

Schlussbericht

Programm **Geothermie**, BFE-Vertrag 60'137, Projektnummer 20'536

Lebensdauer von Erdwärmesonden in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung

Zusammenfassung :

Bei neuen EWS-Installationen geht die Tendenz eindeutig zu grösseren Sondenlängen hin. Sonden > 200 m sind bereits keine Seltenheit. In solchen Tiefen ist die Druckbelastung beträchtlich, was besondere Anforderungen an die Dichtigkeit des Zirkulationssystem stellt und auch die Lebensdauer der Anlage beeinflussen kann. An einem kommerziell erstellten EWS-System (EWS-Länge 260 m) werden gezielte Begleitmessungen durchgeführt und ausgewertet.

Bei vielen Anlagen wird die Erdwärmesonde überlastet. Bei einer Überlastung gefriert die Hinterfüllung um die EWS ein. Dabei entstehen hohe Drücke, die je nach Bodenbeschaffenheit das Erdreich verdrängen können oder die EWS abklemmen. Bei einer kurzen EWS (Länge 70 m) wird der Druck über die Gefrierzyklen erfasst. Dabei hat sich die Schrumpfung der Hinterfüllung als gering erwiesen. Die Gefrier-Tau Zyklen hingegen erzeugen eine hohe mechanische Belastung der EWS, was zu einer Lebensdauerreduktion führt und im Extremfall zum Versagen der Anlage gipfeln kann.

Anhand einer Diplomarbeit durch M. Salton an der Abteilung für Erdwissenschaften sind die theoretischen Randbedingungen geschaffen worden, die Gefrierzyklen mit entsprechender Temperatur und Dauer zu fahren. Zusätzlich ist in der Arbeit das Programm FRACTure mit dem Programm EED verglichen worden. Als Basis dient eine auf dem Versuchsgelände gebohrte 265 m tiefe Erdwärmesonde.

Dauer des Projektes : 1.3.97 bis 1.10.99 mit Verlängerung auf 15.12.01

Beitragsempfänger : E. Rohner, Arnegg

Berichterstatter : E. Rohner jun

Prof. Dr. L. Rybach

Adresse: Stationsstrasse 24
9212 Arnegg

ETH Zürich
Institut für Geophysik
8093 Zürich

Telefon: 071/380 05 50

01 / 633 26 05

Fax: 071/380 05 54

01 / 633 10 65

Berichterstatter : E. Rohner

Programm
Geothermie
BFE-Vertrag 60'137

Lebensdauer von Erdwärmesonden in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung

ausgearbeitet durch
Herr E. Rohner 9212 Arnegg
Prof. Dr. L. Rybach, Herr M. Salton, Institut für Geophysik ETHZ, 8093
Zürich

im Auftrag des
Bundesamtes für Energiewirtschaft

Dezember 2001

Schlussbericht

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel der Arbeit	3
2	Untersuchung verschiedener EWS-Hinterfüllungen	3
2.1	Probenherstellung	3
2.2	Temperaturstabilität	4
2.3	Wärmeleitfähigkeitsmessungen	5
2.4	Wärmeleitfähigkeitsmessung im wassergesättigten Zustand - Vergleich der Werte vor und nach dem Einfrieren der Proben	5
2.5	Wärmekapazitätsbestimmung	6
2.6	Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit	6
3	Geologie und Ausbau der Bohrungen	7
3.1	Geologie der beiden Bohrungen	7
3.1.1	Bohrung 1 : 70 m ø 115 mm für EWS 4 x ø 32 mm	7
3.1.2	Bohrung 2 : 265 m ø 135 mm für EWS 4 x ø 40 mm	7
3.2	Bohrlochausbau	9
3.2.1	Bohrloch 70 m ø 194/115mm für ø 32 mm EWS	9
3.2.2	Bohrloch 265 m ø 194/133 mm für ø 40 mm EWS	10
3.3	Ausmessung der Bohrung 1 (70m) mit Sinle Shot Bohrloch Vermessungsinstrument.	11
4	Simulationsvergleich FRACTure und EED	13
4.1	Aufgabenstellung (Diplomarbeit M. Salton)	13
4.2	Gittersensitivität (Zusammenfassung Kapitel 5.2.7 Diplomarbeit)	13
4.3	Simulation Gefrierzyklus	14
4.4	Simulation mit vorgegebenem Lastprofil	16
5	Aufbau der Anlage	18
6	Druckverhältnisse am Sondenfuss	19
6.1	Differenzdruck über die Zeit	19
6.2	Beulen der EWS bei zu grossem Aussendruck beim Injizieren	20
6.3	Differenzdruck bei Schockkühlung	20
7	Temperaturganglinien	21
8	Überlastung der 70 m EWS	22
8.1	Legende zu den Diagrammen	22
8.2	Belastung Beginn	23
8.3	Eisbildung	25
8.4	Auftauphase	26
9	Zusammenfassung und Ausblick	27
10	Anhang (Literatur-, Tabellen- und Abbildungsverzeichnis)	29

