis 50 bar
- Flexibel (aufrollbar)
- zäh und reissfest
- λ hoch
- günstig
- chem. unbedenklich und beständig
- Innendurchmesser gross (Wandstärke klein)
- Temperaturbeständig
- schweisbar

Wie lange halten Sonden?

Koaxialsonden (Rücklauf nach oben innen): Die Idee wäre genial, jedoch ist in der Praxis die Sonde zu wenig flexibel, sie kann nicht aufgerollt werden. Teuer bei der Koaxialsonde ist oben die Trennung Vor-/Rücklauf. Diesen Sondenkopf günstig herzustellen sei schwierig. Koaxialsonden sind bis heute ein Nischenprodukt.

Bei Sonden tiefer als 500 m wäre das Koaxialprinzip besser. Schwierig hier wäre aber auch die Verbindungstechnik unten. Der Durchmesser würde 110 mm, kann nicht mehr aufgewickelt werden.

Möglich sind Koaxialsonden auch mit $D = 63$ mm bis 50 m Länge, für schräge Bohrungen ab einer Stelle mit der Trakto-Technik.

In Bezug auf die Wärmepumpen (WP):

Die Verdampfer sollten optimiert werden und genügend gross sein. Der Durchfluss im Verdampfer und in der Sonde muss gleich sein und sollte für die Sonde optimal sein.

Die WP sollte Umwälz-Pumpen, Sicherheitsgruppe und Expansionsgefäss ab Werk enthalten. Frage: braucht es überhaupt ein Expansionsgefäss? Das PE ist dehnbar.

Bei den WP besteht noch etwa 15 bis 20 % Verbesserungspotential. Die Exergieanalyse bei Luft/Wasser-WP der HSLU zeigt mögliche Verbesserungen auf. Daher sollten heute die Sonden überdimensioniert werden, damit sie auch für bessere WP noch passen.

Heute müssen bei einem Ersatz einer ersten WP oft zu kurz dimensionierte Sonden ergänzt werden: entweder mit einer zusätzlichen Sonde, oder mit einem Luftregister als zweite Wärmequelle. Dann wird auch eine Regenerierung der Sonde ermöglicht, die Sonde kann bis zu 40 % zu kurz sein.

Inline-Pumpen sind nur bei grossen Anlagen mit tiefen Sonden resp. hohem Δp sinnvoll.

Propan (ev. auch Isobutan) als Kältemittel wäre besser. Das Problem ist die Akzeptanz beim Kunden, der sich vor der Explosionsgefahr fürchtet. Bei kleinen Anlagen sind die Zusatzkosten für die Sicherheit zudem relevant. Technisch gebe es keine Probleme.

In Bezug auf die Planung und die Erstellung der Anlagen:

Die Sonden dürfen nicht in den Gefrierbereich gefahren werden (sollte mit Auslegung nach SIA gegeben sein). In Spitzenlastzeiten werden aber trotzdem tiefere Temperaturen (bis -5 °C) erreicht. Was passiert mit der Hinterfüllung?

Ist die Berechnung der Sondenlänge richtig? Wer berechnet?

Mit der neuen SIA werden die Sonden tiefer als früher. Wenn Wasser als Fluid: 4 °C minimale Temperatur ist notwendig.

Planer sollten ebenfalls eine Gütesiegel haben, dito Installateure. Die Qualitätssicherung muss über die ganze Kette gewährleistet sein.

Es wird mit Planerbüros zusammen gearbeitet, die teilweise heute ein gutes Know-how hätten. Aber es gebe auch Ausbildungsdefizite. EWS rechnen oder simulieren können nur sehr wenige Planer, insb. die wenigen spezialisierten Büros. Viele Planer arbeiten mit Faustformeln für die Sondenauslegung und die WP ist für sie eine Blackbox.

Bei kleinen Anlagen lässt sich der Installateur vom WP-Lieferanten und der Sondenbohrfirma "beraten" resp. übernimmt deren Angaben und Schemas und offeriert so die Anlage.

- **Wie tief können Sonden gebohrt werden? Was sind die Risiken und Probleme, wenn tief (grösser 250 m) gebohrt wird?**

Bis 250 m kann "jeder" bohren, und die Sonden sind OK. Ab 300 m wird das Bohren teurer, ab 250 m müssten bessere Preise erzielbar sein (80.-/m). Das heutige PE ist ab ca. 240 m nicht mehr immer genügend stark.

Ab 250 m steigen die Risiken, Ansprüche und Kosten exponentiell. Tiefer bohren ist nur möglich, wenn die Geologie stimmt: je tiefer man bohrt, desto mehr Schichten werden durchbohrt. Je nach

dem muss eine Schicht verrohrt werden. Die Gefahr von gespanntem Grundwasser (Arteser) und Gas nimmt zu. Das Verbinden von Grundwasserstockwerken nimmt potentiell ebenfalls zu. Wie verhält sich die Hinterfüllung? Eine einwandfreie Hinterfüllung wird schwieriger je tiefer.

In Molasse sind 300 m Tiefe gut machbar. Bis 500 m sei unter optimalen Verhältnissen machbar, viele Bohrfirmen bohren aber nur bis 250 m. Ab 400 m sind stärkere Bohranlagen und Kompressoren nötig, es ist ein grösserer Bohr-Durchmesser nötig (für Sonden DN 50) und mehr Energie (Diesel).

Umgekehrt gibt es die Aussage: Je tiefer desto besser. Die Entwicklung gehe in Richtung tiefe Sonden. Dann wird der Innen- oder Aussendruck hoch, je nach Situation. Ideal wären Tiefen ab 800 m: dann wäre eine Direktheizung ohne WP möglich. Bei tiefen Sonden wäre oben eine Wärmedämmung der Sondenrohre nötig.

Eine Firma kann bis 5000 m tief bohren.

- **Wie ist die Abhängigkeit von der Geologie?**

Es sollte ein geol. Gutachten (oder Sondierbohrung) vorhanden sein. Dann kann besser geplant und offeriert werden.

Die FWS müsste ein Preismodell machen, das die Geologie, das Risiko etc. berücksichtigt. Das geologische Risiko müsste auch der Bauherr mittragen (z.B. wenn doch nicht tief gebohrt werden kann).

Optimierungsidee: Recycling resp. Aufbereitung Bohrklein (Bohrschlamm) prüfen: Nutzung für Hinterfüllung oder für andere Zwecke: Magerbeton, Schüttungen und als Unterlage Strassen, Wege, Pflästerungen.

In Lockergestein kann mit Imlochhammer-Verfahren und gleichzeitiger Verrohrung bis ca. 100 m gebohrt werden. Danach "klemmt" die Verrohrung. Mit einem Spülbohrverfahren kann tiefer gebohrt und verrohrt werden, aber nur wenige Bohrfirmen können das (eine Universalbohrmaschine ist erforderlich). Bis 180 m Tiefe seien Teleskop-Verrohrung und Spülbohrung möglich. Bei der Spülbohrung stützt und schmiert ein Wasser-Bentonit (und ev. Polymer)-Gemisch das Bohrloch. Es wird ca. 20 % teurer.

Je nach Wasseranfall sind die Probleme verschieden: Bei trockenem Fels: der Gegendruck fehlt. Bei viel Wasser wird es ab ca. 220 m schwierig, das Wasser nach oben zu drücken (hohe Drücke sind nötig). Aber: wenn Wasser vorhanden ist, wird die Wärmeleitung besser.

- **Welche Bohrverfahren verwenden Sie?**

Je nach Gestein werden unterschiedliche Bohrverfahren: Normal ist das Imlochhammer-Verfahren mit Luftspülung

Bei weichem Fels wird Rotary-Bohren (Stufenmeissel) angewendet. Dieser baut besser ab, es ist weniger Diesel für den Kompressor erforderlich. Dann braucht es Wasser zum Spülen oder eine Wasser-Bentonit-Spülung.

Für tiefere Bohrungen in Lockergestein müsste von den Behörden ein Spülbohrverfahren verlangt werden.

- **Machen Sie Auslegungen von Erdwärmesonden? Wenn ja, wie?**

Ja, es wird insbesondere bei Direktaufträgen von Privaten eine Auslegung der EWS gemacht. Dies sei ca. in 30 % der Aufträge der Fall. Eine typische Auslegung ist 37 W/m, die Heizleistung wird nach altem Ölverbrauch oder bei Neubauten nach der Grösse (m²) berechnet resp. abgeschätzt. Eine

Firma legt mit einem eigenen Excel-Programm aus, nach SIA, oder auch mit EED und dem "Huber-Programm". Jemand betont, die EWS so auszulegen, dass die Verdampfer-Ausgangstemperatur nie unter 0 °C fällt. Dies könne in der Praxis auch erreicht werden. Die Sondenbelastung werde 35 bis 40 W/m.

Andere kontrollieren die Auslegung und mahnen ab wenn zu kurze Sonden verlangt werden, resp. verlangen eine tiefere Sonde. Wieder andere sagen, das solle ein Spezialist, Fachingenieur machen, sonst gebe es Interessenskonflikte.

Die Installateure verlangen eher zu grosse Wärmepumpen.

Grosses Potential habe die Regeneration der Sonden. Der Trend zu grossen Tiefen sei dagegen problematisch. Im Sommer kann mit den EWS zudem Free-Cooling gemacht werden, was deren Nutzen erhöht und eine zus. Regeneration bedeutet.

Jemand forciert Anlagen mit bivalenten Wärmequellen: EWS und Aussenluft. Ab Aussentemperaturen über 6 °C ist die Aussenluft die bessere Wärmequelle. Ab Aussenlufttemperatur von ca. 12 °C kann die Sonde regeneriert werden. Um die Aussenluft zu nutzen wird in den Solekreis ein Aussenluft-WT parallel zur Sonde eingebaut. Die EWS können um ca. 40 % kürzer dimensioniert werden, da sie weniger belastet werden. Den Nutzen (die JAZ) einer solchen Anlage haben Sie noch nie im Vergleich gemessen.

Eine EWS sollte ca. 4 Generationen Wärmepumpen überleben (4 mal 20 Jahre). Da die WP in Zukunft wohl noch bessere COP erreichen, sollte die EWS bereits heute genügend lang ausgelegt werden.

Eine gute Beratung sei nötig. Die Kunden schauen nur auf den Endpreis. Die Preise seien besser bei Sanierungen.

- **Welche Sonden verwenden Sie? (Hersteller, Typ, Material etc.)**

Der Preis sei bei den in der Schweiz üblichen Lieferanten etwa gleich. Es gebe nur marginale Unterschiede.

Üblich ist PE 100 RC, diese Sonden sind weniger kerbempfindlich (z. B. beim Einbau). PE-Xa sei teurer und nur bei hohen Temperaturen in die Sonde (Rückkühlen) nötig. Sonst seien diese Materialien äquivalent.

Erdwärmesonden mit höherer Druckfestigkeit gebe es schon, diese seien noch teuer.

Neu gebe es weitere Sondenhersteller, viele aus dem Ausland: Qualität?

- **Warum verwenden Sie dieses Produkt?**

Genannt werden eine gute Qualität und eine lange Zusammenarbeit, sowie rasche Lieferung.

Die Hersteller könnten etwas innovativer werden.

Bei ausländischen Herstellern könne die Qualität nicht garantiert werden.

- **Welche Hinterfüllmaterialien verwenden Sie? (Hersteller, Eigenschaften etc.)**

Viele verwenden Fertigmischungen, sonst sei die Qualität nicht garantierbar. Die Mischung Wasser/Füller muss stimmen, Je nach Geologie etwas dichter oder weniger dicht mischen: dichter bei Klüften, es dichtet dann besser ab.

Die BAFU-Richtlinie [13] müsse beachtet werden.

Jemand verwendet selbst gemischte Bentonit/Zement Mischung (FWS- Rezept). Bei Fertigmischungen: was sind die Bestandteile? Gibt es nichts, was das Grundwasser gefährdet? Deklaration fehle!

Eine frostbeständige Hinterfüllung sei i. A. bei Auslegung nach SIA nicht notwendig, die Fluidtemperatur bleibe über der Gefriertemperatur der Hinterfüllung. Jemand stellt aber fest, in der Praxis erreiche das Fluid zu Spitzenlastzeiten aber bis $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Was passiere mit dem nicht frostbeständigen Hinterfüllmaterial?

Thermisch verbesserte Hinterfüllung wird selten auf Kundenwunsch angewendet (siehe auch unten).

- **Warum verwenden Sie dieses Produkt?**

Hier wird die Qualität genannt, eine universale Anwendbarkeit und gute Verarbeitbarkeit.

- **Wie wenden Sie diese Hinterfüllmaterialien an? (Mischung, Verarbeitung, Pumpe etc.)**

Einige mischen es auf dem Werkhof im Silo und liefern von dort die Fertigmischung auf Baustelle.

Andere mischen es vor Ort, und liefern es in Säcken oder lose als Trockenware.

Es werden separate Kolben-Pumpen oder zwei Pumpen in Serie verwendet, um das Hinterfüllmaterial in die Contractorrohre zu pumpen. Jemand hat ein Universalbohrgerät, bei dem die Spülpumpe für die Hinterfüllung verwendet werden kann. Bei Bohrgeräten nur für das Imlochhammer-Verfahren geht das aber nicht.

Auch möglich ist eine autom. Mischpumpen und Fertigmischungen für die Hinterfüllung.

Die meisten verwenden bei tieferen EWS zwei Contractor-Rohre: ein Rohr bis unten und eines bis ca. Mitte. Besser wären grössere Contractorrohre. Jemand verwendet 3 Schläuche: einen bis ganz unten, einen bis unter die Verrohrung, einen um von oben fertig zu füllen bei Bedarf.

Je tiefer die Sonde ist, desto schwieriger wird die Hinterfüllung.

Die Hinterfüllung muss gut gemacht werden. Die Bohrmeister seien oft schlecht ausgebildet. Der Hinterfüllvorgang sei nach Angaben der Bohrmeister kein Problem. Unerfahrene, neue Bohrfirmen würden den Angaben der Bohrmeister zufolge teilweise schlechter arbeiten.

Die Qualität der Hinterfüllung ist schwer kontrollierbar und manchmal schwer erreichbar. Es ist stark vom Bohrmeister abhängig. Diesen kann man nicht ständig überwachen.

Zur Kontrolle dient das verpresste Volumen: theoretischer Bedarf plus 20 %. Mit der Kontrolle der Menge des Hinterfüllmaterials können Abweichungen festgestellt werden. Nur selten gebe es Probleme (Abweichungen der Menge), die im Bohrprotokoll festgehalten werden. Jemand braucht weniger Hinterfüllmaterial als theoretisch notwendig.

Wenn die Bohrung rasch einstürzt, kann ev. von unten nicht verfüllt werden.

Wenn Hinterfüllung zu stark in die Bohrung gedrückt wird, kann die Sonde gequetscht werden.

Die Verrohrung kann bei schlechten Verhältnissen nur vor der Hinterfüllung gezogen werden. Dann ist es schwierig, eine gute Hinterfüllung zu erzielen.

Einige verdächtigen andere, mit zu wenig Hinterfüllmaterial zu arbeiten oder gar nicht zu hinterfüllen, um Geld zu sparen. Solange das Bohrloch mit Wasser gefüllt sei, funktioniere die EWS trotzdem (meist füllt sich das Bohrloch, ausser im Karst und bei Klüften). Aber das Grundwasser wird so gefährdet.

Hinterfüllmaterial kann vor dem Abbinden von Grundwasserströmen weggetragen werden, in Klüften einsickern oder inhomogen entmischt sein und so lockere Stellen enthalten. Auf die Dauer kann strömendes Grundwasser die Hinterfüllung wegtragen (Erosion). Wasser oder Gas können entlang der Sonde oder dem Bohrloch Wege (Kanäle) schaffen.

Um die Hinterfüllung gegen Ausfliessen in Klüfte zu schützen haben zwei Firmen einen EWS-Strumpf entwickelt (Patent Broder). Dieser dichtet das Bohrloch gegen aussen ab. Die Anforderun-

gen an die mechanische Stabilität sind in der Praxis hoch. Gute Lösungen scheitern oft auch am Mehrpreis: ein Strumpf kostet ca. CHF 5 bis 10 pro Meter.

Für die Qualitätskontrolle der Hinterfüllung könnte ein erweiterter Thermal Response Test gemacht werden, mit einem Temperatur-Log über die ganze Sondenlänge. Es gebe Anbieter die das können.

Oder es könnte ein Log der Gammastrahlung gemacht werden: das Hinterfüllmaterial (der Bentonit) strahlt anders als der ungestörte Boden. Eventuell könnte dem Hinterfüllmaterial ein Tracer (Zirkonsand) beimischt werden, um die Strahlung zu verstärken. Eine entsprechende Messsonde ist in Entwicklung. Es gibt Firmen für geophysikalische Messungen, auch der Vertikalität einer Bohrung.

Es müssten auch Bodenbewegungen messbar sein: An Hängen können Bohrungen resp. das Schaffen von Wasserwegen zwischen Schichten Hangbewegungen auslösen. Auch kann die Oberfläche so von unten durchnässt werden.

- **Was sind die Nachteile von Hinterfüllmaterial mit verbesserten thermischen Eigenschaften?**

Nur der Mehrpreis: dieser werde nur von Privaten bezahlt. Es sei verfügbar und problemlos machbar und wäre besser.

Wenn Quarzsand beigemischt ist, zerstört dieser die Pumpe (Abrasion).

Thermisch verbesserte Hinterfüllmaterialien sei verfügbar und problemlos machbar. Die Mehrkosten seien Fr. 5.- /m, der Mehrpreis ca. Fr. 6.- /m. Jemand hat thermisch verbessertes Hinterfüllmaterial in einem Projekt mit Erdwärmespeicher angewendet. Problem: die hohe Dichte (siehe SIA 384/6: tiefe Sonden sind nur eingeschränkt möglich). Andere verwenden es auf Kundenwunsch. Die Frage sei ob nicht mehr Bohrmeter denselben Effekt haben. Wenn vom Platz her möglich solle eher mehr gebohrt werden.

- **Haben Sie Erfahrungen mit Abstandshalter? Welchen Typ verwendeten Sie? Was ist das Problem mit Abstandshalter?**

Der Einbau sei unpraktisch, funktioniert nicht, brauche viel Zeit, die Abstandshalter verklemmen und verschieben sich. Der Einbau verzögert sich, das Bohrloch bleibt ev. nicht so lange frei, dann kann die Sonde nicht mehr eingebaut werden. Das Risiko sei hoch, jemand macht das nur mit schriftlicher Abmahnung.

Diese werden auch nie verlangt.

Ob Abstandshalter nützlich wären, gehen die Annahmen auseinander. Diese nützen nur in der Theorie. Es gebe Messungen in Deutschland die zeigen, dass die Effizienz kaum besser werde. Die Temperaturdifferenz Vor- Rücklauf ist nur klein, der Gegenstrom-WT-Effekt daher klein. Jemand hat Versuche mit Steg-Sonden gemacht, deren Abstand definiert ist. Der Nutzen sei sehr klein gewesen.

- **Haben Sie Erfahrungen mit der Dämmung der obersten Bereiche der Sonde? Wie haben Sie gedämmt? Was sind die Probleme mit der Dämmung?**

Die Dämmung der obersten Meter Erdwärmesonde hat jemand schon gemacht mit synthetischen Kautschuk-Dämmschläuchen). Ist dann teuer: je nach Material ca. Fr. 40.- bis Fr. 80.- pro Meter.

Mit Packer könnte unterschiedliches Hinterfüllmaterial gewählt werden, oben z. B. dämmende Hinterfüllung.

Die obersten Meter zu dämmen habe aber wenig Potential, unter anderem da noch die Phasenverschiebung genutzt werden könne.

Für die horizontalen Verbindungsleitungen sei eine Sandeinbettung normal, auch möglich sei eine Einbettung in Magerbeton, wenn die Leitungen geschützt werden sollen. Verlegt wird in Frosttiefe, je nach Ort. Der Graben ist ca. 1 m tief. Einen Abstand zu halten bei der Verlegung sei schwierig, wenn viele Leitungen im Graben sind. Dieser ist eine Baggerschaufel breit: 60 cm.

Hingegen würden die horizontalen Leitungen mit Vorteil gegen einander und gegen oben mit verrottungssicheren Dämmplatten (wie für Perimeter-Dämmung) gedämmt. Dies werde meist nicht verlangt, wäre aber nützlich. Auch möglich wäre eine Schüttung aus Dämmmaterial: Vertikulit aus einem Big Bag. Wurde schon auf Kundenwunsch gemacht. Sei günstig.

Jemand verlegt die horizontalen Rohre mit einer Handbreite Abstand (ca. 10 cm). Die Hosenrohre zum Verbinden der beiden Sondenrohre der Doppel-U-Rohr Sonde bringen sie direkt über der Sonde an. Wo die Leitungen aus den Sonden verbunden werden, sei aber je nach Planer anders.

- **Wie ist der Anteil (Kosten) der Baustelleninstallation im Verhältnis zum bohren (den Bohrmetern und Sondenverlegung)? Wie offerieren/verrechnen Sie (Fixbetrag und Preis pro Meter oder nur Preis pro Meter)**

Viele machen eine detaillierte Offerte.

Die horizontale Verbindung koste ca. Fr. 600.- bis Fr. 800.- ohne Bauarbeiten (Graben, Oberfläche, Durchbruch etc.) bei ca. 5 m Länge. Fertig koste sie Fr. 2000.- bis Fr. 8000.- je nach Oberbelag. Speziell bei Sanierungen wird das teuer.

Andere rechnen pro Anschluss einer Sonde mit ca. Fr. 2000.-.

- **Wie ist die Vertikalität Ihrer Bohrungen? Können Sie dies messen und/oder beeinflussen?**

Viele haben das noch nie gemessen.

Es sei ein Abstand der Sonden von 5 % der Länge nötig, weil nie ganz gerade nach unten gebohrt werden könne. Das Bohr-Verfahren ist ungesteuert.

Gem. Literatur betrage die Abweichung ca. 3 bis 5 % der Länge. Bei horizontalen Schichten sei die Abweichung ca. 2 % der Länge, sonst seien mehrere 10 m möglich.

An einem Ort mit schrägen Schichten wurden bis 10 % Abweichung gemessen.

Jemand kann ein Bohrloch messen, nicht aber in der Sonde. Sie machen das aber kaum je. Es gebe Angebot für eine Messsonde im Sondenrohr aus Deutschland.

Es könne auch bis 5° schräg gebohrt werden, der Abstand oben sollte i.A. > 2 m sein.

- **Wie beherrschen Sie artesisch gespanntes Grundwasser?**

Jemand habe das noch nie erlebt (mind. nicht so, dass es ein Problem wurde). Sonst wären die Bohrmeister instruiert, Packer und Holzkeile seien vorhanden, und es sei möglich, Hilfe zu holen. Jemand sagt, sie holen Hilfe und dichten das Bohrloch oben ab.

Artheser müssen (nach Einbringen der Sonde) mit Gewebe-Packer verschlossen werden, die Bohrung ist gut abzudichten. Der Packer wird mit reinem Zement verfüllt: es sind dann drei Contractor-Rohre nötig. Eines ganz unten, eines für den Packer, eines oben am Packer. Ein Hersteller verkaufe aber fast keine Packer, obwohl auf jeder Bohrmaschine gemäss SIA 384/6 einer auf Reserve sein müsste. Diese sollten von den Behörden verlangt werden, um Grundwasser abzudichten. Auf der

Homepage eines Herstellers kann ein Packer-Zertifikat erstellt werden, um den Einbau nachzuweisen.

Oder die Bohrung stoppen und verfüllen.

In der Praxis werde Grundwasser oft nicht gemeldet, es wird einfach weiter gebohrt.

Es könne Probleme mit dem Auftraggeber geben, wenn wegen Grundwasser eine Bohrung nicht wie geplant fertig gestellt werde, jemand habe deswegen schon Kunden verloren.

- **Wie beherrschen Sie einen Erdgasaustritt?**

Mit einer Messung des Gases, dann muss der Bauplatz gesichert werden. Andere sagen, Erdgas rieche man.

Einmal habe jemand Gas und Erdöl angebohrt. Der ölverschmutzte Bohrschlamm musste als Sonderabfall entsorgt werden.

Jemand weise auf die Risikoversicherung für Arteser und Gasaustritt hin.

- **Wie beherrschen Sie Hohlräume (Klüfte)?**

Zwei Unternehmer wenden einen Gewebestrumpf (siehe oben) an.

- **Welche zukünftigen Entwicklungen sehen Sie bei den Erdwärmesonden?**

Bessere Hinterfüllung und Qualitätssicherung.

Marktpreise müssen wieder besser werden, damit Qualität geliefert werden kann.

Höhere Drücke, siehe oben.

- **Haben Sie Erfahrungen mit Erdkörben, Erdkollektoren, Grabenkollektoren etc.?**

Mit Erdwärmekörben hat kaum jemand Erfahrungen. Validierte Berechnungsverfahren würden fehlen, ebenso die Erfahrung.

Das Problem beim Einbau von Erdwärmekörben etc. sei, dass das Erdreich sehr gut verdichtet werden müsse, sonst bleiben Lufteinschlüsse, die den Wärmeübergang beeinträchtigen.

Erdwärmekörbe seien nicht sinnvoll, da aus Erfahrung nur 500 W pro Korb gewonnen werden kann.

Erdkollektoren (flache Kollektoren):

Wenige haben Erfahrung damit. Jemand habe schon Sonden erstellt um Erdkollektoren zu ersetzen, welche undicht wurde, oder weil der Garten gelitten habe. Erdkollektoren brauchen zu viel Platz.

Es werden 1 bis 2 Anlagen pro Jahr erstellt. Ein Horizontalkollektor wäre am günstigsten, auch als Grabenkollektor machbar. Diese dürfen aber nicht zu klein dimensioniert sein. Aus zu klein dimensionierten Anlagen komme der schlechte Ruf.

Grabenkollektoren:

Kaum jemand hat Erfahrungen damit.

Jemand weist darauf hin, dass mit Grabenkollektoren und Energiezäune in Kombination höhere Sol-temperaturen als mit Sonden erreicht werden könnten. Auch eine Kombination mit Solarkollektoren sei noch nicht ausgeschöpft.

- **Haben Sie Erfahrungen mit Heat-Pipe-Sonden (CO₂-Sonden)?**

Kaum jemand hat Erfahrungen damit.

Jemand kennt ein Projekt mit Wellrohren von Brugg AG.

Es wird gesagt, dass wie bei Koaxialsonden die Hinterfüllung schwieriger wird, da das Contractorrohr neben der Sonde ist.

Nachteil der CO₂-Sonden ist dass diese sind nicht zum Kühlen geeignet sind. Gut geeignet aber können diese Sonden für z.B. Rampenheizungen sein, die selbsttätig arbeiten. In Österreich gebe es Beispiele. Die Frage ist, wie lange die Sonden aus Metall (Kupfer oder Chromstahl) im Boden nicht korrodieren.

- **Wie Überwachen Sie die Qualität der Erdwärmesonden?**

Die SIA Norm 384/6 wird angewendet und die Gütesiegel-Bestimmungen. Ausschlaggebend sei aber der Bohrmeister vor Ort.

- **Welche gesetzlichen oder behördlichen Regulierungen erschweren den Markt für Erdwärmesonden? Was würde den Markt fördern?**

Die Bewilligungspraxis wird unterschiedliche bewertet. Einige finden sie OK. Andere sagen, die Bewilligungspraxis sollte praxisnäher sein. Mit Formularen etc. sollte nur abgefragt werden, was wirklich notwendig ist. Die Behörden hätten teilweise zu wenige Fachkenntnisse. Die unterschiedlichen Bewilligungs-Verfahren je nach Kanton werden kritisiert und kosten den Bohrfirmen deutliche mehr Aufwand. Die Bewilligung und Auflagen müssten schweizweit einheitlich sein, gem. BAFU-Vollzugshilfe.

Beispiele: Die Auflagen der Schlammentsorgung sind unterschiedlich. Die Gebühren sind unterschiedlich. Auch die Förderung ist pro Kanton unterschiedlich. Ob und durch wen ein geologisches Profil zu erstellen sei ist unterschiedlich.

Eine Gebühr in Abhängigkeit der Sondenlänge (z.B. CHF 2.50 pro m) mache keinen Sinn, besser eine fixe Gebühr.

Die Bewilligungsverfahren sollten in klaren Fällen vereinfacht werden (z.B. ein Anzeigeverfahren). Nur wo aus geologischer/hydrogeologischer Sicht unklare Verhältnisse herrschen, könnte ein neutrales Gutachten Sinn machen.

Jemand schlägt vor, das Bohrverfahren vorschreiben. Der Schutz Grundwasser muss sichergestellt werden (=Lebensmittel).

Der Vollzug müsste strenger werden: Baustellenkontrollen sind erforderlich: Wasser, Hinterfüllung. Auflagen müssen kontrolliert werden, ob sie eingehalten werden. Der Kanton St. Gallen sei gut, mache differenzierte Auflagen, gehe manchmal auf Baustelle.

Für den Vollzug könnten auch der FWS oder Private beauftragt werden.

Problem: die Vollzugskosten dürfen nicht zu hoch werden, sonst leidet die Konkurrenzfähigkeit der Erdwärme-WP.

Gewünscht wird, im GIS wären auch die geol. Daten zu finden. Alle Kantone müssten die gleichen Daten liefern (der Datenschutz sei hier fraglich). Die geologischen Profile sollten aufgezeichnet wer-

den und von den Kantonen auf GIS zur Verfügung gestellt werden. Damit würde die Planung und Qualitätskontrolle vereinfacht und verbessert.

Die Entsorgung des Bohrschlammes ist teilweise teuer, bis CHF 10 pro m³. Könnte dieser Schlamm nicht bei Neubauten als Verfüll- oder Unterlagsmaterial genutzt werden, d.h. auf der Baustelle entsorgt oder wiederverwertet werden?

- **Wann (bei welchen Bedingungen) muss der Untergrund regeneriert werden?**

Eine Regeneration wäre immer gut, z.B. mit Solarenergie. Andere sehen nur bei grossen Bauten eine Regeneration als nötig an.

- **Welche Chancen und Probleme ergeben sich beim Heizen und Kühlen mit Erdwärmesonden?**

Gute Chance, bessere JAZ sei erreichbar. Im Wohnbau sei die Nachfrage selten.

Werde je länger je wichtiger. Ermöglicht eine Regeneration. Auch für EFH und in südlichen Ländern interessant. Bei Sanierungen mit Heizkörpern ist Kühlen nicht möglich. Bei Bodenheizung kann es kalte Füsse im Sommer geben. Besser ist über die Decke zu kühlen.

Mit Erdwärmesonden könnten auch Vorplätze, Strassen, Einfahrten etc. passiv beheizt (enteist) werden. Es ist nur eine Pumpe und Steuerung erforderlich.

Mit Erdwärmesonden darf keine Bauaustrocknung gemacht werden.

- **Wen müssten wir beeinflussen, um optimierte Erdwärmesonden am Markt zu etablieren?**

Ein unabhängiges Controlling auf der Baustelle wäre gut, z. B. organisiert von FWS.

Bei Neubauten die Architekten. Bei Sanierung die Endkunden. Auch die Laien müssen informiert werden.

Alle: Vom Endverbraucher muss Druck kommen, er muss Qualität verlangen und wissen, worauf es ankommt. Es reicht nicht, wenn die Anlage funktioniert und keine Störungen auftreten.

Das Bohrverfahren muss stimmen und Qualität muss gewährleistet sein: der Bohrunternehmer muss das können.

- **Wären die Bezeichnungen Luft/Wasser-WP, Grundwasser/Wasser-WP und Erdwärme/Wasser-WP nicht besser zu kommunizieren (statt Sole/Wasser-WP)?**

Diese Bezeichnungen wären sicher besser.

Bezeichnung Erdwärme-Wasser WP wäre viel besser als Sole-Wasser-WP

Ja. In der Praxis setzt sich dies teilweise durch: Erdsonden-WP.

- **Welche weiteren offenen Fragen sollen wir im Projekt bearbeiten?**

Die Befüllung mit Sole: Einige machen das mit Subunternehmer, und verwenden Gemische mit 25 %/75 % oder mit 20 %/80 % Glykol-Wasser.

Die Heizungsunternehmer haben Mühe damit, speziell mit dem Entlüften. Die Solefüllung bringt oft der Installateur. Er kann beim Befüllen Fehler machen: Wenn das System nicht genügend gut entlüftet wird, gibt es Probleme oder Schäden mit Luftblasen.

Wenn reines Wasser verwendet wird: 50 % tiefer Bohren sei nötig. Wenn deswegen eine 2te Sonde nötig wird, werde es teuer. Anderen Quellen zufolge müsse die Sonde 100% tiefer/länger sein. Die min. Temperatur am Ausgang Verdampfer soll dann 4 °C nicht unterschreiten (Regel aus der Kälte-technik).

Das ganze System ist zu betrachten, inkl. Warmwasser.

Einheitliche Berechnungen fördern.

Alkohol /Ethanol als Frostschutzmittel: Die VOC-Abgabe verhindert Anwendung. Wärmepumpen- und Sondenhersteller sollen das zulassen. Jemand verwendet heute Wasser/Ethylenglykol 25 % vorgemischt ab Tank. Wenn Ethanol billiger wäre würde dies wohl verwendet, nach Tests bez. Machbarkeit. Jemand verwendet heute schon für gewisse Anwendungen Ethanol, das Handling sei kein Problem. Das Ethylenglykol-Gemisch koste etwa 1 CHF pro Liter, reines Glykol etwa 2 CHF pro Liter.

Das Sondenmaterial sollte verbessert werden.

Die Qualitätssicherung bei der Hinterfüllung.

Ein automatischer Drucktest wird gefordert.

FWS soll das Qualitätssiegel an Bohrfirmen aufteilen: A für Firmen mit Universalbohranlagen (Hammerbohrungen und Spülbohrungen), B für Firmen mit nur Hammerbohranlagen.

Hybrid-Anlagen untersuchen.

Das WW sollte für hohe JAZ mit einer Frischwasser-Anlage (kein Boiler) erwärmt werden.

- **Befragte Unternehmer:**

Stefan Berli, Dipl. sc. nat. Geologe SIA, Foralit Erdwärme AG, St. Gallen

E. Bianco, Bürgler AG, Wettingen

Mathias Broder, Dipl. Ing. FH, Wirtschaftsing. STV, Geschäftsführer, Broder AG Sargans

Alphons Ebnöther, Dipl. El. Ing. HTL, Wirtschaftsing. STV, Leiter GB Erdwärmesysteme, Haka Gerdur AG, Benken

Mario Grämiger, Verkaufsleiter und Peter Remund, PM Wärmepumpen, Störi Mantel Wärmetechnik AG, Au/Wädenswil

Daniel Trüssel, Dipl. Ing. FH, Geschäftsführer, KWT Kälte-Wärmetechnik AG,

5.5 Optimierung und Qualitätssicherung Hinterfüllung

Aus der Literaturstudie und den Interviews geht klar hervor, dass bei der Hinterfüllung ein Optimierungspotential besteht und die Notwendigkeit für Verbesserungen gegeben ist.

Gute thermische Leitfähigkeit

Das Optimierungspotential besteht vor allem bei der Verwendung von Hinterfüllungsmörtel mit verbesserter thermischer Leitfähigkeit. Damit kann eine um etwa 2 °C höhere Fluidtemperatur (bei gleicher Sondenlänge) erreicht werden [41], was einen besseren COP der Wärmepumpe zur Folge hat. Der grösste Vorteil bietet die thermisch verbesserte Hinterfüllung aber wenn regeneriert werden soll oder wenn die EWS auch für Kühlzwecke genutzt werden soll. Dann kann auch die Temperatur im Fluid tiefer sein, was die Regeneration z.B. mit Hybridkollektoren verbessert oder einen bessere freie Kühlung zulässt. Der Bedarf nach beiden wird zunehmen: Die Regeneration wird langfristig wohl in vielen Fällen notwendig, weil immer mehr Erdwärmesonden erstellt werden (was auch anzustreben ist). Die Nachfrage nach Kühlung wird zunehmen, weil die Klimaerwärmung für immer höhere Temperaturen im Sommer führen wird, weil die Gebäude immer besser gedämmt werden und damit im Sommer nicht mehr ohne zusätzliche Wärmeabfuhr auskühlen, und nicht zuletzt auch weil wir immer verwöhnter werden. Der Komfort eines klimatisierten Autos und Büros wird sich auch auf die Ansprüche an die Kühlung von Wohnräumen übertragen.

Frostbeständigkeit

Das Hinterfüllmaterial muss frostbeständig sein. Trotz korrekter Auslegung nach SIA 384/6 sind viele Fälle denkbar, dass es trotzdem zu Temperaturen unter null Grad Celsius im Sondenfluid kommen kann. Der berechnete Wärmebedarf des Hauses kann falsch sein. Das Haus kann anders gebaut werden als geplant. Die Nutzung des Hauses ist anders als geplant (z.B. mehrere Bewohner). Das Haus wird nachträglich vergrössert.

Viel eher aber kann es vorkommen, dass die Bewohner oder Nutzer ganz einfach deutlich mehr Wärmeenergie verbrauchen als normal. Messungen bei Einfamilienhäusern zeigen enorme Unterschiede im Wärmeverbrauch auf. Dies betrifft sowohl den Heizenergieverbrauch (Abbildung 5) als auch den Warmwasserbedarf (Abbildung 6).

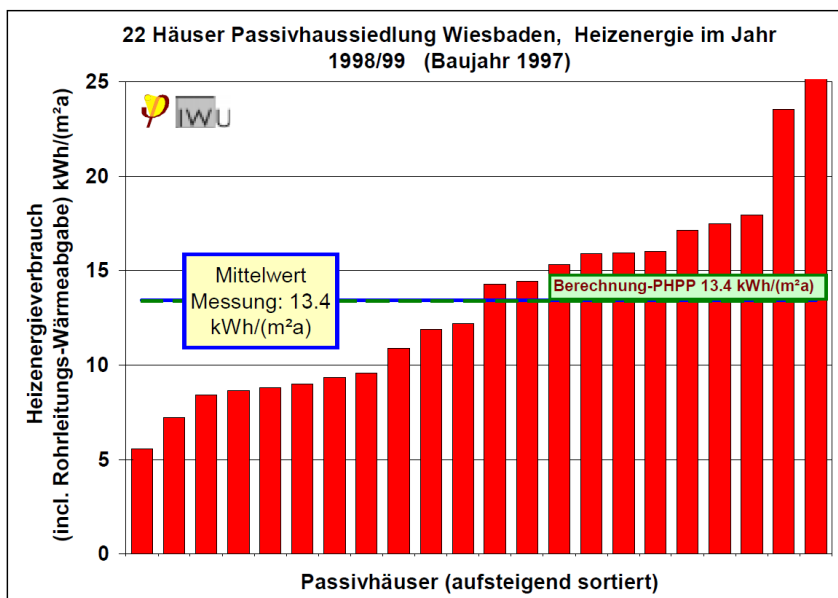


Abbildung 5: Heizenergiekennwerte inklusive der nutzbaren Wärmeabgabe von Rohrleitungen [42]

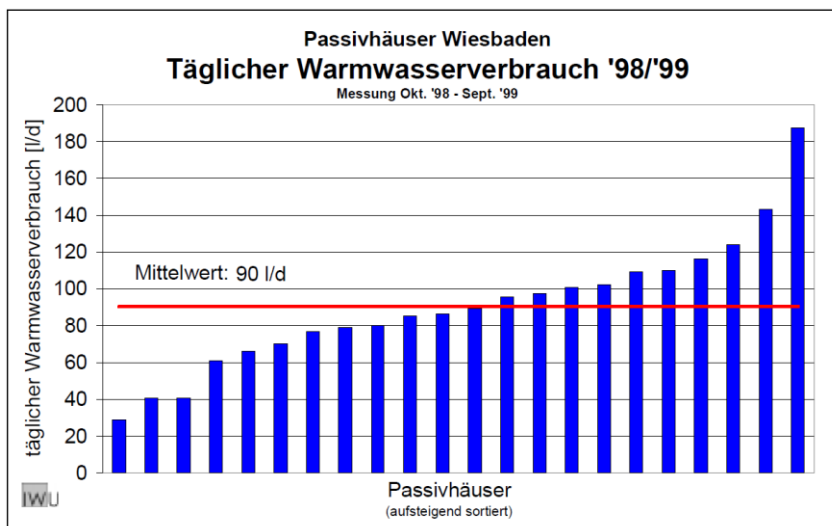


Abbildung 6: Warmwasserverbrauch der Einzelhäuser, aufsteigend sortiert (Messwerte Warmwasserzähler) [42]

Ein häufiges Szenario ist, dass in der Nähe weitere Erdwärmesonden erstellt werden und deswegen der Boden langsam auskühlt. Auch das Wetter kann Kapriolen schlagen, wie z.B. im Februar 2013, als die Temperaturen deutlich tiefer als üblich und als in der Auslegung gerechnet anzunehmen waren.

Ebenso eine nicht mehr zutreffende Auslegung der EWS und die Gefahr eines Absinkens der Soletemperatur in der Erdwärmesonde treten auf, wenn nach ca. 20 Jahren eine neue, nun bessere (höherer COP) Wärmepumpe installiert wird. Dann wird mehr Wärme aus dem Boden entzogen, was bei der Dimensionierung einer EWS heute kaum je berücksichtigt wird.

Da eine einmal eingebrachte Hinterfüllung weder repariert noch verändert oder gar ersetzt werden kann, ist es von größter Bedeutung, dass diese so eingebracht wird, dass alle, auch zukünftige, Anforderungen über die ganze Lebensdauer der Erdwärmesonde von mindestens 50, besser aber 100 Jahren erfüllt werden können. Dabei ist zu beachten, dass weniger tiefe Erdwärmesonden einfacher und sicherer hinterfüllt werden können als sehr tiefe.

Auf ein frostsicheres Hinterfüllmaterial könnte nur verzichtet werden, wenn reines Wasser als Sondenfluid verwendet wird und es sichergestellt werden könnte, dass nie im Verlauf der Lebensdauer der Erdwärmesonde (hoffentlich mehr als 100 Jahre) doch ein Frostschutzmittel beigegeben wird. Da dies kaum zu erreichen ist, sollte selbst bei Erdwärmesonden, welche für reines Wasser dimensioniert wurden, ein frostsicheres Hinterfüllmaterial gewählt werden.

Hilfreich hier ist, dass viele der frostsicheren Fertig-Produkte auf dem Markt, die heute verfügbar sind, auch eine verbesserte thermische Leitfähigkeit aufweisen, was ebenso erforderlich ist. Damit können zwei wesentliche Verbesserungen aufs Mal erreicht werden.

Qualitätssicherung auf der Baustelle

Die Qualitätssicherung der Hinterfüllung ist eine weitere Anforderung, welche zu wenig beachtet wird. Hier stellt sich das Problem, dass eine nachträgliche Kontrolle schwierig bis unmöglich ist.

Heute können zwei einfache Empfehlungen gegeben werden:

Der Bauherr oder sein Vertreter, stichprobenartig auch ein Behördenvertreter, sollten auf der Baustelle den Hinterfüllungsvorgang kontrollieren. Hier steht zuerst die Kontrolle des gelieferten Hinterfüllmaterials an: Wurde das richtige (bestellte) Material in der richtigen Menge auf die Baustelle geliefert? Wenn das Material in Säcken geliefert wird, ist die Kontrolle einfach: es müssen die Anzahl der Säcke gezählt werden und deren Aufschrift überprüft werden, ob diese mit den bestellten Material übereinstimmt. Um die Berechnung der notwendigen Anzahl Säcke zu vereinfachen, wurde in die-

sem Projekt ein Excel-Programm erstellt (Abbildung 7: Screenshot des Excel-Programms für Bauherren), in einer Ausführung für Laien und einer für Fachleute. Auch wurde eine Zusammenstellung der geeigneten Hinterfüllmaterialien gemacht, welche aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder Aktualität machen kann. (siehe <http://www.erdsondenoptimierung.ch/dokumente/im-projekt-erarbeitete-tools/>)

Berechnung Hinterfüllmaterial-Mengen (Fertigmischungen, trocken)			
Eingabefeld			
Ausgabefeld (Berechnung)			
Anzahl Bohrungen	1	(= Anzahl der Erdwärmesonden)	
Durchmesser der Bohrung	0.12 m	(Bohrunternehmer fragen, in Meter eingeben)	
Tiefe der Bohrung	150 m	(= Länge der Erdwärmesonden)	
Durchmesser PE-Erdsondenrohr	40 mm	(= Aussendurchmesser der Sonden-Rohre)	
Markenname	Hersteller	Anzahl Säcke à 25 kg	Menge in kg
ThermoCem Plus	HeidelbergCement Baustoffe für Geotechnik D-59320 Ennigerloh www.heidelbergcement.de	30 Stück	760 kg
EWM Füllbinder	Schwenk Zement KG D-89028 Ulm/Donau www.schwenk-zement.de	54 Stück	1 346 kg
Callidutherm	Terra Calidus GmbH, D-07546 Gera domburger zement GmbH & Co. D-07778 Dorndorf www.terra-calidus.de	39 Stück	973 kg
HDG	HDG Umelttechnik GmbH Stolzenseeweg 1 D-88353 Kisslegg www.hdg-umwelttechnik.com	47 Stück	1 178 kg
Duritherm Plus	w&p Zement GmbH A-9373 Klein St. Paul http://www.zement.wup.at/	41 Stück	1 037 kg
Stüwatherm 2000 "Z"	STÜWA Konrad Stükerjürgen GmbH D-33397 Rietberg - Varesell www.stuewa.de	43 Stück	1 084 kg
Stüwapress F-10	STÜWA Konrad Stükerjürgen GmbH D-33397 Rietberg - Varesell www.stuewa.de	41 Stück	1 025 kg

Abbildung 7: Screenshot des Excel-Programms für Bauherren

Wenn das Hinterfüllmaterial lose geliefert wird, ist die Kontrolle etwas schwieriger. Hier empfiehlt es sich die Menge zu erheben und mit der berechneten Anzahl Säcken zu vergleichen. Zudem sollte ein Glas (z.B. ein Konfitürenglas) voll fertig gemischten Mörtels als Probe entnommen werden, um bei Verdacht auf ein falschen Materials dieses im Labor untersuchen lassen zu können.

Zum weiteren braucht eine qualitativ einwandfreie Hinterfüllung Zeit. Auf der Baustelle kann auch kontrolliert werden, ob der Bohrmeister sich genügend Zeit nimmt, die Hinterfüllung fachgerecht zu erstellen. Der Zeitbedarf ist je nach Sondentiefe mit mindestens 2 bis 3 Stunden zu kalkulieren. Besonders ungünstig ist es, wenn relativ kurz vor Feierabend der Unternehmer noch die Hinterfüllung einpressen will, um am nächsten Tag mit dem Abbau der Anlage beginnen zu können. Am Schluss muss oben am Bohrloch die Hinterfüllung herausquellen, und sie sollte sich danach nur leicht absetzen. Dieser Vorgang sollte mindestens sporadisch auf der Baustelle überprüft werden.