1 Ziel der Arbeit

Bei neuen EWS-Installationen geht die Tendenz eindeutig zu grösseren Sondenlängen hin. Sonden > 200 m sind bereits keine Seltenheit. In solchen Tiefen ist die Druckbelastung beträchtlich, was besondere Anforderungen an die Dichtigkeit des Zirkulationssystem stellt und auch die Lebensdauer der Anlage beeinflussen kann. An einem kommerziell erstellten EWS-System (EWS-Länge 265 m) sollen gezielte Begleitmessungen durchgeführt und ausgewertet werden. Dabei ist eine Messdauer von zwei Heizsaisons vorgesehen.

Bei vielen Anlagen wird die Erdwärmesonde überlastet, was zum Teil den verbesserten Wärmepumpen zugeschrieben werden kann. Bei einer Überlastung gefriert die Hinterfüllung um die EWS ein. Dabei wird vermutet, dass sie durch die Gefrier-Tau Zyklen schrumpft. Auch dies beeinflusst über die Druckverhältnisse die Lebensdauer der EWS. Durch das Absacken der Hinterfüllung wird die Leistungsfähigkeit der EWS stark reduziert und kann im Extremfall zum Versagen der Anlage führen.

Mit der gleichen Messung soll an einer kurzen EWS (Länge 70 m) der Druck über die Zyklen erfasst werden. Durch das Abschalten der langen EWS kann die Kurze mit maximal über 100 W belastet werden. Damit können auch die schlimmsten Fälle der Praxis nachgebildet werden. Mit dieser hohen Belastung kann auch der Effekt des Absackens der Bentonit-Zement Hinterfüllung besser untersucht werden. Zusätzlich werden die Resultate der kurzen EWS in Relation zur tiefen EWS gesetzt (Vor dem ersten Gefrierzyklus).

2 Untersuchung verschiedener EWS-Hinterfüllungen

Vier verschiedene Hinterfüllungen wurden durch Herr Salton am geophysikalischen Institut der ETHZ hergestellt und auf folgende Eigenschaften hin untersucht:

- Wärmeleitfähigkeit (vor und nach dem Gefrieren)
- Wärmekapazität
- Temperaturstabilität
- Wasserdurchlässigkeit

2.1 Probenherstellung

Zu untersuchen sind 4 verschiedene Mischungsverhältnisse a, b, c und d, wie diese in der folgenden Tabelle 1 beschrieben sind:

Bezeichnung	Inhalt und Mischungsverhältnis	Bemerkung
a2	160g Bentonit, 320g Zement, 1408g Wasser	Standarthinterfüllung
b2	160g Opalit, 320g Zement, 1408g Wasser	Hinterfüllung, wie sie von der Firma Frutiger verwendet wird
c2	160g Bentonit, 960g Zement, 1408g Wasser	mittelschwere Hinterfüllung bei schwach drückenden Artesern
d2	160g Bentonit, 960g Zement, 640g Baryt, 1408g Wasser	schwere Hinterfüllung bei stark drückenden Artesern

Tabelle 1: Mischungsverhältnisse der zu untersuchenden Proben (Vorgabe)

Um das bestmögliche Ergebnis der Mischungen zu erhalten wurden verschiedene Verfahren für die Probenherstellung am geophysikalischen Institut eingesetzt. Schlussendlich hat sich folgendes Vorgehen als befriedigend erwiesen.

Zuerst wurde das Wasser abgemessen, dann Bentonit bzw. Opalit mit einem Mixer ca. 10 Minuten eingerührt. Bei der Probe d2 wurde danach Baryt dazugemischt und wieder ca. 10 Minute gerührt. Bei allen Proben wurde Zement zuletzt dazugegeben und wiederum ca. 10 Minuten mit dem Mixer umgerührt. Die Mischungen wurden je in 2 PE-Gefässe verschiedener Grösse gegossen. Bei den Proben a2, c2 und d2 wurde diesmal ein homogenes Gemisch ohne Wasserabscheidung erreicht. Bei der Probe b2 wurde wieder - wie in der ersten Probenserie bei der Probe b1 - der Grossteil des Wassers ausgeschieden, was offensichtlich mit dem Opalit in Zusammenhang steht. Trotz der Wasserabscheidung verfestigte sich das Gemisch darunter problemlos. Die Abscheidung beträgt 40-45%. Damit kann vermutet werden, dass es in den Bohrlöchern zu Teilsedimentationen kommen kann, d.h. das Bohrloch ist stellenweise nur mit Wasser gefüllt. Je nach Grundwasserspiegel kann sich das Wasser später auch verflüchtigen. Damit würde die EWS teilweise im Bohrloch in der Luft stehen. Stellen sich diese Verhältnisse ein, ist weder die Abdichtung, noch der Wärmeübergang gewährleistet.

Da die Proben ziemlich instabil sind und bei den Untersuchungen leicht zerbrechen, mussten für die folgenden Untersuchungen einige weitere Probenserien analog zur zweiten hergestellt werden. Die Bezeichnung der Proben wurde analog weitergeführt.

Bsp.: Probe c3 = Probe mit Mischungsverhältnis c aus der dritten Probenserie.

2.2 Temperaturstabilität

Das Gefrieren der Proben zog bei den Mischungsverhältnissen b,c und d keine wesentlichen Veränderungen mit sich. Bei der Mischung a jedoch, welche ohnehin schon sehr instabil ist, konnte nach dem Einfrieren eine merkbare Verkleinerung (ca. 2%) des Volumens (Länge 11 cm zu 10.8 cm) festgestellt werden. Ausserdem wurde die Mischung noch instabiler, d. h. sie zerfiel beinahe in der Hand.

Diese Beobachtung deckt sich auch mit Erfahrungen aus der Praxis. Wird eine EWS überlastet, so stellt man ein Absinken der Hinterfüllung fest durch den Volumenschwund fest. Dieser Effekt wird noch durch die instabil werdende Hinterfüllung und die Pumpwirkung der Gefrier-/Auftauzyklen verstärkt, d.h. die instabil werdende Hinterfüllung kann durch die Druckwirkung der Eisbildung in Porenräume und Lo-

ckerschichten verpresst werden. Dieser Effekt wird bei der kurzen EWS (70 m) genauer untersucht. Für die Hinterfüllung dieser EWS wurde die Mischung a eingesetzt.

2.3 Wärmeleitfähigkeitsmessungen

Die Wärmeleitfähigkeitsmessungen wurden mit einer HLQ-Sonde durchgeführt. Untersucht wurde vorerst die zweite Probenserie nach ca. einer Woche Abbindzeit. Für jede Probe wurden jeweils zweimal sieben Einzelwerte ermittelt, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen. Die Durchschnittswerte (auf zwei Stellen nach dem Komma gerundet) sind in der untenstehenden Tabelle 2 ersichtlich.

Probe	Durchschnittliche WLF der 1. Messreihe [W/mK]	Durchschnittliche WLF der 1. Messreihe [W/mK]
a2	0.81	0.81
b3 ¹⁾	0.93	0.95
c2	0.88	0.88
d2	0.90	0.90

Tabelle 2 : Wärmeleitfähigkeiten

¹⁾ Sedimentationsteil der Mischung, siehe Kapitel 2.1 Probenherstellung

Der hohe Zementanteil, resp. Barytanteil hat zu keiner Nennenswerten Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit geführt.