Ein Verdacht auf nicht korrekt eingebrachte Hinterfüllungen kann bei den Behörden dazu führen, dass von der Erdwärmebranche unerwünschte Restriktionen bei der Nutzung der untiefen Geothermie eingeführt werden. Dies ist kürzlich im Kanton Zürich geschehen, wo für einen grossen Teil des Kantons neu eine Tiefenbeschränkung für Erdwärmesonden eingeführt wurde. Grund ist, weil nach Angaben der Behörden zu vermuten sei, dass bis die Hälfte der Hinterfüllungen mangelhaft seien und deswegen ein Anbohren einer Grundwasserschicht im Molassefels oder Malmkalk (eines Aquifers) in der oberen Meeressmolasse nicht mehr gestattet werde [43].

5.6 Trennung Vor- und Rücklauf in der EWS

Die Bohrung für eine Erdwärmesonde (EWS) sollte idealerweise eine senkrechtes und leeres Loch sein, begrenzt durch kompaktes Erdreich oder Felsgestein. Darin wird die EWS abgesenkt, theoretisch natürlich so, dass die Sondenrohre immer denselben Abstand zueinander haben und parallel verlaufen. Auch sollte der Abstand der Rohre zur Bohrlochwand immer gleich sein, d.h. die Rohre sollten zentriert sein. In der Praxis ist es aber wahrscheinlich, dass die Bohrung nicht genau senkrecht verläuft. Die Bohrung kann unbeabsichtigt schräg oder gebogen verlaufen, da es sich um ungesteuerte Bohrverfahren handelt. Die Bohrlochwände können leicht ausbrechen oder Klüfte anschneiden. Zudem werden die EWS-Rohre unkontrolliert eingebracht und verdrehen sich über die Sondenlänge. Der Abstand der einzelnen Rohre und ihre Position zueinander und zur Bohrlochwand verändern sich laufend.

Speziell geformte Abstandshalter (Abbildung 8), in regelmässigen Abständen befestigt, sollen einen gleichmässigen Abstand der Rohre über die gesamte Sondenlänge sicherstellen. Damit soll der Gegenstrom-Wärmetauscherereffekt, der zwischen den Vor- und Rücklaufrohren wirkt, verringert werden.



Abbildung 8: Abstandshalter der Firma Frank GmbH

Die heute angebotenen Abstandshalter funktionieren nicht

In der Praxis ist die Montage der heute angebotenen Abstandshalter kaum machbar, die Abstandshalter verschieben sich unkontrolliert und der Zeitaufwand für die Montage ist zu gross. Zudem muss der Einbringvorgang immer wieder unterbrochen werden, was die EWS zum Verklebmen bringen kann. Eine weitere Einbringung ist dann nicht mehr möglich.

Um die Sondenrohre zu zentrieren sind auch Zentrierhilfen erhältlich (Abbildung 9). Diese haben zusätzlich Abstandshalter zur Bohrlochwand. Auch hier gelten die obigen Probleme.

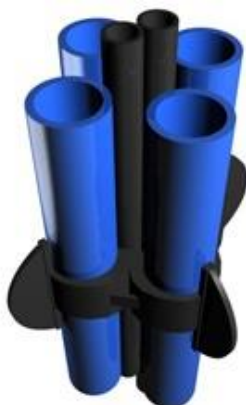


Abbildung 9: Zentrierhilfe der Firma Müller1

¹ <http://www.mueller-vhf.de/>

Um eine sichere Rohrlage zu erreichen, sind zudem sehr viele solcher Abstandshalter (mind. alle 2 Meter) oder Zentrierhilfen (eine pro Meter) erforderlich. Wenn diese noch verrutschen, können sie zusätzlich die Hinterfüllung erschweren, da der aufsteigende Mörtel gestaut wird.

Versuche und Messungen [44] zeigen zudem, dass der Nutzen der Abstandshalter nur gering ist, solange die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf 5 °C nicht übersteigt und es sich nicht um sehr tiefe Erdwärmesonden (ab 400 m) handelt.

Im horizontalen Verbindungsstück sollte der Vorlauf gedämmt werden

Die horizontalen, in circa 1 m Tiefe verlegten Verbindungsleitungen hingegen sollten getrennt und der Vorlauf aus der Sonde (zum Verdampfer) sollte gedämmt werden. Um die Verbindungsleitungen zu verlegen, wird ein schmaler Graben ausgehoben, der am besten wie folgt aufgefüllt wird (siehe auch). Ganz unten in einem Sandbett wird der (kalte) Rücklauf zur EWS hin verlegt. Darüber folgt eine circa 0,3 bis 0,4 m breite Dämmplatte, wie sie für Perimeterdämmungen verwendet wird. Darauf wird nochmals eine dünne Sandschicht gelegt, welche den (warmen) Vorlauf enthält, und das ganze wird gegen oben nochmals mit einer gleichen Dämmplatte isoliert. Zum Beispiel können Schaumglas-Dämmplatten mit ca. 3 cm Dicke und 30 cm Breite verwendet werden (Abbildung 10). Eine andere Möglichkeit ist, den Vorlauf mit einem verrottungssicheren Dämmschlauch zu dämmen, was aber oft schwieriger zu machen ist. Zudem gibt es kaum geeignete, langlebige Produkte.

Wenn das Verbindungsstück auf diese Weise installiert wird, kann ein Temperaturverlust im wärmeren Vorlauf vermieden werden, und der Rücklauf kann trotzdem schon Wärme von unten aufnehmen. Diese Dämmung wirkt umso besser, je tiefer die Erdwärmesonde ist. Sie ist insbesondere zu empfehlen, wenn die EWS mit reinem Wasser gefüllt ist, oder wenn es sich um lange horizontale Verbindungsleitungen handelt.

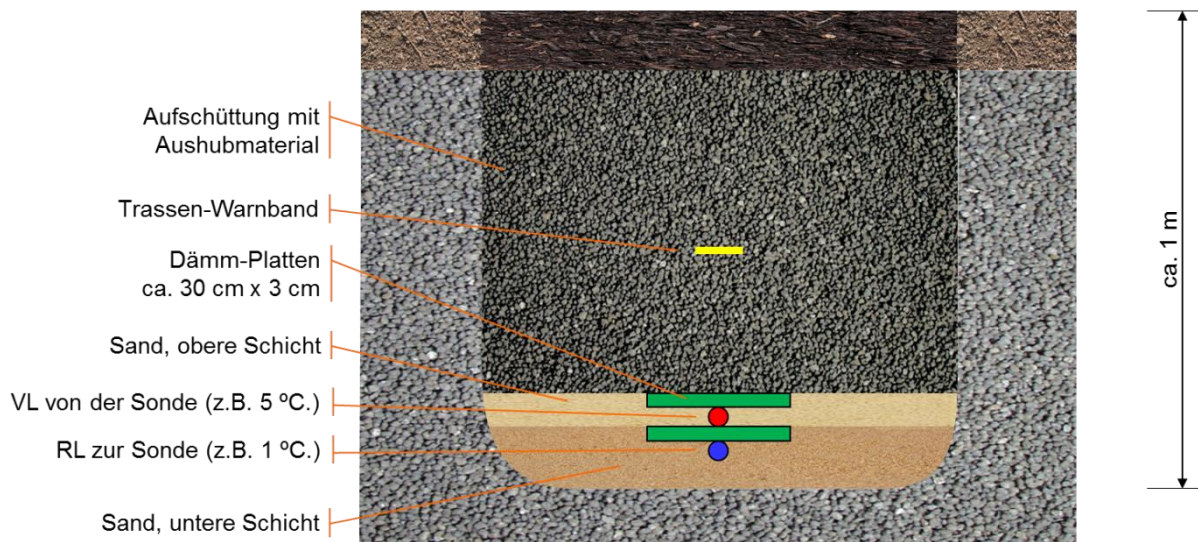


Abbildung 10: Vorschlag Trennung Vor- / Rücklauf zum Sondenkopf

5.7 Erarbeitung physikalische Eigenschaften der Sondenfluide

Bisher fehlen Angaben zu den physikalischen Eigenschaften von Wasser-Ethanol-Mischungen. Diese wurden im Projekt aus der Literatur herausgefiltert, umgerechnet und neu dargestellt. Dabei zeigte es sich, dass die Darstellung für die Planung von Erdwärmesonden, insbesondere über den hier interessierenden Temperaturbereich von ca. -10 °C bis ca. 20 °C und in den hier relevanten Bereich der volumetrischen Konzentrationen (von mind. 10 bis ca. 30 %), fehlt. Deswegen mussten die Werte aus unterschiedlichen Quellen kombiniert, teilweise extrapoliert und in die geeigneten Einheiten umgerechnet werden.

Bei der Bearbeitung zeigte es sich, dass eine Mischung aus Wasser und Ethanol eine sogenannte nicht-ideale Mischung ergibt, das heisst deren Eigenschaften können nicht linear aus den Eigenschaften der beiden Komponenten hergeleitet werden. Dies betrifft z.B. das Volumen einer Mischung. Werden z.B. 80 l Wasser mit 20 l Ethanol gemischt, resultieren nicht 100 l, sondern etwas weniger, da eine Volumen-Kontraktion stattfindet. Das analoge gilt für die spezifische Wärme, die andere Werte annimmt, als es die lineare Umrechnung der Mischung aus den Werten von reinem Wasser und reinem Ethanol ergeben würde. Auch die Verdampfungstemperatur (hier weniger von Bedeutung) verläuft nicht linear mit dem Mischungsverhältnis, sondern hat ein Minimum bei 95,6 % Massenanteil Ethanol². Und die Zähigkeit der Mischung ist sehr klar nicht-ideal, als es hier ein deutliches Maximum bei ca. 50 % Volumenanteile gibt, wo die Mischung deutlich zäher ist als es die beiden einzelnen reinen Komponenten sind.

Auch die spezifische Wärme der Mischung verhält sich anders als anzunehmen wäre und wird sogar höher als der Wert der beiden einzelnen Fluide Wasser und Ethanol. Dieses nicht-ideale Verhalten der Mischung lässt sich mit der starken Wechselwirkung zwischen den Moleküle beider Substanzen erklären [45].

Zusammen mit dem Institut für Chemie der ZHAW wurde die internationale Literatur ausgewertet. Die Literaturliste zur Erarbeitung der Fluidaten findet sich in Anhang A1.

Die Ergebnisse wurden graphisch dargestellt, sie sind auf der Website www.erdsondenoptimierung.ch veröffentlicht, und finden sich in Anhang A2.

5.8 Ethanol als Sondenfluid

5.8.1 VOC-Abgabenbefreiung auf Ethanol

Bisher hatte die Lenkungs-Abgabe des Bundes³ auf Stoffe, welche volatile Kohlenwasserstoffe (VOC) emittieren, eine Nutzung von Ethanol in Erdwärmesonden verhindert. Der Preis von Ethanol wurde dadurch stark erhöht. Der Sinn dieser Lenkungsabgabe ist es, die Luftreinhaltung zu fördern, da VOC als Vorläuferstoffe bei der Bildung von Ozon in bodennahen Luftschichten (Sommersmog) gelten. Insofern macht diese Lenkungs-Abgabe nur bei Anwendungen Sinn, wo eine Substanz so verbraucht wird, dass diese am Ende verdunstet und entsprechende VOC-Emissionen entstehen.

Bei der Verwendung von Ethanol als Frostschutzschlag in Erdwärmesonden hingegen ist das Ethanol einerseits in Wasser verdünnt und andererseits befindet es sich in einem geschlossenen Kreislauf und kann nicht verdunsten. Bei der allfälligen Entsorgung kann das Wasser-Ethanol-Gemisch in die Kanalisation gegeben werden, wo es sich weiter verdünnt und nicht verdunstet, aber biologisch gut abbaubar ist.

² Siehe bei <http://www.chemguide.co.uk/physical/phaseegia/nonideal.html>

³ Siehe bei http://www.ezv.admin.ch/zollinfo_firmen/04020/04256/04264/index.html?lang=de

Der Autor dieses Berichtes gelangte deswegen an das Bundesamt für Umwelt (BAFU), mit der Anfrage, ob und wie eine Befreiung der VOC-Abgabe möglich wäre für die Anwendung in Erdwärmesonden. Das BAFU nahm diese Idee positiv auf und engagierte sich stark für eine Lösungsfindung. Es zeigte sich, dass für Produktion resp. Import, Verarbeitung und Verteilung von Ethanol die eidgenössische Alkoholverwaltung (alcosuisse ag) verantwortlich ist. Heute findet hier eine Liberalisierung statt, alcosuisse ag soll per 2017 privatisiert werden⁴. alcosuisse bleibt aber wohl bis auf weiteres Marktführer im Bereich Produkte auf der Basis von Ethanol. Auch das Bundesamt für Energie entsendete einen Vertreter an die erforderlichen Sitzungen beim BAFU. Da für die Erhebung der VOC-Abgabe (und den Vollzug der entsprechenden Verordnung) die Eidgenössische Zollverwaltung verantwortlich ist, mussten auch Vertreter dieser Bundesstelle eingeladen werden. Schliesslich konnte eine Lösung gefunden werden, welche rechtlich zulässig ist. Dies da alle Beteiligten sich sehr stark für diese Idee einsetzten und kreativ Lösungswege diskutiert werden konnten. Es kann ein fertiges Produkt angeboten werden, welches als zweckentsprechende Mischung für die Verwendung in Erdwärmesonden angeboten wird. Dieses Produkt muss denaturiert sein, das heisst mit einem Vergällungsmittel versetzt werden, um einen Missbrauch als Trinkalkohol zu verhindern. Zusätzlich wird das Produkt eingefärbt, um es kenntlich zu machen, aber um es nicht z.B. als Reinigungs- oder Lösungsmittel einsetzen zu können. Das Produkt wird mit 20 % Volumenanteil Ethanol versetzt. Damit ist genügend Alkohol vorhanden, um eine Essigsäurebildung zu verhindern, welche bei geringer Konzentration auftreten könnte, falls Sauerstoff in die Mischung gelangt.

5.8.2 Neues Produkt Pumpetha

AlcoSuisse bietet nun ein solches Produkt unter dem Namen Pumpetha an⁵. Vorteile dieses Produktes (Abbildung 11) sind:

- Geringere Zähigkeit als Wasser-Ethylenglykol-Mischung und daher geringere elektrische Leistung der Umwälzpumpen, insb. in grossen Anlagen
- Keine Korrosionsschutz-Inhibitoren erforderlich
- Einfache Entsorgung möglich
- Gute biologische Abbaubarkeit
- Völlig ungiftig
- Nicht brennbar und es bilden sich keine explosiven Dämpfe bei Temperaturen unter 30 °C.
- Fertig gemischt mit kontrollierter Qualität, auch des Wassers (Härte)
- Jederzeit mit reinem Wasser verdünnbar oder mit mehr Ethanol mischbar.

⁴ Siehe bei <https://www.news.admin.ch/message/index.html?lang=de&msg-id=55547>

⁵ Seihe bei <http://www.alcosuisse.ch/de/angebot/spezialitaeten/>

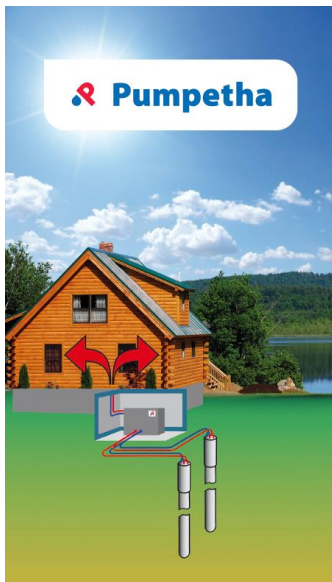


Abbildung 11: Werbung von alcosuisse für Pumpetha

Die Hauptvorteile dieser neuen Mischung sind deren geringe Zähigkeit und deren Umweltfreundlichkeit. Da Ethanol weltweit in riesigen Mengen hergestellt wird (unter anderem als Biotreibstoff) ist auch dessen Preis tief, so dass auch die Mischung günstig angeboten werden könnte.

Ob sich dieses Produkt am Markt durchsetzen kann, muss sich zeigen. Die Macht der Gewohnheit wird stark hemmend wirken. Auch sind Ängste und Vorbehalte auszuräumen. An positiven Erfahrungen aber mangelt es nicht, in der Schweiz gibt es einige Anlagen die schon länger problemlos betrieben werden. In Schweden, wo Erdwärmesonden ebenfalls schon länger grosse Verbreitung finden, ist Ethanol seit je das Standard-Frostschutzmittel.

Dazu kommt dass die Logistik aufwendiger wird, wenn das Fluid fertig gemischt angeliefert wird. Eventuell braucht es zusätzliche Dienstleistungen wie die Spülung, Reinigung der neu erstellen Erdwärmesonde und deren Prüfung auf Durchfluss, Dichtheit und Druck, und dann die Anlieferung der Mischung und die Befüllung.

Vorteilhaft wiederum ist, dass der Mischvorgang auf der Baustelle entfällt und die Qualitätssicherung einfacher wird.

5.8.3 Gefahren von Wasser-Ethanol-Mischungen

Reines Ethanol ist bezüglich Brennbarkeit und Explosionsschutz ein gefährliches Produkt. Eine Mischung mit Wasser ist bezüglich Brennbarkeit wesentlich ungefährlicher. Der Flammpunkt, das heisst die Temperatur ab der sich eine explosionsfähige Gasmischung über der Flüssigkeit bildet, liegt bei 20 % Vol. Ethanol bei 36 °C. Um sicher zu gehen sollte diese Mischung nicht über 31 °C erwärmt werden, d.h. bis max. 5 °C unter dem Flammpunkt. Bei höheren Temperaturen kann unter Umständen (insb. bei geschlossenen Behältern) über dem Gemisch ein explosionsfähiges Ethanol-Dampf-Luftgemisch durch Verdampfung des Ethanols entstehen. Dieses Gemisch ist entzündlich (R 10), das Gemisch sollte kühl aufbewahrt und vor Hitze geschützt werden. Mischungen von unter 15 % Vol. Ethanol gelten nicht mehr als brennbar (Flammpunkt ≥ 45 °C).

Ethanol ist auch bezüglich Umwelt besser als Ethylen-Glykol, insbesondere da keine Korrosionsschutz-Inhibitoren erforderlich sind. Es kann problemlos via Kanalisation entsorgt werden. Zudem ist es ein Produkt aus natürlichen Rohstoffen, welches als "Bio-Treibstoff" heute in riesigen Mengen und zu tiefen Preisen hergestellt wird.

Mischungen aus Wasser und Ethanol sind kaum giftig, sie entsprechen etwa Wein.

Ethanol-Wasser-Gemische sind biologisch gut abbaubar.

5.8.4 Gefrierverhalten einer Ethanol-Wasser-Mischung

Beim Gefrieren auf $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ eines Ethanol-Wasser-Gemisches mit 12 % Vol. Ethanol Gehalt entsteht kein harter Eisblock, aber ein Glace-artiges Gel (Abbildung 12 und Abbildung 13). Eine Mischung aus Wasser und 20 % Vol. Ethanol gefriert zu einer honigartigen Masse, die noch sichtbare Flüssigkeitsanteile enthält. Dies weil das Wasser zuerst gefriert und eine flüssig bleibende, höher konzentrierte Ethanol-Wasser-Mischung übrig bleibt. Die Volumenzunahme beim Gefrieren kann durch die fließfähige Restflüssigkeit kompensiert werden, so dass zum Beispiel in einem Verdampfer kaum mehr eine Sprengwirkung zu befürchten ist.

Von der Gefriersicherheit her kann Ethanol also als gut geeignet taxiert werden, selbst im Falle einer Unterschreitung der Gefriergrenze ist keine Gefahr für Schäden an der Anlage zu befürchten. In dieser Hinsicht würde für Erdwärmesonden eine 15 % Vol.-Mischung ausreichen.

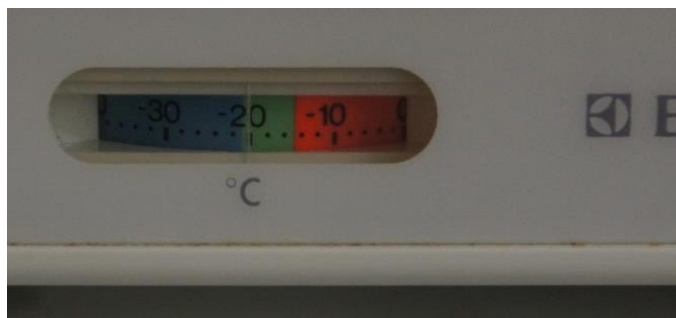
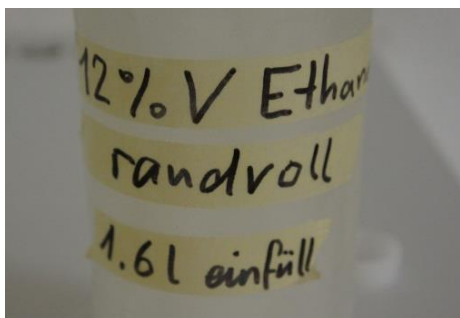


Abbildung 12: Gefrierversuch bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$



Abbildung 13: Gefrierversuch mit 12 % Vol.-Mischung: es ist eine kleine Volumenzunahme feststellbar, es entsteht aber kein fester Eisblock, sondern überflüssiges Gel tritt als Pfropfen und Flüssigkeit aus einer PET-Flasche.

5.8.5 Essigsäurebildung in Ethanol-Wasser-Gemischen

In Gemischen mit Wasser und Ethanol kann, unter Zufuhr von Sauerstoff, Essigsäure entstehen. Dieser biologische Prozess benötigt als Voraussetzung eine mindestens minimale Kontamination mit Essigbakterien (Acetobacter) und ein Gehalt an Ethanol von ideal zwischen 6 bis 12 % Vol. Je nach Quelle hört die Essigbildung bei 15 bis 20 % Vol. auf, der dann zu hohe Gehalt an Ethanol wirkt wie ein Sterilisator, die Bakterien werden abgetötet. Die Essigbildung (Säurebildung) findet statt bei Temperaturen zwischen $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, mit einem Optimum bei $26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ab $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ sterben die Essigbakterien ab. Zudem sind für die Essigbildung weitere organische Stoffe sowie Sauerstoff nötig. In einer Mischung aus destilliertem Wasser und Ethanol können Essigbakterien sich nicht vermehren.

In Erdwärmesonden sind die Bedingungen für eine Essigbildung meistens nicht ideal, aber manchmal doch gegeben. Sauerstoff kann durch die PE-Rohre diffundieren und es ist deshalb nicht zu verhindern, dass sich Sauerstoff in der Sole löst. Auch die Anwesenheit von organischen Stoffen kann kaum verhindert werden. Selbst wenn destilliertes Wasser verwendet würde, wären noch Verunreinigungen in den Rohren und beim Befüllen möglich. Wohl oft muss mit der Anwesenheit von Essigbakterien gerechnet werden, welche in der Natur und z.B. auch in Esswaren vorkommen.

Temperaturen über 20 °C sind möglich, falls die Erdwärmesonde regeneriert werden soll. Eine absolute Sicherheit gegen Säurebildung ist damit nicht gegeben.

Um die Bildung von Essigsäure sicher zu verhindern, und damit eine Korrosionsgefahr zu vermeiden, ist eine Mischung aus Wasser und 20 % Vol. Ethanol zu empfehlen.

Falls eine Essigsäurebildung auftritt, würde dies den pH-Wert der Sole sofort sehr deutlich verändern. Um zu überprüfen, ob in der Praxis eine Säurebildung auftritt, wurden an bestehenden Anlagen durch das EKZ Messungen des pH-Wertes durchgeführt (Tabelle 1). Die Resultate zeigen, dass es bei Mischungen mit 20 % Vol. keine Säurebildung gibt. Gemessen wurde je mit 2 unterschiedlichen pH-Wert-Messstreifen. Zum Vergleich wurden auch 2 Anlagen mit Ethylen-Glykol gemessen. Die Werte sind alle im neutralen Bereich, es fand also keine Säurebildung statt.

Tabelle 1: Messungen pH-Werte an bestehenden EWS-Anlagen

pH Messungen vom 07.04.2011

	Baujahr	Alter	EWS-Fluid		pH-Wert	Sonden	
			Sole	Konzentration		Anz	Länge
A	2001	10	Ethanol	20%	7	6	1840
B	2000	11	Ethanol	20%	7	14	4315
C	2002	9	Ethanol	20%	7	13	3599
D	2002	9	Ethanol	20%	6.5	23	6926
E	2002	9	Ethylen Glykol	20%	8	21	5837
F	2007	4	Ethylen Glykol	25%	7	8	2200

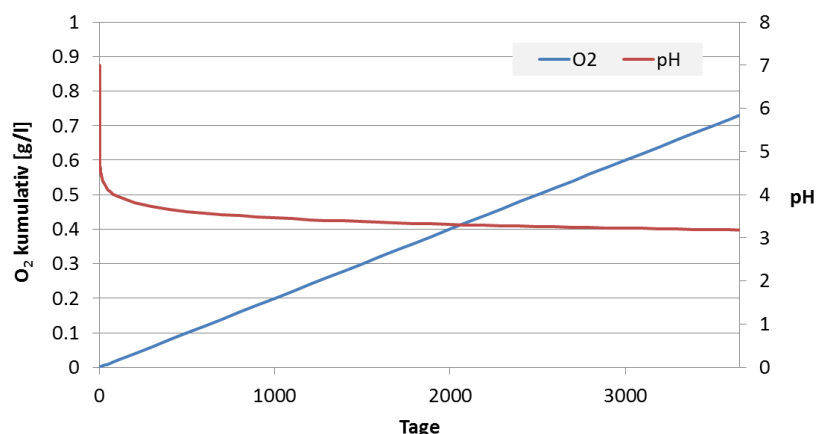


Abbildung 14: Bei auch nur geringer Säurebildung, abhängig vom Sauerstoffgehalt, fällt der pH-Wert sofort auf Werte unter 4.

Sole mit 20 % Vol. Ethanol

Vom Gefrierpunkt her ist diese Sole sicher auf der sicheren Seite, mit einem Gefrierpunkt von -8,4 °C. Diese Sole ist auch nicht mehr durch Säurebildung gefährdet. Der Vorteil einer Mischung mit 20 % Vol. Ethanol ist nicht eine tiefere Zähigkeit, sondern die höhere spezifische Wärmekapazität. Diese beträgt bei 5 °C 4,35 kJ/kgK, statt 3,82 kJ/kgK für eine 25 % Ethylenglykol-Sole, wie sie in der Praxis üblich ist. Damit kann auch hier 12 % weniger Fluid bei gleicher Temperaturdifferenz umgewälzt werden, was wieder vereinfacht und theoretisch berechnet Strom für die Umwälzpumpe in der dritten Potenz spart, also 32 %.

Nachteilig ist die doch schon etwas hohe Zähigkeit, die neben einer höheren Leistung der Umwälzpumpe auch dazu führt, dass im Sondenrohr eher eine laminare Strömung entsteht und dadurch der Wärmeübergang etwas schlechter wird. Nachteilig ist auch, dass diese Sole als brennbar gilt und die entsprechenden Sicherheitshinweise zu beachten sind.

Denaturierung

Um einem Missbrauch als trinkbarem Alkoholgetränk vorzubeugen, muss ein Denaturier- oder Vergällungsmittel beigegeben werden. Damit erhält die Flüssigkeit einen unangenehmen sehr Geruch und Geschmack. Dieses Mittel darf die Umwelt und das Grundwasser im Falle eines Lecks nicht gefährden (Auflage BAFU).

Einfärbung

Die Fertig-Mischung muss eingefärbt werden, einerseits damit Missbrauch verhindert wird, andererseits aber für die Anwendung, damit einfach kontrolliert werden kann, ob die ganze Anlage mit Frostschutzmischung gefüllt ist.

5.9 Optimierung der Strömung im Sondenrohr

Dieser Teil des Berichts beinhaltet Modelle und Berechnungen, welche der Optimierung von Erdwärmesondenanlagen dienen.

In diesem Teil geht es darum, die externe elektrische Leistung, welche der Umwälzpumpe und dem Kompressor der Wärmepumpe zugeführt werden muss zu minimieren, um damit die Jahresarbeitszahl zu optimieren. Dafür wird das Strömungsverhalten im Sondenrohr analysiert, welches einen ausschlaggebenden Einfluss auf den Druckverlust und die Wärmeübertragung und somit auch auf die externe Leistungsaufnahme hat. Insbesondere wird die Änderung der Fluidstoffwerte (Viskosität, Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit) entlang des Sondenrohres berücksichtigt, welche durch die Änderung der Temperatur im Fluid auftritt. Letztendlich wird die hergeleitete Theorie in eine Software eingebaut, welche einem Planer oder Bauherr bei der Auslegung eines neuen Erdwärmesondensystemes das Optimierungspotenzial aufzeigen soll.

5.9.1 Temperaturabhängigkeit von Sondenfluiden

In den durchgeführten Berechnungen sowie in der resultierenden Software wurden drei verschiedene Sondenfluide berücksichtigt, welche eingesetzt werden können:

- reines Wasser
- 20 % Ethanol, 80 % Wasser
- 25 % Ethylenglykol, 75 % Wasser

Für diese Fluide wurden die Stoffwerte bei verschiedenen Temperaturen gefunden [46]. Um einen analytischen Zusammenhang zwischen den Stoffwerten und den Temperaturen zu schaffen, werden die Werteverteilungen mit Polynomen angenähert. Dies resultiert in den folgenden Beziehungen (Tabelle 2)

Tabelle 2: Eigenschaften verschiedener Fluide

dyn. Viskosität η [10^{-3}Ns/m^2]	
Wasser	$\eta = 9 \cdot 10^{-4} T^2 - 5.75 \cdot 10^{-2} T + 1.7886$
Ethanol 20 %	$\eta = -2 \cdot 10^{-4} T^3 + 9.4 \cdot 10^{-3} T^2 - 2.334 \cdot 10^{-1} T + 4.5023$
Ethylenglykol 25 %	$\eta = -8 \cdot 10^{-5} T^3 + 4.7 \cdot 10^{-3} T^2 - 1.648 \cdot 10^{-1} T + 4.2307$

Dichte ρ [kg/m³]	
Wasser	$\rho = -7 \cdot 10^{-6} T^2 - 5 \cdot 10^{-5} T + 0.9998$
Ethanol 20 %	$\rho = -8 \cdot 10^{-6} T^2 - 2 \cdot 10^{-4} T + 0.9786$
Ethylenglykol 25 %	$\rho = -2 \cdot 10^{-4} T + 1.0459$
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	
Wasser	$\lambda = 1.9 \cdot 10^{-3} T + 0.5612$
Ethanol 20 %	$\lambda = 10^{-3} T + 0.4663$
Ethylenglykol 25 %	$\lambda = 4 \cdot 10^{-4} T + 0.4831$
spez. Wärmekapazität c [kJ/kgK]	
Wasser	$c = 8 \cdot 10^{-5} T^2 - 3.4 \cdot 10^{-3} T + 4.2176$
Ethanol 20 %	$c = 5 \cdot 10^{-5} T^2 - 3.6 \cdot 10^{-3} T + 4.3681$
Ethylenglykol 25 %	$c = 10^{-3} T + 3.81$

Möchte man das Strömungsverhalten in einem Sondenrohr untersuchen, so müssen diese Werte in jeder beliebigen Tiefe bekannt sein. Da die Temperatur des Fluids von dessen Tiefe abhängt, kann diese Beziehung geschaffen werden. Die Schwierigkeit dabei ist, dass man für die Berechnung der Temperatur wiederum die Stoffwerte in jeder Tiefe kennen muss. Das Vorgehen zur Berechnung der Beziehung zwischen Stoffwerten und Tiefe ist deshalb iterativ.

Um die Iteration zu beschreiben, muss man die Geometrie des Bohrloches kennen. Die benötigten Grössen sind in Abbildung 15 dargestellt. Aus diesen Grössen werden zusätzlich die Exzentrizität

$$b = \frac{Bu}{2r_1}$$

und der Konduktivitätsparameter

$$\sigma = \frac{\lambda_{Fill} - \lambda_{Earth}}{\lambda_{Fill} + \lambda_{Earth}}$$

definiert. Weiter muss man die Vor- und Rücklauftemperatur ($T_{Quelle}/T_{Rücklauf}$), die spezifische Sondenleistung \dot{q} (Leistung pro Längeneinheit) und die Sondentiefe H kennen.

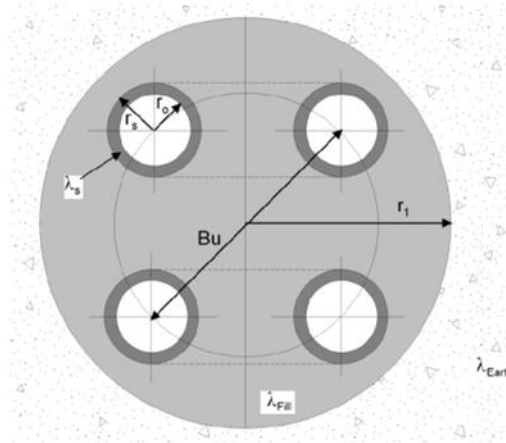


Abbildung 15: Bohrlochgeometrie einer Doppel-U Erdwärmesonde [47].

Nun kann für diskrete Werte $(\rho_i, \lambda_i, \eta_i, c_i)$ mit $i = 1, \dots, H$ folgende Iteration durchgeführt werden:

1. Startwerte: $(\rho_i, \lambda_i, \eta_i, c_i) = (\rho(T), \lambda(T), \eta(T), c(T))$ mit $T = 0$ für alle $i = 1, \dots, H$
2. Berechnen der dimensionslosen Nusseltzahl (Huber, Erdwärmesonden für Direktheizung, 2005):

$$Nu = \begin{cases} 4.36, & Re < 2300 \\ 0.012(Re^{0.87} - 280) \left(\frac{\eta c}{\lambda}\right)^{0.4} \left[1 + \left(\frac{r_0}{H}\right)^{\frac{2}{3}}\right], & Re \geq 2300 \end{cases}$$

mit

$$Re = \frac{\dot{q}H}{\pi r_0 \eta c \Delta T}$$

3. Berechnen des Wärmeübergangskoeffizienten [47]:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{2r_0}$$

4. Berechnen des internen Bohrlochwiderstandes [47]:

$$R_a = \frac{1}{\pi \lambda_{Fill}} \left[\ln\left(\frac{\sqrt{2}br_1}{r_0}\right) - \frac{1}{2l} \ln\left(\frac{2br_1}{r_0}\right) - \frac{1}{2} \sigma \ln\left(\frac{1-b^4}{1+b^4}\right) \right] + \frac{1}{2\pi r_0 \alpha} + \frac{1}{2\pi \lambda_s} \ln\left(\frac{r_s}{r_0}\right)$$

5. Berechnen der Temperatur in der Tiefe z auf dem Weg nach unten und auf dem Weg nach oben [47]:

$$T_{up}(z) = T_{Rücklauf} + \frac{\dot{q}z}{2\dot{m}c} + \frac{\dot{q}Hz}{R_a \dot{m}^2 c^2} - \frac{\dot{q}z^2}{2R_a \dot{m}^2 c^2}$$

$$T_{up}(z) = T_{Quelle} - \frac{\dot{q}z}{2\dot{m}c} + \frac{\dot{q}Hz}{R_a \dot{m}^2 c^2} - \frac{\dot{q}z^2}{2R_a \dot{m}^2 c^2}$$

wobei

$$\dot{Q} = \dot{m}c\Delta T \Rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{q}H}{c\Delta T}$$

6. Diese Temperaturen werden nun in die obenstehende Tabelle eingesetzt um neue Stoffwerte $(\rho_i, \lambda_i, \eta_i, c_i) = (\rho_i(T), \lambda_i(T), \eta_i(T), c_i(T))$ mit $T=T_{down}(z)$ bzw. $T_{up}(z)$ zu erhalten. Es muss dabei zwingend zwischen den Fällen „down“ und „up“ unterschieden werden. Diese neuen Stoffwerte werden jetzt wieder bei Schritt 2 eingesetzt.
7. Schritt 2 bis 6 wird nun wiederholt bis die neuen Stoffwerte nicht mehr merklich von den vorhergehenden abweichen. Dabei kann eine beliebige Genauigkeit ε gewählt werden.
8. Die Stoffwerte werden jetzt als Funktion von z aufgezeichnet:
 $(\rho_i, \lambda_i, \eta_i, c_i) = (\rho_i(T(z)), \lambda_i(T(z)), \eta_i(T(z)), c_i(T(z)))$
9. Die in Schritt 8 gezeichneten Kurven werden wiederum durch ein Polynom angenähert um einen geschlossenen Ausdruck für die Tiefenabhängigkeit der Stoffwerte zu erhalten

5.9.2 Druckverlust im Erdwärmesondenkreislauf

Möchte man nun den Druckverlust im Erdwärmesondenkreislauf berechnen, muss man folgende Komponenten beachten:

- Druckverlust in den Sondenrohren
- Druckverlust am Verdampfer der Wärmepumpe
- Druckverlust an den Zuleitungen
- Druckverlust an Armaturen (Ventile, Bögen, ...)

Als erstes wird der Druckabfall in den Sondenrohren berechnet. Da sich die Stoffwerte des Fluides entlang der Sonde ändern, wird der Druckverlust für infinitesimal kleine Rohrabschnitte (Abbildung 16) betrachtet und anschliessend über die gesamte Sondentiefe integriert.

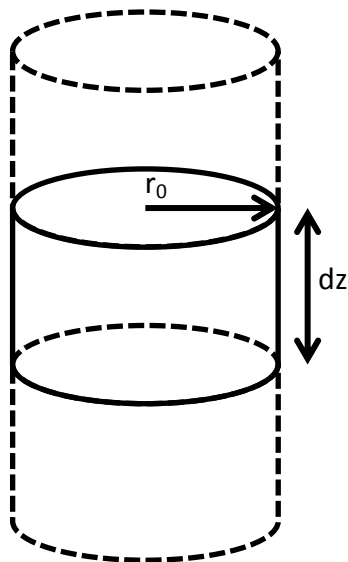


Abbildung 16: Infinitesimaler Rohrabschnitt zur Druckverlustberechnung

Der Druckverlust in einem Rohrstück wie in Abbildung 16 ist gemäss [48]:

$$dp = \xi \frac{\rho}{2} \frac{v^2}{2r_0} dz$$

wobei

$$v = \frac{\dot{v}_{Rohr}}{A_\emptyset} = \frac{\dot{v}_{Rohr}}{\pi r_0^2} = \frac{\dot{v}_{Verd}}{2\pi r_0^2}$$

Dabei ist \dot{v}_{Rohr} der Volumenstrom im Sondenrohr, welche für eine Doppel-U Erdwärmesonde genau die Hälfte des Volumenstromes im Verdampfer \dot{v}_{Verd} (von hier an mit \dot{v} bezeichnet) beträgt. Die Durchflussgeschwindigkeit ist über die Dichte mit dem Massenstrom verknüpft ($\dot{m} = \rho \dot{v}$). Man erhält damit:

$$dp = \xi \frac{\dot{q}^2 H^2 dz}{16r_0^5 \pi^2 c^2 \Delta T^2 \rho}$$

Um nun die Rohrreibungszahl ξ zu bestimmen, muss zwischen *laminarer* und *turbulenter* Strömung unterschieden werden. Hierfür wird die dimensionslose Reynolds-Zahl eingeführt:

$$Re = \frac{2r_0 v}{\nu} = \frac{2r_0 \dot{q} H}{2\pi r_0^2 c \Delta T \rho v} = \frac{\dot{q} H}{\pi r_0 c \Delta T \eta}$$

wobei die kinematische Viskosität ν mit der dynamischen Viskosität via $\eta = \rho \nu$ verknüpft ist. Die *laminare Strömung* wird dann durch [48]:

$$\xi = \frac{64}{Re}$$

und die *turbulente Strömung* durch [48]:

$$\xi = [0.79 \ln(Re) - 1.64]^{-2}$$

beschrieben. Der Umschlagpunkt zwischen laminar und turbulent ist bei etwa $Re = 2300$. Der Druckverlust pro Längeneinheit kann nun also wie folgt beschrieben werden:

$$\frac{dp}{dz} = \begin{cases} \frac{4\dot{q}^2 H^2}{r_0^5 c^2 \Delta T^2 \pi^2 \rho Re}, & Re < 2300 \\ \frac{\dot{q}^2 H^2}{16r_0^5 c^2 \Delta T^2 \pi^2 \rho} [0.79 \ln(Re) - 1.64]^{-2}, & Re \geq 2300 \end{cases}$$

Der totale Druckabfall in den Sondenrohren berechnet sich dann mit einer Integration:

$$\Delta p = \int_0^H \left(\left[\frac{dp}{dz} \right]_{down} + \left[\frac{dp}{dz} \right]_{up} \right) dz$$

Der Druckabfall im Verdampfer wird wie folgt beschrieben [48]:

$$\Delta p_{Verd} = \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_N} \right)^2 \Delta p_N$$

wobei der Nennmassenstrom \dot{m}_N und der Nenndruckverlust Δp_N durch die technischen Daten der Wärmepumpe bekannt sein müssen. Das in \dot{m} steckende c wird dabei als $c(T_{Quelle})$ berechnet.

Der Druckabfall über den Armaturen wird durch Widerstandsbeiwerte ζ wie folgt berechnet [48]:

$$\Delta p_{Arm} = \zeta \frac{\rho}{2} v^2$$

Sind die genauen Positionen der Armaturen bekannt, so kann eine exakte Rechnung mit den lokalen Stoffwerteeigenschaften durchgeführt werden. Sind die Positionen nicht bekannt, kann der Druckabfall über die gesamte Sondenlänge „verschmiert“ und danach integriert werden. Dafür wird Δp_{Arm} durch die doppelte Sondentiefe geteilt (damit der Weg nach unten und nach oben berücksichtigt wird):

$$\frac{dp_{Arm}}{dz} = \zeta \frac{\rho}{4H} \frac{\dot{q}^2 H^2}{4\pi^2 c^2 \Delta T^2 \rho^2 r_0^4} = \zeta \frac{\dot{q}^2 H^2}{16\pi^2 c^2 \Delta T^2 \rho r_0^5 H}$$

Um den totalen Druckabfall über den Armaturen zu berechnen, wird dieser Ausdruck gemeinsam mit dem Druckabfall in den Sondenrohren über die gesamte Sondentiefe integriert.

Als letzte Komponente muss nun noch der Druckabfall in den Zuleitungsrohren berechnet werden:

$$\Delta p_{Zul} = \xi \frac{L_{Zul}}{D_{Zul}} \frac{\rho}{2} v^2$$

Dabei ist L_{Zul} die Länge der Zuleitung bzw. Ableitung und D_{Zul} der Innendurchmesser der Zuleitungsrohre ($D_{Zul} = 2 \cdot r_{Zul}$). Die Dichte muss zwischen Zu- und Ableitung unterschieden werden, da die Temperaturen verschieden sind, ebenso sind ξ und v von den Temperaturen abhängig:

$$\Delta p_{Zul} = \xi_{Zul} \frac{L_{Zul}}{2r_{Zul}} \frac{\rho_{down}(0)}{2} v_{Zul}^2 + \xi_{Abl} \frac{L_{Zul}}{2r_{Zul}} \frac{\rho_{up}(0)}{2} v_{Abl}^2$$

Mit

$$v = \frac{\dot{q}H}{c\Delta T \rho \pi r_{Zul}^2}$$

erhält man schliesslich

$$\Delta p_{Zul} = \frac{L_{Zul} \dot{q}^2 H^2}{4\pi r_{Zul}^3 \Delta T^2} \left(\frac{\xi_{Zul}}{c^2_{down}(0) \rho_{down}(0)} + \frac{\xi_{Abl}}{c^2_{up}(0) \rho_{up}(0)} \right)$$

wobei man in ξ_{Zul} und ξ_{Abl} die Reynoldszahl

$$Re = \frac{2\dot{q}H}{\eta_{u/d} c_{u/d} \Delta T \pi r_{Zul}}$$

benötigt.

Der gesamte Druckabfall des Systems erhält man nun durch Addition der Einzelbeiträge:

$$\Delta p_{tot} = \Delta p + \Delta p_{Verd} + \Delta p_{Arm} + \Delta p_{Zul}$$

5.9.3 Externe Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe

Die Leistung, welche die Umwälzpumpe aufnehmen muss, ist dann die hydraulische Leistung unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades der Umwälzpumpe η_p :

$$P_p = \frac{\Delta p_{tot} \dot{v}}{\eta_p}$$

Da \dot{v} entlang der Sonde verändert wird, geht man vom Maximum aus:

$$\dot{v}_{max} = \frac{\dot{q}H}{\Delta T c_{up}(0) \rho_{up}(0)}$$

In der Praxis wird die Pumpe bei bekanntem Δp_{tot} und \dot{v} ausgelegt (zum Beispiel mit dem Pumpselector von Biral⁶) und die Leistung sowie der Wirkungsgrad bestimmt. Als Kontrolle kann überprüft werden ob die gefundenen Werte die obige Gleichung erfüllen.

In den Abbildungen Abbildung 17 bis Abbildung 24 sind die benötigten elektrischen Pumpenleistungen für verschiedene Sondenfluide, Rohrdicken und Temperaturen aufgezeichnet. Die Werte für den Druckabfall und den Volumenstrom wurden mit den obigen Methoden berechnet und danach ein Pumpenwirkungsgrad von $\eta_P = 25\%$ angenommen. Als Nennvolumenstrom und Nenndruckverlust im Verdampfer wurden die folgenden Werte angenommen: $\Delta p_N = 2.8\text{ kPa}$, $\dot{v}_N = 0.860\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ (Wärmepumpe Viessmann Vitocal BW301.A06).

Die Wärmeleitfähigkeiten wurden wie folgt verwendet: $\lambda_{Fill} = 2\frac{\text{W}}{\text{mK}}$, $\lambda_{Earth} = 2,5\frac{\text{W}}{\text{mK}}$ und $\lambda_S = 0,35\frac{\text{W}}{\text{mK}}$. Die spezifische Wärme-Entzugsleistung beträgt $\dot{q} = 40\frac{\text{W}}{\text{m}}$ und die Rohrdimensionen sind $r_0 = 32,6\text{ mm}$, $r_s = 40\text{ mm}$ und $r_1 = 15\text{ cm}$ (DN40) bzw. $r_0 = 26\text{ mm}$, $r_s = 32\text{ mm}$ und $r_1 = 12\text{ cm}$ (DN32). Der Druckabfall über Armaturen und in den Zuleitungen wird in dieser Rechnung vernachlässigt.