2.4 Wärmeleitfähigkeitsmessung im wassergesättigten Zustand - Vergleich der Werte vor und nach dem Einfrieren der Proben

Da die Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllungen stark von ihrem Wassergehalt abhängig ist, dieser jedoch nach dem Einfüllen des Materials in das Bohrloch nicht genau bekannt ist, scheint es vernünftig, die Proben im wassergesättigten Zustand zu untersuchen. Weiter soll abgeklärt werden, ob sich die Wärmeleitfähigkeit durch das Einfrieren der Proben stark verändert. Aus diesem Grund wurden an der fünften Probenserie Messungen vor und nach dem Gefrieren durchgeführt. Die Durchschnittswerte (auf zwei Stellen nach dem Komma gerundet) dieser Untersuchungen sind in der Tabelle 3 ersichtlich.

Probe	Durchschnittliche WLF der 1. Messreihe [W/mK]	Durchschnittliche WLF der 1. Messreihe [W/mK]
a5	0.84	0.85
b5 ¹⁾	0.90	0.92
c5	0.93	0.92
d5	0.95	0.97

Tabelle 3 : Wärmeleitfähigkeiten im wassergesättigten Zustand - Werte vor und nach dem Gefrieren

¹⁾ Sedimentationsteil der Mischung, siehe Kapitel 2.1 Probenherstellung

Wie in der Tabelle 3 ersichtlich ist, hat das Einfrieren der Proben keinen wesentlichen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeiten. Es ist sogar - mit Ausnahme der Mischung c - eine leichte Zunahme zu beobachten.

2.5 Wärmekapazitätsbestimmung

Zur Bestimmung der Wärmekapazitäten wurden die Proben zerkleinert und gemahlen. Anschliessend erfolgte eine 6-stündige Trocknung im Ofen bei 75°C. Die Durchschnittswerte der Wärmekapazitäten (auf zwei Stellen nach dem Komma gerundet) sind in der untenstehenden Tabelle 4 ersichtlich.

Probe	Probe Durchschnittliche Wärmekapazität [J/gK]
a2	1.55
b2	0.47
c2	0.96
d2	0.61

Tabelle 4 : Wärmekapazitäten trocken

Da die Hinterfüllung in der Praxis kaum trocknet, scheint es vernünftig, die Proben im wassergesättigten Zustand zu untersuchen. Zurzeit ist jedoch erst die Mischung a bestimmt worden (Tabelle 5).

Probe	Probe Durchschnittliche Wärmekapazität [J/gK]
a7	3.04
b7	noch nicht gemessen
c7	noch nicht gemessen
d7	noch nicht gemessen

Tabelle 5 : Wärmekapazitäten nass

Der hohe Wert der Mischung a wird durch den hohen Wassergehalt von 70% verursacht.)

2.6 Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit

Im Laufe der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Wasserdurchlässigkeit aller Mischungsverhältnisse extrem klein ist. Somit ist es vernünftiger die Diffusion von Wasser nach dem 2. Fick'schen Gesetz zu bestimmen. Dazu wurden die Hinterfüllungen in transparente zylindrische Gefässe gegossen. Nach der Verfestigung (jedoch wassergesättigt) wurde gefärbtes Wasser dazugegeben. Somit konnte die Diffusion des Wassers in die Probe hinein sichtbar gemacht werden.

Die Diffusionskoeffizienten sind in der untenstehenden Tabelle 6 ersichtlich. Es handelt sich hierbei lediglich um eine Abschätzung der maximalen Diffusion.

Probe	Diffusion [cm ² /s]
a6	5×10^{-8}
b6 ¹⁾	3×10^{-8}
c6	3×10^{-8}
d6	3×10^{-8}

Tabelle 6 : Diffusionskoeffizienten

3 Geologie und Ausbau der Bohrungen

3.1 Geologie der beiden Bohrungen

Durch Dr. U. Schärli und M. Salton sind am Geophysikalischen Institut der ETHZ folgende Werte bestimmt worden :

3.1.1 Bohrung 1 : 70 m ø 115 mm für EWS 4 x ø 32 mm

Tiefe [m]	Beschreibung der Cuttings	Schicht Nr.	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Modellschicht
0-2	sandiger Silt, braun	1	2.60 ¹⁾	A
2-10	siltiger-toniger Kies mit viel Sand, beige	2	2.60 ¹⁾	
10-14	Konglomerat, grau	3	2.60 ¹⁾	
14-31	Konglomerat mit teilweise viel Sand, beige-grau	4	2.84	B
31-40	Sandstein mit Konglomerat, beige-grau	5	2.21	C
40-42	Sandstein/Siltstein, wenig Konglomerat, beige	6	2.02	D
42-59	Schlamm-Siltstein, teilweise sandig, beige	7	1.94	E
59-62	Sandstein-Siltstein	8	2.02	F
62-64	Sandstein	9	2.60 ¹⁾	G
64-65	Schlamm-Siltstein/Siltstein, beige	10	1.94	H
65-70	Konglomerat mit Sandstein	11	3.08	I
70-	„obere Süsswassermolasse“, homogen	12	2.60	J

Tabelle 7 : Geologie Bohrung 1: 70 m ø 115 mm

1) Für diese Schichten konnten mittels des Messgerätes TK04 keine Resultate ermittelt werden. Für diese Schichten und für den Tiefenbereich unter 70m wurde eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von 2.6 W/mK (Leu et al. 1999) eingesetzt.

3.1.2 Bohrung 2 : 265 m ø 135 mm für EWS 4 x ø 40 mm

Tiefe [m]	Beschreibung der Cuttings (kursiv → Bohrmeisterangaben /Th. Hosalla, Grundtag AG)	Schicht Nr.	Wärmeleitfähigkeit [W/mK] ²⁾	Modellschicht ²⁾
0-2	<i>Bohrmeisterangabe Kies-sandig erdflecht</i>			
2-12	<i>Bohrmeisterangabe Kies-sandig wasserführend</i>			
0-12	schwach siltiger-toniger Kies mit reichlich Sand, Geröll graubunt	1	2.60 ¹⁾	A
12-16	schwach siltiger Kies mit wenig Sand, graubunt (<i>Bohrmeisterangabe Konglomerat</i>)	2	2.60 ¹⁾	
16-17	siltiger Kies mit reichlich Sand, graubunt (<i>Bohrmeisterangabe Konglomerat</i>)	3	2.60 ¹⁾	
17-36	Konglomerat grauschwarz/braungelb, hart	4	2.84	B
28-33	<i>Bohrmeisterangabe Konglomerat gebräch, wasserführend</i>			
36-40	Mergel, sandig, beige-gelb, weich	5	2.21	C
40-46	Feinsandstein/Mergel grau/braungelb	6	2.02	D

46-49	Feinsandstein/Mergel grau/beige-braungelb			
49-65	Mergel siltig sandig, grau-beige-braungelb	7	1.94	E
65-70	Feinsandstein, hellbraun-grau-rotviolett, hart	9	2.60 ¹⁾	G
70-74	Schlamm-Siltstein/Siltstein, grau/beige	10	1.94	H
74-81	Konglomerat schwarzbunt, sehr hart	11	3.08	I
81-84	Mergel, siltig, hellgrau-braungelb	12	2.60	J
84-88	Mittelsandstein, silbergrau mit Mergellagen hellbraun, mittelhart			
88-91	Konglomerat schwarzbunt, sehr hart			
91-94	Sandstein mergelig, hellgrau, Konglomerat schwarzbunt			
94-97	Mergel siltig, hellgrau-beige			
97-101	Feinsandstein, grau-manganviolett, mittelhart bis hart			
101-105	Feinsandstein grau mittelhart; Mergel beige-braungelb			
105-111	Mergel sandig, hellgrau-hellbraun			
111-118	Mergel, siltig-sandig, hellgrau-hellbraun			
118-121	Konglomerat schwarzbunt, hart			
121-127	Mergel, sandig, grau-schwarz-beige, weich bis hart			
127-133	Siltstein, grau, u.T gelbbraun			
133-140	Feinsandstein grau hellbraun, hart			
140-143	Feinsandstein, graugrün, rotviolett			
143-147	Mergel/Siltstein, grau-hellbraun, weich/mittelhart			
147-148	Feinsandstein hellgrau-rotviolett, hart			
148-150	Feinsandstein, rotviolett, hart			
150-157	Feinsandstein, hellgrau-rotviolett, hart			
157-161	Feinsandstein, rotviolett, hart			
161-164	Konglomerat, schwarz-grau-rotviolett, hart			
164-165	Sandstein, mergelig, ziegelrot			
165-168	Sandstein, hellbraun-ziegelrot, weich			
168-171	Sandstein, hellbraun-ziegelrot-schwarz, hart			
171-181	Konglomerat schwarzbunt, hart			
181-188	Feinsandstein, siltig grüngrau, mittel bis hart			
188-199	Mittelsandstein, grau-graugrün, mittelhart			
199-203	Konglomerat schwarzbunt, hart			
203-215	Konglomerat mit Sandstein schwarzbunt, hart			
215-224	Konglomerat schwarzbunt, hart			
224-227	Feinsandstein, ziegelrot-beige, hart			
227-229	Mittelsandstein, ziegelrot-hellbraun, mittelhart bis hart			
229-237	Mittelsandstein, ziegelrot mit Konglomerat,			