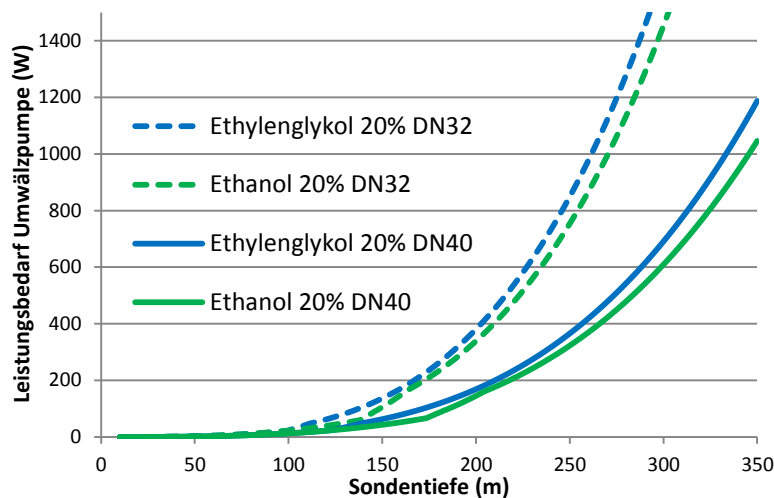


Abbildung 17: Leistung nach 50 Jahren, bei Auslegetemperatur von $-1,5\text{ °C}$ (gemäss SIA 384/6) und $\Delta T = 3\text{ °C}$.

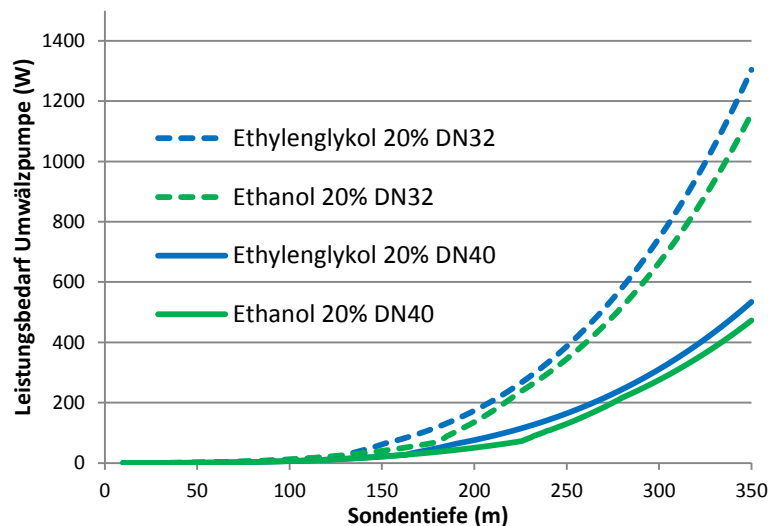


Abbildung 18: Leistung nach 50 Jahren, bei Auslegetemperatur von $-1,5\text{ °C}$ (gemäss SIA 384/6) und $\Delta T = 4\text{ °C}$.

⁶ Siehe bei www.biralpumpselector.ch

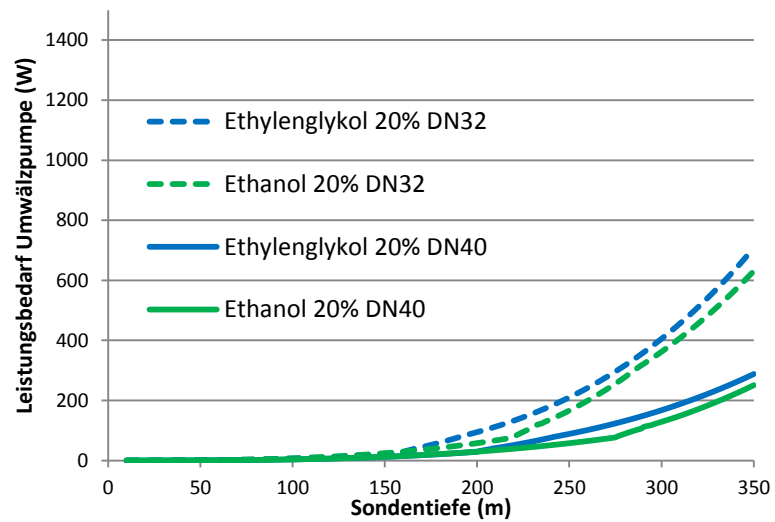


Abbildung 19: Leistung nach 50 Jahren, bei Auslegetemperatur von $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (gemäss SIA 384/6) und $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

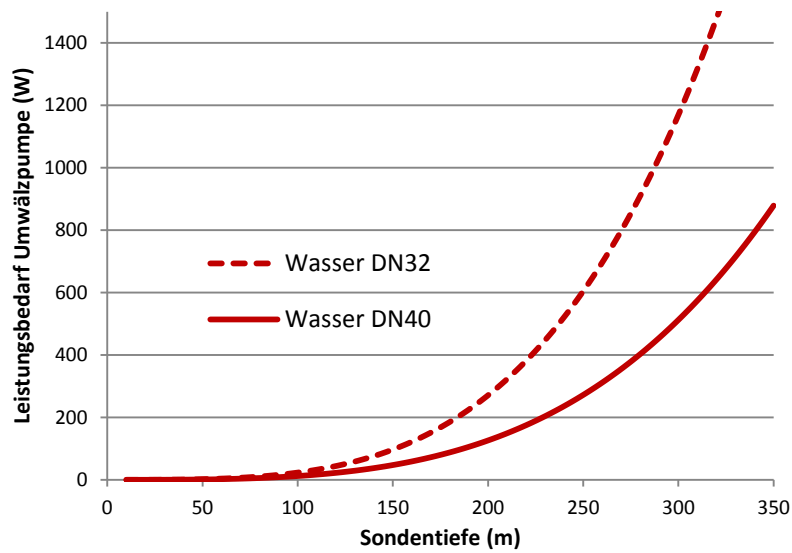


Abbildung 20: Leistung nach 50 Jahren, bei Auslegetemperatur von $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $\Delta T = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, reines Wasser.

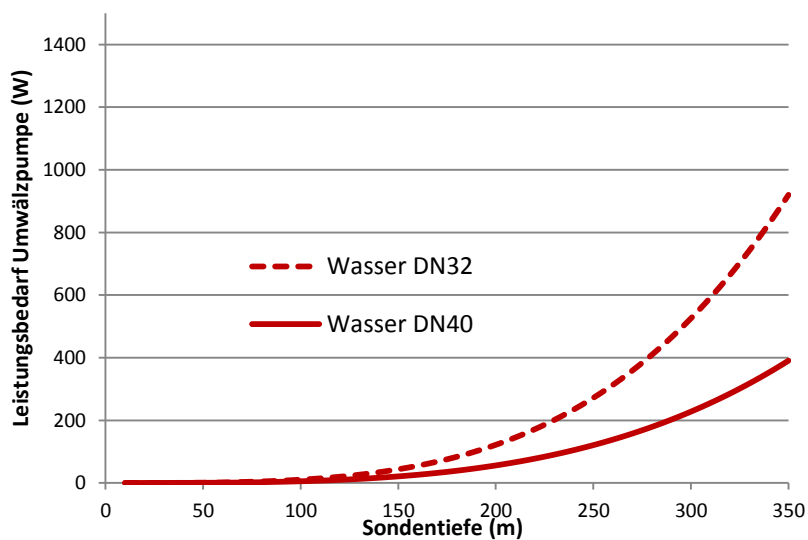


Abbildung 21: Leistung nach 50 Jahren, bei Auslegetemperatur von $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $\Delta T = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$, reines Wasser.

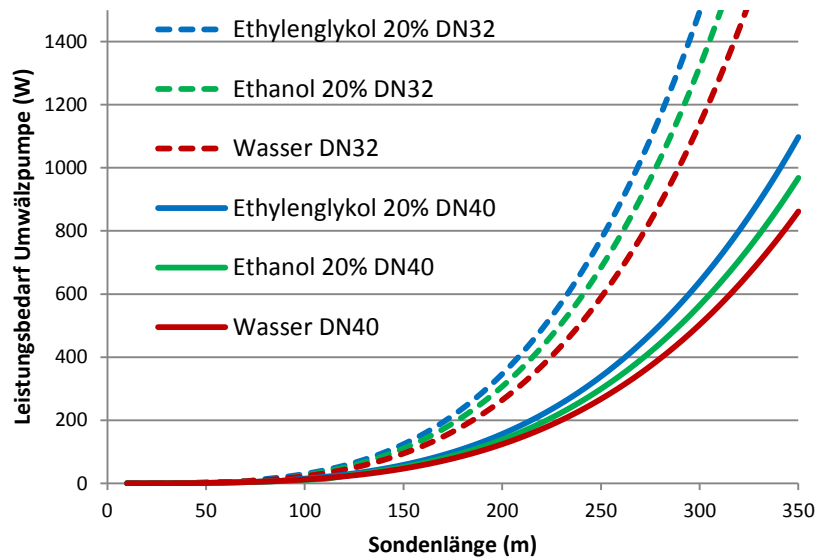


Abbildung 22: Leistung bei einer neuen Anlage, bei Durchschnittstemperatur von 8,5 °C und $\Delta T = 3$ °C.

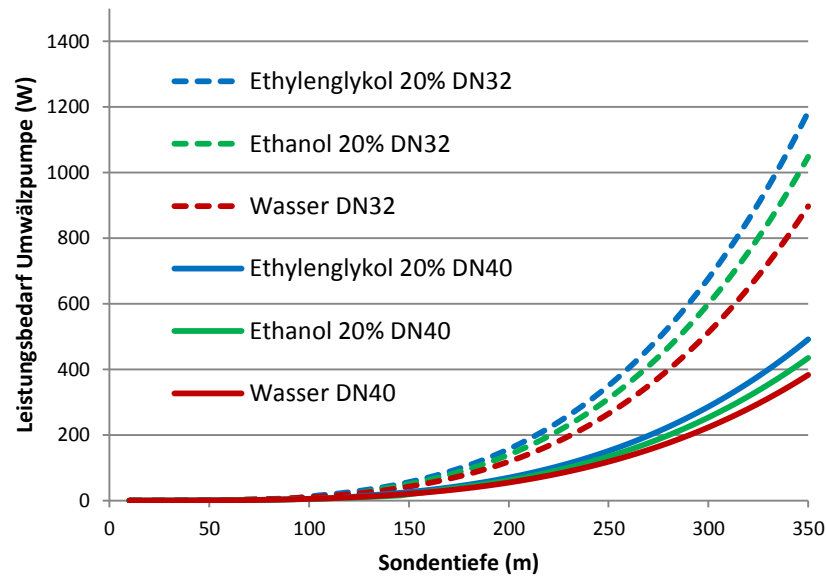


Abbildung 23: Leistung bei einer neuen Anlage, bei Durchschnittstemperatur von 8,5 °C und $\Delta T = 4$ °C.

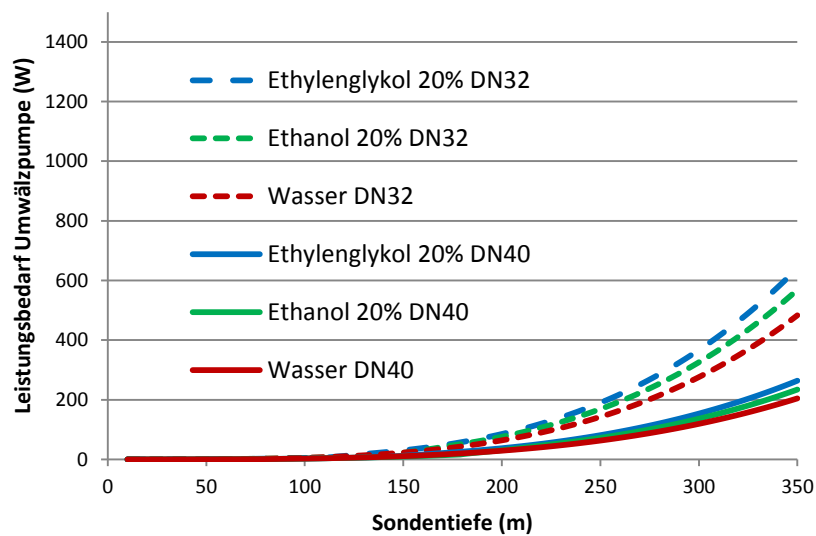


Abbildung 24: Leistung bei einer neuen Anlage, bei einer Durchschnittstemperatur von 8,5 °C und $\Delta T = 5$ °C.

Aus den obigen Abbildungen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Reines Wasser im Sondenkreis führt zum geringsten Leistungsbedarf für die Umwälzpumpe.

Ethanol (mit 20 % Volumenanteil) ist etwas besser als Ethylenglykol mit derselben Konzentration (eine Konzentration von Ethylenglykol mit 25 % Volumen-Anteil wurde nicht gerechnet, da dies ohnehin keinen Sinn macht.)

Bis etwa einer Tiefe von ca. 120 m können DN32 Rohre verwendet werden, ohne mehr Pumpenenergie zu benötigen. Ab 140 m Tiefe müssen DN40 Rohre verwendet werden.

Ab ca. 160 m Tiefe sollte auf ein ΔT von 4 °C ausgelegt werden, darunter sind 3 °C besser, damit eine turbulente Strömung erreicht werden kann.

Ab ca. 250 m Tiefe nimmt der Leistungsbedarf der Pumpe stark zu. Bei tieferen Sonden sollte auf ein ΔT von 5 °C ausgelegt werden. DN50 Rohre machen wegen der dickeren Wandstärke wenig Sinn.

5.9.4 Leistungsaufnahme der Wärmepumpe

Wärmeübertragung zwischen Rohrwand und Sondenfluid

Um die Wärmeübertragung zwischen Rohrwand und Sondenfluid zu beschreiben, wird die Situation wie in Abbildung 25 betrachtet. Gemäss dem Newton'schen Wärmeübergangsgesetz [49] gilt:

$$Q = \alpha A_{RW} (T_a - T_f) \Delta t$$

wobei Q die übertragene Wärmemenge, α der Wärmeübergangskoeffizient, A_{RW} die betrachtete Fläche (Rohrwand, nicht Rohrquerschnitt), Δt das betrachtete Zeitintervall und T_a und T_f die Temperaturen an der Rohrwand bzw. im Fluid, sind.

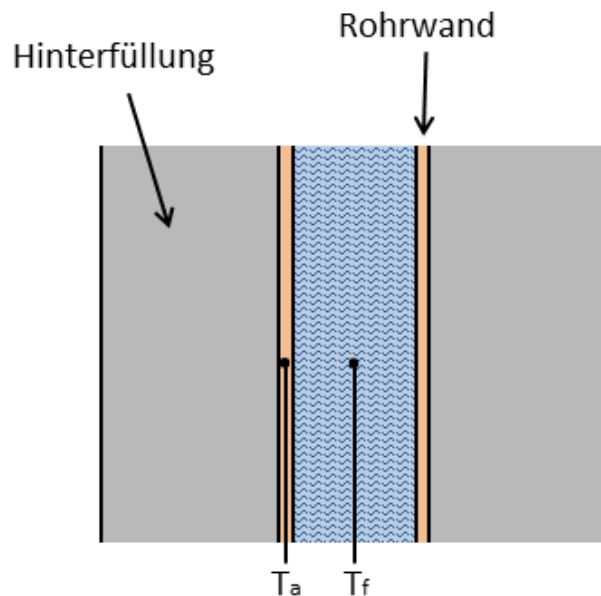


Abbildung 25: Wärmeübertragung zwischen Rohrwand und Sondenfluid

Nutzt man nun die Beziehungen $\dot{Q} = Q/\Delta t$ und $\Delta T_R = T_a - T_f$ kann die obige Gleichung wie folgt umgeschrieben werden:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A_{RW} \cdot \Delta T_R$$

Die Fläche A_{RW} kann durch Multiplikation des Rohrumfanges mit der Gesamtrohrlänge (hier 4 Rohre) berechnet werden:

$$A_{RW} = 4H\pi \cdot 2r_0$$

Stellt man nun \dot{Q} durch die spezifische Entzugsleistung dar ($\dot{Q} = \dot{q} \cdot L$), so ergibt sich für den Temperaturunterschied zwischen Wand und Fluid der folgende Ausdruck:

$$\Delta T_R = \frac{\dot{q}}{8\alpha \cdot \pi \cdot r_0}$$

Beschreibung des Wärmeübergangskoeffizienten

Der Wärmeübergangskoeffizient α kann mit Hilfe der dimensionslosen Nusselt-Zahl Nu beschrieben werden [50]:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{2r_0}$$

womit ΔT_R dann zu

$$\Delta T_R = \frac{\dot{q}}{4\lambda \cdot Nu \cdot \pi}$$

wird. Die Nusselt-Zahl hängt davon ab, ob das Fluid im Sondenrohr laminar oder turbulent strömt [50]:

$$Nu = \begin{cases} 4.36, & Re < 2300 \\ 0.012(Re^{0.87} - 280)Pr^{0.4} \left[1 + \left(\frac{r_0}{H}\right)^{\frac{2}{3}} \right], & Re \geq 2300 \end{cases}$$

Durch einsetzen von Re und Pr wird dieser Ausdruck zu

$$Nu = \begin{cases} 4.36, & Re < 2300 \\ 0.012 \left(\left(\frac{\dot{q} \cdot H}{\pi \cdot r_0 \cdot \eta \cdot c \cdot \Delta T} \right)^{0.87} - 280 \right) \left(\frac{\eta \cdot c}{\lambda} \right)^{0.4} \left[1 + \left(\frac{r_0}{H}\right)^{\frac{2}{3}} \right], & Re \geq 2300 \end{cases}$$

Relative Änderung des COP

Der COP der Wärmepumpe kann beschrieben werden durch

$$COP = \eta_G \cdot \eta_c$$

wobei η_G der sogenannte Gütegrad ($\sim 0,45$) und $\eta_c = \frac{T_0}{T_o - T_u}$ der Carnot-Wirkungsgrad sind. Es gilt also

$$COP = \eta_G \frac{T_0}{\Delta T_W}$$

mit $\Delta T_W = T_o - T_u$ dem totalen Temperaturhub der Wärmepumpe. Richtwerte für $\Delta T_W \sim 35$ °C bei einer Bodenheizung und ~ 50 °C für Radiatorheizungen. Um den Einfluss der Wärmeübertragung im Sondenrohr auf den COP zu beschreiben wird nun folgende Ersetzung in der obigen Gleichung vorgenommen:

$$\Delta T_W \rightarrow \Delta T_W + \Delta T_R$$

Die relative Differenz ΔCOP zwischen $COP_{turbulent}$ und $COP_{laminar}$ ist dann gegeben durch

$$\Delta COP = \frac{COP_{turbulent}}{COP_{laminar}} - 1$$

Wird in diesen Ausdruck die modifizierte Gleichung für den COP für beide Fälle laminar und turbulent eingesetzt, so ergibt sich:

$$\Delta COP = \frac{\Delta T_W + \Delta T_{Rlaminar}}{\Delta T_W + \Delta T_{Rturbulent}} - 1$$

für $Re > 2300$. Für $Re < 2300$ ist die Differenz 0. Um letztendlich die relative Differenz auszurechnen muss also der Ausdruck für die Nusselt-Zahl in den Ausdruck für ΔT_R eingesetzt werden:

$$\Delta COP = \begin{cases} 0, & Re < 2300 \\ \frac{\Delta T_W + \frac{\dot{q}}{4\lambda\pi \cdot 4.36}}{\Delta T_W + \frac{\dot{q}}{4\lambda\pi \cdot 0.012 \left(\left(\frac{\dot{q}H}{\pi r_0 \eta c \Delta T} \right)^{0.87} - 280 \right) \left(\frac{\eta c}{\lambda} \right)^{0.4} \left[1 + \left(\frac{r_0}{H} \right)^{\frac{2}{3}} \right]}}, & Re \geq 2300 \end{cases}$$

Um die Änderung der Sondenfluideigenschaften entlang der Erdwärmesonde zu berücksichtigen, wird dieser Ausdruck durch die doppelte Sondentiefe geteilt und entlang der Sonde integriert.

Leistungsaufnahme des Kompressors

Mit den obigen Vorbereitungen kann nun sehr leicht die dem Kompressor extern zuzuführende Leistung berechnet werden,

$$P_{Komp} = \frac{\dot{Q}_W}{COP} = \frac{\dot{Q}_U}{COP \left(1 - \frac{1}{COP} \right)} = \frac{\dot{Q}_U}{COP - 1}$$

wobei \dot{Q}_W die Wärmeleistung und \dot{Q}_U die totale Entzugsleistung der Sonde bedeuten. Um die oben berechnete Differenz ΔCOP zu berücksichtigen wird nun folgende Änderung vorgenommen,

$$COP \rightarrow COP (1 + \Delta COP)$$

woraus dann folgende Leistung resultiert:

$$P_{Komp} = \frac{\dot{Q}_U}{COP \left(1 + \frac{\Delta COP}{100} \right) - 1}$$

5.9.5 Optimierung der Hydraulik im Sondenrohr

Die totale Leistungsaufnahme des Erdwärmesondensystems erhält man nun durch Addition der Leistungen, welche durch die Umwälzpumpe und durch den Kompressor aufgenommen werden:

$$P_{total} = P_p + P_{Komp}$$

Ein neuer COP' -Wert, der auch die Umwälzpumpe miteinbezieht, kann nun wie folgt berechnet werden:

$$COP' = \frac{\dot{Q}_W}{P_p + P_{Komp}} = \frac{\dot{q}H}{P_p + P_{Komp}} \frac{COP}{COP - 1}$$

Dies wurde für die gleichen Fluide und Temperaturen und unter den gleichen Bedingungen wie in Abschnitt 2.3. durchgeführt. Als Vorlauftemperatur der Heizung wurde 35 °C gewählt, was einer Bodenheizung entspricht. Es wurden jeweils zwei verschiedene Rohraussendurchmesser (32 mm und 40 mm) sowie Sondertiefen zwischen 10 m und 350 m betrachtet. Die Resultate sind in den Abbildungen Abbildung 26 bis Abbildung 33 graphisch dargestellt.

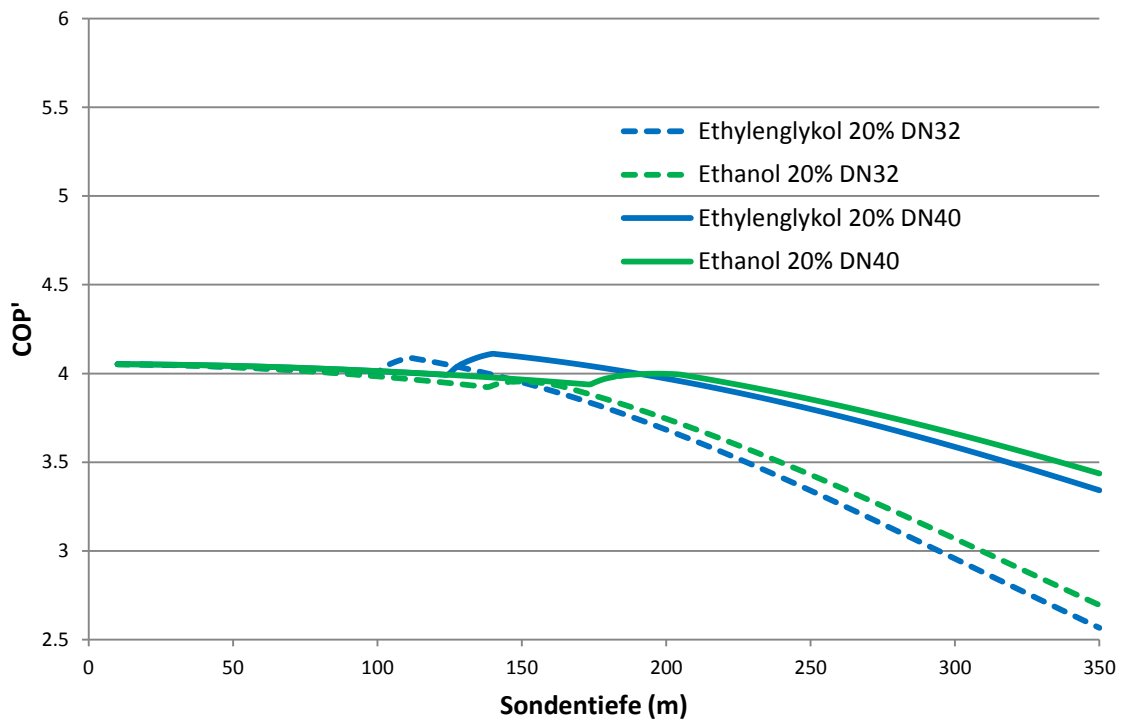


Abbildung 26: COP' nach 50 Jahren, bei Auslegetemperatur von -1,5 °C (gemäss SIA 384/6) und $\Delta T = 3$ °C.

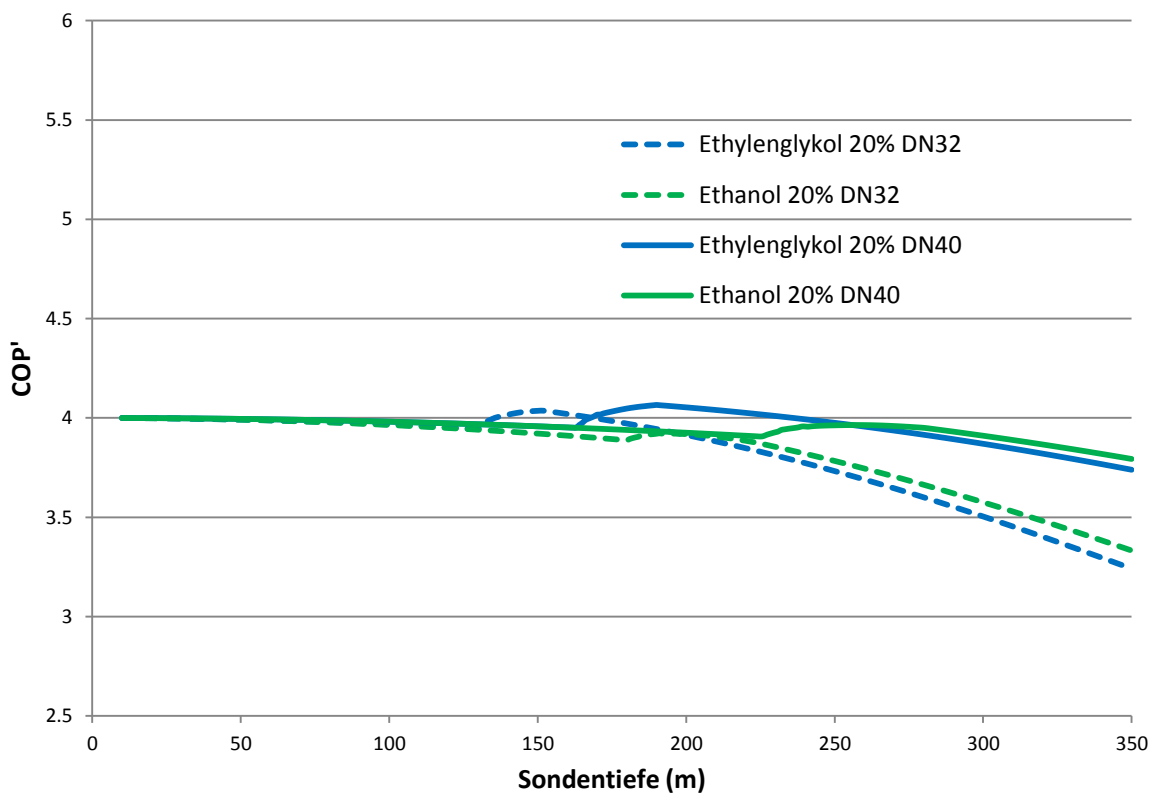


Abbildung 27: COP' nach 50 Jahren, bei Auslegetemperatur von -1,5 °C (gemäss SIA 384/6) und $\Delta T = 4$ °C.

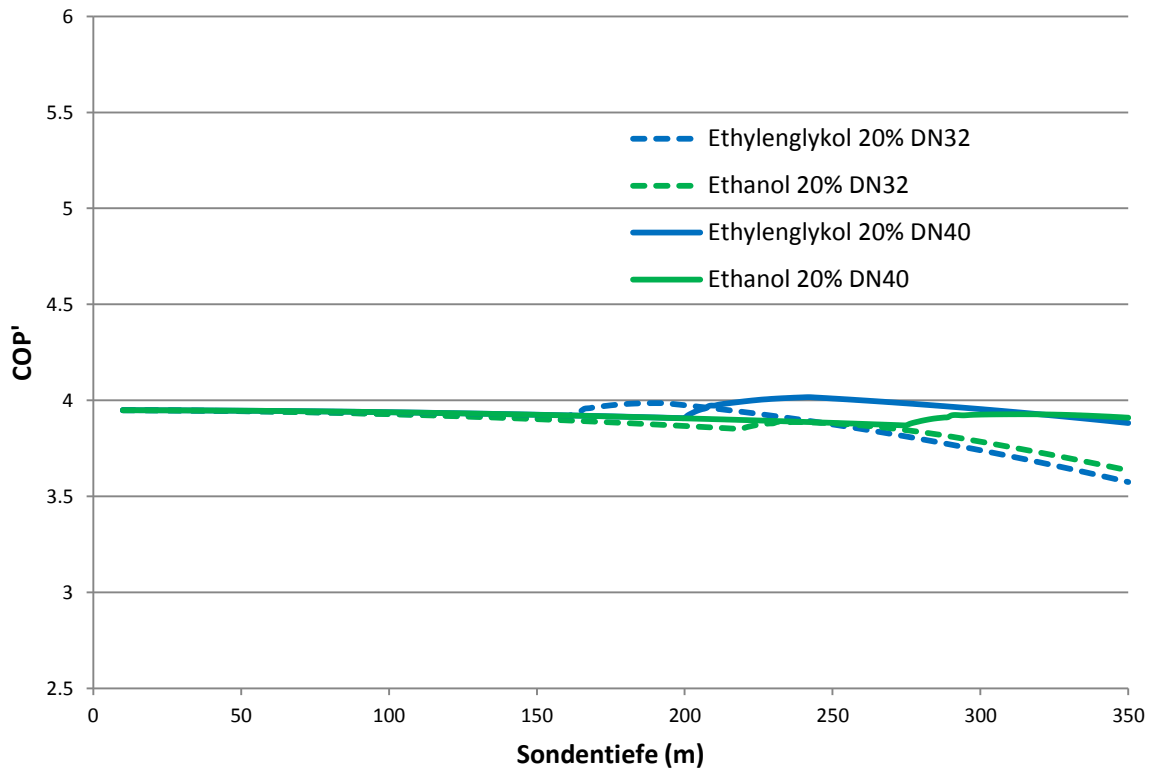


Abbildung 28: COP' nach 50 Jahren, bei Auslegetemperatur von $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (gemäss SIA 384/6) und $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

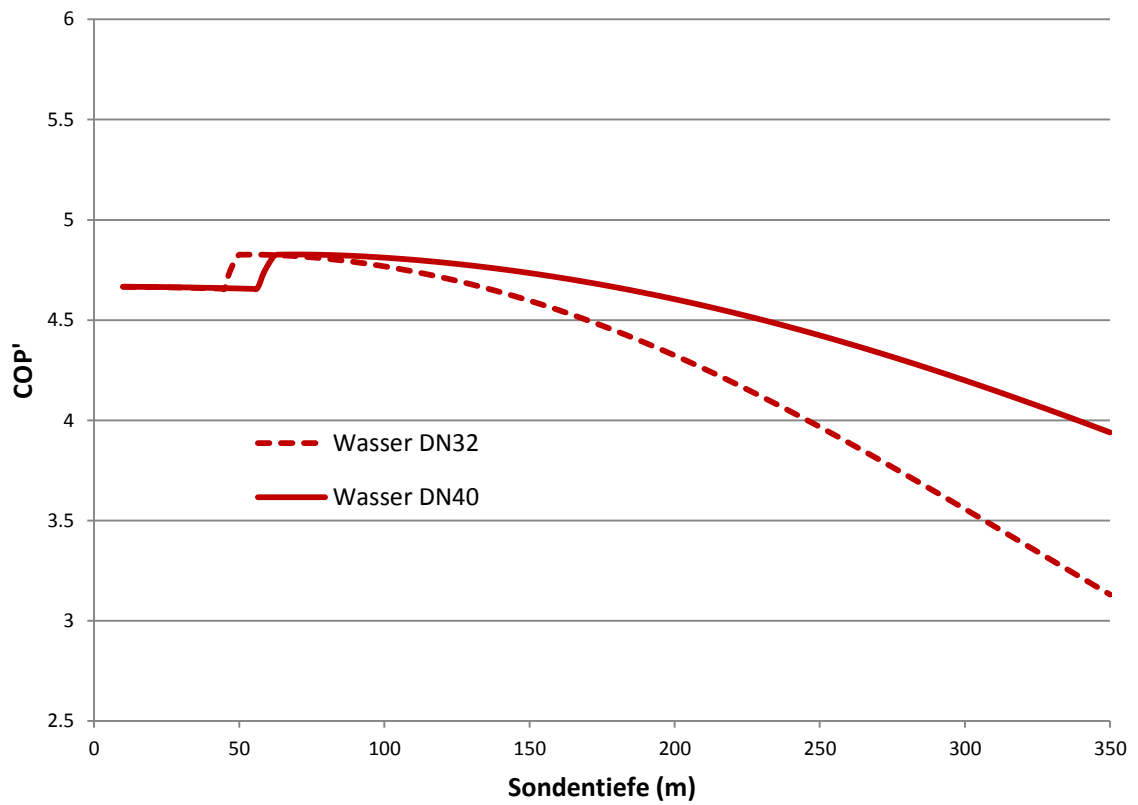


Abbildung 29: COP' nach 50 Jahren, bei Auslegetemperatur von $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $\Delta T = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

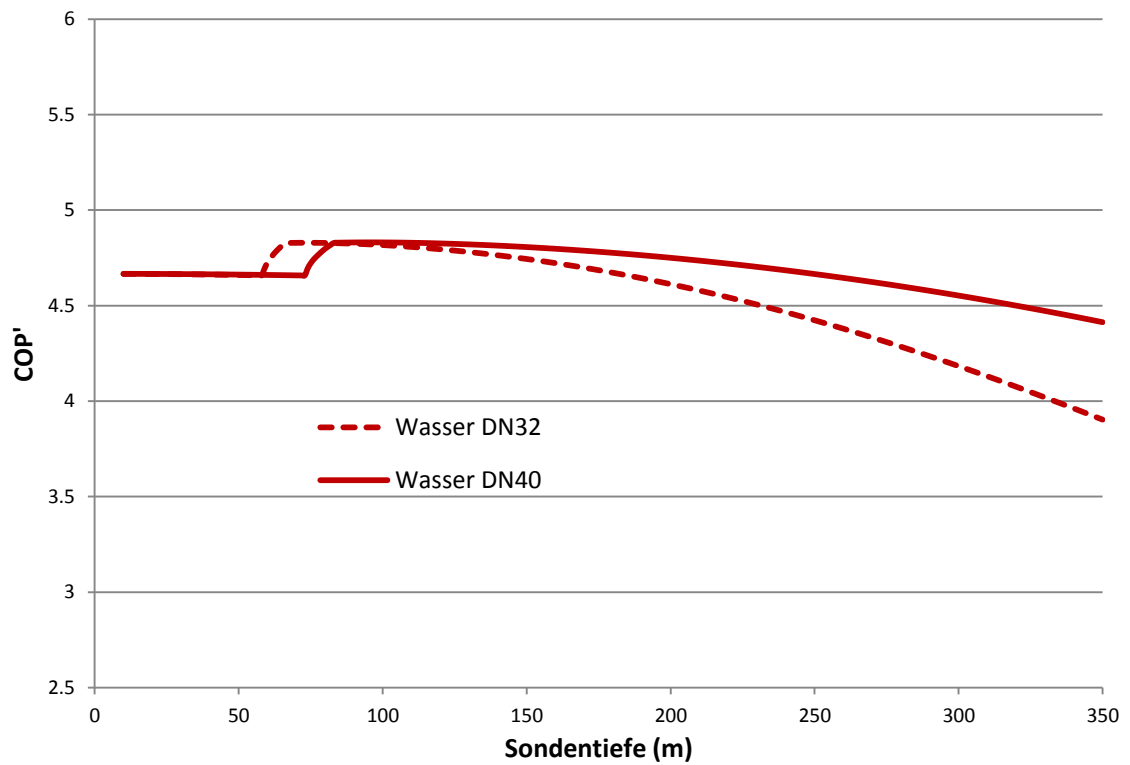


Abbildung 30: COP' nach 50 Jahren, bei Auslegetemperatur von 4 °C und $\Delta T = 4$ °C.

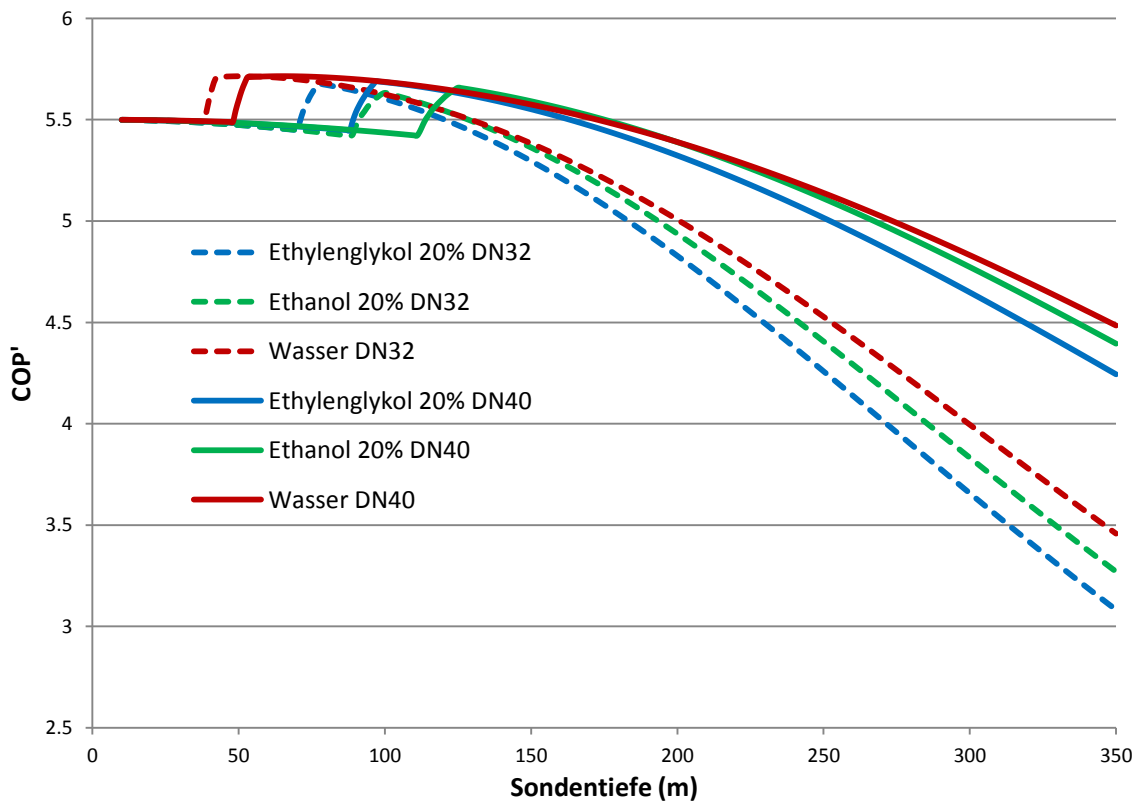


Abbildung 31: COP' einer neuen Anlage, bei Durchschnittstemperatur von 8,5 °C und $\Delta T = 3$ °C.

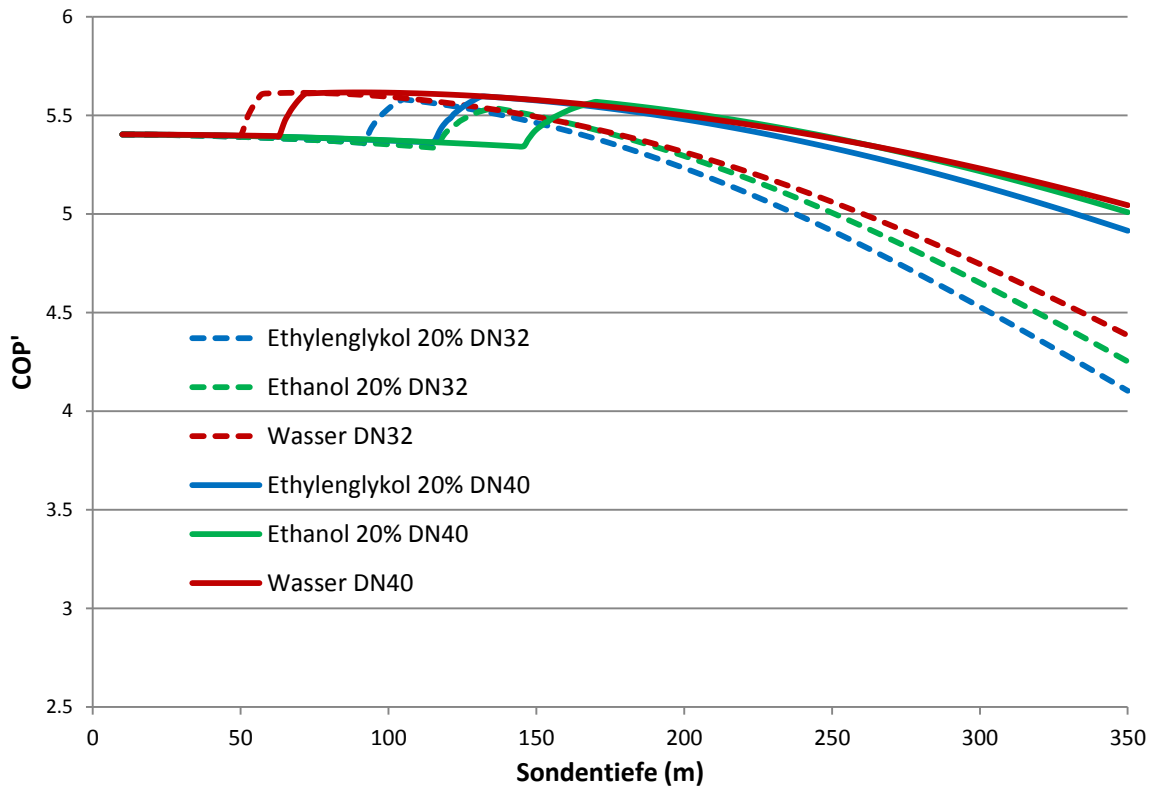


Abbildung 32: COP' einer neuen Anlage, bei Durchschnittstemperatur von 8,5 °C und $\Delta T = 4$ °C.

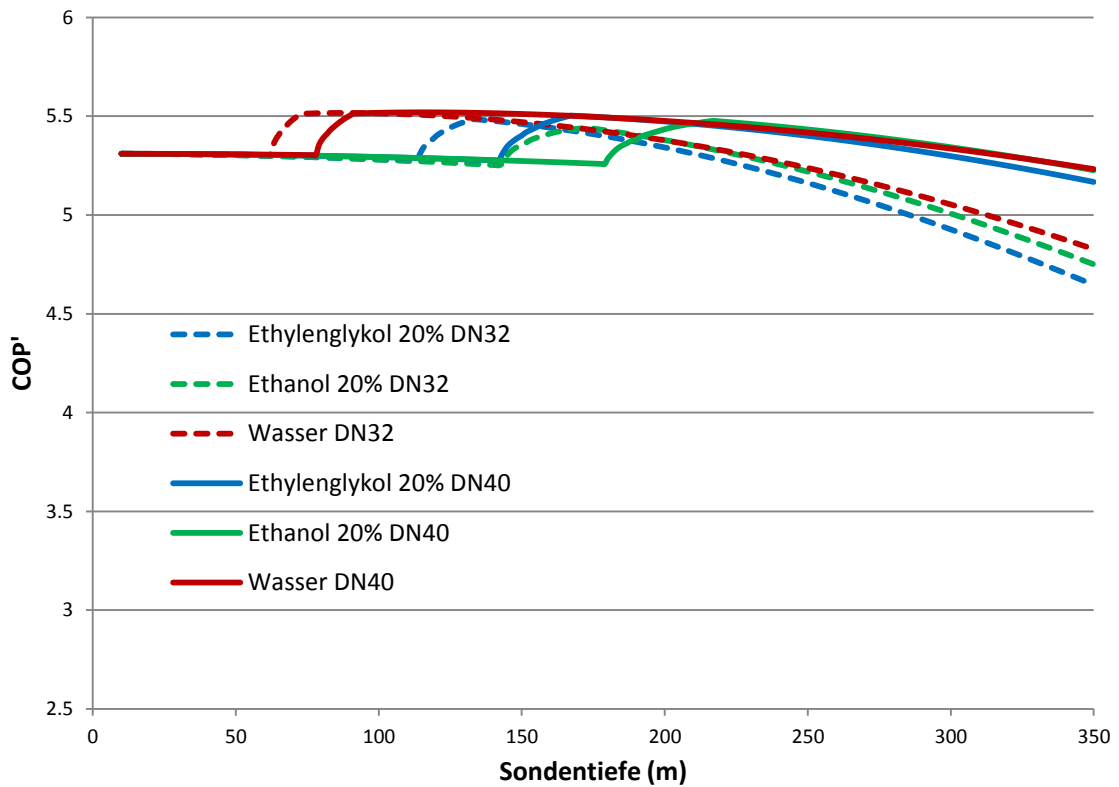


Abbildung 33: COP' einer neuen Anlage, bei Durchschnittstemperatur von 8,5 °C und $\Delta T = 5$ °C.

Die obigen Abbildungen zeigen, dass das Maximum der gesamten Leistungsziffer (COP der Wärmepumpe und Leistungsbedarf der Umwälzpumpe) dann erreicht werden, wenn gerade eine turbulente Strömung im Rohr erreicht wird (in den Abbildungen sind die Umschlagspunkte laminar – turbulent gut zu sehen). Die turbulente Strömung ergibt eine bessere Wärmeübertragung auf das Sondenfluid und damit eine höhere Fluidtemperatur. Bei reinem Wasser erfolgt dieser Umschlag zuerst. Ethanol als Sondenfluid erreicht diesen Umschlagpunkt erst später. Deswegen ist Ethanol insbesondere bei tiefen Erdwärmesonden zu empfehlen, oder bei grossen Anlagen mit langen horizontalen Verbindungsleitungen zu den einzelnen Erdwärmesonden.

Diese Berechnungen zeigen auch, dass Erdwärmesonden ab ca. 250 m Tiefe kaum mehr Sinn machen, ausser dank entsprechend grosszügiger Auslegung (sprich tiefer spezifischer Entzugsleistung) können auch langfristig höhere Soletemperaturen erreicht werden. Genauso gut sind aber weniger tiefe Erdwärmesonden, welche dank Regeneration keine langfristige Abnahme der Soletemperatur aufweisen, d.h. die Werte für Neuanlagen behalten. So können auch mit Sondertiefen zwischen 100 m und 200 m sehr effiziente Anlagen erreicht werden, und dies mit minimalen Risiken beim Bohren und mit bewährter, einfacher Technologie der Erdwärmesonden.