	schwarzbunt, hart
235-238	Bohrmeisterangabe <i>wasserführende Schicht</i>
237-239	Feinsandstein, hellgrau, hart
239-240	Feinsandstein, ziegelrot-beige-gelb, hart
240-247	Mittelsandstein, grüngrau, z.T. braungelb, hart
247-254	Konglomerat schwarzbunt, hart
254-258	Mittelsandstein, grau-grün, mittelhart
258-264	Mittelsandstein, ziegelrot-beige, mittelhart
264-265	Konglomerat schwarzbunt, hart

Tabelle 8 : Geologie Bohrung 2: 265 m ø 135 mm

2) Für die Simulation wurden die Schichten der Bohrung 1 (70 m) verwendet. Für die Bohrung 2 sind noch keine Wärmeleitfähigkeitsmessungen gemacht worden.

3.2 Bohrlochausbau

3.2.1 Bohrloch 70 m ø 194/115mm für ø 32 mm EWS

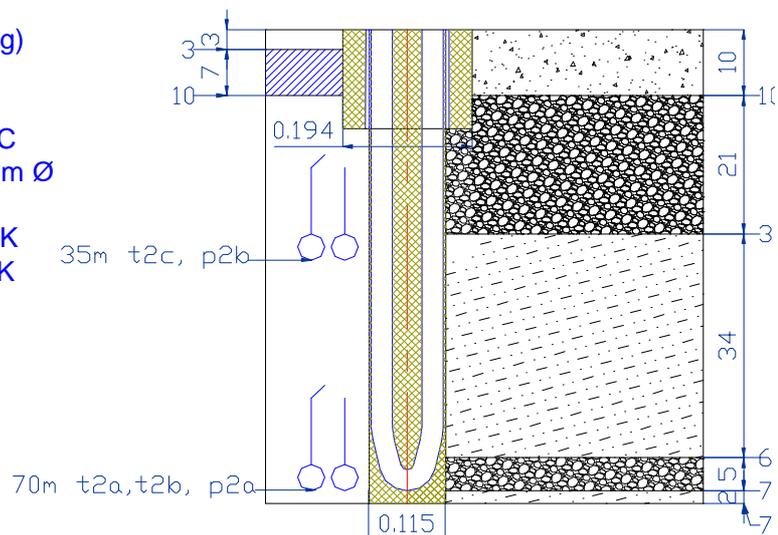
Bohrung bis 15 m mit 7 5/8"
Spülbohrung (Bentonit Spülung)
Ausbau mit 159 mm Casing,
temporär
anschliessend Ausbau mit PVC
Filterrohren Schlitzweite 1.5 mm Ø
125 x 115 mm
Wärmeleitfähigkeit : 0.27 W/mK
Wärmekapazität : 0.86 KJ/Kg/K
spez. Gewicht : 1400 kg/m³

Bohrung ab 15 m bis 72 m
mit Imlochhammer 4",
Schlagteil Ø 115 mm

Instrumentierung :
Temperatur und Druck an
EWS-Wand
35 m t2c und p2b
70 m t2a,t2b und p2a