5.10 Einfluss von Erdwärmesonden auf die Bodentemperatur

Dieses Kapitel widmet sich einer Analyse des Temperaturverhaltens im Erdreich um Erdwärmesonden. Ein einfaches Modell soll helfen, das Temperaturverhalten in Abhängigkeit der Zeit und der dem Boden entzogenen Wärme grob abzuschätzen. Mit Hilfe des entwickelten Modelles werden anschliessend Situationen, wie sie heute vorkommen, wie auch mögliche Szenarien betrachtet.

5.10.1 Modellbildung

Es wird die Situation wie in Abbildung 34 betrachtet. Der Wärmeentzug \dot{Q} , der pro Volumen ($V = \pi R_2 L_1$) angegeben ist, sei konstant. Die Situation wird ab einer Tiefe von 10 Metern betrachtet und zur Vereinfachung wird die Tiefe bei 10 Meter als $x = 0$ definiert. Ebenfalls wird die horizontale Ausdehnung des Bodens als unendlich betrachtet, was das Problem auf eine Raumdimension (Tiefe) reduziert. Man möchte nun ein zeit- und tiefenabhängiges Temperaturprofil berechnen.

Das Modell geht von der Annahme eines (unendlich) grossen Erdwärmesonden-Feldes mit gleichmässiger Verteilung (Anordnung) der Erdwärmesonden und gleicher Tiefe wie auch gleichem Wärmeentzug aller EWS aus. Jede Erdwärmesonde kann nur aus einem Zylinder (gem. Abbildung 34) mit dem Radius R Wärme dem Boden entziehen, wobei der Radius R etwa der halben Distanz zwischen den Erdwärmesonden entspricht. Da somit keine Wärme horizontal in den betrachteten Zylinder nachfliessen kann, wird die Zylinderoberfläche als adiabat betrachtet und Wärme kann nur von unten oder oben nachfliessen. Von unten fliesst dabei der geothermische Wärmefluss, was vereinfacht so berechnet wird, dass in einer gewissen Tiefe unterhalb der Erdwärmesonde die Temperatur nicht mehr absinke, sondern den ungestörten Wert behalte. Von oben kann Wärme ungehindert und unbegrenzt nachströmen, derart, dass die Temperatur in 10 m Tiefe (bei $x = 0$) immer den ungestörten Wert von 10 °C behalte. Dies stellt den bestmöglichen (optimistischsten) Fall dar, in Wirklichkeit wird die Temperatur leicht abnehmen, da der Wärmefluss von oben begrenzt ist.

Im Zylinder selbst wird die Temperatur in einer gewissen Tiefe als gleich angenommen, das heisst der in Wirklichkeit entstehende Temperaturtrichter wird über den ganzen Radius "verschmiert". Die Temperatur in der Erdwärmesonde wäre also entsprechend tiefer, die Temperatur am Zylinderrand entsprechend höher.

Im Modell werden keine Grundwasser-Flüsse berücksichtigt.

Mit diesen Vereinfachungen wird das Problem analytisch lösbar. Es kann berechnet werden, wie lange es dauert oder bei welchen Abständen der Erdwärmesonden nach welcher Zeit die Temperatur des Bodens zu stark auskühlt. Hier wird angenommen, dass die mittlere Boden-Temperatur im Zylinder in keiner Tiefe unter Null Grad Celsius fallen darf.

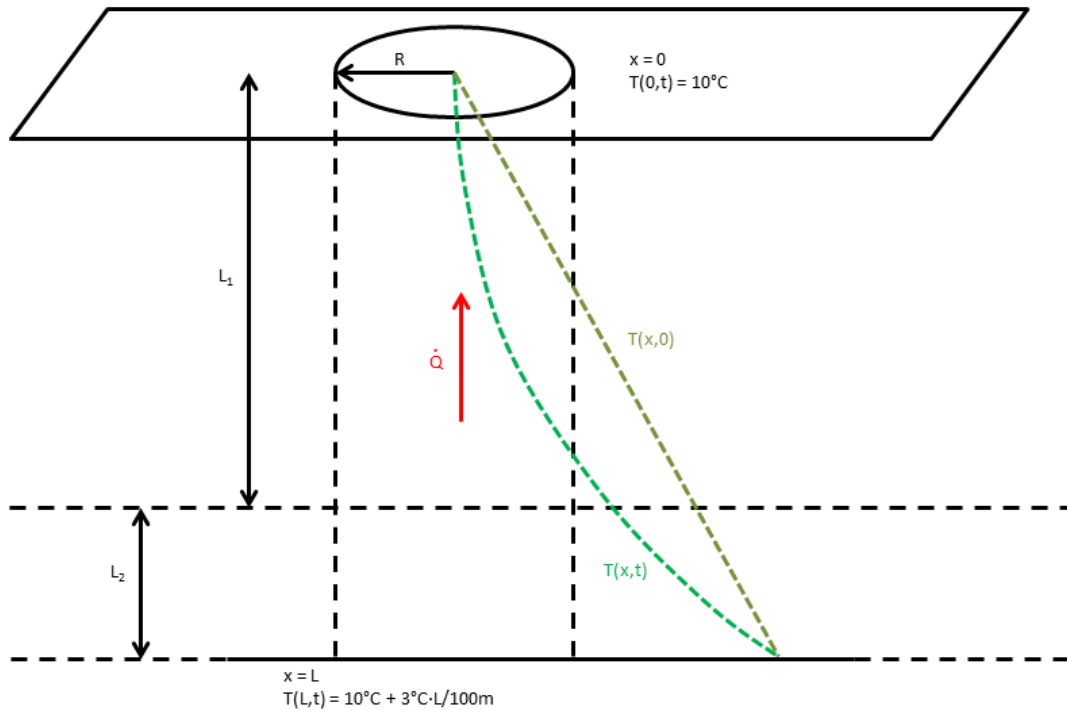


Abbildung 34: Zeit- und tiefenabhängiges Temperaturprofil bei konstantem Wärmeentzug

Die Temperatur wird durch die folgende partielle Differentialgleichung (eindimensionale Wärmeleitungsgleichung) beschrieben:

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = -\frac{\dot{Q}}{\rho c}$$

wobei $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ eine Konstante des Erdreiches ist. Mit $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$, $c = 800 \text{ J/kgK}$ und $\lambda = 2,5 \text{ W/mK}$ ergibt sich $a \sim 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Da davon ausgegangen wird, dass von oben her genügend Sonnenenergie in Form von Wärme nachfließt, wird die Temperatur in einer Tiefe von 10 Metern (durchschnittliche Aussenlufttemperatur, $10 \text{ }^\circ\text{C}$) als konstant betrachtet. Um die Rechnung zu vereinfachen wird die Sondentiefe L_1 künstlich um eine genügend grosse Länge L_2 verlängert, so dass durch das nachfließen von Wärme aus dem inneren der Erde, die Temperatur bei $x = L = L_1 + L_2$ ebenfalls als konstant angenommen werden kann. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die Temperatur pro 100 m zusätzlicher Tiefe um ca. $3 \text{ }^\circ\text{C}$ ansteigt.

Es gelten also folgende Anfangsbedingungen:

$$T(x, 0) = 10 \text{ }^\circ\text{C} + \frac{x \cdot 3 \text{ }^\circ\text{C}}{100 \text{ m}}$$

Durch das Festhalten der Temperaturen am oberen und unteren Rand des Problems erhält man folgende Dirichlet-Randbedingungen:

$$T(0, t) = 10 \text{ }^\circ\text{C}, \quad T(L, t) = 10 \text{ }^\circ\text{C} + \frac{L \cdot 3 \text{ }^\circ\text{C}}{100 \text{ m}}$$

5.10.2 Analytische Lösung

Als erstes wird eine Hilfsfunktion definiert. Sei $w(x, t)$ eine Funktion, welche die obigen Randbedingungen erfüllt:

$$w(x, t) = 10 \text{ }^\circ\text{C} + \frac{x \cdot 3 \text{ }^\circ\text{C}}{100 \text{ m}}$$

Mit Hilfe der obigen Hilfsfunktion wird nun die Wärmeleitungsgleichung für $\tilde{T}(x,t) = T(x,t) - w(x,t)$ umgeschrieben:

$$\frac{\partial \tilde{T}(x,t)}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \tilde{T}(x,t)}{\partial x^2} = \underbrace{\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}}_{-\frac{\dot{Q}}{\rho c}} - \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + a \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}$$

Aus der anfänglichen Wärmeleitungsgleichung wird nun also eine leicht modifizierte Wärmeleitungsgleichung:

$$\frac{\partial \tilde{T}(x,t)}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \tilde{T}(x,t)}{\partial x^2} = f(x)$$

wobei die Inhomogenität $f(x)$ gegeben ist durch:

$$f(x) = -\frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + a \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\dot{Q}}{\rho c} = -\frac{\dot{Q}}{\rho c}$$

Entsprechend müssen aber auch die Anfangs- und Randbedingungen angepasst werden, wobei diese durch die Hilfsfunktion homogenisiert werden:

$$\tilde{T}(x,0) = T(x,0) - w(x,0) = 10^\circ\text{C} + \frac{x \cdot 3^\circ\text{C}}{100\text{ m}} - 10^\circ\text{C} - \frac{x \cdot 3^\circ\text{C}}{100\text{ m}} = 0$$

$$\tilde{T}(0,t) = T(0,t) - w(0,t) = 0$$

$$\tilde{T}(L,t) = T(L,t) - w(L,t) = 0$$

Es gilt nun also die neue, inhomogene Differentialgleichungen mit den neuen, homogenen Anfangs- und Randbedingungen zu lösen.

Als Ansatz wählt man

$$\tilde{T}(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n(t) \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right)$$

womit dann

$$a_n(t) = \frac{2}{L} \int_0^L \tilde{T}(x,t) \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) dx$$

und mit den homogenen Anfangsbedingungen gilt $a_n(0) = 0$. Auch die rechte Seite der Differentialgleichung kann als Sinusreihe dargestellt werden

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n(t) \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right)$$

woraus man durch Einsetzen in die Differentialgleichung eine einfachere Differentialgleichung erhält:

$$\dot{a}_n(t) + a \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 a_n(t) = b_n(t)$$

Rechnet man $b_n(t)$ aus,

$$b_n(t) = \frac{2}{L} \int_0^L \left(-\frac{\dot{Q}}{\rho c}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) dx = \left(-\frac{\dot{Q}}{\rho c}\right) \frac{2(1 - \cos(\pi n))}{\pi n}$$

so sieht man, dass dieser Ausdruck nicht von t abhängig ist. Damit kann die einfache Differentialgleichung für $a_n(t)$ durch einfaches Umstellen und einer Integration über die Zeit gelöst werden:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{a}_n(t)}{a\left(\frac{\pi n}{L}\right)^2 a_n(t) - b_n} &= -1 \\ \Rightarrow \frac{1}{a\left(\frac{\pi n}{L}\right)^2} \ln\left(a\left(\frac{\pi n}{L}\right)^2 a_n(t) - b_n\right) &= -t + C \\ \Rightarrow a\left(\frac{\pi n}{L}\right)^2 a_n(t) - b_n &= \tilde{C} e^{-a\left(\frac{\pi n}{L}\right)^2 t} \\ \Rightarrow a_n(t) &= \frac{\tilde{C} e^{-a\left(\frac{\pi n}{L}\right)^2 t} + b_n}{a\left(\frac{\pi n}{L}\right)^2} \end{aligned}$$

Mit der Bedingung $a_n(0) = 0$ stösst man auf $\tilde{C} = -b_n$ woraus sich dann

$$a_n(t) = \frac{b_n}{a\left(\frac{\pi n}{L}\right)^2} \left(1 - e^{-a\left(\frac{\pi n}{L}\right)^2 t}\right)$$

ergibt. Setzt man dies in den Ansatz für $\tilde{T}(x,t)$ ein, so erhält man

$$\tilde{T}(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{a\left(\frac{\pi n}{L}\right)^2} \left(1 - e^{-a\left(\frac{\pi n}{L}\right)^2 t}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right)$$

woraus man durch Addition von $w(x,t)$ dann $T(x,t)$ berechnen kann:

$$\tilde{T}(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \left(-\frac{Qa}{\lambda}\right) \frac{2(1 - \cos(\pi n))}{\pi n} \left(\frac{L}{\pi n}\right)^2 \frac{1}{a} \left(1 - e^{-a\left(\frac{\pi n}{L}\right)^2 t}\right) + w(x,t)$$

5.10.3 Berechnungstool der Bodentemperatur

Diese Funktion resp. dieses Modell aus dem obigen Kapitel wurde in einem Excel-Tool programmiert.

Damit kann mit diesem vereinfachten Modell nun berechnet werden, wie sich die Temperatur über die Tiefe nach einer gewissen Zeit einstellt, wenn um eine Erdwärmesonde weitere vorhanden sind (Abbildung 35 und Abbildung 36). Die blaue Linie zeigt die ungestörte Anfangstemperatur.

Tabelle 3: Parameter im Tool Bodentemperatur

Parameter	Werte (Beispiele)	Einheit
Sondentiefe	200	m
Sondenradius	16	m
Wärmeentzug pro Jahr	80	kWh/m
Erdwärmestrom	0.06	W/m ²
Dichte Erdreich	2600	kg/m ³
spez. Wärmekap. Erde	800	J/kgK
Wärmeleitfähigkeit Erde	2,5	W/mK
Zeit	5,00E+01	Jahre

Der Sondenradius stellt dabei den mittleren halben Abstand zu den nächsten Erdwärmesonden dar, resp. den Bereich, der von der zu berechnenden Erdwärmesonde genutzt werden kann. Als Parameter können die Werte gemäss Tabelle 3 eingegeben werden.

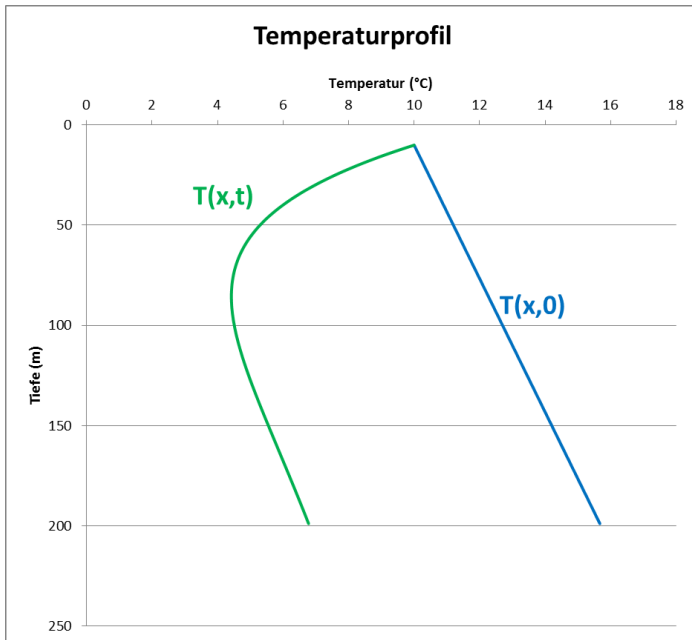


Abbildung 35: Berechnete mittlere Temperatur nach 50 Jahren, bei einem Abstand in einem Sondenfeld von 32 m zwischen den EWS, mit den Werten gem. Tabelle 3 gerechnet

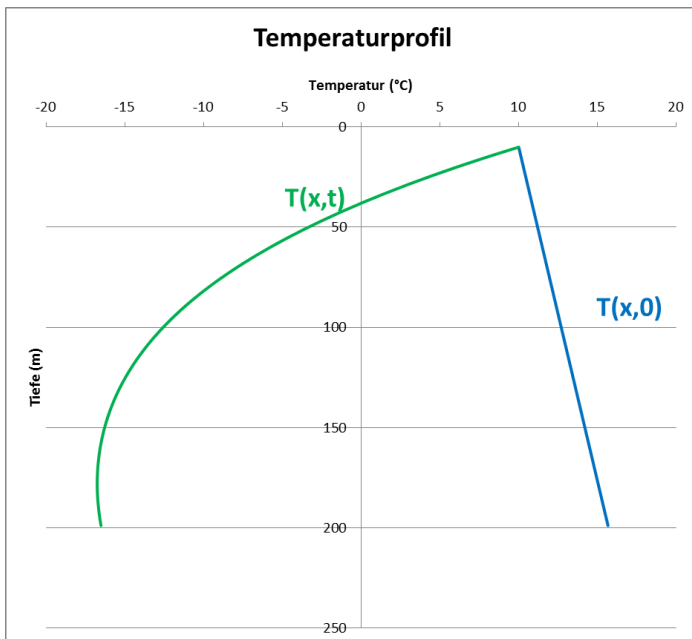


Abbildung 36: Berechnete mittlere Temperatur nach 200 Jahren, mit den sonst gleichen Werten

Die Berechnungen mit diesem Programm zeigen, dass Erdwärmesonden, welche in einem Feld angeordnet sind und deren Abstände die halbe Sondentiefe erreichen, sich auch auf sehr langen Zeit berechnet (10'000 Jahre), sich kaum gegenseitig beeinflussen. Beträgt der Anstand aber nur 32 m, dann kann zwar 50 Jahre (die Berechnungsdauer nach SIA 384/6) Wärme dem Boden entzogen werden, dieser kühlt aber stetig ab und nach 200 Jahren wäre die Temperatur bereits weit unter Null Grad, ausser im oberflächennahen Bereich, wo gemäss diesem Modell unbegrenzt Wärme von der Oberfläche (Solarwärme) nachfliessen kann, da in 10 Meter Tiefe immer 10 °C Temperatur herrschen.

5.10.4 Eine tiefe Sonde oder mehrere kurze Sonden?

Um herauszufinden ob es besser ist eine tiefe Sonde oder mehrere kurze Sonden zu bohren, werden zwei verschiedene Zeithorizonte betrachtet, einmal die Temperatur nach 50 Jahren (Auslegung gemäss SIA-Norm 384/6) und einmal der Beharrungszustand (nach 10^{300} Jahren). Es wird von einer Sonde mit $H = 400$ m und $R = 60$ m ausgegangen. Es wird dann ebenfalls der Fall mit drei ($r = R(2\sqrt{3} - 3)$), 4 ($r = R(\sqrt{2} - 1)$) und sechs ($r = \frac{R}{3}$) Sonden betrachtet. Dabei wird der Radius so angepasst, dass die Radien der kürzeren Sonden innerhalb des Radius der einzelnen Sonde Platz haben. Dies führt zu folgenden Resultaten (Tabelle 4: Resultate für unterschiedliche Varianten der Sonden-Anzahl und -Tiefe), welche in Abbildung 37 auch noch graphisch dargestellt sind:

Tabelle 4: Resultate für unterschiedliche Varianten der Sonden-Anzahl und -Tiefe

Anzahl Sonden	Tiefe (m)	Radius (m)	Temperatur nach 50 Jahren (°C)	Temperatur im Beharrungszustand (°C)
1	400	60	10,01	-12,06
3	133,33	27,85	8,71	-1,45
4	100	24,85	7,96	2,51
6	66,67	20	6,88	5,45

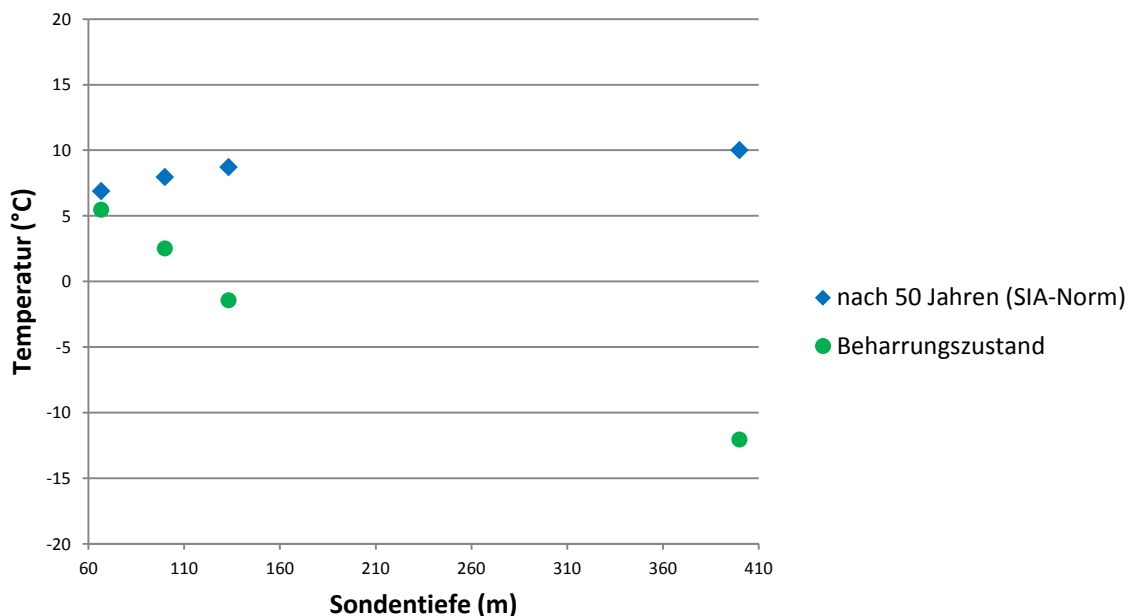


Abbildung 37: Temperatur nach 50 Jahren bzw. im Beharrungszustand für verschiedene Anzahl Sonden.

Das Resultat zeigt schön auf, dass bei einer Nutzung von „nur“ 50 Jahren das Erdreich als Speicher geleert wird, wobei dieser Speicher für kürzere Sonden schneller erschöpft ist. Bei einer längerfristigen Nutzung muss die Wärme, aufgrund des sehr kleinen geothermischen Wärmestromes und der Erschöpfung des Speichers, von oben her als Sonnenwärme nachfliessen können. Wie die Resultate für den Beharrungszustand zeigen, ist dies für kürzere Sonden viel einfacher. Als Fazit kann ausgesagt werden, dass tiefe vertikale Sonden dazu dienen die im Boden gespeicherte Erdwärme zu entziehen und kurze vertikale Sonden oder horizontale Sonden (z.B. Flachkollektoren) die Sonnenwärme in den obersten Schichten des Bodens benützen. Umgekehrt gesagt, sind untiefe Erdwärmesonden (bis 250 m) in Zeiträumen von 50 oder 100 Jahren schlechter als sehr tiefe Erdwärmesonden, welche mehr gespeicherte Wärme nutzen können. Langfristig hingegen fliesst oben eher mehr Wärme von der Sonne nach, während diese natürliche Regeneration umso weniger wirkt, je tiefer die Erdwärmesonde ist.

5.10.5 Max. Wärmebedarfsdichte für EWS ohne Regeneration?

Die noch offene Frage ist nun, bis zu welcher Wärmebedarfsdichte eine Erdwärmesonde ohne Regeneration funktioniert. Dies ist wieder von der Tiefe abhängig. Für verschiedene Sondentiefen wurde für einen Entzug während 50 Jahren (gemäss SIA-Norm 384/6), 100 Jahren, 200 Jahren sowie für den Beharrungszustand der Radius gesucht, bei welchem die Temperatur unter 0 °C fällt und damit die Wärmebedarfsdichte in kWh/m² berechnet. Diese wurde dann mit einem Wärmebedarf von 120 kWh/m² pro Jahr und Wohnfläche verglichen, unter der Annahme, dass ¾ des Bedarfs mit Wärme aus dem Boden gedeckt wird. Die Resultate für verschiedene Sondentiefen und den Fall nach 50, 100 und 200 Jahren sowie für den Beharrungszustand sind in Abbildung 38 dargestellt.

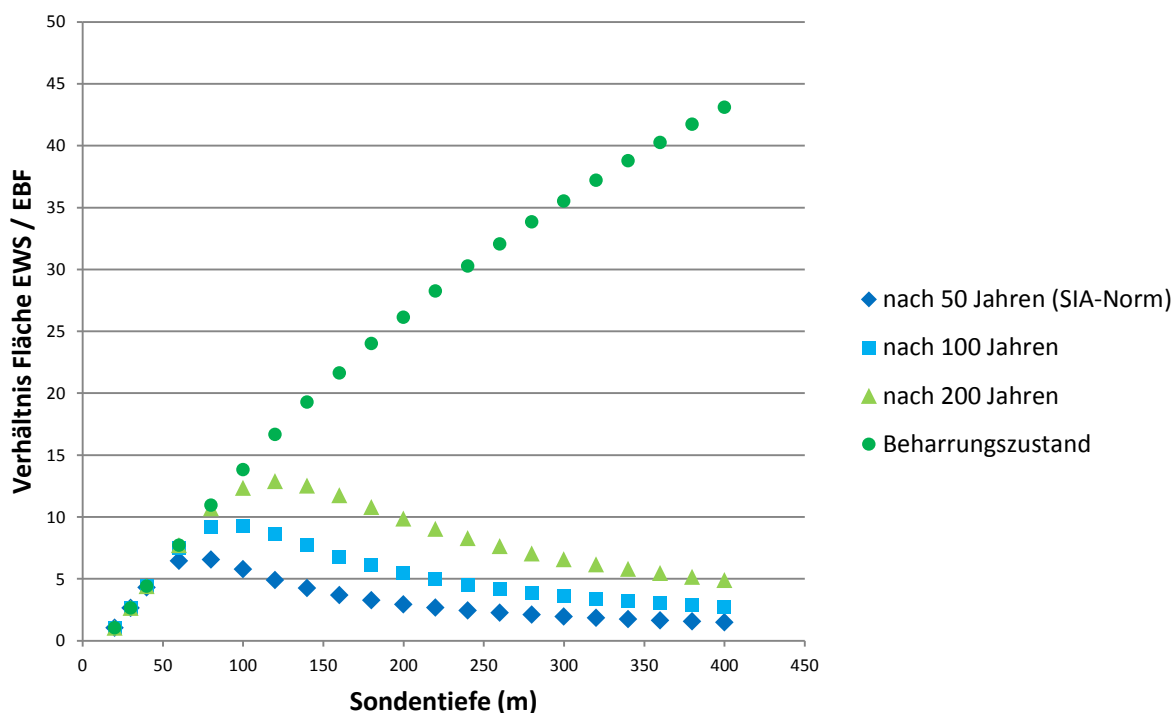


Abbildung 38: Verhältnis der pro EWS benötigten Bodenfläche zu Wohnfläche

Mit Hilfe von Abbildung 38 kann nun für die Beispielausschnitte aus dem folgenden Kapitel bestimmt werden, ob eine Regeneration notwendig ist:

Tabelle 5: Zustand heute

Gemeinde	# EWS	Radius	A _{EWS}	EBF _{EWS}	A _{EWS} /EBF
Schwerzenbach	66	30.82	2'982.9	11'698	0.25
Brütten	111	23.73	1'768.2	19'728	0.09
Hünikon	23	52.31	8'592.1	4'061	2.12
Tannen	3	153.27	73'763.9	473	155.95
Zürich (Kreis 9)	112	35.33	3'919.4	8'900	0.44

Tabelle 6: Zustand wenn alle Gebäude mit EWS beheizt werden

Gemeinde	# EWS	Radius	A _{EWS}	EBF _{EWS}	A _{EWS} /EBF
Schwerzenbach	440	11.92	446.2	78'252	0.0057
Brütten	539	10.76	363.6	95'881	0.0038
Hünikon	215	17.05	912.8	38'228	0.0239
Tannen	112	23.63	1'753.3	19'898	0.0881
Zürich (Kreis 9)	738	9.2	265.8	131'210	0.0020

Liegt das Flächenverhältnis von zur Verfügung stehender Erdwärmesondenfläche zur Energiebezugsfläche oberhalb der in Abbildung 38 gezeigten Kurve, so ist ein regenerationsloser Betrieb möglich. Man sieht, dass dies bereits mit der heutigen Anzahl Erdwärmesonden nur noch in kleinen Gemeinden möglich ist.

Fazit

Aus den obigen Abschätzungen kann folgendes Fazit herausgelesen werden:

- Legt man Erdwärmesonden nur auf 50 Jahre aus und lässt den Boden danach in seinen thermodynamischen Ursprungszustand übergehen, so empfiehlt es sich möglichst tiefe Sonden zu bohren.
- Möchte man eine komplett erneuerbare Energiequelle haben, die nicht regeneriert werden muss, so sollte man möglichst kurze Sonden bauen. Diese Methode ist allerdings darauf angewiesen, dass genügend Sonnenenergie in den Boden eindringen kann.
- Möchte man grössere Gebiete über längere Zeit mit Erdwärme versorgen ist eine Regeneration des Erdreiches unabdingbar.

5.10.6 Abschätzungen in 5 Gebieten des Kantons Zürich

Als Beispiel wird eine Erdwärmesonde der Tiefe 160 m ($L_1 = 150$ m) betrachtet. Als Abstand bis zur unteren Isotherme wird $L_2 = 300$ m gewählt. Somit gilt $L = 450$ m. Um eine Beispielabschätzung zu erhalten, wurden Ausschnitte à 500 m x 500 m fünf verschiedener Zürcher Gemeinden ausgewählt. Ein Beispiel der Stadt Zürich (Kreis 9) ist in Abbildung 39 zu sehen. Es folgt nun sowohl eine Betrachtung des momentanen Zustandes als auch die Berechnung für ein Szenario, bei welchem alle Gebäude mit Erdwärmesonden beheizt werden.

Zählt man in Abbildung 39 die Grundfläche aller mit EWS beheizten Gebäude zusammen und multipliziert sie mit dem Faktor 2,5 kennt man die totale Geschossfläche, die mit EWS beheizt wird. Geht man von einem jährlichen Wärmeverbrauch von 120 kWh/m^2 aus und nimmt an, dass rund 75 % der Energie aus dem Boden entzogen wird, so erhält man einen Entzug von $8'010'000 \text{ kWh}$ pro Jahr.



Abbildung 39: 500 m x 500 m Ausschnitt aus dem Wärmenutzungsatlas des GIS-Browsers.

Zählt man in Abbildung 39 die Grundfläche aller mit EWS beheizten Gebäude zusammen und multipliziert sie mit dem Faktor 2,5 (Anzahl der Geschosse) weiss man die totale Geschossfläche, die mit EWS beheizt wird. Geht man von einem jährlichen Wärmeverbrauch von 120 kWh/m² aus und nimmt an, dass rund 75 % der Energie aus dem Boden entzogen wird, so erhält man einen Entzug von 8'010'000 kWh pro Jahr. Weiter schätzt man nun, dass pro Sondenmeter und Jahr rund 100 kWh entzogen werden, woraus für den Ausschnitt total 8010 m Sondenlaufmeter resultieren. Geht man von 160 m tiefen Sonden aus, so ergeben sich 50 Sonden, was bei gleichmässiger Verteilung zu 7 Sonden pro 500 m führt. Eine Sonde kann also einen maximalen Abstand von 70 m haben, womit man R = 35 m erhält. Eine 160 m tiefe Sonde entzieht dem Boden unter der Annahme eines Entzuges von 100 kWh/m pro Jahr 160'000 kWh. Wenn man die mittlere Leistung pro Jahr wissen möchte, teilt man also durch 8760 h, woraus man 1,83 kW erhält. Die mittlere Leistung, welche dem von einer Sonde genutzten Erdvolumen entzogen wird, ergibt sich also zu:

$$Q = \frac{1.83 \text{ kW}}{160 \text{ m} \cdot (35 \text{ m})^2 \cdot \pi} = 0.003 \frac{\text{W}}{\text{m}^3}$$

Die Berechnungen für die anderen Ausschnitte und das Szenario werden genau gleich geführt. Eine Übersicht der Resultate findet man in Tabelle 7. Angegeben sind der Radius R, die entzogene Wärme pro Volumeneinheit \dot{Q} und die Temperatur in 160 Metern Tiefe nach 10 Jahren regenerationslosem Entzug.

Tabelle 7: Resultate verschiedener Gemeinden.

Gemeinde	Heute (Stand 2012)			Szenario (alle Gebäude mit EWS)		
	R (m)	\dot{Q} (W/m ³)	Temperatur nach 10 Jahren in 160 m Tiefe (°C)	R (m)	\dot{Q} (W/m ³)	Temperatur nach 10 Jahren in 160 m Tiefe (°C)
Schwerzenbach	30.82	0.0038	13.90	11.92	0.0256	10.30
Brütten	23.73	0.0065	13.40	10.76	0.0314	9.30
Hünikon	52.31	0.0013	14.30	17.05	0.0125	12.40
Tannen	153.27	0.0002	14.50	23.63	0.0065	13.40
Zürich (Kreis 9)	35.33	0.0029	14.00	9.2	0.0430	7.38

Diese Abschätzungen zeigen klar auf, dass Erdwärme keine unbegrenzt vorhandene, regenerierbare Energie ist, sondern dass hauptsächlich gespeicherte Energie genutzt wird. Deswegen wird es in Zukunft viele Gemeinden und Städte geben, wo sich in Zukunft Probleme ergeben werden, sie es mit den heute schon bestehenden Erdwärmesonden, oder falls weiterhin zusätzliche Gebäude mit Erdwärmesonden beheizt werden sollen. Dabei kann in den ersten Jahrzehnten die gespeicherte Wärme genutzt werden, so dass noch keine Probleme sichtbar werden. Aber um eine nachhaltige Wärmenutzung zu ermöglichen, muss mittelfristig der Boden wieder regeneriert werden, was am idealsten mit Solarenergie oder Abwärme erfolgen kann.

5.10.7 Berechnung der Abkühlung des Erdreiches in 5 Beispielgebieten

In diesem Kapitel sind die fünf Beispiele, welche im obigen Kapitel betrachtet werden, im Detail aufgeführt. Für jeden Ausschnitt wurden die Grundflächen, welche mit und ohne EWS beheizt werden mit Hilfe des GIS-Browsers ermittelt. Unter der Annahme von einer durchschnittlichen Stockwerkzahl von 2,5 wurde dann die total mit und ohne EWS beheizte Geschossfläche berechnet. Als Wärmebedarf wurden 120 kWh/m^2 pro Jahr angenommen, wobei bei einer Erdwärmesondenheizung rund $\frac{3}{4}$ davon aus dem Boden stammen.

Wie lange dauert es bis sich die Erde in 170 m Tiefe auf 10°C abgekühlt hat?

Für jeden Ausschnitt wurde ausserdem sehr vereinfacht berechnet wie lange es dauert, bis sich die Erde in 170 m Tiefe auf 10°C abgekühlt hat. Die Annahme ist, dass damit die gespeicherte Wärme im Boden aufgebraucht ist und eine Regeneration notwendig wird.

Für diese Rechnung wurden die folgenden Annahmen gemacht:

- Die Temperatur in 10 m Tiefe ist konstant 10°C .
- Die Anfangstemperatur steigt um 3°C pro 100 m zusätzlicher Tiefe.
- Eigenschaften des Erdreichs: $\rho_E = 2600 \text{ kg/m}^3$, $c_E = 800 \text{ J/kgK}$.

Um die Temperaturänderung ΔT in einer Tiefe x (vom Temperaturniveau 10°C gerechnet) zu berechnen, wird die entzogene Energie pro Jahr $Q_{W,a}$ (in Joule, $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$) pro Fläche mit der Leistung aus der im Boden gespeicherten Energie plus der von unten nachfliessenden Leistung \dot{Q}_{geo} für eine infinitesimal dünne Schicht der Dicke dx gleichgesetzt

$$\frac{Q_{W,a}}{A\Delta t_a} = dx \cdot \rho_E \cdot c_E \cdot \Delta T + \frac{\dot{Q}_{geo}}{A},$$

wobei $\Delta t_a = 1 \text{ y} = 3,16 \cdot 10^7 \text{ s}$. Durch umstellen erhält man dann ΔT für eine infinitesimal dünne Schicht:

$$\Delta T = \frac{\frac{Q_{W,a}}{A\Delta t_a} - \frac{\dot{Q}_{geo}}{A}}{dx \cdot \rho_E \cdot c_E}$$

Um nun zu berechnen wie lange es dauert (Δt_x), bis die betrachtete Schicht um eine gewisse Temperaturdifferenz $\Delta T'$ abkühlt benützt man:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{\Delta T'}{\Delta t_x} \text{ mit } \Delta T' = \frac{x}{100 \text{ m}} \cdot 3^\circ\text{C} \\ \Rightarrow \Delta t_x &= \frac{dx \cdot \rho_E \cdot c_E \cdot \frac{x}{100 \text{ m}} \cdot 3^\circ\text{C}}{\frac{Q_{W,a}}{A\Delta t_a} - \frac{\dot{Q}_{geo}}{A}} \end{aligned}$$

Will man nun wissen, wie lange es dauert (Δt) bis sämtliche Schichten bis in eine Tiefe von 170 m abgekühlt sind, muss über alle Schichten integriert werden:

$$\Delta t = \int_{10}^{170} \Delta t_x = \int_{10}^{170} \frac{dx \cdot \rho_E \cdot c_E \cdot \frac{x}{100 \text{ m}} \cdot 3^\circ\text{C}}{\frac{Q_{W,a}}{A\Delta t_a} - \frac{\dot{Q}_{geo}}{A}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{160^2 \cdot \rho_E \cdot c_E \cdot \frac{3^\circ\text{C}}{100 \text{ m}}}{\frac{Q_{W,a}}{A\Delta t_a} - \frac{\dot{Q}_{geo}}{A}}$$

Betrachtete Beispielausschnitte



Ort: Schwerzenbach ZH
 Ausschnitt: $500\text{ m} \cdot 500\text{ m} = 250'000\text{ m}^2$
 Energie aus Erdwärmestrom:
 $0,55\text{ kWh pro Jahr / m}^2 \cdot 250'000\text{ m}^2 = 137'500\text{ kWh pro Jahr}$
 Geschossfläche ohne EWS: $66'554\text{ m}^2$
 Geschossfläche mit EWS: $11'698\text{ m}^2$
 Geschossfläche Total: $78'252\text{ m}^2$
 Wärmebedarf aus EWS (heute): $1'403'760\text{ kWh pro Jahr}$
 Wärmebedarf aus Boden (heute): $1'052'820\text{ kWh pro Jahr} \rightarrow \Delta t = 60,60\text{ Jahre}$
 Gesamtwärmebedarf aller Gebäude: $9'390'240\text{ kWh pro Jahr}$
 Gesamtwärmebedarf aus Boden (falls alle Gebäude durch EWS geheizt werden): $7'042'680\text{ kWh pro Jahr} \rightarrow \Delta t = 8,03\text{ Jahre}$

Abbildung 40: 500 m x 500 m Ausschnitt Schwerzenbach



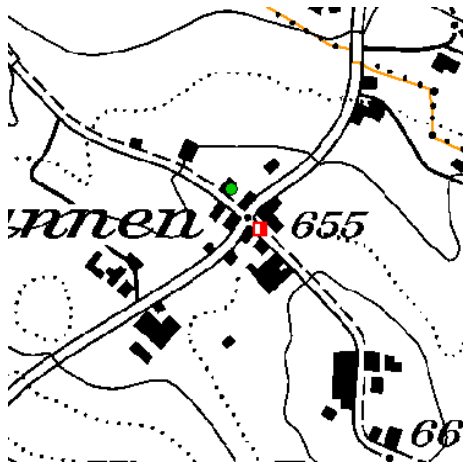
Ort: Brütten ZH
 Ausschnitt: $500\text{ m} \cdot 500\text{ m} = 250'000\text{ m}^2$
 Energie aus Erdwärmestrom:
 $0,55\text{ kWh pro Jahr / m}^2 \cdot 250'000\text{ m}^2 = 137'500\text{ kWh pro Jahr}$
 Geschossfläche ohne EWS: $76'153\text{ m}^2$
 Geschossfläche mit EWS: $19'728\text{ m}^2$
 Geschossfläche Total: $95'881\text{ m}^2$
 Wärmebedarf aus EWS (heute): $2'367'360\text{ kWh pro Jahr}$
 Wärmebedarf aus Boden (heute): $1'775'520\text{ kWh pro Jahr} \rightarrow \Delta t = 33,86\text{ Jahre}$
 Gesamtwärmebedarf aller Gebäude: $11'505'720\text{ kWh pro Jahr}$
 Gesamtwärmebedarf aus Boden (falls alle Gebäude durch EWS geheizt werden): $8'629'290\text{ kWh pro Jahr} \rightarrow \Delta t = 6,53\text{ Jahre}$

Abbildung 41: 500 m x 500 m Ausschnitt Brütten



Ort: Hünikon ZH
 Ausschnitt: $500\text{ m} \cdot 500\text{ m} = 250'000\text{ m}^2$
 Energie aus Erdwärmestrom:
 $0,55\text{ kWh pro Jahr / m}^2 \cdot 250'000\text{ m}^2 = 137'500\text{ kWh pro Jahr}$
 Geschossfläche ohne EWS: $34'167\text{ m}^2$
 Geschossfläche mit EWS: $4'061\text{ m}^2$
 Geschossfläche Total: $38'228\text{ m}^2$
 Wärmebedarf aus EWS (heute): $487'320\text{ kWh pro Jahr}$
 Wärmebedarf aus Boden (heute): $365'490\text{ kWh pro Jahr} \rightarrow \Delta t = 243,29\text{ Jahre}$
 Gesamtwärmebedarf aller Gebäude: $5'587'360\text{ kWh pro Jahr}$
 Gesamtwärmebedarf aus Boden (falls alle Gebäude durch EWS geheizt werden): $3'440'520\text{ kWh pro Jahr} \rightarrow \Delta t = 16,79\text{ Jahre}$

Abbildung 42: 500 m x 500 m Ausschnitt Hünikon



Ort: Tannen ZH
Ausschnitt: 500 m · 500 m = 250'000 m²
Energie aus Erdwärmestrom:
 0,55 kWh pro Jahr / m² · 250'000 m² = 137'500 kWh pro Jahr

Geschossfläche ohne EWS: 19'425 m²
Geschossfläche mit EWS: 473 m²
Geschossfläche Total: 19'898 m²

Wärmebedarf aus EWS (heute): 56'760 kWh pro Jahr
Wärmebedarf aus Boden (heute): 42'570 kWh pro Jahr → Δt → ∞

Gesamtwärmebedarf aller Gebäude: 2'387'760 kWh pro Jahr
Gesamtwärmebedarf aus Boden (falls alle Gebäude durch EWS geheizt werden): 1'790'820 kWh pro Jahr → Δt = 33,55 Jahre

Abbildung 43: 500 m x 500 m Ausschnitt Tannen



Ort: Zürich (Kreis 9)
Ausschnitt: 500 m · 500 m = 250'000 m²
Energie aus Erdwärmestrom:
 0,55 kWh pro Jahr / m² · 250'000 m² = 137'500 kWh pro Jahr

Geschossfläche ohne EWS: 122'310 m²
Geschossfläche mit EWS: 8'900 m²
Geschossfläche Total: 131'210 m²

Wärmebedarf aus EWS (heute): 1'068'000 kWh pro Jahr
Wärmebedarf aus Boden (heute): 801'000 kWh pro Jahr → Δt → 83,6 Jahre

Gesamtwärmebedarf aller Gebäude: 15'745'200 kWh pro Jahr
Gesamtwärmebedarf aus Boden (falls alle Gebäude durch EWS geheizt werden): 11'808'900 kWh pro Jahr → Δt = 4,75 Jahre

Abbildung 44: 500 m x 500 m Ausschnitt Kreis 9 (Zürich)

Diese Berechnungen sind so vereinfacht, dass sie in einem Weiler wie z.B. der Weiler Tannen wohl zu Resultaten führen, welche nicht der Wirklichkeit entsprechen. Dort kann sich kein grosses Erdwärmesondenfeld bilden, und von der Seite kann auch langfristig Wärme nachströmen.

Schon in einer kleinen Siedlung wie Hünikon können sich aber Erdwärmesonden in der Ortsmitte befinden, welche von anderen Erdwärmesonden so umgeben werden, dass diese mittleren Sonden nicht mehr von einem horizontalen Wärmestrom von aussen profitieren können. Für diese Erdwärmesonden dürfte diese Abschätzung schon genauer sein.

In den anderen 3 betrachteten Gebieten hingegen ergeben sich Erdwärmesonden-Felder, welche lang- oder schon mittelfristig nicht ohne Regeneration betrieben werden können. Sollten in einem städtischen Gebiet alle oder auch nur die meisten Gebäude mit Erdwärme beheizt werden, so erschöpft sich das Erdreich schon sehr bald.

6 Wirtschaftlichkeitstool

6.1 Einleitung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Tool entwickelt werden, das eine einfache Analyse von kleinen Heizsystemen, wie sie in Ein- bis Mehrfamilienhäusern vorkommen, ermöglicht. Es soll die Eingabemöglichkeiten einerseits flexibel gestalten, um dem Anspruch der Individualität zu genügen, andererseits soll die Benutzung dieses Tools nicht Experten vorenthalten sein.

Das Programm macht Aussagen über die Wirtschaftlichkeit. Es vermittelt aber auch mit Hilfe einfacher Diagramme klare Aussagen zur Ökologie der Varianten. Des Weiteren informiert es über den Stand in Bezug auf aktuelle Klimaziele, wie die 1t-CO₂ und die 2000 W Gesellschaft. Um es einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wird das Programm in Excel programmiert.

Dabei werden verschiedene Sanierungsvarianten berücksichtigt. Denn einerseits geht es um die Installation einer Erdwärmesonde (EWS) mit Wärmepumpe und andererseits soll die Betrachtung von kombinierten Anlagen ermöglicht werden. Dazu werden drei Varianten vorgeschlagen.

- Nur EWS
- EWS + thermische Kollektoren (mit oder ohne saisonalem Speicher)
- EWS + Photovoltaikanlage

Diese drei Grund-Varianten werden um drei weitere Varianten erweitert. Es werden drei Varianten mit optimierter EWS zusätzlich miteinbezogen, welche höhere Investitionskosten verursacht, dafür aber eine deutlich bessere Jahresarbeitszahl (JAZ) ermöglichen. Damit kann deren Wirtschaftlichkeit genauer betrachtet werden.

Das Tool besteht aus mehreren Tabellenblättern welche nachfolgend einzeln beschrieben werden. Zur einfacheren Anwendung wurde eine Vielzahl von Makroprogrammen erstellt. Auf diese wird in diesem Bericht aber nicht weiter eingegangen. Die Eingabe durch den Benutzer erfolgt jeweils über die hellblauen Zellen. Die lachsfarbenen geben Standartwerte und Ergebnisse wieder.

6.2 Information (Einführung)

Im ersten Teil werden dem Benutzer Informationen bereitgestellt. Eine kurze Anleitung gibt Auskunft über die korrekte Navigation und die Vorgehensweise.

Des Weiteren hilft ein Bild die Energieflüsse und die Systemgrenzen sowie die Investitionsaufteilung zu erkennen (Abbildung 45).