Ausbau mit HAKA Gerodur
Erdwärmesonde
Dimension
Länge : 70 m
Durchmesser 4 x 32 x 2.9 mm
Wärmeleitfähigkeit : 0.42 W/mK
Wärmekapazität : 1.7 kJ/kg/K bei 10°C
spez. Gewicht : 1005 kg/m³ bei 20°C

Injektion Zement-Bentonit
Mischungsverhältnis 100 kg Bentonit, 200 kg
Zement, 880 kg Wasser --> Probe a5
Wärmeleitfähigkeit : 0.84 W/mK
Wärmekapazität : 3.04 kJ/kg/K



Legende :

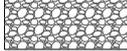
-  wasserführende Schicht
-  Bentonit - Zement Injektion
-  sandiger Kies
-  Konglomerat
-  Mergel - Sandsteinschichten

Abbildung 1 Ausbau 70 m Bohrung

3.2.2 Bohrloch 265 m Ø 194/133 mm für Ø 40 mm EWS

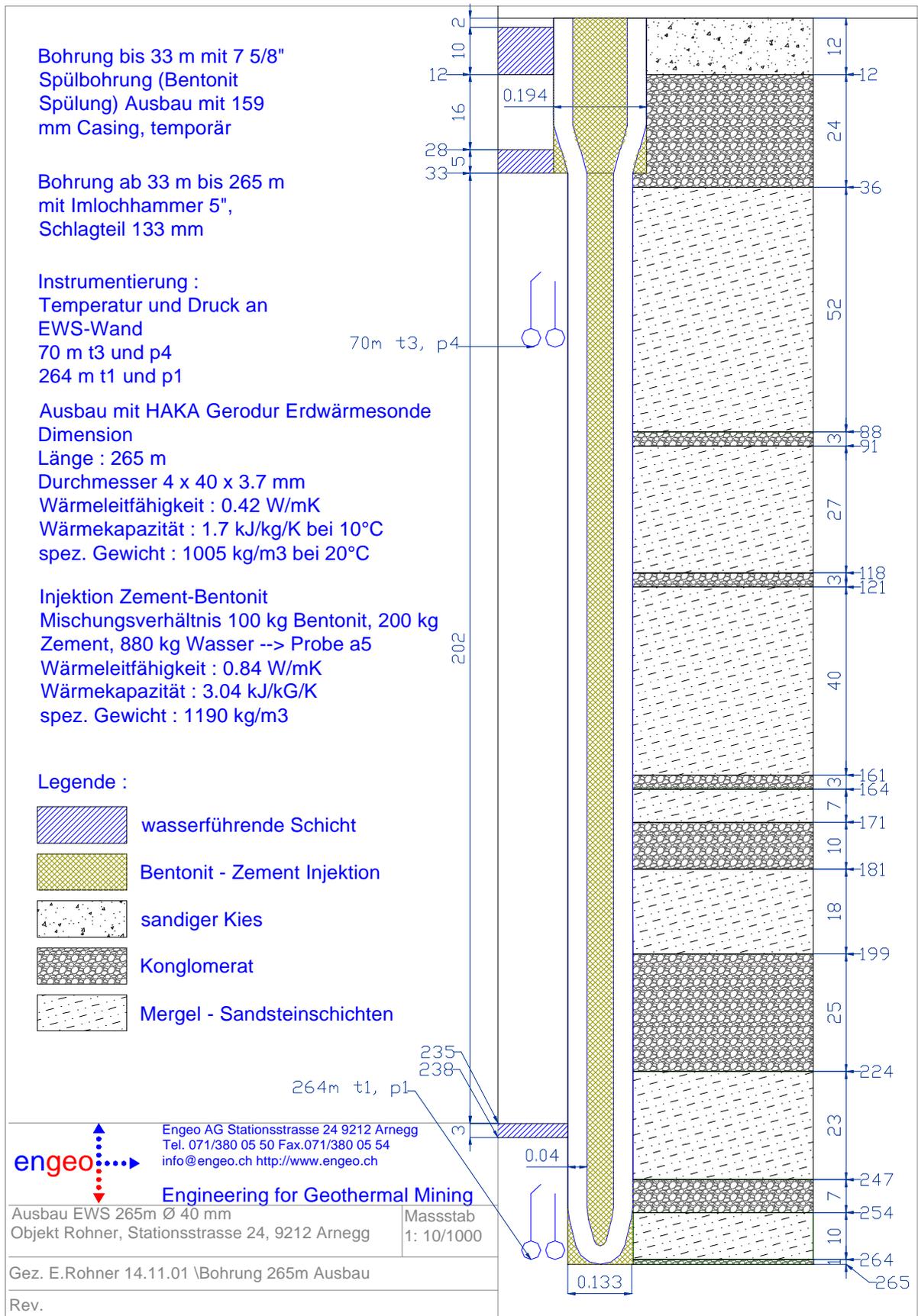


Abbildung 2 Ausbau 265 m Bohrung

3.3 Ausmessung der Bohrung 1 (70m) mit Sinle Shot Bohrloch Vermessungsinstrument.

Mit einem von der Firma Foralith AG zu Verfügung gestellten Single Shot Bohrloch Vermessungsinstrument ist vor dem Einbringen der Erdwärmesonde das Bohrloch auf Azimut und Neigung vermessen worden. Für die Messung ist das Messgerät auf 3 verschiedene Horizonte in das Bohrloch eingebracht worden. Die Resultate sind in der untenstehenden Tabelle ersichtlich.

Bohrlochverlauf nach Minimum Curvature						Messung mit		Single Shot			DLS
Mess-	Bohr-	Verti-	Tie-	Neigung	Azimut	Koor-		Gesamt-	Proj.	nach	
punkt	tiefe	kal-	fen-	(gemes-	(gemes-	+N/-	+E/-	Azi-	Abw.		
Nr.	m	tiefe	verlust	sen)	sen)	S	W	mut	Betrag	0.00	°/10
		m	M	°	°	m	m	°	m		m
1	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
2	22.50	22.50	0.00	0.60	32.00	0.10	0.06	31.95	0.12	0.10	0.27