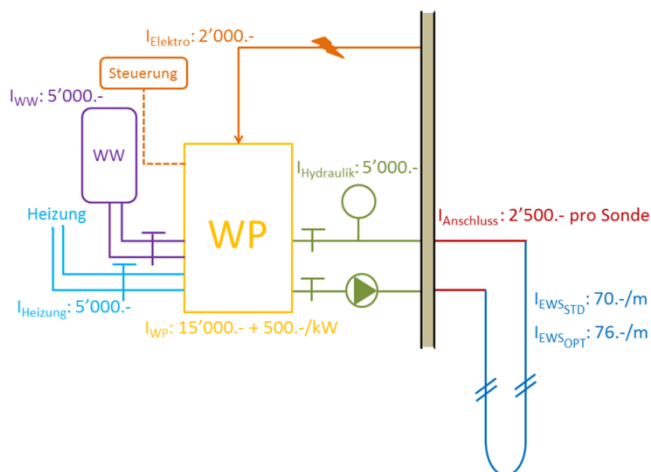


Abbildung 45: Modellgrenzen und Investitionskosten für das Tool Wirtschaftlichkeit

6.3 Allgemeine Informationen (Heizenergie)

Das erste Input-Tabellenblatt ist das Tabellenblatt Heizenergie. Durch die Navigation von oben nach unten werden die Parameter des Gebäudes eingegeben. Dabei wird unterschieden ob es sich um einen Alt- oder Neubau handelt. Weiter muss die Energiebezugsfläche und die Anzahl der Personen im Haushalt angegeben werden. Dazu kommen noch weitere Parameter (Heizsystem, geografische Lage usw.). Diese variieren je nach Vorauswahl.

Aus diesen ersten Informationen wird der Wärmebedarf des Gebäudes eruiert. Dieser dient im Anschluss zur Dimensionierung des neuen Heizsystems. Aus diesem Grund sollten die Eingaben möglichst realitätsgetreu vorgenommen werden.

Die Berechnung für einen Neubau erfolgt entweder nach einer Abschätzung und den Grenzwerten gemäss SIA 380/1 [51], wenn noch keine Berechnung des Heizwärmebedarfes durch den Bauphysiker resp. für die Baueingabe vorliegt (Abbildung 46). Dabei werden noch Korrekturfaktoren für die Kompaktheit des Gebäudes und die Höhenlage, sowie ob auf der Alpennordseite oder Alpensüdseite gelegen, berücksichtigt.

Berechnung Wärmebedarf und Energiekennzahl

BENUTZEREINGABEN		
Neu-/Altbau	Neubau	
Wärmebedarfsberechnung vorhanden	Nein	
Haustyp	Einfamilienhaus	
Anzahl Personen im Haushalt	4	
Wohnfläche netto beheizt	180	m ²
Kompaktheit	Normal	
Geographische Lage	Alpennordseite	
Höhe über Meer	450	m

Bitte mit "Enter"-Taste Eingaben bestätigen.

BERECHNUNG WÄRMEBEDARF		
Wärmebedarf Heizen	10836	kWh pro Jahr
Wärmebedarf Warmwasser	3400	kWh pro Jahr
Energiebezugsfläche	207	m ²
Energiekennzahl Heizen	52	kWh/m ² pro Jahr
Energiekennzahl Heizen	188	MJ/m ² pro Jahr
Energiekennzahl Heizen + WW	69	kWh/m ² pro Jahr

Farblegende

Erklärung	Benutzereingaben	Ausgabe
-----------	------------------	---------



Um eine bessere Einschätzung der Energieeffizienz des Gebäudes zu erhalten, kann kostenlos eine light-Version des Gebäudeenergieausweises der Kantone unter folgendem Link erstellt werden (19.09.12): <http://www.geak.ch/Pages/Light/About/GeakLightPage.aspx>
 Noch besser ist es, einen GEAK Plus erstellen zu lassen.

Abbildung 46: Screenshot Blatt Eingaben und Berechnung Wärmebedarf Neubau (ohne vorhandene Berechnung Wärmebedarf)

Falls bereits eine Berechnung des Heizwärmebedarfes vorliegt, kann dieser Wert eingegeben werden.

Bei einem Altbau wird der Wärmebedarf anhand des bisherigen Verbrauchs an Heizenergie (es können maximal 4 Jahresverbräuche eingegeben werden) und den entsprechenden Wirkungsgraden bestehender Wärmeerzeuger berechnet (Abbildung 47).

Berechnung Wärmebedarf und Energiekennzahl

BENUTZEREINGABEN		
Neu-/Altbau	Altbau	
Haustyp	Einfamilienhaus	
Anzahl Personen im Haushalt	4	
Wohnfläche netto beheizt	180	m ²
Heizart bisher	Öl	
Warmwasseraufbereitung	mit Heizung	
Ölverbrauch Jahr 1	3000	Liter pro Jahr
Ölverbrauch Jahr 2	2800	Liter pro Jahr
Ölverbrauch Jahr 3	3100	Liter pro Jahr
Ölverbrauch Jahr 4	2700	Liter pro Jahr
Durchschnitt Ölverbrauch	2900	Liter pro Jahr

Bitte mit "Enter"-Taste Eingaben bestätigen.

BERECHNUNG WÄRMEBEDARF		
Wärmebedarf Heizen	21250	kWh pro Jahr
Wärmebedarf Warmwasser	3400	kWh pro Jahr
Energiebezugsfläche	207	m ²
Energiekennzahl Heizen	103	kWh/m ² pro Jahr
Energiekennzahl Heizen	370	MJ/m ² pro Jahr
Energiekennzahl Heizen + WW	119	kWh/m ² pro Jahr

Abbildung 47: Screenshot Blatt Eingaben Haustyp und Wärmebedarf für Altbauten

Auf diesem Blatt besteht auch die Möglichkeit, alle Eingabewerte zurück zu setzen, um eine neue Berechnung machen zu können (roter Knopf in Abbildung 46). Dieser Befehl kann nicht rückgängig gemacht werden. Zudem wird hier ein Hinweis auf die Möglichkeit gemacht, einen GEAK erstellen zu lassen, oder selbst einen GEAK-Light zu machen.

Die roten Ecken in einigen Zellen weisen auf anklickbare weitere Hinweise und Informationen hin.

6.4 Inputparameter Variantenstudie (Wirtschaftlichkeit).

Durch die Benutzereingaben (im obersten Bereich des Blatts Wirtschaftlichkeit, Abbildung 48) werden weitere Randbedingungen, respektive Berechnungsparameter definiert. Die klare Strukturierung und durch Kommentare ergänzte Excel-Tabelle ist selbsterklärend. Durch den beschränkten Zugriff können nur die entsprechenden Zellen verändert werden, was verhindern soll, dass durch eine falsche Anwendung des Tools trügerische Resultate entstehen.

Wirtschaftlichkeitsberechnung von Erdwärmesondenanlagen in Kombination mit Solaranlagen

BENUTZEREINGABEN			
Lebensdauer der Anlage	25 Jahre	Strompreis WP Hochtarif	0.2 Fr./kWh
Kapitalzinssatz	3 %	Strompreis WP Niedertarif bezogener Strommix	0.14 Fr./kWh
Wärmebedarf Heizung	10836 kWh pro Jahr	Rückvergütungstarif PV	0.08 Fr./kWh
Wärmebedarf Warmwasser	3400 kWh pro Jahr	PV Anlagenart	Integriert
Volllaststunden	2000 h	Heizungsunterstützung durch SK	Nein
Anzahl Erdwärmesonden (EWS)	1		

Abbildung 48: Screenshot Blatt Wirtschaftlichkeit, notwendige Eingaben durch den Benutzer

Im oberen Teil könnte zusätzlich ausgewählt werden, welches Vergütungsmodell bei einer PV-Anlage gewählt werden soll, falls die Anlage mit über 10 kW (Peak-Leistung) eingegeben würde. Standardmässig wird eine 3 kW PV-Anlage berechnet.

Im zweiten Bereich (berechnete Anlagedaten, Abbildung 49) werden die verschiedenen Anlageelemente vordimensioniert. Die vorgeschlagenen Werte (Standardfall) sind jeweils in den lachsfarbenen Zellen zu finden. Diese werden anhand der eingegebenen Parameter und der Datenbank (Tabellenblatt Daten) errechnet. In den hellblauen Zellen können diese allerdings überschrieben werden. Der Standardfall ist ökonomisch und technisch optimiert. Ebenfalls noch in diesem Bereich werden die Investitionen und Kosten berechnet. Auch diese bilden sich aus den Eingaben und den Daten aus der Datenbank. Auch hier können die Werte durch eigene Zahlen in den blauen Zellen überschrieben werden. Rechts dieser Tabelle befindet sich ein roter Knopf, mit dem eine zusätzliche Berechnung des iterativen Solar-Kollektoren-Modells (SK) gestartet werden kann. Diese Berechnung kann lange Zeit in Anspruch nehmen, es wird unter Umständen aber ein etwas besseres Resultat erreicht.

BERECHNETE ANLAGEDATEN				EWS _{STD} : Standard Erdwärmesonde	
Total Wärmeleistung		7.1 kW			EWS _{STD} + SK: Standard Erdwärmesonde mit thermischer Sonnenkollektoranlage
Wärmepumpe (WP) mit Erdwärmesonde	JAZ	4.4	Tiefe (m)	138	EWS _{STD} + PV: Standard Erdwärmesonde mit Photovoltaikanlage
Wärmepumpe mit Erdwärmesonde opt.		5.0		185	EWS _{OPT} : Optimierte Erdwärmesonde (30% tiefer, höhere Jahresarbeitszahl, Wasser statt Sole)
Fläche und Speicher			Wärmeproduktion SK (kWh)		EWS _{OPT} + SK: Optimierte Erdwärmesonde mit thermischer Sonnenkollektoranlage
Sonnenkollektor (SK)		5.2 m ²		2040	EWS _{OPT} + PV: Optimierte Erdwärmesonde mit Photovoltaikanlage
Speichervolumen		392	Leistung PV (kW)		Wärmeproduktionsangaben können von der tatsächlichen Energie (Siehe D38, G38, resp. Tabellenblatt "Solarkollektor Modell") minimal abweichen
Photovoltaik (PV)		21.0 m ²		3.00	
			Stromproduktion PV (kWh)		
				2853	
Investitionskosten (Fr.)			Wartungskosten/Jahr (Fr.)		
WP / EWS-Anlage		47684		400	
WP / EWS-Anlage optimiert		51324		400	
WP / EWS Subventionen					
Thermischer Sonnenkollektor		15692		200	
Therm. Sonnenkollektor Subventionen					
Photovoltaikanlage		12424		171	
Photovoltaik Subventionen		4953			
Planung, Bewilligung		10000			
Maurer, Gärtner,		5000			
Steuerabzug falls Sanierung		0 %			

Berechnungsstatus 1: Berechnung durchführen
 Berechnungsstatus 2: Bitte genaue Berechnung Durchführen
Genauere Berechnung
Wärmeertrag SK

Betriebs- und Unterhaltskosten nach BFE 6 Rp./kWh (für Anlagen kleiner als 100 kW)

Abbildung 49: Screenshot Blatt Wirtschaftlichkeit, Berechnung der Investitionen

In diesem Bereich könnten auch Subventionen eingegeben werden, falls solche erhältlich sind. Die Subventionen für die PV-Anlage werden automatisch berechnet, nach .

Bereich drei stellt die Energiebilanz dar (Abbildung 50). Dabei werden die in der Einleitung beschriebenen zwei Mal drei Varianten errechnet. Das Vorgehen ist jeweils dasselbe. Dem totalen Wärmebedarf wird, falls vorhanden, die durch den Sonnenkollektor produzierte Wärme abgezogen, was die zu produzierende Energie der Wärmepumpe ergibt. Mit der bereits definierten JAZ kann so der Strombedarf der Wärmepumpe bestimmt werden. Diesem wird dann je nach Modell der selber produzierte Solarstrom abgezogen oder nicht. Dabei wird zwischen dem ökonomischen dem ökologischen Modell unterschieden. Einerseits soll der Hauseigentümer die Möglichkeit haben, den hergestellten Solarstrom zu verkaufen und somit auch den ökologischen Nutzen abzutreten (z.B. an eine Solarstrombörse). Andererseits besteht die Möglichkeit, sich den ökologischen Nutzen selber anzurechnen und den produzierten Solarstrom selber zu brauchen, resp. den Überschussstrom nur mit den vom Elektrizitätsversorger eingesparten Kosten vergütet zu erhalten. Das Endergebnis ist die Menge Strom welche aus dem öffentlichen Netz bezogen werden muss (in der Bilanz über ein Jahr). Grün dargestellt werden die Zellen resp. Zahlen mit den besten (tiefsten) Werten.

ENERGIEBILANZ (kWh pro Jahr)							
	EWS _{STD}	EWS _{STD} + SK	EWS _{STD} + PV	EWS _{OPT}	EWS _{OPT} + SK	EWS _{OPT} + PV	
Totaler Wärmebedarf	14236	14236	14236	14236	14236	14236	14236
- Wärmeproduktion Solar	0	2185	0	0	2185	0	0
Wärmeproduktion EWS-Anlage	14236	12051	14236	14236	12051	14236	14236
- Wärmeentzug Boden	11000	9312	11000	11389	9641	11389	11389
Strombedarf WP	3236	2739	3236	2847	2410	2847	2847
Ökologisches Modell (Eigenverbrauch des PV-Stromes)							
- Strombezug aus PV	0	0	856	0	0	856	856
Strombezug aus dem öff. Netz	3236	2739	2380	2847	2410	1991	1991
Stromüberschuss aus PV (Rückspeisung)			1997			1997	1997

Abbildung 50: Screenshot Blatt Wirtschaftlichkeit, Berechnung der Energiebilanz

Im vierten Bereich ist die Jahreskostenrechnung dargestellt (Abbildung 51). Mittels der Annuitätenmethode werden die jährlichen Kosten errechnet und können so einfach miteinander verglichen werden. Zudem werden Gestehungskosten der Wärme (Rp./kWh) dargestellt. Unter den Eingabewerten finden sich alle 6 Varianten im ökologischen Modell, rechts davon die beiden Varianten mit PV-Anlagen im ökonomischen Modell.

JAHRESKOSTENRECHNUNG (Ökologisches Modell, Eigenverbrauch)							Ökonomisches Modell (Verkauf PV-Strom mit KEV)	
	EWS _{Std}	EWS _{Std} + SK	EWS _{Std} + PV	EWS _{Opt}	EWS _{Opt} + SK	EWS _{Opt} + PV	EWS _{Std} + PV	EWS _{Opt} + PV
Annuitätsfaktor	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,000	0,000
Investition einmalig (Fr.)	62684	78377	70155	65524	81216	72995	0	0
Stromkosten jährlich (Fr.)	582	493	428	512	434	358	0	0
Jährl. Ertrag Photovoltaik (Fr.)	0	0	-160	0	0	-160	0	0
Wartungskosten jährlich (Fr.)	400	600	571	400	600	571	0	0
Total Jahreskosten (Fr.)	4582	5994	4869	4675	5698	4962	0	0
Betriebskosten pro Monat (Fr.)	82	91	70	76	86	64	0	0
Gestehungskosten Wärme (Rp./kWh)	32	39	34	33	40	35	0	0
Mehrkosten ggü. günstigster Variante (%)	0	22	6	2	24	8	0	0

Abbildung 51: Screenshot Blatt Wirtschaftlichkeit, Berechnung der Jahreskosten

Auch hier könnten alle Eingabebewerte im Tool zurückgesetzt werden. Zusätzlich wird angeboten, sich die Ergebnisse als pdf-Datei exportieren zu können.

6.5 Grafischer Output

Die Tabellenblätter *Ökologisches Modell* und *Ökonomisches Modell (KEV)* basieren auf den Eingaben und Ergebnissen der beiden vorangegangenen Tabellenblätter und erscheinen je nach Auswahl der Vergütungsart bei PV-Anlagen ab 10 kW. Es werden jeweils die Wirtschaftlichkeit, die Energiebilanz (Strombilanz, Primärenergieverbrauch) und Umweltbelastung (Treibhausgasemissionen, UBP) dargestellt und kurz beschrieben. Die Daten zu diesen Berechnungen befinden sich in den ausgeblendeten Tabellenblätter *Daten und Berechnungen zu den Diagrammen*. Darin sind die Zusammenhänge sowie die Quellen der verwendeten Daten gekennzeichnet.

Die folgenden Abbildungen Abbildung 52 bis Abbildung 54 zeigen das ökologische Modell.

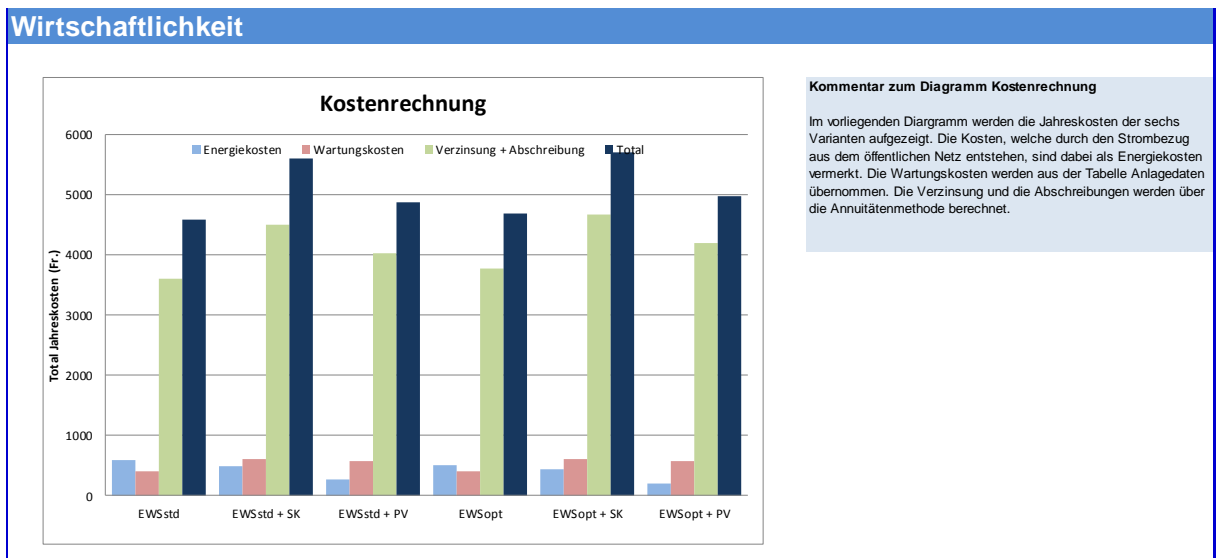
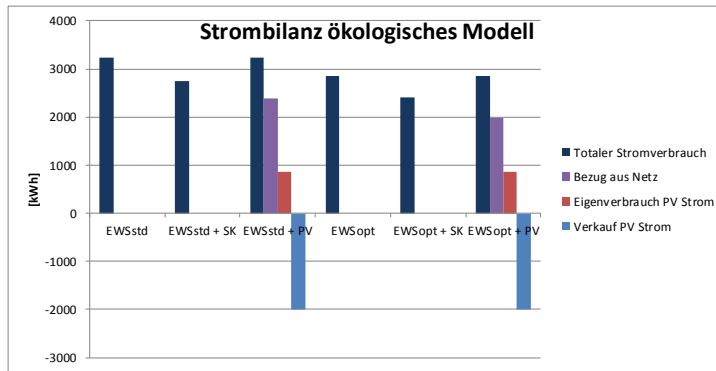


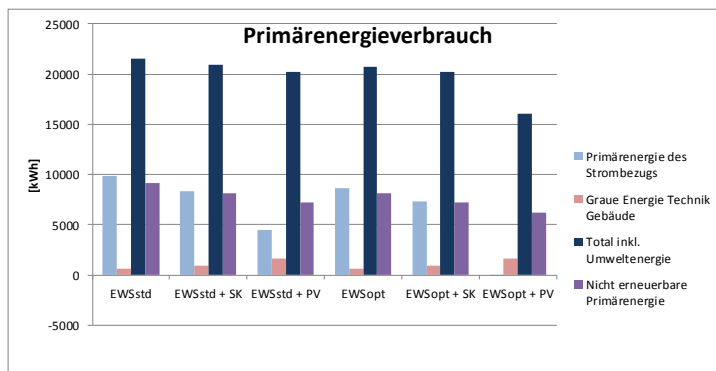
Abbildung 52: Darstellung der Wirtschaftlichkeit bei Einmalvergütung in Kosten pro Jahr

Energiebilanz



Kommentar zum Diagramm Strombilanz der Wärmezeugung und Solaranlage pro Jahr

In diesem Diagramm wird der vom Netz bezogene Strom dargestellt (Endenergie). Ein negativer Strombezug bedeutet, dass im betrachteten System mehr Strom produziert als verbraucht wird. Folglich kann diese Menge für andere Zwecke im Gebäude genutzt werden oder sie wird in das Netz zurück gespiesen. Es wird die Bilanz über ein Jahr gezeigt, der PV-Stromertrag vom Sommer wird dabei zum Teil ans Netz abgegeben und wird im Winter wieder vom Netz bezogen. Verluste, die eventuell mit dieser virtuellen Speicherung im Netz verbunden sind, werden nicht mit berechnet.



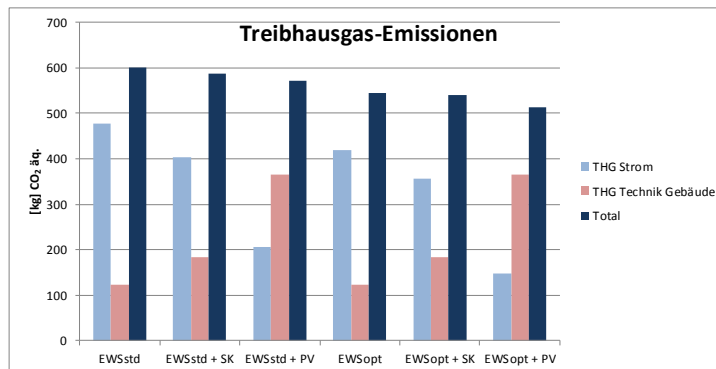
Kommentar zum Diagramm Primärenergieverbrauch

In diesem Diagramm werden die Primärenergiewerte der Energiebilanz der verschiedenen Varianten dargestellt. Diese sind vom gewählten Strommix abhängig. Ebenso ist die graue Energie enthalten, die in den hier betrachteten Anlagen steckt und über die Lebensdauer abgeschrieben wird.

Strommix gewählt: Strom Schweiz

Abbildung 53: Darstellung der Energiebilanz (Endenergie) und des gesamten Primärenergiebedarf pro Jahr

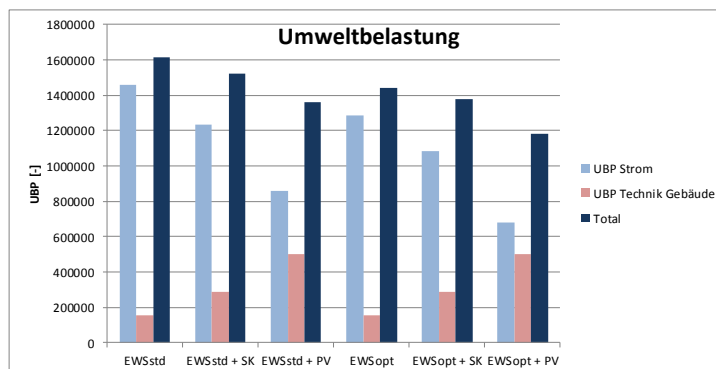
Umweltbelastung



Kommentar zum Diagramm Treibhausgas-Emissionen

In diesem Diagramm werden die Treibhausgasemissionen (THG) in als äquivalente CO₂-Emissionen in kg pro Jahr dargestellt. Die THG hängen vom gewählten Strommix ab. Ebenso sind die grauen THG berücksichtigt, die in den hier betrachteten Anlagen stecken und über die Lebensdauer abgeschrieben werden.

Strommix gewählt: Strom Schweiz



Kommentar zum Diagramm Umweltbelastung

In diesem Diagramm wird die Umweltbelastung mit Hilfe der Umweltbelastungspunkte (UBP) dargestellt. Dabei wird die Belastung durch den bezogenen Strom vom Netz als UBPF Strom aufgezeigt. Der Balken UBPF Technik Gebäude zeigt hingegen die Umweltbelastung, welche durch die hier betrachteten Anlagen verursacht wird. Diese wird über die Lebensdauer der Anlagen abgeschrieben.

Abbildung 54: Darstellung der Umweltbelastung in äquivalenten CO₂-Emissionen und Umweltbelastungspunkten pro Jahr

Das Tabellenblatt *Transformationspfad* stellt die errechneten Daten in den Zusammenhang der Energiewende (Abbildung 55). Im oberen Diagramm steht der THG-Ausstoss pro kWh Primärenergie dem jährlichen Primärenergieverbrauch pro Quadratmeter EBF gegenüber. Es werden jeweils die Ausgangssituation und die errechneten sechs Varianten dargestellt. Im zweiten Diagramm ist der jährliche THG-Ausstoss pro Person dem Jährlichen Primärenergieverbrauch gegenübergestellt. Hier sind ebenfalls die Ausgangslage und die sechs Varianten dargestellt. Je weiter eine Lösung in Richtung unterer linker Ecke liegt, desto eher entspricht diese Variante den Anforderungen der 2000-Watt Gesellschaft resp. der 1 t CO₂-Gesellschaft.

Eine detailliertere Beschreibung befindet sich direkt neben den beiden Grafiken ().

Ausgewählter Strommix: Strom Schweiz

Modell: Ökologische Betrachtung

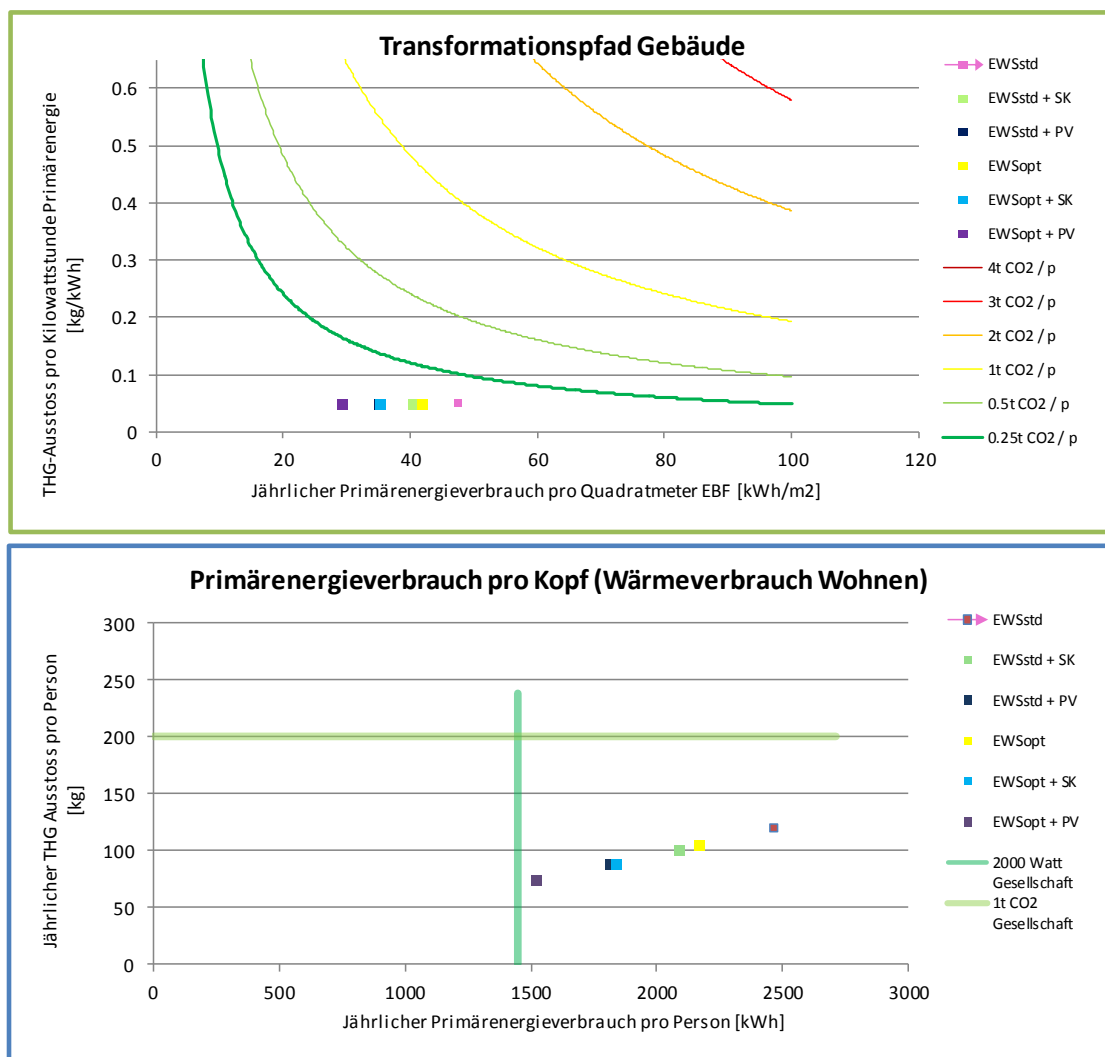


Abbildung 55: Grafiken im Tabellenblatt Transformationspfad.

Kommentar zum Diagramm Transformationspfad

Das Diagramm Transformationspfad zeigt auf der Abzisse die jährliche Umweltbelastung in Form der verbrauchten Primärenergie pro Quadratmeter Energiebezugsfläche (EBF). Der Durchschnitt der Schweiz liegt bei 180 kWh pro Quadratmeter EBF. Die Ordinate zeigt die spezifischen Treibhausgas-Emissionen (THG) pro Kilowattstunde Primärenergie.

Des Weiteren können mit Hilfe der Trendlinien die absoluten Werte der Treibhausgas-Emissionen pro Person abgelesen werden. Es ist zu beachten, dass hier nur die THG-Emissionen der Wärmeerzeugung erfasst werden.

Die Energiebezugsfläche pro Person wird aufgrund der Eingabe berechnet. Der durchschnittlichen Wohnflächenverbrauch pro Kopf beträgt 60 m^2 pro Person.

Energiebezugsfläche pro Person: **51.8 m²**

Kommentar zum Diagramm Primärenergieverbrauch

Die Grafik zeigt die jährliche Umweltbelastung in Form der verbrauchten Primärenergie pro Person sowie des Treibhausgasausstosses (THG) in CO₂-Äquivalenten pro Person.

Zum Vergleich sind weiter die beiden Ziele der "2000 Watt" sowie der "1 t CO₂-Gesellschaft" grün eingezeichnet. Da der Primärenergiebedarf für Heizung und Warmwasser aber nur einen Teil des totalen Energie- und CO₂-Budgets ausmacht, müssen diese Werte entsprechend angepasst werden. Nur ein Teil darf für den Wärmeverbrauch budgetiert werden. Dieser Anteil des Primärenergieverbrauches bzw. der totalen Treibhausgasemissionen am gesamten Primärenergieverbrauch bzw. am gesamten Treibhausgasausstoss kann unten festgelegt werden.

Anteil des Wärmeverbrauchs am Gesamt-Primärenergieverbrauch einer Person von max. 2000 W. **165 W**

Anteil des Wärmeverbrauchs an den gesamten THG-Emissionen einer Person von max. 1 t CO₂. **200 kg**

Farblgende

Erklärung Benutzereingaben Ausgabe

Abbildung 56: Erklärungen auf dem Tabellenblatt Transformationspfad

6.6 Solarkollektor Modell

Da im Gegensatz zu Photovoltaikanlagen für thermische Solarkollektoren die Leistung nur schwer messbar ist und nahezu keine Daten diesbezüglich zu finden sind musste ein neues Modell dazu entwickelt werden. Dabei werden einigen Annahmen und Vereinfachungen getroffen. Vergleiche mit realen Anlagen und gebräuchlichen Berechnungstools zeigen aber eine sehr gute Übereinstimmung.

Basis diese Methodik bildet eine Kurve welche aus dem Kehrwert der gausschen Normalverteilung entsteht. Diese Kurve entspricht der Leistung der Heizung über das ganze Jahr. Das Integral dieser den Heizenergiebedarf. Diese Kurve wird nun so lange angepasst, dass die Gesamtenergie und die maximale Leistung der Heizung stimmen, zusätzlich aber auch rund 200 Tage im Jahr nicht geheizt werden muss. Dieser Kurve wird nun ein konstant verteilter Wärmebedarf für Warmwasser addiert. Die Summe der beiden Kurven ergeben den toten Wärmebedarf des Gebäudes. Die solaren Erträge werden als Dreieck dargestellt. Einfach zu erkennen ist nun die Tatsache, dass die maximale Leistung der Sonnenkollektoren in der Zeit mit dem geringsten Wärmebedarf auftreten (im Sommer). Dies ergibt eine starke Minderung der effektiven zur theoretischen Leistung resp. des effektiv nutzbaren Wärmegewinns der Kollektoren und muss in der Energiebilanz berücksichtigt werden. Die Berechnungen finden im dazugehörigen, ausgeblendeten Berechnungsblatt statt. Dargestellt ist dieses Modell im Blatt *Solarkollektor Modell* (Abbildung 57).

Randbedingungen			
Wärmeleistung Heizung	7.1 kW		Abw: 0.1648
Wärmebedarf Heizung	10836 kWh pro Jahr		Abw: 1278.9979
Fläche SK	5.23 m ²		
Anzahl Personen	4		
Heiztage pro Jahr	160 Tage	Gesamter Wärmebedarf	14235.76 kWh
Heizungsunterstützung	Nein		
Speicher	Ja		
Speichervolumen	392 l	Maximale Grösse Speicher	392 l

Ergebnisse			
Heizungsunterstützung direkt	0 kWh pro Jahr	0.0%	Deckungsgrad (Wärmebedarf Heizung)
Warmwasserunterstützung direkt	2078 kWh pro Jahr	61.1%	Deckungsgrad (Wärmebedarf Warmwasser)
Unterstützung Speicher	107 kWh pro Jahr	0.8%	Deckungsgrad (von totalem Wärmebedarf)
Wärmeunterstützung Total	2185 kWh pro Jahr	15.3%	Deckungsgrad total
Überschussstunden SK eff. (ev. für Speicher)	1992 Stunden	83 Tage	
Heizzstunden Berechnung	3192 Stunden	133 Tage	27 Tage differenz

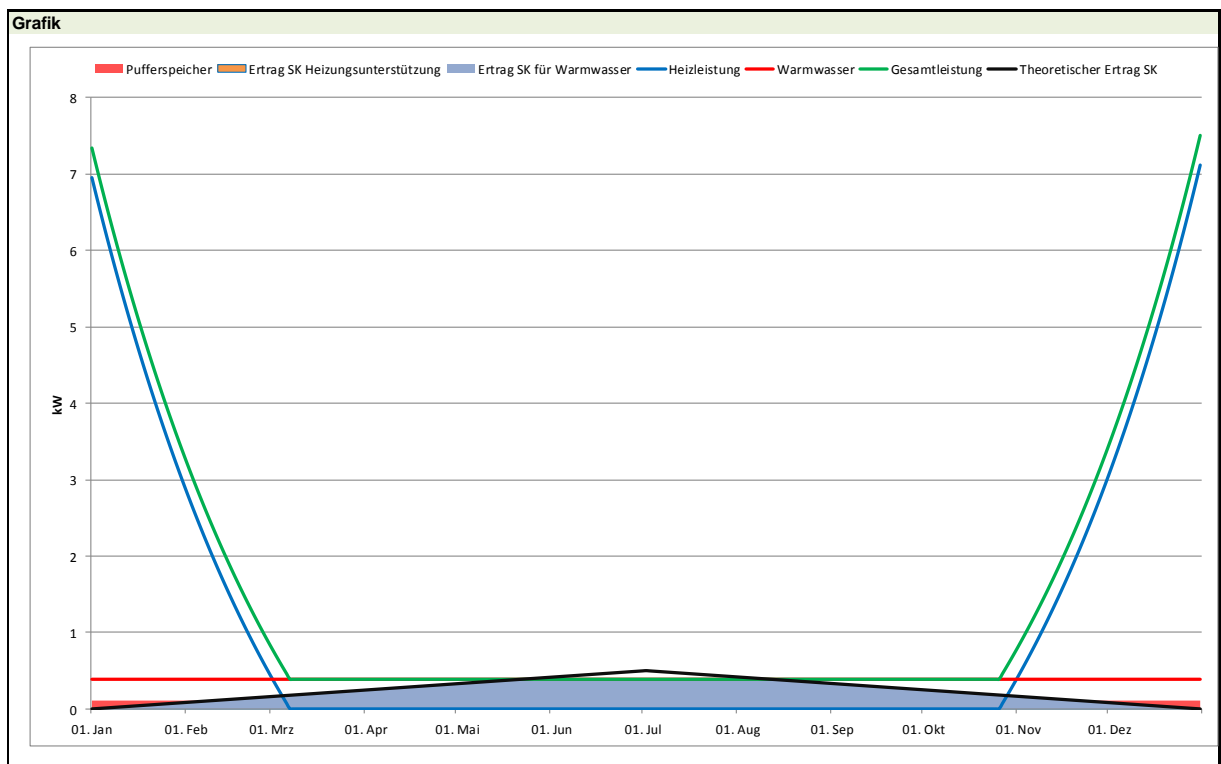


Abbildung 57: Darstellung Solarkollektoren Modell

6.7 Interpretation der Resultate des Tools Wirtschaftlichkeit

Durch die relativ einfache Anwendung, trotz der hohen Komplexität der Zusammenhänge und Verknüpfungen, kann das Tool zu einer Blackbox werden. Aus diesem Grund ist es wichtig zu verstehen was im Hintergrund des Tools läuft. Die einzelnen Abhängigkeiten und vor allem die verwendeten Werte sind ausschlaggebend ob eine Variante Wirtschaftlich ist oder nicht. Darum werden nachfolgend die Ergebnisse, welche mit dem Tool errechnet werden können, kritisch betrachtet und auf ihre Tauglichkeit geprüft.

Die angenommenen Werte, welche im Tabellenblatt Daten einsehbar sind, entsprechen aktuellen Werten zu welchen Produkte im Markt verkauft werden. Dies entspricht somit einer realen Situation. Die Werte im Tabellenblatt Wirtschaftlichkeit stehen vor allem in Bezug eher auf der konservativen Seite. Die Zusatzfunktion des Überschreibens erlaubt es trotzdem eigene Werte (aus Offerten usw.) zu verwenden und somit noch genauere Werte zu erhalten.

Die errechneten Modelle (ökonomisch und ökologisch) machen deutlich, dass der Verkauf des Solarstroms sich erst dann lohnt, wenn der Verkaufspreis höher ist als der Einkaufspreis für den benötigten Strom der Wärmepumpe. Mit der Einmalvergütung kann eine kleine PV-Anlage trotzdem fast kostendeckend erstellt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Preise für PV-Anlagen sehr unterschiedlich sein können, je nach Art der Lösung, Grösse und momentanen Markt-Verhältnissen. Bei grossen Anlagen ist eine Vergütung nach KEV möglich. Wie dieses Vergütungssystem in Zukunft zugänglich ist ist momentan leider nicht ganz klar, da noch immer eine Warteschlange besteht.

Verschiedene Versuche haben ergeben, dass eine thermische Solar-Kollektoranlagen rund 60 % des Warmwasserbedarfs decken kann ohne übermässig gross zu sein. Eine rentable und effiziente Heizungsunterstützung ist allerdings nur mit einem grossen saisonalen Wärmespeicher möglich, welcher die überschüssige Energie in den Sommermonaten in den Winter transferieren lässt.

Bei den Werten für die Energie- und Umweltbilanz wurden die Werte gemäss KBOB-Empfehlung Ökobilanzdaten im Baubereich [52] verwendet. Dabei zeigt es sich, dass sowohl PV-Anlagen wie auch Solarkollektoren-Anlagen einen recht hohen Bedarf an grauer Energie resp. an grauen Umwelt-Belastungspunkten (UBP) aufweisen, dies im Gegensatz zu Wärmeerzeuger und Erdwärmesonden. Da insbesondere Solarkollektoren und Wärmepumpen aus ähnlichen Materialien gefertigt werden, sind uns diese Unterschiede nicht plausibel zu erklären. Bei den PV-Paneelen ist zu sagen, dass die benötigte graue Energie stark von der Technik und dem Herstellungsland resp. dessen Strommix abhängen. Immerhin führt der technische Fortschritt zu einer laufenden Verringerung der grauen Energie die zur Herstellung von PV-Modulen notwendig ist [53].

Beim Transformationspfad und den Klimazielen ist stets die Frage offen wie viel Energie respektive CO₂ für das Wohnen eingesetzt werden soll. Durch eine manuelle Eingabe kann dieser Teil angepasst werden und somit verschiedene Varianten errechnet werden.

Abschliessend ist zu sagen, dass das Tool eine einfache aber trotzdem ganzheitliche Möglichkeit eröffnet eine Wirtschaftlichkeitsanalyse verschiedener Varianten durch zu führen. Zudem lassen sich auch noch die unterschiedlichen ökologischen Auswirkungen einfach erkennen.

Damit das Tool aber auch Laien resp. von einer breiten Masse an Hauseigentümer angewendet wird, sollte es als Applikation professionell programmiert werden. Excel ist ein sehr fragiles Werkzeug für solche Anwendungen, kommt hier an seine Grenzen und ist nur schwer erweiterbar.

7 Gesamtoptimierung der Anlagen

7.1 Jahresarbeitszahl

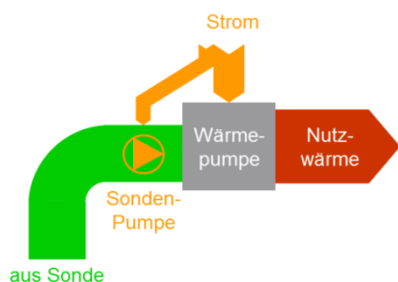
Der Stromverbrauch einer Wärmepumpen-Anlage wird wesentlich vom Wärmebedarf, aber auch von der Jahresarbeitszahl (JAZ) bestimmt. Daher ist es einerseits wichtig, den Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser insgesamt zu minimieren - in diesem Bereich kann oft viel erreicht werden (bessere Wärmedämmung, bessere Fenster, dichte Gebäudehülle etc.). Die Sanierung der Gebäudehülle bei Altbauten wird vom Gebäudeprogramm⁷ unterstützt.

Andererseits sollte die Jahresarbeitszahl so hoch wie möglich sein, um so wenig Strom wie möglich zu benötigen. Dabei sollte sichergestellt werden, dass keine Wärmepumpen-Anlagen erstellt werden, welche eine JAZ von weniger als 3 erreichen, da dann die Primärenergiebilanz nicht mehr immer positiv ist. Bei Wärmepumpen mit Erdwärmesonden wird auch bisher kaum eine JAZ unter 3 erreicht, bei Anlagen mit Aussenluft als Wärmequelle hingegen schon.

Wenn eine JAZ von 5 erreicht wird, dann werden bereits 80 % der Wärme aus der Umwelt bezogen. Diese JAZ ist mit einer optimierten Anlage mit Erdwärmesonden heute mit bewährter Technik machbar. Eine weitere Steigerung der JAZ ist sicher positiv, aber der Nutzen ist nur noch gering. Selbst bei einer (bisher höchstens theoretisch erreichbaren) JAZ von 10 könnten nur 10 % mehr Umwelte-nergie gewonnen werden.

Auch wenn eine Sonde gut gebaut wurde, kann eine Optimierung der Erdwärmesonde im Betrieb die JAZ noch deutlich erhöhen.

Die Jahresarbeitszahl wird hier definiert als das Verhältnis der jährlich produzierten Nutzwärme zum Strombedarf für den Kompressor der Wärmepumpe inklusiv deren Steuerung etc. und dem Strombedarf der Sondenfluid-Umwälzpumpe (Abbildung 58).



$$\text{Jahresarbeitszahl (JAZ)} = \frac{\text{Nutzwärme pro Jahr}}{\text{Strom pro Jahr}}$$

Abbildung 58: Definition JAZ

Die Jahresarbeitszahl ist von folgenden Einflussfaktoren abhängig:

- Der Temperatur der Wärmequelle, diese sollte so hoch wie möglich sein. Bei Erdwärmesonden ist dies die Temperatur des Sondenfluids, nachdem es durch die EWS gefördert wurde. Je höher sie ist, desto weniger Strom wird in der Wärmepumpe verbraucht.
- Der Temperatur der Nutzwärme, diese sollte so tief wie möglich sein. Dies ist die Vorlauftemperatur im Heizwasser, resp. die Temperatur des Warmwassers. Je tiefer sie ist, desto weniger Strom wird in der Wärmepumpe verbraucht.
- Dem COP der Wärmepumpe ("Coefficient of Performance" oder Leistungszahl), diesen findet man in den technischen Unterlagen der Wärmepumpe, die fast immer auf der Website des Herstellers zu finden sind. Der COP ist abhängig von der Bauart sollte so hoch wie möglich sein und unter den Testbedingungen B0/W35 nach EN-Norm 14551 mindestens bei 4,3 liegen.

⁷ Siehe <http://www.dasgebaeudeprogramm.ch/index.php/de/>

- Dem Strombedarf für die Umwälzpumpe. Dieser soll so klein wie möglich sein: eine nicht zu gross ausgelegte, hocheffiziente Umwälzpumpe (A-Klasse, heutzutage gesetzlich vorgeschrieben) ist notwendig. Zudem sollte die Hydraulik in der EWS, deren Durchmesser und Tiefe optimiert sein.

7.2 Gesamtoptimierung bei Neubauten

Der Strombedarf einer Wärmepumpe bei kleinen Neubauten (EFH, kleine MFH, kleine Nichtwohn-Gebäude) kann durch eine Konzeption gem. Abbildung 59 minimiert werden.

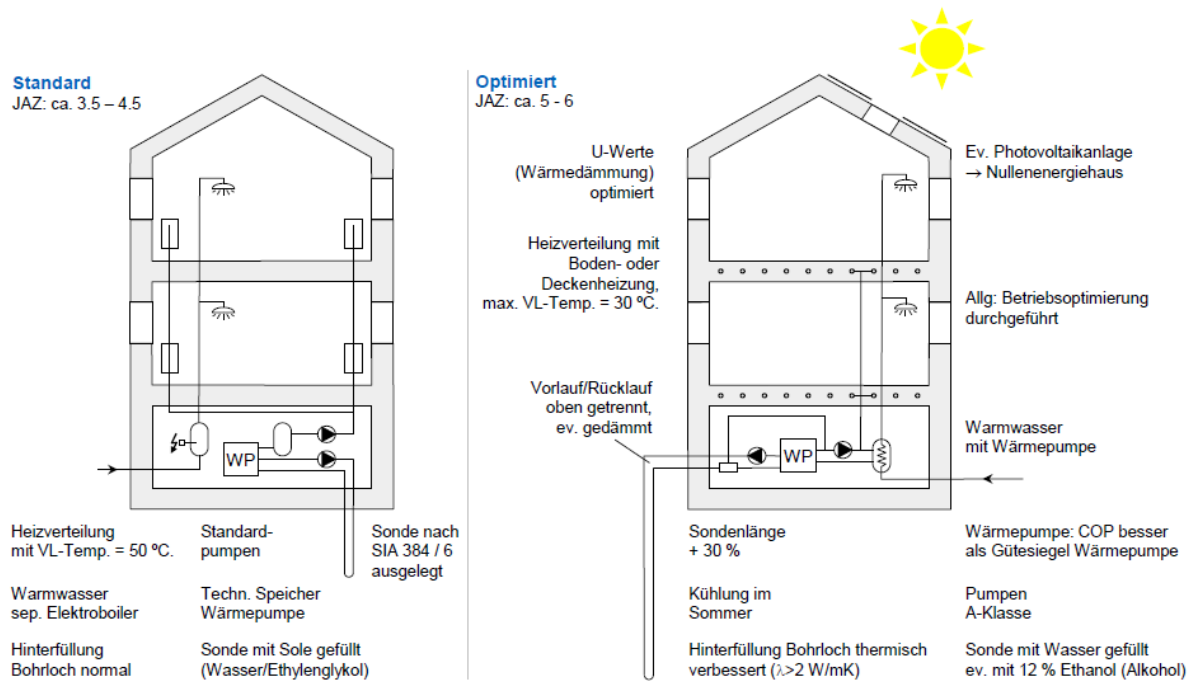


Abbildung 59: Gesamtoptimierung bei Neubauten

Die gute Wärmedämmung ist heute durch die Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE) vorgegeben. Hier dürfen keine Abstriche gemacht werden, und es ist auf eine einwandfreie Umsetzung der Vorschriften im Bauablauf zu achten. Auch die U-Werte der Fenster sind zu optimieren, hier sind weitere Fortschritte zu erwarten.

Die Heizverteilung erfolgt heute, insbesondere bei Wohnbauten, fast ausschliesslich über Bodenheizungen. Hier sollte zukünftig vermehrt auf Deckenheizungen gesetzt werden. Diese sind insbesondere zum Kühlen im Sommer geeigneter und ermöglichen damit einen hohen Komfort und eine mindestens teilweise Regeneration der Erdwärmesonden.

Bei Erdwärmesonden mit hoher Temperatur im Sondenfluid (eher tiefe und grosszügig ausgelegte EWS mit thermisch optimierter Hinterfüllung) sollte in den horizontalen Verbindungsleitungen der Vor- und Rücklauf getrennt und gegen oben isoliert werden (Abbildung 10).

Die Erdwärmesonde sollte gemäss den Erkenntnissen aus diesem Projekt optimiert werden und mit reinem Wasser oder mit einer Mischung aus Wasser und einer minimal zulässigen Konzentration von Frostschutzmittel betrieben werden. Alle EWS sollten mit frostsicherem und thermisch verbessertem Mörtel hinterfüllt werden.

Die Wärmepumpe sollte einen höchstmöglichen COP aufweisen⁸ und darf nicht überdimensioniert sein.

⁸ siehe auch bei <http://www.topten.ch/deutsch/haus/waermepumpen/sole-wasser-2.html>

Die Hydraulik der Wärmeverteilung und der Warmwasser-Erwärmung sollte mit Umschaltventilen so gelöst werden, dass entweder direkt geheizt wird mit minimal möglicher Vorlauftemperatur. Dazu muss die Heizkurve in den ersten beiden Wintern optimal eingestellt werden. Oder es wird auf Warmwasser-Erwärmung mit entsprechend höherer Vorlauftemperatur umgestellt.

Zusätzlich ist ein technischer Speicher vorhanden, aus welchem die Wärme fürs Warmwasser entnommen wird, Dieses wird frisch mit innerem Durchlaufregister oder mit einem externen Wärmetauscher (Frischwasser-Station, siehe z.B. Vortrag Sonnenkollektoren in Verbindung mit Wärmepumpen am EnergiePraxis-Seminar 2012-1, 22. Mai 2012 in Rotkreuz [54]) auf ca. 50 °C erwärmt. Sobald dieser Speicher leer ist, sowie jeden morgen früh, wird auf Speicherladung umgeschaltet und der Speicher auf ca. 55 °C geladen. Die Wärmepumpe sollte dabei eine Vorlauftemperatur bis max. 60 °C erreichen können, falls dies einmal notwendig sein sollte. Zudem sollte sie mit einem elektronischen Expansionsventil ausgestattet sein. Beim Speicher ist auf eine gute Schichtung zu achten: schlank und hoch, Einströmung oben langsam. Damit kann erreicht werden, dass die Wärmepumpe immer mit geringster möglicher Vorlauftemperatur und damit höchstmöglicher Effizienz betrieben werden kann.

Der optimierten Warmwasser-Erwärmung ist auch deswegen grosse Beachtung zu schenken, weil bei heutigen Neubauten der Warmwasserbedarf über 50 % des jährlichen Wärmebedarfes ausmachen kann [55].

Es darf keine elektrische Zusatzheizung, weder für die Gebäudeheizung noch für das Warmwasser, eingeplant werden.

In den ersten beiden Jahren ist eine Betriebsoptimierung zu machen und die Parameter der Anlage sind optimal einzustellen. Dazu muss die Jahresarbeitszahl gemessen werden können und ausgewertet werden.

Die Kombination aller dieser Massnahmen sollte eine JAZ von 5 oder besser machbar machen.

Der nun noch verbleibende Strombedarf kann nun in der Regel mit einer PV-Anlage auf dem Dach des Gebäudes erzeugt werden. Damit wird das Gebäude in der Jahresbilanz ein Null-Wärmeenergie-Haus. Mit dem in diesem Projekt entwickeltem Wirtschaftlichkeits-Tool kann gezeigt werden, dass dies heute ohne wesentliche Mehrkosten (Jahreskosten) machbar ist, insbesondere auch weil die tiefen Zinsen zu tiefen Finanzierungskosten führen, aber auch dank Subventionen und stark gefallenen Preisen für PV-Module.

Noch besser wären Hybrid-Kollektoren, wie sie heute teilweise angeboten werden. Damit kann eine Regeneration des Bodens ermöglicht werden, oder im Sommer können die Hybridkollektoren als Wärmequelle für die Wärmepumpe (fürs Warmwasser) dienen.

7.3 Gesamtoptimierung bei Altbauten

Die Sanierung der Wärmeerzeugung ist bei allen Gebäuden regelmässig, das heisst etwa alle 20 bis 25 Jahre, erforderlich. Eine solche Sanierung sollte geplant werden (geplante, präventive Instandsetzung), das heisst es sollte nicht gewartet werden, bis der bestehende Wärmeerzeuger, heute noch in der Mehrheit eine Ölheizung, einen unreparierbaren Defekt aufweist und dann in einer Notfallübung (ungeplante Instandsetzung) ersetzt werden muss. Der geplante Ersatz der Wärmeerzeugung stellt eine gute Gelegenheit dar, auf eine regenerative Energiequelle, d.h. meist auf eine Wärmepumpe, umzustellen. Gleichzeitig sollten, vor dem Ersatz der Wärmeerzeugung, weitere Sanierungsschritte zur Heizwärmeeinsparung geprüft und umgesetzt werden.

Auch bei bestehenden Gebäuden kann mit einer Optimierung aller Komponenten eine Wärmepumpen-Anlage erstellt werden, welche hohe Jahresarbeitszahlen ermöglicht (Abbildung 60). Auch hier gilt die Empfehlung, nicht die Investition, sondern die Jahreskosten zu optimieren. Eine Investition in eine optimierte Wärmeerzeugung kann sich langfristig besser rentieren und bietet weniger Risiken als viele heute angebotene Finanzprodukte.

Grundsätzlich sind die meisten Empfehlungen für Neubauten auch für bestehende Gebäude anwendbar.

Alle Gebäude eignen sich für eine Wärmepumpe

Anders als oft geschrieben, eignen sich praktisch alle Gebäude für eine Wärmepumpe. Es müsste schon ein sehr seltener Fall vorliegen, wo eine Wärmepumpe nicht möglich ist. Wärmepumpen gibt es in allen Grössen und bis hin zu Vorlauftemperaturen von 80 °C, so dass im Prinzip alle Heizsysteme betrieben werden können.

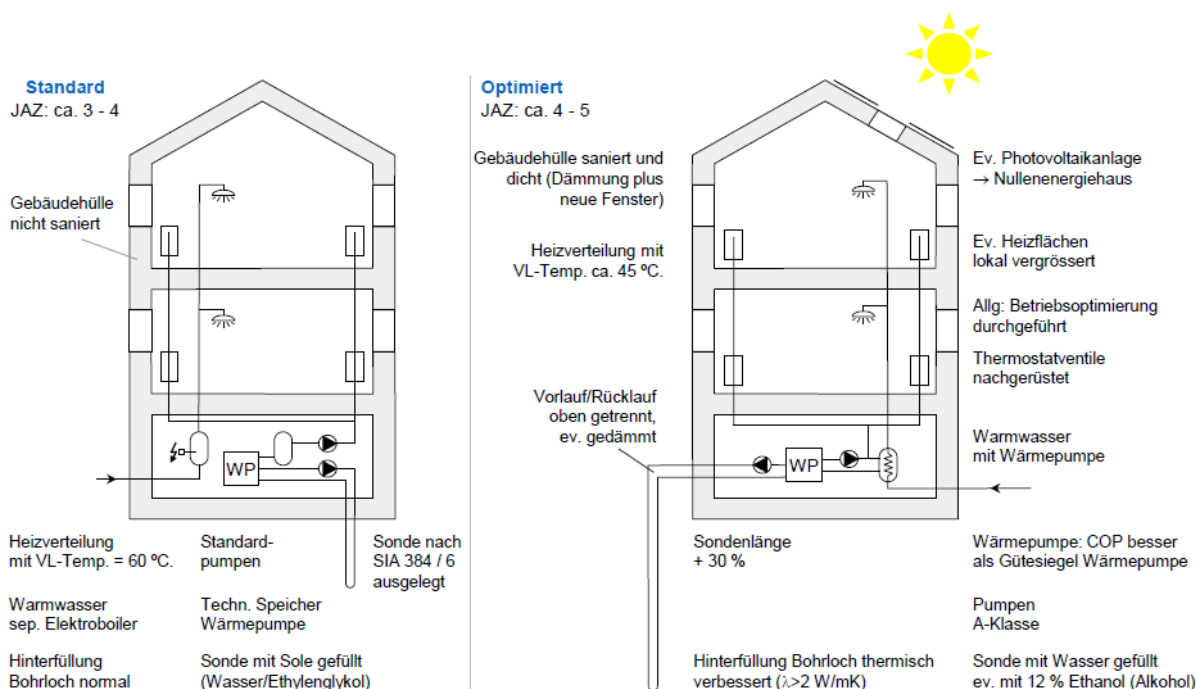


Abbildung 60: Gesamtoptimierung bei bestehenden Bauten

Damit die Wärmeerzeugung maximal effizient wird und zu minimalen Investitionen realisiert werden kann, sollte, falls es möglich ist und nicht bereits gemacht wurde, zuerst das Gebäude wärmetechnisch saniert werden. Dies ist immer der beste Weg, um die Energiekosten drastisch zu senken.

Die Dämmung von Dach und Kellerdecke ist meist relativ einfach machbar. Schon damit kann viel Heizwärme gespart werden, und im Allgemeinen verbessert sich auch der Komfort. Eine Dämmung des Dachs kann zudem einen neuen, nutzbaren Raum schaffen. Alternativ kann auch der Estrichboden gedämmt werden.

Das Auswechseln der Fenster, am besten inkl. der ganzen Rahmen, ist ebenfalls eine gute Methode, den Wärmeverlust zu verringern sowie den Gebäudewert und Komfort zu steigern. Inzwischen sind sehr gute Fenster mit 3-fach-Verglasung und gedämmten Fensterrahmen zu attraktiven Preisen erhältlich. Wenn möglich, sollte gleichzeitig auch die Fassade gut gedämmt werden. Dank neuen Dämmmaterialien auf Aerogel-Basis ist heute eine äussere Aussenwärmedämmung möglich ohne das Aussehen des Gebäudes zu verändern [12].

Alle diese Massnahmen profitieren in der Schweiz von Beiträgen aus dem Programm Gebäudesanierung des Bundes, und die Investitionskosten können meist von den Steuern abgezogen werden.

Immer sollte auch die Dichtheit der Gebäudehülle verbessert werden. Alle Undichtigkeiten und Ritzen sollten abgedichtet werden. Diese finden sich bei Fenstern und Türen, aber auch bei Anschlüssen unterschiedlicher Bauteile wie Dachanschluss, Kamindurchdringung und unterschiedlichen Fassaden-Bauteilen. Auch wenn ein Cheminée (ein Kamin) oder ein Holzofen vorhanden ist, entweicht über den Kamin viel warme Luft, falls er nicht ganz geschlossen ist.

Die Sanierung der Gebäudehülle senkt den Heizwärmebedarf und erhöht die Behaglichkeit und den Gebäudewert. Es kann auch bauphysikalischen Problemen und Schimmel vorgebeugt werden.

Die gute Wärmedämmung bewirkt auch, dass kurze Unterbrüche in der Beheizung, z.B. weil auf Warmwasser-Erwärmung umgestellt wird oder weil die Wärmepumpe bei Bedarfsspitzen oder Ver-

sorgungsengpässen im Netz kurzzeitig ausgeschaltet werden muss (Demand side-Management), sich nicht negativ auf den Komfort auswirken.

Mit Massnahmen zur Verminderung der Wärmeverluste sinkt automatisch auch die erforderliche Vorlauftemperatur im Heizsystem. Üblicherweise reichen nun ca. 45 °C Vorlauftemperatur. Damit werden beste Voraussetzungen für eine Wärmepumpe geschaffen. Auch bei kaum sanierten Gebäuden liegt heute die erforderliche Vorlauftemperatur fast immer unter 60 °C.

Um die erforderliche Vorlauftemperatur nach Sanierung zu kennen, kann wie folgt vorgegangen werden: Am Heizungsregler muss die Vorlauftemperatur (die Heizkurve) so tief wie möglich eingestellt. Am besten wird die Heizkurve bei kaltem Wetter im Wochenrhythmus schrittweise abgesenkt. Sobald es in einem Raum zu kalt wird (bzw. die Benutzer reklamieren), wird die Heizkurve wieder einen Schritt höher eingestellt und dann so belassen. Sollten nur wenige Räume im Gebäude kühler als die übrigen sein, kann es sich lohnen, dort die Heizflächen zu vergrössern, das heisst zum Beispiel grössere Heizkörper zu installieren. An den kältesten Tagen im Winter kann nun beobachtet werden, wie hoch die maximale Vorlauftemperatur sein muss. Diese Information ist wichtig, um die neue Wärmepumpenanlage optimal planen und in Betrieb nehmen zu können.

In aller Regel ist auch bei bestehenden, nur teilweise sanierten Gebäuden mit Heizkörpern eine Vorlauftemperatur von 50 °C ausreichend, bei völlig unsanierten Gebäuden bis max. 60 °C. Über 60 °C Vorlauftemperatur würde bedeuten, dass man sich an kalten Tagen die Finger an den Heizkörpern verbrennt, dies ist heutzutage kaum mehr der Fall.

Für die Planung der neuen Wärmepumpenanlage muss man auch die erforderliche Heizleistung am kältesten Tag kennen. Dazu sollte der Energieverbrauch der bestehenden Wärmeerzeugungsanlage über 3 bis 4 Jahre bekannt sein. Aus diesen Werten kann ein Fachplaner oder Installateur die erforderliche Heizleistung berechnen (Siehe z.B. Merkblatt des BFE [56]).

In jedem Fall ist es zu empfehlen, auch das Warmwasser mit der Wärmepumpe vollständig zu erwärmen. Das heisst allfällig bestehende Elektro-Boiler sollten ersetzt werden. Bei der Wärmepumpenanlage sollte das heisst keine Nachwärmung mit z.B. einem Elektro-Heizeinsatz vorgesehen werden. Das Warmwasser sollte im Durchlaufprinzip oder mit einer Frischwasserstation erwärmt werden.

Als Wärmequelle für eine Wärmepumpe bei Sanierungen eignen sich optimierte Erdwärmesonden ganz besonders, da sie im Winter eine höhere Wärmequellentemperatur als Luft bieten. Damit kann mit guter Effizienz auch eine höhere Vorlauftemperatur erzeugt werden, wie sie z.B. für Heizkörper erforderlich ist. Alternativ kann auch Grundwasser eine sehr gute Wärmequelle sein. Da Grundwasser eher aufwendiger und störungsanfälliger zu nutzen ist, eignet es sich vor allem für grössere Objekte. Auch Aussenluft kann genutzt werden, die Jahresarbeitszahl wird aber tiefer und damit der Strombedarf und der Leistungsbedarf an kalten Wintertagen höher. Insbesondere letzteres wirkt sich negativ auf den Aufwand für die Bereitstellung der erforderlichen maximalen Netzleistung aus.

In den ersten beiden Jahren nach Sanierung ist eine Betriebsoptimierung zu machen und die Parameter der Anlage sind optimal einzustellen. Dazu muss die Jahresarbeitszahl gemessen werden können und ausgewertet werden.

Auch Altbauten können mit all diesen Massnahmen und mit einer optimierten Wärmepumpenanlage mit Erdwärmesonden zu einem Null-Wärmeenergie-Haus werden, falls der Strombedarf für die Wärmepumpenanlage mit einer PV-Anlage auf dem Dach selbst erzeugt wird. Bei kleinen Gebäuden sollte dies in der Regel möglich sein. Und auch hier sollte für die Regeneration des Bodens geprüft werden, ob nicht Hybridkollektoren möglich sind.

8 Diskussion der Erkenntnisse

Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes zeigen klar auf, dass entgegen oft feststellbarer Meinung auch bei Erdwärmesonden noch Forschungsbedarf besteht. Umgekehrt kann mit heute bekannten Techniken eine deutliche Verbesserung von Anlagen mit Erdwärmesonden erreicht werden. Diese Art der Wärmeerzeugung kann dann den grössten Teil der benötigten Wärme aus der Umgebung gewinnen und funktioniert mit hoher Effizienz auch bei kalten Aussentemperaturen. Sie sollte deshalb wo immer gefördert werden, da damit ein wesentlicher Beitrag zu den beiden Hauptzielen der Energiewende geleistet werden kann.

Der Qualitätssicherung von Erdwärmesonden, um nicht Risiken für das Grundwasser zu schaffen, ist grösste Beachtung zu schenken. Hier sind Bauherren, Planer, Unternehmer wie auch Behörden gefordert. Dies betrifft insbesondere die Hinterfüllung der Bohrungen, wo besseres Material erforderlich ist. In diesem Projekt konnte leider keine Technologie zur Messung der Qualität der Hinterfüllung entwickelt werden. Dies wäre dringend notwendig. Ansätze dazu bestehen schon, und aus jetziger Sicht scheint ein Test auf Basis der Messung der Abbindewärme der Hinterfüllung eine erfolgsversprechende Möglichkeit zu sein. Über ein entlang einem Sondenrohr, z.B. dem Contraktorrohr, eingebautes Glasfaserkabel kann mit einer mobilen Messeinrichtung ein Temperaturlog über die Sondentiefe während dem Abbinden des Hinterfüllmörtels erstellt werden. Aufgrund neuer Erkenntnisse muss aber davon ausgegangen werden, dass auch kleinere Fehlstellen entstehen können, welche mit dieser Methode nicht gemessen werden können. Auch hier ist weitere Forschung nötig, um eine klare Kenntnis der Probleme bei der Hinterfüllung zu erhalten und gezielt Verbesserungsmaßnahmen entwickeln zu können.

Eines der wesentlichsten Erkenntnisse aus diesem Projekt, die nun auch von anderen Fachleuten geteilt wird, ist die Tatsache, dass die Erdwärme keine regenerative Energie darstellt, sondern es sich primär um gespeicherte Wärme handelt, ausser es seien nur wenige einzelne Erdwärmesonden vorhanden. Um die zukünftig anvisierte Anzahl Gebäude mit Erdwärme beheizen zu können, muss in Zukunft wohl an sehr vielen Orten der Boden wieder regeneriert werden. Dies stellt eine grosse Herausforderung dar, da die Notwendigkeit einer Regeneration die Anlagen mit Erdwärmesonden teurer und komplizierter machen kann. Deren Konkurrenzfähigkeit gegenüber den Luft-Wasser-Wärmepumpen wird damit schlechter, was die Tendenz zu weniger Anlagen mit Erdwärmesonden verstärken könnte. Auch die Verkäufe von Wärmepumpen stagnieren resp. sind sogar leicht rückläufig seit 2008(siehe dazu die Statistiken der FWS⁹). Umgekehrt könnte dies auch als Chance begriffen werden. Die Erdwärmesonden bieten auch die Möglichkeit zu kühlen, seien es Räume, Server etc. oder seien es Photovoltaik-Module, die als Hybridmodule gekühlt werden können und damit mehr Strom liefern. Die Kühlung bedeutet aber automatisch eine Regeneration des Bodens, den diese abgeführte Wärme zugeführt wird. Damit kann in Zeiten der Klimaerwärmung und der immer besseren Wärmedämmung der Gebäude mit Erdwärmesonden der zunehmende Bedarf an Kühlung äusserst effizient und nachhaltig abgedeckt werden. Auch hier ist weitere Entwicklungsarbeit notwendig, um optimierte, einfache und kosteneffiziente Lösungen zu entwickeln.

Die heute vorliegende Fassung der SIA 384/6 sollte überarbeitet werden, da nicht alle Erkenntnisse dieses Forschungsprojektes eingeflossen sind. Aufgrund der Interviews wurde klar, dass auch der Drucktest neu definiert werden muss, da die heutige Variante nicht befriedigt und eine zusätzliches Risiko darstellen kann.

Ein ebenfalls wohl recht aufsehenerregendes Resultat ist, dass sich eine Kombination einer Wärmepumpe mit thermischen (konventionellen) Solarkollektoren nicht lohnt, weder wirtschaftlich noch ökologisch. Diese Lösung wird bis heute oft angeboten und wohl auch verkauft. Dies zeigt, dass eine Bereitschaft der Kunden für Mehrinvestitionen in optimierte Anlagen vorhanden ist. Nur wäre der Effekt wesentlich besser, würde dieses Geld in optimierte Erdwärmesonden und PV-Anlagen investiert. Mit einer Kombination einer Wärmepumpe mit Photovoltaik kann ohne höhere Jahreskosten ein Null-Wärmeenergiehaus erreicht werden, was das Ziel für die Zukunft sein muss.

⁹ <http://www.fws.ch/statistiken.html#statistik-2013>

9 Ausblick

9.1 Offene Fragen und Forschungsbedarf

Aufgrund des Projektes zeigen sich verschiedene Möglichkeiten, die Erdwärmesonden zu optimieren. Hier sehen wir folgende Hauptfragen:

- Wie kann die Umsetzung dieser Erkenntnisse in der Praxis beschleunigt werden?
- Wie kann der Konflikt zwischen besseren, effizienteren Anlagen und höheren Investitionen gelöst werden? Hier sind insbesondere Investoren und Generalunternehmer zu nennen, welche oft nach dem Motto der geringsten Investitionen ihre Projekte realisieren.
- Ab welchen Bedingungen müssen Erdwärmesonden regeneriert werden?
- Wie kann eine einfache und doch korrekte Berechnung der notwendigen Länge der Erdwärmesonden erfolgen?
- Wie kann eine einfache Qualitätskontrolle der Hinterfüllung erfolgen?
- Wie sollte eine optimale gesetzliche Regelung der Nutzung des Untergrundes, und speziell der untiefen Geothermie, aussehen?
- Wie kann der COP der Wärmepumpen weiter gesteigert werden: Kältemittel, variable Kompressoren, Steuerung der Expansion, Dimensionierung der Wärmetauscher?
- Welche natürlichen Kältemittel für Wärmepumpen können genutzt werden (Propan, Ammoniak, ISO-Buthan)?
- Wie kann eine Legionellengefahr sicher eliminiert werden ohne Temperaturen über 60 °C im Warmwasser? (Nachweis der Legionellenfreiheit bei kleinen Systemen ohne Warmwasserspeicher)

9.2 nächste Schritte nach Projektabschluss

Die Schweizerische Vereinigung für Geothermie hat sich gegen Ende 2014 entschlossen, ein Ressort untiefe Geothermie ins Leben zu rufen. Es soll sich eine Gruppe dieses Ressorts mit den Chancen, Risiken und offenen Fragen in Bezug auf die untiefe Geothermie befassen. Es ist zu hoffen, dass hier einige Fortschritte erzielt werden können.

Die SIA 384/6 [14] sollte revidiert werden. Es sollten die Erkenntnisse betr. Hinterfüllung und gegenseitiger Beeinflussung der Erdwärmesonden resp. der Notwendigkeit einer Regeneration einfließen. Dazu ist weitere Forschung in zwei Richtungen notwendig: wie kann einfach festgestellt werden, ob es eine Regeneration braucht? Wie kann diese effizient und günstig erfolgen?

Die Endkunden sollten motiviert werden, nicht eine Wärmepumpe, sondern eine optimierte Wärmepumpe mit möglichst hoher Jahresarbeitszahl zu bestellen resp. beim Kauf eines Hauses dies zu berücksichtigen. Damit würden auch die Generalunternehmer und Projektentwickler eher solche Lösungen anbieten. Dazu müssten die Endkunden aber informiert werden, dass eine Wärmepumpe nicht per se gut ist, sondern dass es deutliche Unterschiede in der Effizienz (der Jahresarbeitszahl) und beim maximalen elektrischen Leistungsbedarf einer Wärmepumpe gibt.

Die Planer müssten entsprechend ausgebildet werden. Sie sind vor allem in der Pflicht, das Gesamtsystem zu optimieren. Hier sollten Vorurteile gegen eine Deckenheizung abgebaut werden, die Vorteile einer Kühlung bewusst werden und der Umgang mit Solarenergie muss jedem Planer geläufig sein. Neubauten sollten mit dem Ziel geplant werden, in der Bilanz ein Null-Wärmeenergiehaus zu werden. Bezüglich Hydraulik müssten Lösungen geplant werden, wo es keine Mischventile braucht und die Wärmepumpe immer mit tiefst möglicher Vorlauftemperatur betrieben werden kann.

Hierzu müssten die „STASCH-Standradlösungen“ [57] überarbeitet werden. Dies gilt auch in Bezug auf die Warmwasser-Erwärmung, wo Lösungen ohne die Speicherung von Warmwasser erarbeitet werden müssen. Und nicht zuletzt müssen Standardschaltungen ohne thermischen Speicher für die Heizung aufgezeigt werden.

Die Unternehmer der Erdsonden-Branche sollten weiter auf hohe Qualität setzen und diese mit guten Argumenten den Kunden anbieten, statt sich einen ruinösen Preiskampf zu liefern. Sie sollten sich laufend weiter bilden, die Optimierungspotentiale und das Gesamtsystem gut verstehen, um ihre Kunden gut beraten zu können. Der Einsatz von frostbeständigem Hinterfüllmaterial mit guter thermischer Leitfähigkeit sollte selbstverständlich werden.

Die Hersteller von Wärmepumpen sollten Maschinen mit hohem COP und optimal ausgelegten Verdampfern liefern. Diese Wärmepumpen sollten mit reinem Wasser im Sondenkreislauf umgehen können. Das heisst es braucht eine Abschaltung des Kompressors, wenn die Temperatur in Verdampfer zu tief wird, und eine Überwachung des Durchflusses. Nach Ausschalten des Kompressors muss die Umwälzpumpe des Sondenkreises einige Zeit weiter laufen, um dem Verdampfer noch Wärme zu liefern. Um mit unterschiedlichen Vorlauftemperaturen für Heizung und Warmwasser umgehen zu können, sollte das Expansionsventil elektronisch gesteuert sein. Jede Wärmepumpe müsste zudem mit einem Wärmezähler und einem Stromzähler ausgerüstet werden, und die Jahresarbeitszahl berechnen und anzeigen können. Anlagekombinationen einer Wärmepumpe mit konventionellen thermischen Solarkollektoren sollten nicht mehr angeboten werden. Viel besser wäre eine Kombination mit Photovoltaik, hier in Zukunft mit Hybrid-Kollektoren zur Regeneration der Erdwärmesonde im Sommer.

Die Warmwasser-Erwärmung müsste auf eine Erwärmung im Durchlaufprinzip oder mit einer Frischwasserstation erfolgen. Die unnötige Speicherung von Warmwasser (einem Lebensmittel!) sollte ein Ende finden, was hygienische Risiken wesentlich reduzieren würde.

Die Behörden sollten die Bewilligung der Erdwärmesonden nicht zu restriktiv handhaben, aber um das Grundwasser zu schützen und weitere Risiken zu vermeiden fallweise Auflagen wie Tiefe, Sondenfluid und Anforderungen an die Regeneration formulieren. Einer korrekten Hinterfüllung mit frostbeständigem Material ist Beachtung zu schenken. Sporadisch muss eine Kontrolle auf der Baustelle erfolgen. Die Bewilligungsformulare müssten schweizweit vereinheitlicht werden, mit einer elektronischen Eingabehilfe, welche auch gleichzeitig eine automatisierte Kontrolle der korrekten Planung und Auslegung ermöglichen würde.

Die Geologischen Verhältnisse in den mit Erdwärmesonden nutzbaren Schichten müssten frei auf dem GIS der Kantone zu finden sein. Auch hier ist eine schweizweite Vereinheitlichung des Datenmodells und der Art der Angaben notwendig.

Und nicht zuletzt sollten weitere Feldmessungen der Jahresarbeitszahlen erfolgen (analog der Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen 1996 – 2003 FAWA [58]). Zusätzlich zu den bisherigen Analysen sollten die Eigenschaften der Analgen, welche einen Einfluss auf die Jahresarbeitszahl haben können, erfasst werden, um deren Einfluss in der Praxis empirisch nachweisen zu können.

10 Literaturverzeichnis

- [1] BFE, „Elektrizitätsstatistik 2013,“ Bundesamt für Energie, Bern, 2013.
- [2] FWS, „Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.fws.ch/waermepumpen-und-strom.html>. [Zugriff am 17 06 2014].
- [3] R. Phillips, „Positionnement actuel et futur de la pompe à chaleur dans la stratégie énergétique,“ in *News aus der Wärmepumpen-Forschung*, Burgdorf, 2009.
- [4] FWS, „Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS,“ 2013. [Online]. Available: <http://www.fws.ch/statistiken.html>. [Zugriff am 20 12 2014].
- [5] A. Milelli, „Wärmepumpe: Worauf es ankommt,“ 2012. [Online]. Available: <http://www.fws.ch/news/items/waermepumpe-worauf-es-ankommt.html>. [Zugriff am 16 06 2014].
- [6] BFE, „Energiestrategie 2050: Erstes Massnahmenpaket,“ Bundesamt für Energie, Bern, 2012.
- [7] A. Kemmler und et.al., „Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2012 nach Verwendungszwecken,“ Bundesamt für Energie, Bern, 2013.
- [8] BAFU, „Bundesamt für Umwelt,“ Klimapolitik der Schweiz ab 2013, 2014. [Online]. Available: <http://www.bafu.admin.ch/klima/12325/index.html?lang=de>. [Zugriff am 20 12 2014].
- [9] R. Phillips und et.al., „Wärmepumpen, häufig gestellte Fragen,“ Bundesamt für Energie, Bern, 2010.
- [10] R. Wagner und T. Weisskopf, „Erdsondenpotential in der Stadt Zürich,“ Stadt Zürich, Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik, 2014.
- [11] A. Huber, „Einfluss der Sonden hinterfüllung,“ Huber Energietechnik AG, im Auftrag BFE, Zürich, 2010.
- [12] M. Hubbuch, „Mit zwei Zentimeter Wärmedämmung hin zum Null-Heizenergiehaus,“ *HK-Gebäudetechnik*, Nr. 3, pp. 76 - 79, 2014.
- [13] BAFU, „Wärmenutzung aus Boden und Untergrund. Vollzugshilfen für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmennutzung,“ Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, 2009.
- [14] S. 384/6, „Erdwärmesonden,“ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2010.
- [15] Clariant, „Product Sheet, HEAT TRANSFER FLUIDS, ANTIFROGEN® N,“ 2014. [Online]. Available: [http://www.clariant.de/C12575E4001FB2B8/vwLookupDownloads/2010_HeatTransferFluids_Newsroom_TechnicalLeaflets_AntifrogenN_d.pdf/\\$FILE/2010_HeatTransferFluids_Newsroom_TechnicalLeaflets_AntifrogenN_d.pdf](http://www.clariant.de/C12575E4001FB2B8/vwLookupDownloads/2010_HeatTransferFluids_Newsroom_TechnicalLeaflets_AntifrogenN_d.pdf/$FILE/2010_HeatTransferFluids_Newsroom_TechnicalLeaflets_AntifrogenN_d.pdf). [Zugriff am 09 12 2014].
- [16] W. Eugster, „Erdwärmesonden, Funktionsweise und Wechselwirkung mit dem geologischen Untergrund,“ ETH, Zürich, 1991.

- [17] A. Huber und P. Daniel, „Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie?“, Bundesamt für Energie, Bern, 1999.
- [18] P. Bayer, M. de Paly und M. Beck, „Strategic optimization of borehole heat exchanger field for seasonal geothermal heating and cooling,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914009763>. [Zugriff am 15 12 2014].
- [19] F. J. Zapp und e. al., „Mit Regeneration wird die Nutzung der oberflächennahen Geothermie effizienter,“ in *Der Geothermiekongress 2009*, Bochum, 2009.
- [20] D. Pahud und et.al., „Langzeiteffekt von Mehrfach-Erdwärmesonden,“ Bundesamt für Energie, Bern, 2002.
- [21] D. Pahud und M. Belliardi, „Geocooling Handbook, Cooling of Buildings using Vertical Borehole Heat Exchangers,“ in *Bundesamt für Energie*, Bern, 2011.
- [22] V. J. Herrmann, „Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Hinterfüllung von Geothermie-Bohrungen mit Erdwärmesonden,“ Dissertation an der TH Karlsruhe, Karlsruhe, 2008.
- [23] Arbeitskreis Qualitätsmanagement Geothermie, „Fehlervermeidung bei Wärmepumpen mit Erdsonden-Heizsystemen,“ Umweltministerium und Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart, 2009.
- [24] H. Berger, „Erdwärmesonden – Hauptprobleme durch fehlerhafte Planung und Erstellung,“ in *Deutsche Brunnenbauertage 2009*, Peine / Braunschweig, 2009.
- [25] R. Niederbrucker und N. Steinbacher, „Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden,“ Amt der Oö. Landesregierung, Linz, 2007.
- [26] L. Müller, „Frost - Tau – Widerstand von Verfüllbaustoffen für Erdwärmesonden,“ in *Der Geothermiekongress 2009*, Bochum, 2009.
- [27] E. Rohner und L. S. M. Rybach, „Lebensdauer von Erdwärmesonden in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung,“ Bundesamt für Energie, Bern, 2001.
- [28] S. Bassetti, E. Rohner, S. Signorelli und B. Matthey, „Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden,“ Bundesamt für Energie, Bern, 2006.
- [29] V. J. Herrmann, „Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Hinterfüllung von Geothermie-Bohrungen mit Erdwärmesonden,“ Dissertation Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2008.
- [30] H. Berger, „Erdwärmesonden – Hauptprobleme durch fehlerhafte Planung und Erstellung,“ in *Deutsche Brunnenbauertage 2009*, Peine / Braunschweig, 2009.
- [31] H.-P. Ebert und et.al, „Optimierung von Erdwärmesonden,“ Bayrisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V., Garching, 2000.
- [32] M. Riegger und e. al., „EWSPLUS, Untersuchung zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden,“ Steinbeis Forschungsinstitut für thermische Energiesysteme, Stuttgart, 2013.

- [33] R. M. Wagner, „Technologie und Potential von Phasenwechselsonden für tiefe Bohrungen - ein Ausblick zur Entwicklung,“ in *Der Geothermiekongress 2009*, Bochum, 2009.
- [34] A. Peterlunger, M. Ehrbar, S. Bassetti und et.al., „Pumpenlose Erdwärmesonde Phase 1: Potentialabklärung, Machbarkeitsstudie,“ Bundesamt für Energie, Bern, 2004.
- [35] H. Holinger-Bikle, „www.wattwerk.ch,“ 2004. [Online]. Available: www.wattwerk.ch. [Zugriff am 13 11 2014].
- [36] A. Grüniger und B. Wellig, „CO₂-Erdwärmesonde,“ Bundesamt für Energie, Bern, 2009.
- [37] R. Wagner, T. Weisskppf und et.al., „Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich,“ Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik, Zürich, 2014.
- [38] Haka Gerodur, „Flyer Erdwärmesondensystem,“ 2011. [Online]. Available: http://www.hakagerodur.ch/front_content.php?idcat=42. [Zugriff am 10 12 2014].
- [39] H. Gerodur, „Preisliste GEROtherm® Erdwärmesondensystem,“ 2013. [Online]. Available: http://www.hakagerodur.ch/front_content.php?idcat=42. [Zugriff am 10 12 2014].
- [40] Rehau, „Prospekt Tiefensonde,“ 2012. [Online]. Available: <http://www.rehau.com/ch-de/bau/erneuerbare-energien/geothermie/raugeo-hochdruck-tiefensonde#tab5>. [Zugriff am 14 12 2014].
- [41] A. Huber, „Forschungsprojekt Erdsondenoptimierung: Einfluss der Sonden hinterfüllung,“ Huber Energietechnik AG, Zürich, 2010.
- [42] T. Loga, Grossklos und F. W. Marc, „Ein Jahr in der „Gartenhofsiedlung Lummerlund“ - Messergebnisse aus 22 Passivhäusern in Wiesbaden,“ in *4. Passivhaustagung*, Kassel, 2000.
- [43] J. Suter, 2014. [Online]. Available: <http://www.awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/wasserwirtschaft/grundwasser/bewilligung/erdsonden.html>. [Zugriff am 15 12 2014].
- [44] K. Bucher und I. Stober, *Geothermie*, Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2014.
- [45] U. Paderborn, „Azeotrope, Nichtideale Mischungen,“ Skript Universität Paderborn, Paderborn, o.D..
- [46] „Stoffwerte Sondenfluide,“ ZHAW Institut für Facility Management, 2011.
- [47] A. Huber, *Erdwärmesonden für Direktheizung*, Huber Energietechnik AG, 2005.
- [48] A. Huber und M. Ochs, *Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen mit der Software "EWSDruck" Vers. 2.0*, Huber Energietechnik, 2007.
- [49] B. Glück, *Wärmeübertragung: Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren*, 2. Auflage, Berlin: Verlag für Bauwesen, 1990.
- [50] A. Huber, *Planung von gekoppelten Kälte- und Wärmeerzeugungsanlagen mit Erdwärmesonden*, Weiterbildungskurs an der HTA Luzern, 2008.

- [51] S. 380/1, „Thermische Energie im Gebäude,“ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2009.
- [52] KBOB, Eco-Bau und IPB, „Ökobilanzen im Baubereich,“ Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren KBOB, Bern, 2009.
- [53] D. Rufer und A. Braunschweig, „Ökobilanzen von Solarstrom,“ E2 Management Consulting AG, Zürich, 2013.
- [54] A. Genkinger, „Sonnenkollektoren in Verbindung mit Wärmepumpen,“ FHNW Institut für Energie am Bau, Muttenz, 2012.
- [55] R. von Euw, Z. Alimpic und K. Hildebrand, Gebäudetechnik, Zürich und Muttenz: Faktor Verlag und FHNW, Institut Energie am Bau, 2012.
- [56] EnergieSchweiz, „Merkblatt Dimensionierung von Wärmepumpen,“ Bundesamt für Energie, Bern, 2001.
- [57] T. Afjei und et.al., „Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen, Teil 1: STASCH-Planungshilfen,“ Bundesamt für Energie, Bern, 2002.
- [58] M. Erb, P. Hubacher und M. Ehrbar, „Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen,“ Bundesamt für Energie, Bern, 2004.

11 Anhang

11.1 Anhang A1: Literaturliste für die Erstellung der Stoffdaten-Diagramme Sondenfluide

Werte für reines Wasser:

http://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung_Chemie/_Stoffdaten_Wasser#Drucktabellen

Werte für Wasser/Ethylenglykol N:

Berechnet mit Programm von Clariant, <https://www.clariant.com/en/Solutions/Business-Units/Industrial-and-Consumer-Specialties/Heat-Transfer-Fluids/Calculator>

Werte für Glykosol N 20 %:

Datenblatt der Firma Pro Kühlsole GmbH, Düren: <http://www.prokuehsole.de/de/products/glykosol-n>

Werte für Zitrec M -5 (Fragol®):

Datenblatt der Firma FRAGOL GmbH+Co. KG, Mülheim an der Ruhr

Werte für Wasser/Ethanol:

Melinder, Å. (2007). *Thermophysical Properties of Aqueous Solutions Used as Secondary Working Fluids [Doctoral Thesis]*. Stockholm: The Royal Institute of Technology KTH

VDI Wärmeatlas Dd19 - VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1991, 10. Auflage 2006

Peng 08 JDispSciTechn viscosities water alcohol

Huque 04 PhysChemLiqu dens excess vol water ethanol

Huque 05 PhysChemLiqu excess viscos water ethanol

Maximino 09 PhysChemLiqu surf tens dens water alcohol

Diez 04 PhysChemLiqu rheo thermo anal water ethanol

Belda 06 JSolutionChem densities water alcohols

www.engineeringtoolbox.com, 2.2.2010, "Ethanol Freeze Protected Water Solutions"

Perry`s Chemical Engineers Handbook, 6th Edition, 1984, Table 3-110 (pg.3-89), Perry, Robert H.

Broadwater 76 JSolutionChem viscos water EtOH

International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology (1st Electronic Edition); Edited by: Washburn, E.W. 1926 - 1930; 2003 Knovel

Yilmaz 02 JTurkPhys excess props water EtOH

Kiyohara 80 JSolutionChem heat capac water ethanol

Belda 04 JSolutionChem viscous synergy water alcohol

Vidal 93 JChemEngData water EtOH octanol

Privalov 89 JSolutionChem heat capac water EtOH

Lange`s Handbook of Chemistry

<http://www.engineeringtoolbox.com/>

Privalov 89 JSolutionChem heat capac water EtOH

International Critical Tables of Numerical Data

11.2 Anhang A2: Werte und Diagramme der Stoffdaten

Gefrierpunkt

Tabelle 8: Gefrierpunkte der Fluide

Temperatur	Gefrierpunkt
Wasser (rein)	0 °C
Wasser/Ethanol 10 Vol. %	-3,7 °C
Wasser/Ethanol 12 Vol. %	-4,5 °C
Wasser/Ethanol 20 Vol. %	-8,4 °C
Wasser/Ethylenglykol N 20 Vol. %	-11 °C
Wasser/Ethylenglykol N 25 Vol. %	-14 °C
Wasser/Ethylenglykol N 30 Vol. %	-17 °C
Zitrec M -5 (Fragol [®])	-5 °C
Glykosol N 20 % (pro Kühlsole)	-8 °C

Dynamische Viskosität η in $\text{mPa} \cdot \text{s} = 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$

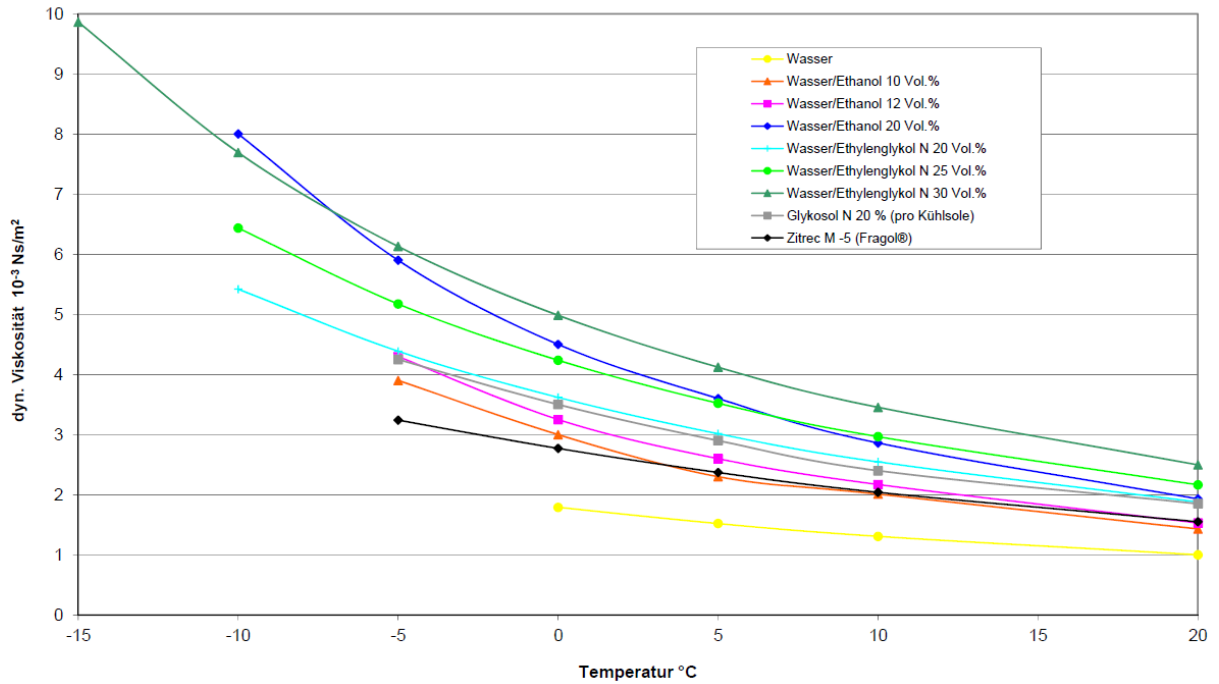


Abbildung 61: Dynamische Viskosität η der Fluide

Dichte ρ in $10^3 \text{ kg}/\text{m}^3 = \text{g}/\text{cm}^3$

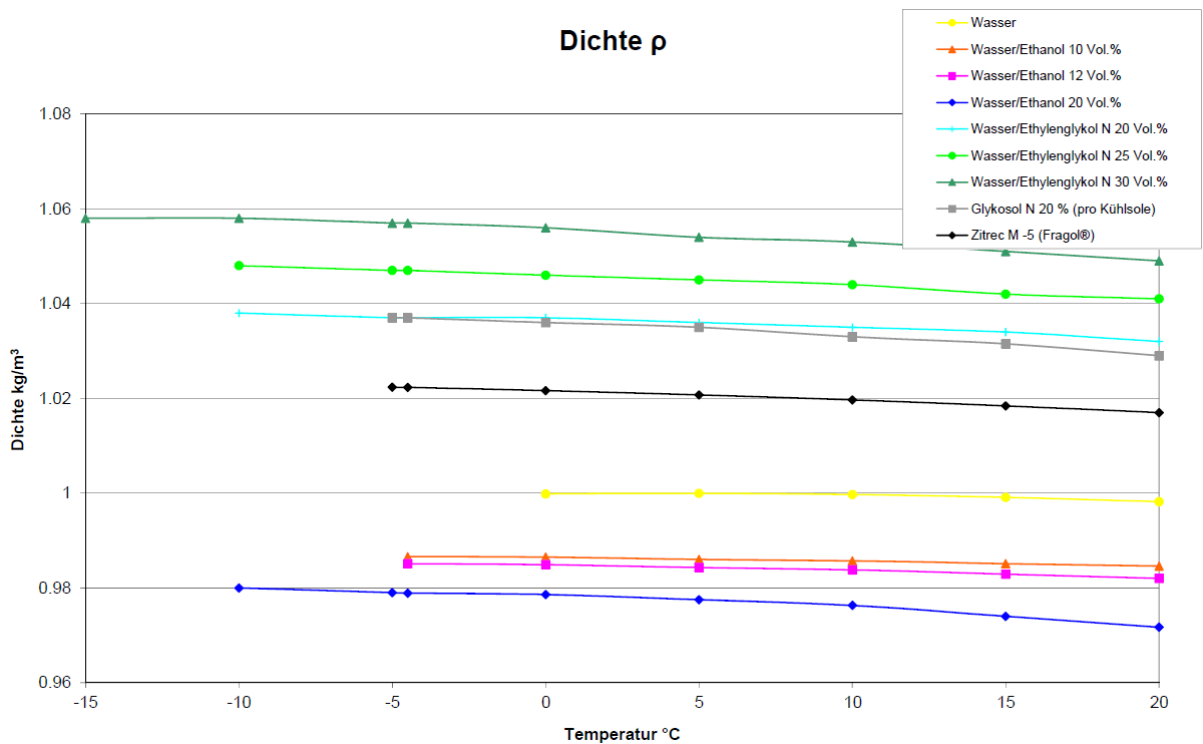


Abbildung 62: Dichte ρ der Fluide

Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m·K)

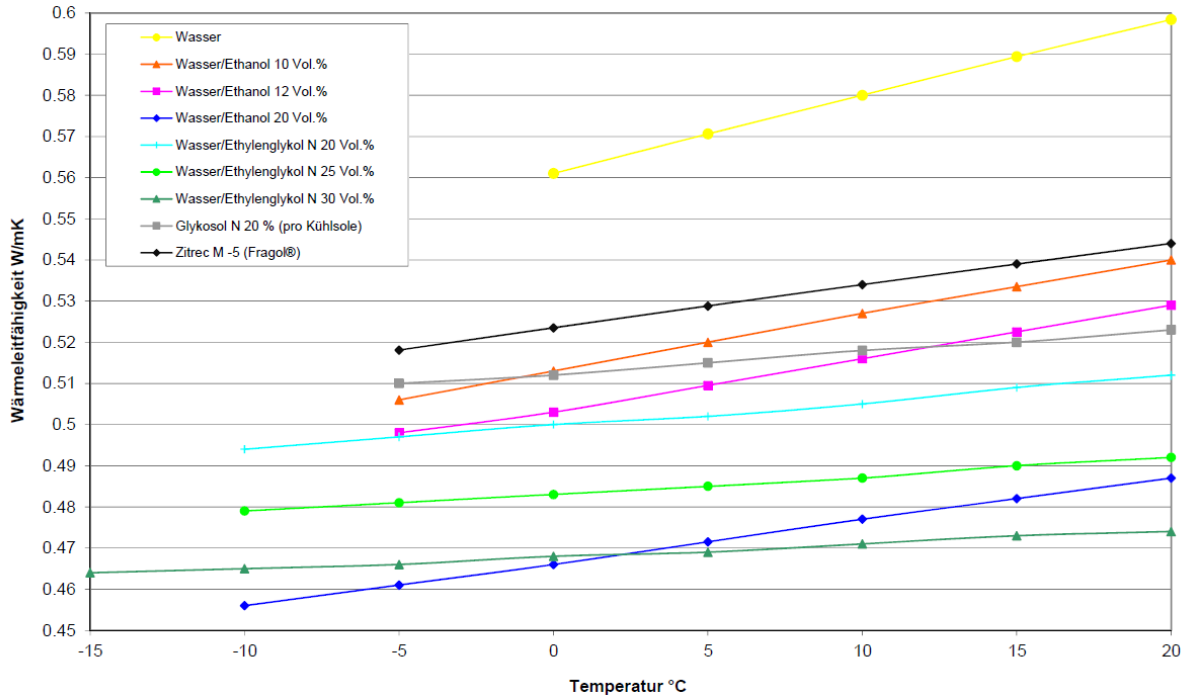


Abbildung 63: Wärmeleitfähigkeit λ der Fluide

Spezifische Wärme c in kJ/(kg · K)

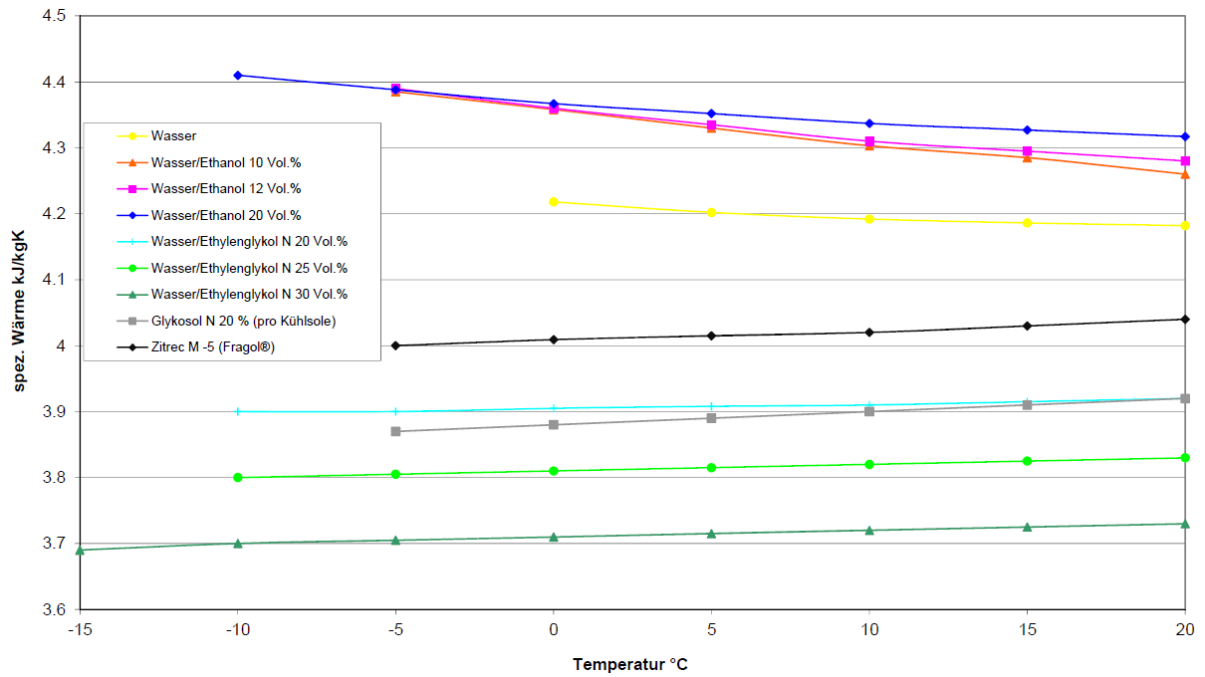


Abbildung 64: Spezifische Wärme c der Fluide

11.3 Anhang A3: Checkliste für Neubauten

Für Laien wurde eine Checkliste für Wärmepumpenanlage Neubau entwickelt, welche nachfolgend wiedergegeben wird. Sie ist auf der Website www.erdsondenoptimierung.ch als pdf-Datei herunterladbar.

Vorabklärungen:

Ist mein Haus gut wärmegeklämt? Bei Neubauten sollte die Dicke der Isolation ca. 20 bis 30 cm betragen (U-Werte unter $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$), der U-Wert der Fenster sollte unter 1 W/m^2 liegen. Prinzipiell sollte man zuerst in die Wärmedämmung investieren, und erst wenn der Wärmebedarf minimiert ist eine dafür geeignete Wärmezeugung auswählen.

Habe ich ein Wärmeabgabesystem mit tiefer Vorlauftemperatur? Boden- oder Deckenheizung sind zu empfehlen, um eine gute Effizienz der Wärmepumpe sicherzustellen (Vorlauf-temperatur unter $35 \text{ }^\circ\text{C}$). Hier ist ein technischer Speicher unnötig und verschlechtert die Effizienz. Auch mit gross dimensionierten Heizkörpern kann eine möglichst tiefe Vorlauftemperatur (unter $45 \text{ }^\circ\text{C}$) erreicht werden. Auch bei Heizkörperheizungen sollte ein technischer Speicher vermieden werden.

Welche Wärmequelle ist nutzbar? Grundwasser und Erdwärmesonden sind vorzuziehen, wenn diese am Standort bewilligungsfähig sind (\rightarrow Erdwärmesondenkarten der Kantone). Aussenluft ist weniger effizient und sollte immer die letzte Wahl sein. Bei Aussenluft als Wärmequelle ist auch eine bivalente Anlage sinnvoll, d.h. eine Anlage bei welcher in kalten Tagen mit einem zusätzlichen System (ideal ein Holzofen) nachgeholfen wird.

Will ich auch kühlen? Wenn Erdwärmesonden erstellt werden oder Grundwasser zur Verfügung steht, kann damit auch gekühlt werden. Um zu kühlen eignet sich am besten eine Deckenheizung. Bei der heutigen Bauweise führt diese zu keinen Komfortproblemen.

Gibt es schon andere Erdwärmesonden in der Nachbarschaft? Wenn mehrere Erdwärmesonden im Abstand von weniger als 25 m bestehen, kann auf die Dauer der Boden auskühlen. In solchen Fällen ist es sinnvoll, eine Regeneration der Erdwärmesonden mindestens planerisch vorzusehen. Bei Erdwärmesonden, die näher als 15 m liegen, muss dies bei der Dimensionierung berücksichtigt werden, und ist längerfristig eine Regeneration eventuell notwendig. (In den meisten Kantonen kann dies via GIS festgestellt werden.)

Welche Heizleistung benötigt die Anlage? Diese muss der Architekt berechnen lassen, im Normalfall von einem Bauphysiker, ev. vom Heizungsplaner. Die Heizleistung ist entscheidend für die korrekte Dimensionierung der Anlage: Eine zu kleine Wärmepumpe heisst Frieren im Winter, eine zu grosse Wärmepumpe heisst Mehrkosten und einen höheren Stromverbrauch. Am besten entnimmt man die erforderliche Leistung der Wärmebedarfsberechnung nach SIA 380/1, welche für die Baufreigabe in den meisten Fällen ohnehin erforderlich ist. Neubauten brauchen um die 20 W/m^2 beheizte Bruttogeschossfläche, sehr sparsame Gebäude auch weniger.

Das Warmwasser sollte unbedingt vollständig durch die Wärmepumpe erzeugt werden, am besten im Durchlaufverfahren (z.B. eine „Frischwasser-Station“). Aus hygienischen Gründen sollte kein oder nur eine minimale Menge an Warmwasser gespeichert werden. Eine elektrische Nachwärmung sollte in jedem Fall vermieden werden.

Die Kombination einer Wärmepumpe mit einer Photovoltaik-Anlage ist ideal. Es wird in vielen Fällen in der Bilanz über ein Jahr keine zusätzliche Elektrizität für Heizung und Warmwasser benötigt. Die Kombination einer Wärmepumpe mit thermischen Kollektoren ist hingegen sehr unwirtschaftlich und auch ökologisch wesentlich unvorteilhafter.

Wärmepumpe: Planung und Ausführung

Wärmepumpenanlagen sind in der Planung und Ausführung anspruchsvoller als Gas- und Ölheizungen. Eine gute Beratung ist sehr wichtig, denn eine nicht optimale Wärmepumpenanlage kann teuer und ökologisch nachteilig werden. Vor allem bei grösseren Objekten muss deshalb ein unabhängiger Fachplaner oder Energieberater beigezogen werden. Die Auswahl der Produkte und des Unternehmers sollte nicht nur aufgrund des offerierten Preises erfolgen, sondern aufgrund der ganzen Lebenszykluskosten und der Effizienz und Qualität der Anlage.

Einige Tipps:

Mindestens drei Offerten mit jeweils gleichem Anforderungsbeschrieb durch eine Fachperson einholen lassen. Offerten durch die Fachperson beurteilen lassen, insbesondere auch die korrekte Dimensionierung der Heizleistung und der Sondenbohrung.

Für das Einholen von Offerten die wichtigsten Anforderungen zusammenstellen:

- Gewünschte Wärmequelle (Erdwärmesonden wenn immer möglich für Wasser statt Sole auslegen, dies ergibt eine höhere Leistungszahl).
- Wärmeabgabesystem und max. Vorlauftemperatur (Boden-, Deckenheizung, gross dimensionierte Radiatoren)
- Wärmeleistungsbedarf nach Berechnung.
- Energiebedarf der Warmwasserversorgung. Diese sollte wie oben erwähnt unbedingt in die Wärmepumpenanlage integriert werden.
- Effiziente Wärmepumpe fordern, die Leistungszahl (COP) muss über den Anforderungen des EHPA-Gütesiegels liegen (grösser 4,3 beim Normpunkt), je höher desto besser. Auf www.topten.ch kann man die Eigenschaften guter Wärmepumpen vergleichen.
- Für den Bau der Erdwärmesonde eine Bohrfirma mit FWS-Gütesiegel engagieren. Eine unsauber durchgeführte Bohrung gefährdet den Betrieb der ganzen Anlage.
- Thermisch gut leitfähiges (ca. 2 W/mK) und frostsicheres Hinterfüllmaterial verlangen.
- Wenn möglich eine auf reines Wasser in den Erdwärmesonden ausgelegte Anlage verlangen (30 % längere Erdwärmesonden, mit gut leitfähigem Hinterfüllmaterial)
- Eventuell EnergieSchweiz-/Minergie-Leistungsgarantie zur Offerte verlangen.

- Einfache Messinstrumente zur Anlagenkontrolle verlangen: Separater Stromzähler (ev. vom EW verlangt, ca. 500 CHF) und ein Wärmezähler (ca. 1000 CHF) stellen sicher, dass der optimale Betrieb der Anlage kontrolliert werden kann.

Auslegung:

Die korrekte Auslegung einer Wärmepumpe ist kritischer als bei Öl- oder Gasheizungen, da die Wärmepumpe viel sensibler auf Fehlplanungen reagiert. Es ist wichtig, dass die Wärmepumpe auch im tiefsten Winter eine genügend hohe Vorlauftemperatur erzeugen kann. Umgekehrt sollte sie nicht überdimensioniert sein.

Mit Anbieter und Fachperson eine Garantie für die Jahresarbeitszahl vertraglich festhalten. Diese kann man durch die eingebauten Messinstrumente kontrollieren.

Bau der Anlage (speziell auch der Bohrung), Einregulierung, Einstellungen (auch Warmwasser) durch den Unternehmer und insbesondere Abnahme durch die Fachperson überwachen lassen. Ein Abnahmeprotokoll mit Mängelliste erstellen und unterzeichnen lassen.

Sondenbohrung: Planung und Ausführung

Die Sondenbohrung durch einen Fachmann dimensionieren lassen. Anzahl, Tiefe und Abstand zwischen den Erdwärmesonden sind wesentliche Voraussetzungen für eine optimal funktionierende Anlage und natürlich für die Investitionskosten. Die optimale Tiefe einer Erdwärmesonde liegt bei etwa 200 bis 250 m.

Ist der Platzbedarf geklärt? Die Lage der erforderlichen Bohrpunkte muss im Vorfeld mit der Bohrfirma abgestimmt werden. Berücksichtigen Sie dabei auch den Platzbedarf für das Bohrgerät. Kommen Wärmekollektoren zum Einsatz, muss berücksichtigt werden, dass die erforderliche Fläche nicht überbaut werden darf.

Haben Sie alle wesentlichen Unterlagen und Pläne des Grundstücks? Damit es beim Bohren keine bösen Überraschungen gibt, ist es erforderlich, alle Bestandspläne zu besitzen bzw. die Schachtscheine bei den Medienträgern (Gas, Wasser, Abwasser und Telekommunikation) einzuholen.

Besteht ein ausreichender Versicherungsschutz? Als Bauherr können Sie sich gegen eventuelle Schäden und Haftpflichtansprüche versichern. Diese Versicherung ist verursacherunabhängig und überbrückt finanzielle Schäden bis zur Feststellung der Schuldfrage.

Liegen alle Genehmigungen vor? Das Bewilligungsverfahren ist von Kanton zu Kanton verschieden, am besten erkundigen Sie sich bei Ihrer kantonalen Behörde und/oder der Gemeinde. Die aus der behördlichen Genehmigung ersichtlichen Auflagen und Beschränkungen müssen dem ausführenden Unternehmen bekannt sein und auf der Baustelle berücksichtigt werden.

Wurde ein fachlich qualifiziertes Bohrunternehmen gewählt? Der Fachverein Wärmepumpen Schweiz (FWS) zeichnet qualifizierte Unternehmen mit dem «Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen» aus. Eine so zertifizierte Firma garantiert einen hohen Qualitätsstandard.

Werden qualitativ hochwertige Materialien eingesetzt? Dazu zählen zertifizierte Sondenrohre und hochwertiges Hinterfüllmaterial. Bedenken Sie, dass eine Erdwärmesonde eine geplante Lebensdauer von 100 Jahren hat. Eine Reparatur oder Nachrüstung ist nicht möglich. Stellen Sie daher sicher, dass Material und Verarbeitung Spitzenqualität aufweisen.

Erfolgt ein fachgerechter Einbau der Sonden? Der Einbau einer Erdwärmesonde ist ein sensibler Prozess. Deshalb muss dies fachgerecht, sorgfältig und nicht unter Zeitdruck erfolgen. Stellen Sie auch sicher, dass genügend Zeit zum Einbringen des Hinterfüllmaterials eingeplant wird. Dies ist ein relativ langsamer Prozess, der sorgfältig durchgeführt werden muss. Die Sonden müssen nach dem Einbau und nach dem Hinterfüllen einer Druck- und Durchflussprüfung unterzogen werden.

Existiert eine Dokumentation aller Arbeiten? Selbstverständlich gehören eine Dokumentation aller ausgeführten Arbeiten und die Vorlage aller notwendigen Bewilligungen, Unterlagen und Prüfergebnissen nach Abschluss der Arbeiten zu den Rechten des Bauherrn.

11.4 Anhang A4: Checkliste für Altbauten

Vorabklärungen:

Ist mein Haus gut wärmedämmt? Bei bestehenden Gebäuden sollten alle Flächen nach Möglichkeit nachisoliert werden (U-Werte unter $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ sind anzustreben), der U-Wert der Fenster sollte unter 1 W/m^2 liegen. Prinzipiell sollte man zuerst in die Wärmedämmung investieren, und erst wenn der Wärmebedarf minimiert ist eine dafür geeignete Wärmeerzeugung auswählen.

Habe ich ein Wärmeabgabesystem mit tiefer Vorlauftemperatur? Boden- oder Deckenheizung sind optimal, um eine gute Effizienz der Wärmepumpe sicherzustellen (Vorlauftemperatur unter $35 \text{ }^\circ\text{C}$). Hier ist ein technischer Speicher unnötig und verschlechtert die Effizienz. Aber auch mit gross dimensionierten Heizkörpern kann eine möglichst tiefe Vorlauftemperatur (unter $45 \text{ }^\circ\text{C}$) erreicht werden. Auch bei Heizkörperheizungen sollte ein technischer Speicher vermieden werden, der bei sanierten Gebäudehülle nicht notwendig ist.

Welche Wärmequelle ist nutzbar? Grundwasser und Erdwärmesonden sind vorzuziehen, wenn diese am Standort bewilligungsfähig sind (\rightarrow Erdwärmesondenkarten der Kantone). Abklären, wo ums Haus herum gebohrt werden kann. Zusätzlicher Platz ist erforderlich, wenn mehr als eine Bohrung notwendig wird. Unter Umständen können zwei oder mehr Bohrungen vom selben Standort aus gebohrt werden, indem eine Bohrung leicht schräg unter das Grundstück gebohrt wird, die andere gerade nach unten. Aussenluft ist weniger effizient und sollte immer die letzte Wahl sein. Bei Aussenluft als Wärmequelle ist auch eine bivalente Anlage sinnvoll, d.h. eine Anlage bei welcher in kalten Tagen mit einem zusätzlichen System (ideal ein Holzofen) nachgeholfen wird.

Will ich auch kühlen? Wenn Erdwärmesonden erstellt werden oder Grundwasser zur Verfügung steht, kann damit im Prinzip auch gekühlt werden. Um zu kühlen ist eine Flächenheizung notwendig und eignet sich eine Deckenheizung am besten. Eine solche kann auch in bestehenden Gebäuden nachgerüstet werden. Bei gut gedämmter Gebäudehülle führt diese zu keinen Komfortproblemen.

Gibt es schon andere Erdwärmesonden in der Nachbarschaft? Wenn mehrere Erdwärmesonden im Abstand von weniger als 25 m bestehen, kann auf die Dauer der Boden auskühlen. In solchen Fällen ist es sinnvoll, eine Regeneration der Erdwärmesonden mindestens planerisch vorzusehen. Bei Erdwärmesonden, die näher als 15 m liegen, muss dies bei der Dimensionierung berücksichtigt werden, und ist längerfristig eine Regeneration eventuell notwendig. (In den meisten Kantonen kann dies via GIS festgestellt werden.)

Welche Heizleistung benötigt die Anlage? Diese muss der Architekt berechnen lassen, im Normalfall von einem Bauphysiker, ev. vom Heizungsplaner. Die Heizleistung ist entscheidend für die korrekte Dimensionierung der Anlage: Eine zu kleine Wärmepumpe heisst Frieren im Winter, eine zu grosse Wärmepumpe heisst Mehrkosten und einen höheren Stromverbrauch. Am besten entnimmt man die erforderliche Leistung der Wärmebedarfsberechnung nach SIA 380/1, welche für eine Baufreigabe einer grösseren Sanierung manchmal erforderlich ist. Für ein bestehendes Gebäude ist auch der

bisherige Heizungsbedarf eine gute Schätzung, allerdings darf man dann den Einfluss einer eventuellen Nachisolierung nicht vergessen.

Das Warmwasser sollte unbedingt vollständig durch die Wärmepumpe erzeugt werden, am besten im Durchlaufverfahren (z.B. eine „Frischwasser-Station“). Aus hygienischen Gründen sollte kein oder nur eine minimale Menge an Warmwasser gespeichert werden. Eine elektrische Nachwärmung sollte in jedem Fall vermieden werden.

Die Kombination einer Wärmepumpe mit einer Photovoltaik-Anlage ist ideal. Es wird in vielen Fällen in der Bilanz über ein Jahr keine zusätzliche Elektrizität für Heizung und Warmwasser benötigt. Die Kombination einer Wärmepumpe mit thermischen Kollektoren ist hingegen sehr unwirtschaftlich und auch ökologisch wesentlich unvorteilhafter.

Wärmepumpe: Planung und Ausführung

Wärmepumpenanlagen sind in der Planung und Ausführung anspruchsvoller als Gas- und Ölheizungen. Eine gute Beratung ist sehr wichtig, denn eine nicht optimale Wärmepumpenanlage kann teuer und ökologisch nachteilig werden. Vor allem bei grösseren Objekten muss deshalb ein unabhängiger Fachplaner oder Energieberater beigezogen werden. Die Auswahl der Produkte und des Unternehmers sollte nicht nur aufgrund des offerierten Preises erfolgen, sondern aufgrund der ganzen Lebenszykluskosten und der Effizienz und Qualität der Anlage.

Einige Tipps:

Mindestens drei Offerten mit jeweils gleichem Anforderungsbeschrieb durch eine Fachperson einholen lassen. Offerten durch die Fachperson beurteilen lassen, insbesondere auch die korrekte Dimensionierung der Heizleistung und der Sondenbohrung.

Für das Einholen von Offerten die wichtigsten Anforderungen zusammenstellen:

- Gewünschte Wärmequelle (Erdwärmesonden wenn immer möglich für reines Wasser statt Sole auslegen, dies ergibt eine höhere Leistungszahl).
- Wärmeabgabesystem und max. Vorlauftemperatur (Boden-, Deckenheizung, gross dimensionierte Radiatoren)
- Wärmeleistungsbedarf nach Berechnung.
- Energiebedarf der Warmwasserversorgung. Diese sollte wie oben erwähnt unbedingt in die Wärmepumpenanlage integriert werden.
- Effiziente Wärmepumpe fordern, die Leistungszahl (COP) muss über den Anforderungen des EHPA-Gütesiegels liegen (grösser 4,3 beim Normpunkt), je höher desto besser. Auf www.topten.ch kann man die Eigenschaften guter Wärmepumpen vergleichen.
- Für den Bau der Erdwärmesonde eine Bohrfirma mit FWS-Gütesiegel engagieren. Eine unsauber durchgeführte Bohrung gefährdet den Betrieb der ganzen Anlage.
- Thermisch gut leitfähiges (ca. 2 W/mK) und frostsicheres Hinterfüllmaterial verlangen.

- Wenn möglich eine auf reines Wasser in den Erdwärmesonden ausgelegte Anlage verlangen (30 % längere Erdwärmesonden, mit gut leitfähigem Hinterfüllmaterial)
- Eventuell EnergieSchweiz-/Minergie-Leistungsgarantie zur Offerte verlangen.
- Einfache Messinstrumente zur Anlagenkontrolle verlangen: Separater Stromzähler (ev. vom EW verlangt, ca. 500 CHF) und ein Wärmezähler (ca. 1000 CHF) stellen sicher, dass der optimale Betrieb der Anlage kontrolliert werden kann.

Auslegung:

Die korrekte Auslegung einer Wärmepumpe ist kritischer als bei Öl- oder Gasheizungen, da die Wärmepumpe viel sensibler auf Fehlplanungen reagiert. Es ist wichtig, dass die Wärmepumpe auch im tiefsten Winter eine genügend hohe Vorlauftemperatur erzeugen kann. Umgekehrt sollte sie nicht überdimensioniert sein.

Mit Anbieter und Fachperson eine Garantie für die Jahresarbeitszahl vertraglich festhalten. Diese kann man durch die eingebauten Messinstrumente kontrollieren.

Bau der Anlage (speziell auch der Bohrung), Einregulierung, Einstellungen (auch Warmwasser) durch den Unternehmer und insbesondere Abnahme durch die Fachperson überwachen lassen. Ein Abnahmeprotokoll mit Mängelliste erstellen und unterzeichnen lassen.

Sondenbohrung: Planung und Ausführung

Die Sondenbohrung durch einen Fachmann dimensionieren lassen. Anzahl, Tiefe und Abstand zwischen den Erdwärmesonden sind wesentliche Voraussetzungen für eine optimal funktionierende Anlage und natürlich für die Investitionskosten. Die optimale Tiefe einer Erdwärmesonde liegt bei etwa 200 bis 250 m.

Ist der Platzbedarf geklärt? Die Lage der erforderlichen Bohrpunkte muss im Vorfeld mit der Bohrfirma abgestimmt werden. Berücksichtigen Sie dabei auch den Platzbedarf für das Bohrgerät. Kommen Flachkollektoren oder Energiekörbe statt Erdwärmesonden zum Einsatz, muss berücksichtigt werden, dass die erforderliche Fläche nicht überbaut werden darf.

Haben Sie alle wesentlichen Unterlagen und Pläne des Grundstücks? Damit es beim Bohren keine bösen Überraschungen gibt, ist es erforderlich, alle Bestandspläne zu besitzen bzw. die Schachtscheine bei den Medienträgern (Gas, Wasser, Abwasser und Telekommunikation) einzuholen.

Besteht ein ausreichender Versicherungsschutz? Als Bauherr können Sie sich gegen eventuelle Schäden und Haftpflichtansprüche versichern. Diese Versicherung ist verursacherunabhängig und überbrückt finanzielle Schäden bis zur Feststellung der Schuldfrage.

Liegen alle Genehmigungen vor? Das Bewilligungsverfahren ist von Kanton zu Kanton verschieden, am besten erkundigen Sie sich bei Ihrer kantonalen Behörde und/oder der Gemeinde. Die aus der behördlichen Genehmigung ersichtlichen Auflagen und Beschränkungen müssen dem ausführenden Unternehmen bekannt sein und auf der Baustelle berücksichtigt werden.

Wurde ein fachlich qualifiziertes Bohrunternehmen gewählt? Der Fachverein Wärmepumpen Schweiz (FWS) zeichnet qualifizierte Unternehmen mit dem «Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen» aus. Eine so zertifizierte Firma garantiert einen hohen Qualitätsstandard.

Werden qualitativ hochwertige Materialien eingesetzt? Dazu zählen zertifizierte Sondenrohre und hochwertiges Hinterfüllmaterial. Bedenken Sie, dass eine Erdwärmesonde eine geplante Lebensdauer von 100 Jahren hat. Eine Reparatur oder Nachrüstung ist nicht möglich. Stellen Sie daher sicher, dass Material und Verarbeitung Spitzenqualität aufweisen.

Erfolgt ein fachgerechter Einbau der Sonden? Der Einbau einer Erdwärmesonde ist ein sensibler Prozess. Deshalb muss dies fachgerecht, sorgfältig und nicht unter Zeitdruck erfolgen. Stellen Sie auch sicher, dass genügend Zeit zum Einbringen des Hinterfüllmaterials eingeplant wird. Dies ist ein relativ langsamer Prozess, der sorgfältig durchgeführt werden muss. Die Sonden müssen nach dem Einbau und nach dem Hinterfüllen einer Druck- und Durchflussprüfung unterzogen werden.

Existiert eine Dokumentation aller Arbeiten? Selbstverständlich gehören eine Dokumentation aller ausgeführten Arbeiten und die Vorlage aller notwendigen Bewilligungen, Unterlagen und Prüfergebnissen nach Abschluss der Arbeiten zu den Rechten des Bauherrn.

11.5 Anhang A5: Bericht Einfluss besser wärmeleitende Hinterfüllung

Dieser Bericht wurde im Rahmen dieses Projektes durch Arthur Huber, Huber Energietechnik AG, Zürich erstellt.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

für

Bundesamt für Energie BFE

22. November 2010



Forschungsprojekt Erdsondenoptimierung: Einfluss der Sonden hinterfüllung

Huber Energietechnik AG

Ingenieur- und Planungsbüro

Jupiterstrasse 26, CH-8032 Zürich

Tel: 044 227 79 78 Fax: 044 227 79 79

<http://www.hetag.ch> Email: mail@hetag.ch

Inhalt

1	ANALYTISCHE ERDSONDENGLEICHUNG	121
1.1	WÄRMELEITUNGSGLEICHUNG UND SPRUNGANTWORT G	121
1.1.1	<i>Wärmeleitungsgleichung</i>	121
1.1.2	<i>Der radiale Temperatur-Trichter</i>	121
1.1.3	<i>Dimensionslose Temperatursprungantwort g</i>	122
1.1.4	<i>Vergleich der Modelle</i>	123
1.2	DIE BOHRLOCHTEMPERATUR T_B UND DIE FLUIDTEMPERATUR T_f	124
1.2.1	<i>Die Fluidtemperatur T_f</i>	124
1.3	THERMISCHE WIDERSTÄNDE R_A UND R_B IN DER DOPPEL-U-SONDE	125
1.3.1	<i>Internen Bohrlochwiderstandes R_a nach Hellström [6]</i>	126
1.3.2	<i>Bohrlochwiderstandes R_b nach Hellström [6]</i>	126
1.4	THERMISCHE WIDERSTÄNDE R_A / R_B AN DER KOAXIALSONDE	127
1.4.1	<i>Modellierung des internen Bohrlochwiderstandes R_a</i>	127
1.4.2	<i>Modellierung des Bohrlochwiderstandes R_b</i>	127
1.5	ANALYTISCHE ERDSONDENGLEICHUNG	128
1.5.1	<i>Konzept der thermischen Widerstände</i>	128
1.5.2	<i>thermische Verbraucherwiderstand R_f</i>	128
1.5.3	<i>Thermischer Transportwiderstand R_m</i>	129
1.5.4	<i>Wärmewiderstand des Bodens R_g</i>	130
1.5.5	<i>Analytische Erdwärmesondengleichung</i>	132
2	EINFLUSS DER HINTERFÜLLUNG AUF DEN SONDENERTRAG	133
2.1	ANALYTISCHE BETRACHTUNG	133
2.2	ERTRAGSVERBESSERUNG MIT THERMOZEMENT	134
2.3	ZUSAMMENHANG ERTRAGSVERBESSERUNG / SONDENTEMPERATUR	135
2.4	BEISPIEL ERHÖHUNG SONDENRÜCKLAUFTEMPERATUR MIT THERMOZEMENT	136
3	SYMBOLVERZEICHNIS	137
3.1	LATEINISCHE SYMBOLE	137
3.2	GRIECHISCHE SYMBOLE	138
4	LITERATURVERZEICHNIS	139

1 Analytische Erdsondengleichung

1.1 Wärmeleitungsgleichung und Sprungantwort g

1.1.1 Wärmeleitungsgleichung

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird vorausgesetzt, dass der dominante Wärmetransportmechanismus im Erdreich die Wärmeleitung ist, der konvektive Wärmetransport durch Wasserbewegungen im Erdreich also vernachlässigt werden kann. Das Problem der Wärmeleitung im Erdreich um eine Erdwärmesonde ist axialsymmetrisch. In Axialkoordinaten kann die Wärmeleitungsgleichung um eine Erdwärmesonde in radialer Richtung geschrieben werden als

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T_{\text{Earth}}}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_{\text{Earth}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_{\text{Earth}}}{\partial r} \quad \text{Gl. 1.1}$$

wobei die Temperaturleitfähigkeit a definiert ist durch

$$\text{Def: } a = \frac{\lambda}{c p_{\text{Earth}} \cdot \rho_{\text{Earth}}} \quad \text{Gl. 1.2}$$

Die Wärmeleitungsgleichung ist linear, so dass sowohl Einzelsonden, als auch Sondenfelder bei geometrischer Ähnlichkeit ähnliche Temperatur-Sprungantworten aufweisen. Diese Ähnlichkeit bezieht sich auf alle Temperaturen im Erdreich für alle Radien r um die Erdwärmesonden und für alle Zeiten t .

Bei einem Wärmeentzug aus einer Erdwärmesonde entsteht so im Erdreich eine Temperaturabsenkung ΔT_{Earth} gegenüber der unbeeinflussten Erdreichtemperatur (=Temperaturtrichter), die sich mit fortlaufendem Entzug radial ausweitet. Diese Temperaturabsenkung ΔT_{Earth} kann mit der spezifischen Entzugsleistung \dot{q} und der Wärmeleitfähigkeit λ_{Earth} dimensionsbefreit werden:

$$\text{Def: } g(r, t) = \frac{\Delta T_{\text{Earth}}(r, t) 2\pi \lambda_{\text{Earth}}}{\dot{q}} \quad \text{Gl. 1.3}$$

1.1.2 Der radiale Temperatur-Trichter

Im stationären Fall ist der radiale Wärmefluss \dot{q} im Sonden-Nahbereich konstant und es gilt

$$\frac{\dot{q}}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{\partial T_{\text{Earth}}}{\partial r} \cdot \lambda_{\text{Earth}} = \frac{\partial g}{\partial r} \cdot \frac{\dot{q}}{2 \cdot \pi} \quad \text{Gl. 1.4}$$

Durch Integration von r bis r_1 wird daraus

$$g(r) = g(r_1) - \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \quad \text{Gl. 1.5}$$

Diese Beziehung erlaubt es, mit einer einzigen Sprungantwort g das Temperaturverhalten im ganzen Sonden-Nahbereich abzuschätzen und bei bekannter Sprungantwort g an der Stelle r_1 auf die Sprungantwort g an der Stelle r zu schliessen. Zu beachten ist dabei allerdings, dass für kleine Zeitschritte t die Annahme eines stationären Falles zu grösseren Abweichungen führt.

1.1.3 Dimensionslose Temperatursprungantwort g

Carlsaw & Jaeger [2] haben die Wärmeleitungsgleichung für eine unendliche Linienquelle analytisch gelöst und haben für g die folgenden Beziehung gefunden:

$$g = \frac{1}{2} \cdot \left[-\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4 \cdot t \cdot a}\right) - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\left(\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot t}\right)^n}{n \cdot n!} \right] \cong \frac{1}{2} \cdot \left[\ln\left(\frac{4 \cdot t \cdot a}{r^2}\right) - \gamma \right] \quad \text{Gl. 1.6}$$

wobei $\gamma=0.5772..$ die Eulerkonstant ist.

Werner, A.; Bigler, R.; Niederhauser, A. et. al. [19] sind durch eine Analogie, abgeleitet aus der Brunnen-gleichung, auf die identische Lösung gekommen. Im Programm-Modul EWS ist Gl. 1.6 eingebaut und diese kann wahlweise, als Alternative zur g-Funktion von Eskilson, als äussere Randbedingung für das Simulationsgebiet ausgewählt werden.

Da bei einer unendlichen Linienquelle aus Gründen der Symmetrie das Nachströmen von Wärme weder von oben noch von unten möglich ist, führt der Ansatz von Carlsaw und Jaeger zu einer stetigen Vergrößerung des Temperaturtrichters, ein Gleichgewichtszustand ist mit diesem Ansatz nicht möglich. Da aber untiefe Erdwärmesonden primär die im Sommer von der Erdoberfläche ins Erdreich gespeicherte Wärme nutzen, wurde an der Universität Lund ein Ansatz für Erdwärmesonden mit der endlichen Sondenlänge H entwickelt.

Nach Claesson und Eskilson [3] besitzen Erdwärmesonden eine Zeitkonstante t_s , mit der das zeitliche Verhalten des Erdreichs um die Erdwärmesonden dimensionsbefreit werden kann:

$$t_s = \frac{H^2}{9a} \quad \text{Gl. 1.7}$$

Die dimensionslose Zahl E_s von Eskilson

$$E_s = \frac{t}{t_s} = \frac{9a}{H^2} t \quad \text{Gl. 1.8}$$

kann somit als dimensionslose Zeit für Sondenfelder und Einzelsonden betrachtet werden.

Die Kenntnis der Zeitkonstanten ist vor allem bei nicht ausgeglichener jährlicher Entzugsbilanz wesentlich. Bis zum Zeitpunkt $E_s = 0.1$ muss mit einer merklichen Abkühlung bzw. Erwärmung des Erdreiches gerechnet werden. Danach erfolgt nur noch eine sehr geringe Temperaturänderung im Erdreich. Der Gleichgewichtszustand zwischen Wärmeentzug und nachhaltigem Nachfliessen der Wärme ist dann ab ca. $E_s = 10$ erreicht.

Die dimensionslose Temperatursprungantwort g ("g-function") ist nach Eskilson (1987) sowohl für Einzelsonden als auch für Sondenfelder einzig eine Funktion der dimensionslosen Zeit E_s und des dimensionslosen Sondenabstandes r_b/H . Man geht dabei von einem konstanten, spezifischen Wärmeentzug pro Sondenlänge \dot{q} aus.

Für eine Einzelsonde im Bereich $5 r_1^2/a < t < t_s$ kann die Funktion g bei einem maximalen Fehler von 7 % angenähert werden mit

$$g(t, r_1) = \ln\left(\frac{H}{2r_1}\right) + 0.5 \ln(Es) \quad \text{Gl. 1.9}$$

Für Zeiten grösser als t_s strebt die Einzelsonde dem folgenden Gleichgewichtszustand zu:

$$g(r_1) = \ln\left(\frac{H}{2 \cdot r_1}\right) \quad \text{Gl. 1.10}$$

In Abb. 1.1 sind als Beispiel die dimensionslosen Temperatur-Sprungantworten g von zwei Erdwärmesonden im Abstand B eingezeichnet. Im Vergleich dazu ist gestrichelt die g -funktion einer Einzelsonde dargestellt. Weitere Temperatur-Sprungantworten für verschiedene Erdwärmesondenfelder sind in Abb. 1.2 zu finden.

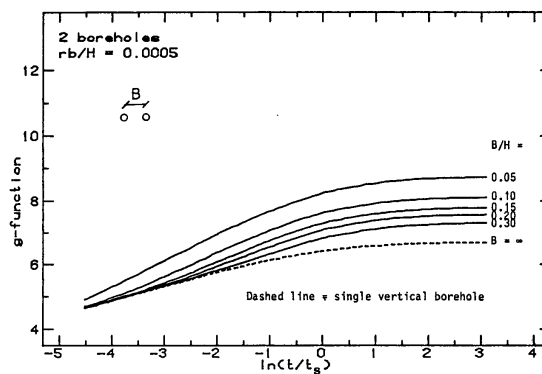


Abb. 1.1 Dimensionslose Sprungantwort g für 2 Erdwärmesonden mit Abstand B nach Eskilson [4].

1.1.4 Vergleich der Modelle

In Abb. 1.2 werden die Ansätze von Carslaw & Jaeger für eine unendlich tiefe Erdwärmesonde mit dem Ansatz von Eskilson für je eine 10m, 100m und 500m tiefe Erdwärmesonde verglichen. Bis zum Erreichen der Zeitkonstante t_s ist zwischen den Modellen keine Abweichung festzustellen.

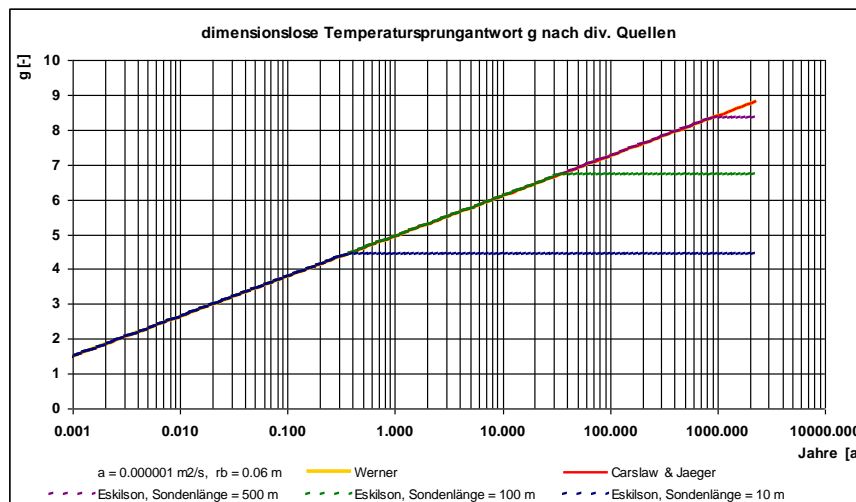


Abb. 1.2 Dimensionslose Sprungantwort g nach Carslaw & Jaeger [2] und Eskilson [4].

1.2 Die Bohrlochtemperatur T_b und die Fluidtemperatur T_f

Um die Temperatur im Erdreich zu erhalten, kann nun die Temperatur-Sprungantwort ΔT von der ungestörten Anfangstemperatur T_m abgezählt werden (Superpositionsprinzip). Die Temperatur am Bohrlochrand $T_{Earth}(r_1)$ (=Bohrlochtemperatur T_b) kann aus g und T_m berechnet werden mit

$$T_b(z) = T_m(z) - R_g \cdot \dot{q} = T_m(z) - \frac{\dot{q}}{2\pi\lambda_{Earth}} g(t, r_1) \quad \text{Gl. 1.11}$$

T_m ist die mittlere Erdtemperatur im ungestörten Zustand in der Tiefe z . Sie berechnet sich aus der durchschnittlichen Jahres-Erdoberflächentemperatur T_{mo} und dem Temperaturgradienten ΔT_{Grad} .

Die durchschnittliche Jahres-Erdoberflächentemperatur T_{mo} ist gleich der durchschnittlichen Lufttemperatur plus einer mittleren Bodenerwärmung die typisch zwischen 0.8 bis 2°C liegt, der Temperaturgradient ΔT_{Grad} schwankt in der Schweiz typischerweise zwischen 0.025 bis 0.045 K/m.

Die über die Bohrtiefe gemittelte Bohrlochtemperatur \overline{T}_b ist definiert als

$$\text{Def } \overline{T}_b = \frac{1}{H} \cdot \int_0^H T_b(z) \cdot dz \quad \text{Gl. 1.12}$$

Für den Fall eines konstanten Wärmeentzugs pro Bohrlänge \dot{q} kann die über die Tiefe im Bohrloch gemittelte Bohrlochtemperatur \overline{T}_b berechnet werden mit

$$\overline{T}_b = \overline{T}_m - R_g \cdot \dot{q} = \overline{T}_m - \frac{\dot{q}}{2\pi\lambda_{Earth}} g(t, r_1) \quad \text{Gl. 1.13}$$

wobei

$$\overline{T}_m = T_{mo} - \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} \quad \text{Gl. 1.14}$$

1.2.1 Die Fluidtemperatur T_f

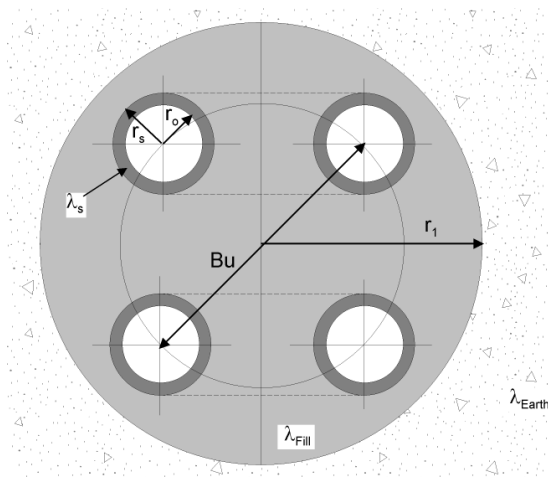
Die mittlere Fluidtemperatur T_f ist definiert als der arithmetische Mittelwert des nach unten und des nach oben strömenden Sondenfluids

$$\text{Def: } T_f(z) = \frac{T_{up}(z) + T_{down}(z)}{2} \quad \text{Gl. 1.15}$$

Die Fluidtemperatur T_f ist also eine Funktion der Tiefe z im Bohrloch. Die mittlere Fluidtemperatur \overline{T}_f ist definiert als

$$\text{Def: } \overline{T}_f = \frac{1}{2} \cdot (T_{Quelle} + T_{Rücklauf}) \quad \text{Gl. 1.16}$$

1.3 Thermische Widerstände Ra und Rb in der Doppel-U-Sonde



Eine idealisierte Doppel-U-Sonde mit dem Bohrradius r_1 und mit den 4 Sondenrohren (mit Innenradius r_o und Aussenradius r_s) ist auf nebenstehendem Bild zu sehen. In je 2 Sondenrohren fließt das Sondenfluid nach unten und nach oben. Die Hinterfüllung besitzt die Wärmeleitfähigkeit λ_{Fill} , die Sondenrohre λ_s und das umgebende Erdreich λ_{Earth} . Die genaue Lage der 4 Sondenrohre in der Bohrung kann definiert werden mit der Exzentrizität b

$$b = \frac{Bu}{2 \cdot r_1} \quad \text{Gl. 1.17}$$

Abb. 1.3 Bezeichnungen an der Doppel-U-Sonde

Die Exzentrizität b ist mit dem Rohrabstand Bu („shank spacing“) gemäss

Abb. 1.3 definiert. Die geometrisch maximal mögliche Exzentrizität b_{Max} beträgt:

$$b_{Max} = \frac{2 \cdot r_1 - 2 \cdot r_s}{2 \cdot r_1} = 1 - \frac{r_s}{r_1} \quad \text{Gl. 1.18}$$

Die geometrisch minimale Exzentrizität b_{Min} (bei einem nicht zentrierten Füllrohr) beträgt:

$$b_{Min} = \frac{r_s}{r_1} \quad \text{Gl. 1.19}$$

Als reine Stoffgrösse wird der Konduktivitätsparameter σ definiert mit

$$\sigma = \frac{\lambda_{Fill} - \lambda_{Earth}}{\lambda_{Fill} + \lambda_{Earth}} \quad \text{Gl. 1.20}$$

Der interne thermische Bohrlochwiderstand R_a [Km/W] ist eine charakteristische Grösse für die längenbezogenen, thermischen „Verluste“ Δq_i [W/m] des heraufströmenden Fluids an das nach unten strömende Fluid und ist unabhängig von der Tiefe im Bohrloch:

$$\text{Def: } R_a = \frac{T_{up}(z) - T_{down}(z)}{\Delta q_i(z)} \quad \text{Gl. 1.21}$$

Mit der mittleren Fluidtemperatur T_f in der Sonde und der Bohrlochtemperatur T_b kann der thermische Bohrlochwiderstand R_b definiert werden als

$$\text{Def: } R_b = \frac{T_b(z) - T_f(z)}{\dot{q}} \quad \text{Gl. 1.22}$$

Der Bohrlochwiderstand R_b ist unabhängig von der Tiefe im Bohrloch und setzt sich zusammen aus dem Bohrloch-Hinterfüllungswiderstand R_c und dem Wärmeübergangswiderstand R_α von der Hinterfüllung ans Sondenfluid:

$$R_b = R_\alpha + R_c \quad \text{Gl. 1.23}$$

Bei Doppel-U-Sonden kann der Wärmeübergangswiderstand R_α berechnet werden mit

$$R_\alpha = \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot r_o} \quad \text{Gl. 1.24}$$

1.3.1 Internen Bohrlochwiderstandes R_a nach Hellström [6]

Nach Hellström [6] (1991, S. 147, Formel 9.149) kann der interne Bohrlochwiderstand R_a für Doppel-U-Sonden mit symmetrischer Sondenrohr-Anordnung berechnet werden mit

$$R_a = \frac{1}{\pi \cdot \lambda_{\text{Fill}}} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{2} \cdot b \cdot r_1}{r_o} \right) - \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot b \cdot r_1}{r_o} \right) - \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \ln \left(\frac{1-b^4}{1+b^4} \right) \right] + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot \alpha} + R_s \quad \text{Gl. 1.25}$$

wobei R_s der thermischer Widerstand der Sondenrohr-Wand ist, der berechnet wird mit

$$R_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_s} \cdot \ln \left(\frac{r_s}{r_o} \right) \quad \text{Gl. 1.26}$$

1.3.2 Bohrlochwiderstandes R_b nach Hellström [6]

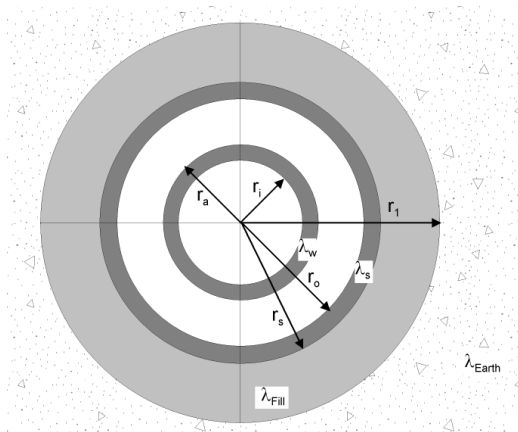
Für eine Doppel-U-Sonde kann nach Hellström [6] (S. 89, Formel 8.69) der Bohrlochwiderstand R_b berechnet werden mit

$$R_b = \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{Fill}}} \cdot \left[\beta + \ln \left(\frac{r_1}{r_o} \right) + \ln \left(\frac{r_1}{Bu} \right) + \sigma \cdot \ln \left(\frac{r_1^4}{r_1^4 - \frac{Bu^4}{16}} \right) - \frac{\frac{r_o^2}{Bu^2} \left[1 - \sigma \cdot \frac{\frac{1}{4} Bu^4}{\left(r_1^4 - \frac{Bu^4}{16} \right)} \right]^2}{\left\{ \frac{1+\beta}{1-\beta} + \frac{r_o^2}{Bu^2} \left[1 + \sigma \cdot \frac{Bu^4 \cdot r_1^4}{\left(r_1^4 - \frac{Bu^4}{16} \right)^2} \right] \right\}} \right] \quad \text{Gl. 1.27}$$

und

$$\beta = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{Fill}} \cdot [R_\alpha + R_w] = \lambda_{\text{Fill}} \cdot \left[\frac{1}{r_o \cdot \alpha} + \frac{1}{\lambda_s} \cdot \ln \left(\frac{r_s}{r_o} \right) \right] \quad \text{Gl. 1.28}$$

1.4 Thermische Widerstände Ra / Rb an der Koaxialsonde



Bezeichnungen an der Koaxialsonde

Eine idealisierte Koaxialsonde ist in Abb. 1.4 dargestellt. Grau dargestellt ist die Bohrung mit dem Bohrradius r_1 .

Die Hinterfüllung besitzt die Wärmeleitfähigkeit λ_{Fill} , das innere Sondenrohr λ_w , das äussere Sondenrohr λ_s und das Erdreich λ_{Earth} .

r_i und r_a sind die inneren und äusseren Radien des inneren Sondenrohres, r_o und r_s die inneren und äusseren Radien des äusseren Sondenrohres.

Abb. 1.4 Bezeichnungen an der Koaxialsonde

1.4.1 Modellierung des internen Bohrlochwiderstandes R_a

Auch für Koaxialsonden gilt die Definition für den internen Bohrlochwiderstand R_a nach Gl. 1.21. Der thermische Widerstand R_a ist somit die Summe aus dem Wärmeübergangswiderstand vom hinaufströmende Fluid ans Innenrohr, dem thermischen Widerstand des Innenrohres und dem Wärmeübergangswiderstand vom Innenrohr ans hinabströmenden Fluid:

$$R_a = \left[\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot \alpha_i} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_w} \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_a \cdot \alpha_a} \right] \quad \text{Gl. 1.29}$$

1.4.2 Modellierung des Bohrlochwiderstandes R_b

Bei der Koaxialsonde ist R_b definiert als der thermische Widerstand des äusseren Sondenfluids (in der Regel das hinabströmende Fluid) bis an die Wand des Bohrlochs (beim Radius r_1):

$$R_b = \left[\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot \alpha_o} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_s} \cdot \ln\left(\frac{r_s}{r_o}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{Fill}}} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_s}\right) \right] \quad \text{Gl. 1.30}$$

1.5.3 Thermischer Transportwiderstand R_m

Im Wärmeentzugsfall liegt die höchste, mittlere Fluid-Temperatur T_f im Sondenfuss. Beim Transport nach oben verliert das Sondenfluid durch Wärmeabgabe an das hinunterfließende Fluid und unter Umständen auch oben ans Erdreich wieder ein Teil dieses Temperaturniveaus. Unter der Annahme einer konstanten, spezifischen Entzugsleistung \dot{q} über die ganze Sondenlänge (für die meisten Sondenbetriebe eine durchaus brauchbare Annahme) erhält man für die Fluidtemperatur in der Sonde die folgende Beziehung (Herleitung in Huber [12]):

$$T_{up}(z) = T_{mo} + \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[\frac{g(t,H)}{2\pi \lambda_{Earth}} + R_b + \frac{1}{R_a} \cdot \frac{H^2 - z \cdot H + \frac{z^2}{2}}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^2} - \frac{H-z}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}} \right] \dot{q} \quad \text{Gl. 1.35}$$

$$T_{down}(z) = T_{mo} + \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[\frac{g(t,H)}{2\pi \lambda_{Earth}} + R_b + \frac{1}{R_a} \cdot \frac{H^2 - z \cdot H + \frac{z^2}{2}}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^2} + \frac{H-z}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}} \right] \dot{q} \quad \text{Gl. 1.36}$$

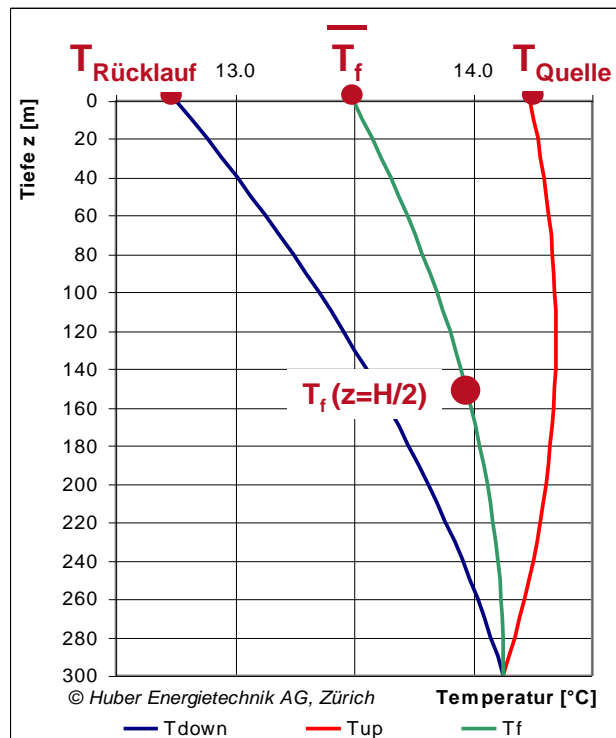


Abb. 1.6: Temperaturverlauf im Sondenfluid nach Huber [12]

Damit kann der **thermische Transportwiderstand R_m** definiert werden als

$$T_f \left(z = \frac{H}{2} \right) - \bar{T}_f \equiv R_m \cdot \dot{q} = \left(\frac{1}{3 \cdot R_a} \cdot \frac{H^2}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^2} \right) \cdot \dot{q} \quad \text{Gl. 1.37}$$

1.5.4 Wärmewiderstand des Bodens R_g

Der Wärmewiderstand des Bodens R_g ergibt sich aus der Temperaturdifferenz der Bohrlochoberfläche T_b und dem ungestörten Temperaturniveau in der gleichen Tiefe. Mit der Definition der g-functions (Gl. 1.3) ergibt sich die Definitionsgleichung für R_g :

$$T_m - T_b = \Delta T(r = r_b, t) = \frac{\dot{q}}{2\pi\lambda} \cdot g(r_b, t) = R_g \cdot \dot{q} \quad \text{Gl. 1.38}$$

Speziell am Wärmewiderstand R_g ist, dass R_g eine Funktion der Zeit ist und sich bei konstantem Entzug ständig vergrößert (cf. Kapitel 1.1).

Mit Gl. 1.9 und Gl. 1.10 lässt sich der Wärmewiderstand des Bodens R_g für eine Einzelsonde bei einem konstanten Entzug relativ genau abschätzen. Bei mehreren, sich gegenseitig beeinflussenden Erdwärmesonden kann man entweder auf die publizierten g-functions z.B. von Eskilson [4] zurückgreifen, oder alternativ dazu die Näherungsgleichungen von Huber [11] für die Abschätzung der g-functions von Sondenfeldern verwenden. Mit Hilfe von Gl. 1.5 lässt sich damit sogar das Temperaturfeld um eine Erdwärmesonde in stationären Zustand berechnen. Ein Beispiel dazu findet sich bei Huber [12]:

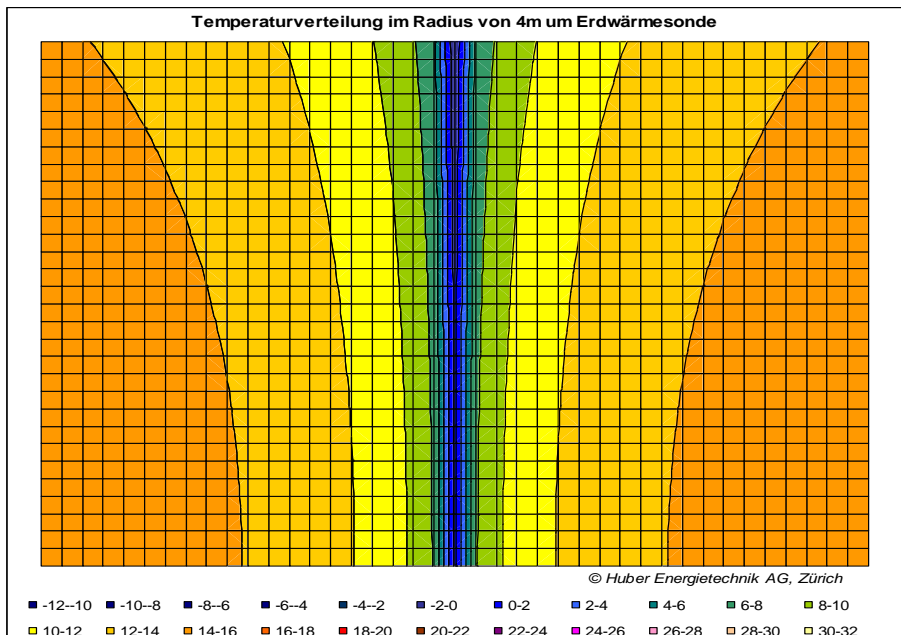


Abb. 1.7: Erdreichtemperatur um eine 300m tiefe Erdwärmesonde mit $\lambda_{\text{Earth}} = 2.4 \text{ W/mK}$ nach 30 Tagen Dauerentzug mit 40 W/m (Huber, 2005 [12]).

Es stellt sich nun die Frage, wie mit einem nicht konstantem Wärmeentzug (z.B. taktender Entzug durch das An- und Abstellen einer Wärmepumpe) umgegangen werden kann. Hier hilft uns die Linearität der Wärmeleitungsgleichung. Diese ermöglicht es, ein Wärmeentzugsprofil aus mehreren Einzel-Entzugsprofilen zusammensetzen (Superpositionsprinzip, Claesen [3], Eskilson [4]). Good et al. [5] haben gezeigt, dass es für die Sondenauslegung reicht, für das Langfristverhalten mit den Jahres-Durchschnittsentzug zu rechnen, superponiert mit einem zusätzlichen saisonalen Durchschnittsentzug und einem kurzfristigen Entzugs-Peak.

Das obige Prinzip soll an einem Beispiel erläutert werden:

Es soll ein Entzugsprofil erstellt werden, womit der thermische Wärmewiderstand des Bodens R_g im 3. Sondenbetriebsjahr berechnet werden kann. Dazu sollen die folgenden Randbedingungen gelten:

1. spezifische Entzugsleistung der Sonde (bei Sondenbetrieb) von 40 W/m
2. 2'200 h Vollbetriebsstunden pro Jahr des Sondenentzugs (Laufzeit der Wärmepumpe)
3. Heizperiode 5200 Stunden pro Jahr
4. Auslegungs-Dauerbetrieb von 3 Tagen mit 40 W/m

Mit diesen Randbedingungen berechnet sich der Jahresdurchschnittsentzug als

$$\bar{q}_a = 40 \text{ W/m} \cdot \frac{2200 \text{ h}}{8760 \text{ h}} = 10.0 \text{ W/m} \quad \text{Gl. 1.39}$$

Der zusätzliche, saisonale Durchschnittsentzug berechnet sich mit

$$\bar{q}_s = 40 \text{ W/m} \cdot \frac{2200 \text{ h}}{5200 \text{ h}} - 40 \text{ W/m} \cdot \frac{2200 \text{ h}}{8760 \text{ h}} = 6.9 \text{ W/m} \quad \text{Gl. 1.40}$$

Der zusätzliche Peak für die 3 Tage Dauerbetrieb ergibt sich aus

$$\dot{q}_{peak} = 40 \text{ W/m} - 40 \text{ W/m} \cdot \frac{2200 \text{ h}}{5200 \text{ h}} = 23.1 \text{ W/m} \quad \text{Gl. 1.41}$$

Dieses Entzugsprofil sieht dann wie folgt aus:

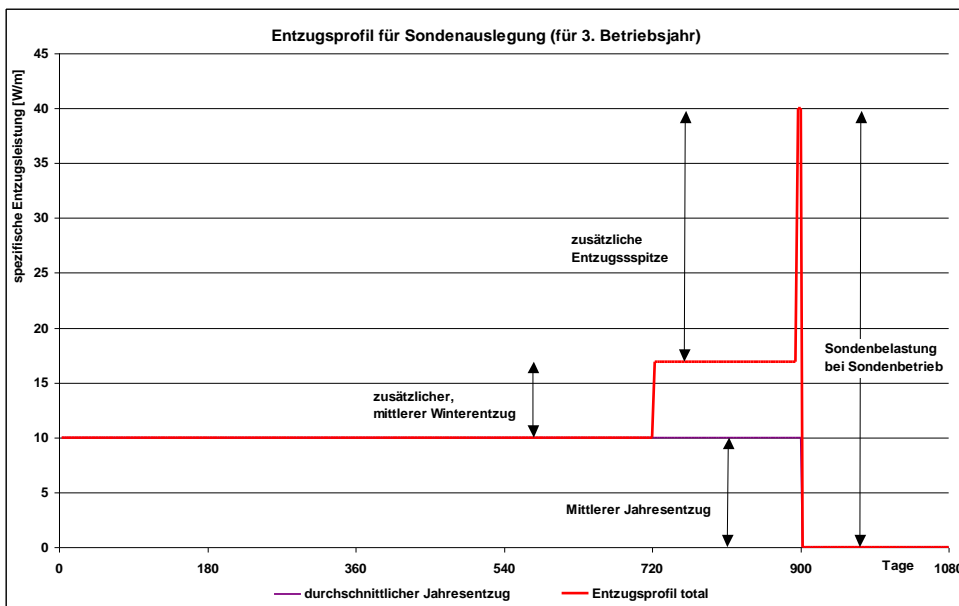


Abb. 1.8: Entzugsprofil für die Bestimmung des Wärmewiderstandes des Bodens R_g im 3. Betriebsjahr einer Erdwärmesonde ohne aktive Regeneration mit Hilfe des Superpositionsprinzips.

Der Wärmewiderstand des Bodens (bezogen auf die Peak-Sondenbelastung) berechnet sich nun daraus wie folgt:

$$R_g = \frac{g(r_b, t = 2.5 \text{ Jahre})}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Earth}} \cdot \frac{\bar{q}_a}{40 \text{ W/m}} + \frac{g(r_b, t = 5200h)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Earth}} \cdot \frac{\bar{q}_s}{40 \text{ W/m}} + \frac{g(r_b, t = 36h)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Earth}} \cdot \frac{\dot{q}_{peak}}{40 \text{ W/m}}$$

Wir können also den Wärmewiderstand des Langfristverhaltens, des zusätzlichen saisonalen Verhaltens und des zusätzlichen Peaks (immer bezogen auf die jeweilige Laufzeit) addieren, müssen diese aber auf die Bezugsleistung (Auslegungsleistung, im Beispiel 40 W/m) skalieren, damit sie in die Erdwärmesondengleichung Gl. 1.45 und Gl. 1.46 eingesetzt werden kann.

1.5.5 Analytische Erdwärmesondengleichung

Die analytische Erdwärmesondengleichung erhält man nun durch den Zusammenschluss der verschiedenen, addierbaren Widerstände an der Erdwärmesonde:

$$T_{Quelle} = T_m - (R_g + R_b + R_m - R_f) \cdot \dot{q} \quad \text{Gl. 1.43}$$

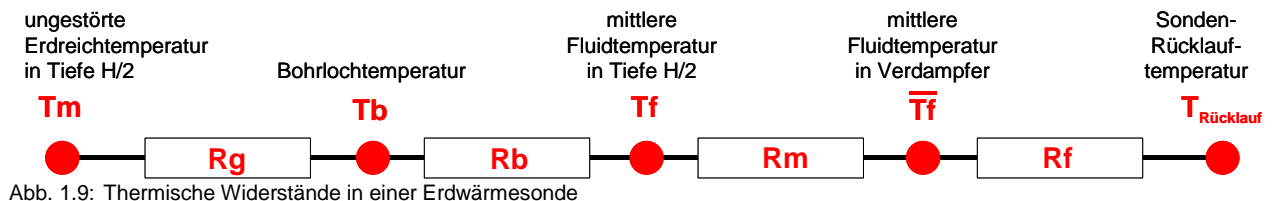
$$T_{Rücklauf} = T_m - (R_g + R_b + R_m + R_f) \cdot \dot{q} \quad \text{Gl. 1.44}$$

Ersetzt man nun T_m durch Gl. 1.14, R_g durch Gl. 1.38, R_m durch Gl. 1.37 und R_f durch Gl. 1.33, so erhält man die analytische Erdwärmesondengleichung

$$T_{Quelle} = T_{mo} + \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[\frac{g(t, r_1)}{2\pi \lambda_{Earth}} + R_b + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{R_a} \cdot \frac{H^2}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^2} - \frac{H}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}} \right] \dot{q} \quad \text{Gl. 1.45}$$

und

$$T_{Rücklauf} = T_{mo} + \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[\frac{g(t, r_1)}{2\pi \lambda_{Earth}} + R_b + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{R_a} \cdot \frac{H^2}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^2} + \frac{H}{2 \cdot \dot{m} \cdot cp_{Sole}} \right] \dot{q} \quad \text{Gl. 1.46}$$



Für Größenordnungsabschätzung und Plausibilisierung von Rechenergebnissen eignet sich die Erdwärmesondengleichung sehr gut.

2 Einfluss der Hinterfüllung auf den Sondenertrag

2.1 Analytische Betrachtung

Nach Gl. 1.22 kann der Temperaturgradient im Bohrloch geschrieben werden als

$$T_b - T_f = \dot{q} \cdot R_b \quad [K] \quad \text{Gl. 2.1}$$

Die Hinterfüllung tritt nur im thermischen Bohrlochwiderstand R_b in Erscheinung. Der spezifische Sondenertrag \dot{q} [W/m] wird aber nicht nur durch den Bohrlochwiderstand R_b vorgegeben, sondern durch die Summe aller thermischen Widerstände einer Erdwärmesonde:

$$\dot{q} = \frac{T_{\text{Rücklauf}} - T_m}{\sum R} = \frac{T_{\text{Rücklauf}} - T_m}{R_g + R_b + R_m + R_f} \quad \text{Gl. 2.2}$$

Geht man davon aus, dass die unbeeinflusste Erdreichtemperatur T_m ein Standort-Parameter ist (also unabhängig vom Sondentyp und von der Sonden hinterfüllung ist), und die Sonden-Rücklauftemperatur $T_{\text{Rücklauf}}$ eine Auslegungsgrösse ist, die gemäss der Norm SIA 384/6 [17] einzuhalten ist und somit ebenfalls unabhängig von der Sonden hinterfüllung ist, so kann die anteilmässige **Ertragsverbesserung**, die durch eine verbesserte Hinterfüllung erreicht werden kann, geschrieben werden als

$$\frac{\dot{q}_2 - \dot{q}_1}{\dot{q}_1} = \frac{\frac{1}{\sum R_2} - \frac{1}{\sum R_1}}{\frac{1}{\sum R_1}} = \frac{\sum R_1 - \sum R_2}{\sum R_2} = \frac{\Delta R_b}{R_g + R_{b2} + R_m + R_f} \quad \text{Gl. 2.3}$$

Wie ist dieses Resultat nun zu interpretieren? Gl. 2.3 zeigt uns folgendes:

1. Die prozentuale Ertragsverbesserung ist unabhängig von der absoluten Sondenbelastung \dot{q} [W/m], sie ist nur abhängig vom aktuellen Verhältnis des Bohrlochwiderstandes zum Gesamtwiderstand in einer Erdwärmesonde (Summe aller Sondenwiderstände).
2. Die Ertragsverbesserung ist bei Einzelsonden grösser als bei Sondenfeldern, da bei Einzelsonden R_g kleiner ist als bei Sondenfeldern.
3. Da der Wärmewiderstand des Bodens R_g mit der Zeit zunimmt, nimmt auch die Ertragsverbesserung bei längeren Sondenlaufzeiten etwas ab.
4. Da der Wärmewiderstand des Bodens von der Wärmeleitfähigkeit des Bodens abhängt (Gl. 1.11), ist die Ertragsverbesserung umso stärker, je besser die Wärmeleitfähigkeit des Bodens ist.
5. Bei ausgeglichener Sondenbilanz im Jahresverlauf muss der Wärmewiderstand des Bodens R_g nur für ein Jahr betrachtet werden. Aus Gl. 1.7 ergibt sich daraus, dass bei ausgeglichener Sondenbilanz die Ertragsverbesserung bei tiefen Sonden grösser ist als bei weniger tiefen Sonden.

2.2 Ertragsverbesserung mit Thermozeement

Thermozeement (teilweise auch unter der Markenbezeichnung „ThermoCem® PLUS“ bekannt) wird heute bereits von einigen Bohrunternehmungen in der Schweiz angeboten. Es soll nachfolgend die Ertragsverbesserung mit Thermozeement, verglichen mit einer Standard-Zement-Bentonit-Hinterfüllung, berechnet werden, dies am Beispiel einer Einzelsonde von 200m Bohrtiefe bei einer Sondenbelastung von 40 W/m. Mit Hilfe der Gl. 2.3 ergibt sich an diesem Beispiel eine Ertragsverbesserung von 12.9 %.

Hinterfüllungsmaterial		Zement-Bentonit	Thermozeement
Wärmeleitfähigkeit Hinterfüllung	W/mK	0.81	2.0
Wärmeleitfähigkeit Erde	W/mK	2.5	2.5
Sondenlänge	m	200	200
Sondentyp		40mm duplex	40mm duplex
Bohrdurchmesser	mm	135	135
spez. Entzug (Auslegung, Vollast)	W/m	40	40
Vollaststunden Entzug	h/a	2200	2200
spez. Jahresdurchschnittsentzug	W/m	10.0	10.0
spez. Entzug im Heizperiodenmittel	W/m	16.9	16.9
ΔT zwischen Vor- und Rücklauf	K	3	3
Sondendurchsatz	kg/s	0.72	0.72
Sondenfluid		25% Ethylenglykol	25% Ethylenglykol
Viskosität Sondenfluid	mm ² /s	4.05	4.05
spez. Wärmekapazität Sondenfluid cp	J/kgK	3725	3725
Rohrabstand ("shank spacing")	mm	60	60
Zeitkonstante Erdwärmesonde	a	176	176
Bohrlochwiderstand Rb	Km/W	0.1	0.057
relativer Bohrlochwiderstand Rb/Rb'	%	100%	57%
Interner Bohrlochwiderstand Ra	Km/W	0.22	0.152
Thermischer Transportwiderstand Rm	Km/W	0.0085	0.0123
Thermischer Verbraucherwiderstand Rf	Km/W	0.0375	0.0375
Wärmewiderstand des Bodens Rg			
- 10 Jahre / 10 W/m	Km/W	0.093	0.093
- 180 Tage / 6.9 W/m	Km/W	0.048	0.048
- 3 Tage / 23.1 W/m	Km/W	0.085	0.085
- Wärmewiderstand Rg total:	Km/W	0.227	0.227
Summe aller Widerstände ΣR	Km/W	0.493	0.428
Ertragsverbesserung:		0%	12.9%

Eine Ertragsverbesserung von 12.9% bedeutet, dass die Sonden 12.9% kürzer gebohrt werden können.

Berechnet man die Ertragsverbesserung mit dem Programm EWS (Huber, 2009 [11]), so ergibt das gleiche Beispiel mit einem realistischen Entzugsprofil eine Ertragsverbesserung von 10.5%. Gemäss dieser Simulationsrechnung können die Erdwärmesonden für dieses Beispiel also 10.5% kürzer gebohrt werden.

2.3 Zusammenhang Ertragsverbesserung / Sondentemperatur

Für den Wirkungsgrad einer einfachen Wärmepumpe ist neben der Bauart vor allem die Verdampfungstemperatur und die Kondensationstemperatur massgebend. Im Idealfall ist die Wärmequelle verantwortlich für die Verdampfungstemperatur. Im realen Fall, d. h. wenn nicht eine beliebig grosse Wärmequelle zur Verfügung steht, ist es primär die Temperatur der Wärmequelle am Austritt des Verdampfers, die für die Verdampfungstemperatur und somit den Wirkungsgrad der Wärmepumpe verantwortlich ist. Die Temperatur der Wärmequelle am Austritt des Verdampfers nennen wir in unserer Terminologie Sonden-Rücklaufstemperatur ($T_{\text{Rücklauf}}$). Für die Sonden-Rücklaufstemperatur gilt gemäss Gl. 1.44:

$$T_{\text{Rücklauf}} = T_m - (R_g + R_b + R_m + R_f) \cdot \dot{q}_o \cdot \frac{\dot{q}}{\dot{q}_o} \quad \text{Gl. 2.4}$$

wobei

$$\text{Def: } \dot{q}_o = \frac{\dot{Q}_{V_o}}{H_o} = \frac{\text{Verdampfer - Leistung im Auslegungsfall}}{\text{Bohrtiefe Referenzfall}} \quad \text{Gl. 2.5}$$

$$\text{Def: } T_{\text{RLo}} = \text{Sondenrücklaufstemperatur im Referenzfall} \quad \text{Gl. 2.6}$$

Damit kann die Abhängigkeit der Sonden-Rücklaufstemperatur von der Bohrtiefe im folgenden Diagramm dargestellt werden, wobei mittlere, ungestörte Erdoberflächtemperatur T_m in Gl. 1.14 definiert ist:

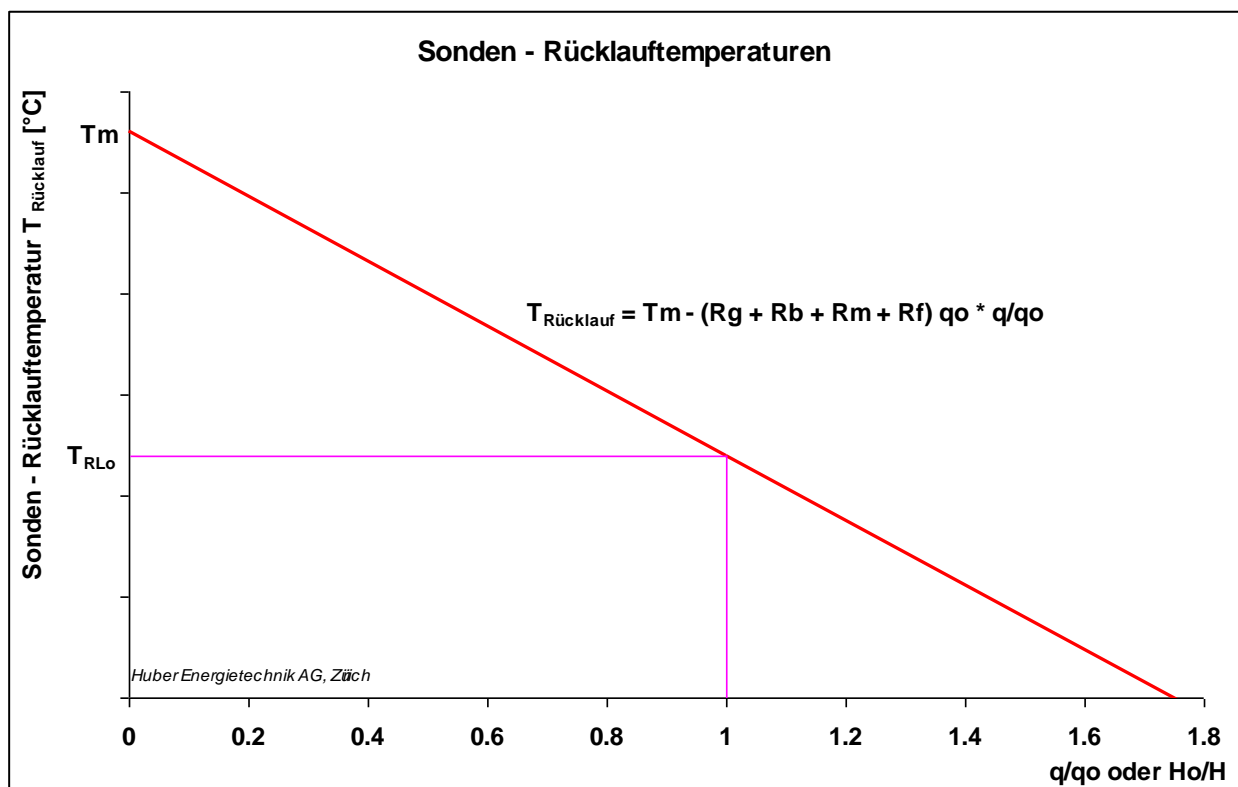


Abb. 2.1: Sonden-Rücklaufstemperatur in Abhängigkeit der Sondenlänge, bzw. der spezifischen Sondenbelastung.

In der Regel wird eine Erdwärmesonde nach der Norm SIA 384/6 ausgelegt. Diese schreibt vor, dass in 50 Betriebsjahren der Mittelwert der Fluidtemperatur am Sondenkopf (Mittelwert zwischen Vorlauf- und Rücklauf-temperatur) -1.5 °C nicht unterschreiten darf. Bei einer Abkühlung im Verdampfer von 3 K ergibt dies eine Vorlauf-temperatur von 0 °C und eine Sonden-Rücklauf-temperatur T_{RLO} von -3 °C . Dieser Wert kann als Sondenrücklauf-temperatur im Referenzfall angesehen werden. Eine Ertragsverbesserung sollte sich somit auf diesen Norm-Auslegungspunkt beziehen.

Die Erhöhung der Sonden-Rücklauf-temperatur kann mit diesem Referenz-Auslegungspunkt relativ geschrieben werden als:

$$\frac{T_m - T_{\text{Rücklauf}}}{T_m - T_{\text{RLO}}} = \frac{\dot{q} \cdot \sum R}{\dot{q}_o \cdot \sum R_o} \quad \text{Gl. 2.7}$$

Nimmt man die Definition der Ertragsverbesserung aus Gl. 2.3

$$\frac{\dot{q} - \dot{q}_o}{\dot{q}_o} = \text{Ertragsverbesserung} \quad \text{Gl. 2.8}$$

so kann Gl. 2.7 auch geschrieben werden als

$$\frac{T_m - T_{\text{Rücklauf}}}{T_m - T_{\text{RLO}}} = \left(\frac{\dot{q} - \dot{q}_o}{\dot{q}_o} + 1 \right) \cdot \frac{\sum R}{\sum R_o} = \left(\frac{\dot{q} - \dot{q}_o}{\dot{q}_o} + 1 \right) \cdot \frac{\sum R}{\sum R_o} \quad \text{Gl. 2.9}$$

2.4 Beispiel Erhöhung Sondenrücklauf-temperatur mit Thermozyement

Es soll nachfolgend die höhere Rücklauf-temperatur dank Thermozyement, verglichen mit einer Standard-Zement-Bentonit-Hinterfüllung, berechnet werden, dies am Beispiel aus Kapitel 2.2. Sondenlänge und Sondenbelastung sollen dabei konstant bleiben ($q = q_o$).

$$\frac{T_m - T_{\text{Rücklauf}}}{T_m - T_{\text{RLO}}} = \left(\frac{\dot{q} - \dot{q}_o}{\dot{q}_o} + 1 \right) \cdot \frac{\sum R}{\sum R_o} = \frac{\sum R}{\sum R_o} = \frac{0.428\text{ Km/W}}{0.493\text{ Km/W}} = \underline{\underline{0.87}} \quad \text{Gl. 2.10}$$

Dies bedeutet also, dass sich bei diesem Beispiel die Differenz der Sondenrücklauf-temperatur zur unbeflussten, mittleren Erdreich-temperatur um 13% reduziert.

Analog zur Verbesserung der Sonden-hinterfüllung lassen sich mit der Gl. 2.9 alle relevanten Einflüsse auf die Sondenrücklauf-temperatur berechnen. Am Beispiel der verbesserten Hinterfüllung der Sonden sollte das allgemeine Berechnungsmodell erläutert werden. Selbstverständlich wäre man ganz einfach und direkt mit der Gl. 1.46 auf das gleiche Resultat gekommen:

$$\Delta T_{\text{Rücklauf}} = (R_g + R_b + R_m + R_f) \cdot \dot{q} - (R_{go} + R_{bo} + R_{mo} + R_{fo}) \cdot \dot{q}_o \quad \text{Gl. 2.11}$$

Im Beispiel aus Kapitel 2.2 ergibt sich damit durch die verbesserte Hinterfüllung die folgende Erhöhung der Sondenrücklauf-temperatur:

$$\Delta T_{\text{Rücklauf}} = \Delta R \cdot \dot{q} = (R_{bo} + R_{mo} - R_b - R_m) \cdot \dot{q} = (0.065\text{ Km/W}) \cdot 40\text{ W/m} = 2.6\text{ K} \quad \text{Gl. 2.12}$$

3 Symbolverzeichnis

3.1 Lateinische Symbole

a	Temperaturleitfähigkeit	[m ² /s]
b	Exzentrizität bei Doppel – U – Sonden	[-]
B	Sondenabstand verschiedener Erdwärmesonden	[m]
B_u	Rohrabstand des hinaufströmenden zum hinunterströmenden Fluid (shank spacing)	[m]
cp_{Sole}	spez. Wärmekapazität des Sondenfluids	[J/(kgK)]
D_i	Innendurchmesser der Sondenrohre	[m]
$DimAxi$	Anzahl Rechenknoten in axialer Richtung	[-]
$DimRad$	Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung	[-]
Es	dimensionslose Zeit von Eskilson	[-]
f	Gitterfaktor für das Rechengitter in radialer Richtung	[-]
g	dimensionslose Temperatursprungantwort der Erde nach Eskilson	[-]
H	Erdwärmesondenlänge, Bohrtiefe	[m]
H_o	Erdwärmesondenlänge im Referenzfall / Auslegungsfall	[m]
\dot{m}	Massenstrom, Sondendurchsatz	[kg/s]
m	Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung (=DimRad)	[-]
n	Anzahl Sonden	[-]
Nu	Nusseltzahl	[-]
Pr	Prandtlzahl	[-]
Δp	Druckabfall	[Pa]
\dot{q}	Spezifische Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonde pro Länge Q/H/n	[W/m]
\dot{q}_o	Spezifische Wärmeentzugsleistung im Referenzfall / bei Auslegung	[W/m]
Δq_i	Wärmeverlust vom hinaufströmenden ans hinunterströmende Fluid	[W/m]
\dot{Q}	Leistung	[W]
\dot{Q}_V	Verdampfer-Leistung der Wärmepumpe / Entzugsleistung aus Sonde	[W]
\dot{Q}_{Vo}	Entzugsleistung aus Sonde im Referenzfall / Auslegungsfall	[W]
Re	Reynoldszahl	[-]
r_o	Innenradius des Sondenrohres	[m]
r_s	Aussenradius des Sondenrohrs	[m]
r_i	Innenradius des inneren Koaxialrohrs	[m]
r_a	Aussenradius des inneren Koaxialrohrs	[m]
r_1	Bohrradius	[m]
r_b	radialer Abstand von der Sondenachse (Variable)	[m]
R_α	Wärmeübergangswiderstand (vom Fluid zum Sondenrohr)	[Km/W]
R_a	interner Sondenwiderstand (von hinauf- zu hinabströmendem Fluid)	[Km/W]
R_b	thermischer Bohrlochwiderstand (von Fluid - bis Bohrradius) in Tiefe z	[Km/W]
R_{bo}	thermischer Bohrlochwiderstand im Referenzfall	[Km/W]
R_c	thermischer Sondenwiderstand (von Sondenrohr- bis Bohrradius)	[Km/W]
R_f	thermischer Verbraucherwiderstand, $(T_{Quelle} - \overline{T_f}) / \dot{q}$	[Km/W]
R_{fo}	thermischer Verbraucherwiderstand im Referenzfall	[Km/W]
R_g	thermischer Widerstand des Bodens ($g / 2 / \pi / \lambda_{Earth}$)	[Km/W]
R_{go}	thermischer Widerstand des Bodens im Referenzfall	[Km/W]
R_m	thermischer Transportwiderstand zwischen der Tiefe H/2 und der Oberfläche	[Km/W]
R_{mo}	thermischer Transportwiderstand im Referenzfall	[Km/W]
ΔT_{Grad}	Temperaturgradient im unbeeinflussten Erdreich	[K/m]
$\Delta T_{Rücklauf}$	Erhöhung der Sondenrücklauftemperatur ($T_{Rücklauf} - T_{RLo}$)	[K]

T_b	Bohrlochtemperatur in Tiefe z (auf dem Radius r_1)	[°C]
\overline{T}_b	über die Bohrtiefe gemittelte Bohrlochtemperatur (auf dem Radius r_1)	[°C]
T_f	mittlere Fluidtemperatur in der Tiefe z	[°C]
\overline{T}_f	mittlere Fluidtemperatur, $\frac{1}{2} (T_{Quelle} + T_{Rücklauf})$	[°C]
T_{down}	Temperatur des hinunterströmenden Fluids in der Tiefe z	[°C]
\overline{T}_{Luft}	langjährige Mitteltemperatur der Aussenluft	[°C]
T_m	ungestörte Erdreichmitteltemperatur (in der Tiefe z)	[°C]
T_{mo}	Jahresmitteltemperatur der Erdoberfläche	[°C]
T_{Quelle}	Quellentemperatur (Temperatur des ausströmenden Sondenfluids)	[°C]
$T_{Rücklauf}$	Rücklauftemperatur (Temperatur des einströmenden Sondenfluids)	[°C]
T_{RLo}	Rücklauftemperatur im Referenzfall / Auslegungsfall	[°C]
T_{up}	Temperatur des hinaufströmenden Fluids in der Tiefe z	[°C]
t_s	Sondenzeitkonstante	[s]
v	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
w	Wandstärke des Innenrohrs bei Koaxialsonden ($r_a - r_i$)	[m]
z	Tiefe im Erdreich, von der Erdoberfläche an gerechnet	[m]

3.2 Griechische Symbole

α	Wärmeübergangskoeffizient des Sondenfluids an die Sonde	[W/(m ³ K)]
β	dimensionsloser thermischer Widerstand Sondenrohr bis Fluid	[-]
ξ	dimensionsloser Druckverlustkoeffizient (Rohrreibungszahl, oft auch λ)	[-]
γ	Eulerkonstante, 0.5772..	[-]
ν	kinematische Viskosität der Sondenfüllung	[m ² /s]
λ_{Earth}	Wärmeleitfähigkeit der Erde	[W/(mK)]
λ_{Fill}	Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung	[W/(mK)]
λ_{isol}	Wärmeleitfähigkeit des isolierten Sondenrohrs	[W/(mK)]
λ_s	Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre	[W/(mK)]
λ_w	Wärmeleitfähigkeit des Innenrohrs bei Koaxialsonden	[W/(mK)]
σ	Konduktivitätsparameter der Hinterfüllung	[-]
ΣR	Summe der Sondenwiderstände ($R_g + R_b + R_m + R_f$)	[W/(mK)]
ΣR_o	Summe der Sondenwiderstände im Referenzfall / Auslegungsfall	[W/(mK)]

4 Literaturverzeichnis

- [1] Afjei, Th.; Dott, R., Huber, A.: **Heizen und kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen**. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2007.
- [2] Carslaw, H.S.; Jaeger, J.C.: **Conduction of heat in solids**. 2nd ed., Oxford Univers. Press, London, 1959
- [3] Claesson, J.; Eskilson, P.: **Conductive Heat Extraction by a Deep Borehole. Analytical Studies**. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, 1987
- [4] Eskilson, P.: **Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes**. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1987. ISBN 91-7900-298-6
- [5] Good, J.; Huber, A.; Widmer, P.; Nussbaumer, Th.; Trüssel, D.; Schmid, Ch.: **Gekoppelte Kälte- und Wärmeerzeugung mit Erdwärmesonden. Handbuch zum Planungsvorgehen**. Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2001.
- [6] Hellström, G.: **Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems. Theory**. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, 1991. ISBN 91-628-0290-9
- [7] Huber, A.; Schuler, O.: **Berechnungsmodul für Erdwärmesonden**. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung. Bundesamt für Energie, Bern, 1997.
- [8] Huber, A.; Pahud, D.: **Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie?** Forschungsprogramm Geothermie. Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 1999.
- [9] Huber, A.; Pahud, D.: **Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder**. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 1999.
- [10] Huber, A.; Ochs, M.: **Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen Mit der Software „EWSDruck“ Vers. 2.0**. Bundesamt für Energie, Bern, 2007.
- [11] Huber, A.: **Programm EWS. Berechnung von Erdwärmesonden. Benutzerhandbuch, Version 4.0**. Huber Energietechnik AG, Zürich, 2009. <http://www.hetag.ch>.
- [12] Huber, A.: **Erdwärmesonden für Direktheizung. Phase 1: Modellbildung und Simulation**. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2005.
- [13] Huber, A.: **Rechenmethode WPesti: Modellbeschreibung**. Verein MINERGIE® (<http://www.minergie.ch>), AWEL (<http://www.energie.zh.ch>), FWS (<http://www.fws.ch>). Zürich, 2006.
- [14] Huber, A.: **Planung von gekoppelten Kälte- und Wärme-Erzeugungsanlagen mit Erdwärmesonden**. Weiterbildungskurs 235, Hochschule für Technik+Architektur, Luzern, 2006
- [15] Leu, W.; Keller, G.; Mégel, Th.; Schärli, U.; Rybach, L.: **Programm SwEWS-99. Berechnungsprogramm für geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (0-500m)**. Schlussbericht. Bundesamt für Energie, Bern, 1999.
- [16] Leu, W.; Keller, G.; Matter, A.; Schärli, U.; Rybach, L.: **Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich 0-500m)**. Bundesamt für Energie, Bern, 1999
- [17] Norm SIA 384/6: **Erdwärmesonden**, 2009, SIA, Zürich
- [18] Merker, G.: **Konvektive Wärmeübertragung**. Springer-Verlag, 1987
- [19] Werner, A.; Bigler, R.; Niederhauser, A. et. al.: **Grundlagen für die Nutzung von Wärme aus Boden und Grundwasser im Kanton Bern. Thermoprogramm Erdwärmesonden, Burgdorf**. Schlussbericht. Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kt. Bern (WEA). 1996.