3	52.50	52.50	0.00	1.30	-6.00	0.57	0.11	10.88	0.58	0.57	0.30
4	69.00	68.99	0.01	2.50	11.00	1.11	0.16	8.14	1.12	1.11	0.80

Tabelle 9 : Vermessung Bohrloch 70 m

Wie bei solchen Messungen vielfach festgestellt verläuft die Bohrung auf eine Seite. Üblicherweise stellt sich der Hammer gegen den Schichtverlauf auf, d.h. er versucht die Schicht rechtwinklig zu durchfahren. Von der um 13 m westlich liegenden 265m tiefen Bohrung steigen die Schichten gegen Osten um 5 bis 9m an. Aufgrund des Bohrverlaufes müssten die Schichten gegen Süden stark absinken

Der Bohrverlauf, wie er mit der fett ausgezogenen Linie auf der nebenstehenden 3D Zeichnung dargestellt wird, ist mit einer maximalen Abweichung von 1.11 auf 70 Meter eine sehr vertikale Bohrung.

Bei der Bohrung mit Imlochhammer wurden keine Stabilisatoren eingesetzt. Der Bohrmeister der Grundag AG achtete jedoch darauf, dass der Imlochhammer (DTH) nur mit geringem Andruck auf dem Gebirge aufstand (ca. max. 500 kg bei 4 ½“ DTH). Dadurch wird ein recht vertikales Loch mit geringem Aufwand erreicht.

Bei der 265 Meter Bohrung musste aus logistischen Gründen auf die Ausmessung des Bohrloches verzichtet werden. Diese Bohrung wurde mit 108-er Gestänge und einem 5“ Hammer in derselben Art und Weise wie die 4 ½“ 70 m Bohrung abgeteuft. Es kann angenommen werden, dass die Vertikalität eher besser sein sollte. Wird die 70 m Bohrung mit einem Polynom 2-ten Grades extrapoliert, so kann angenommen werden, dass die 265 Meter Bohrung eine Abweichung um 10 bis 20 Meter aus der Vertikalen bis Sole erfahren hat.

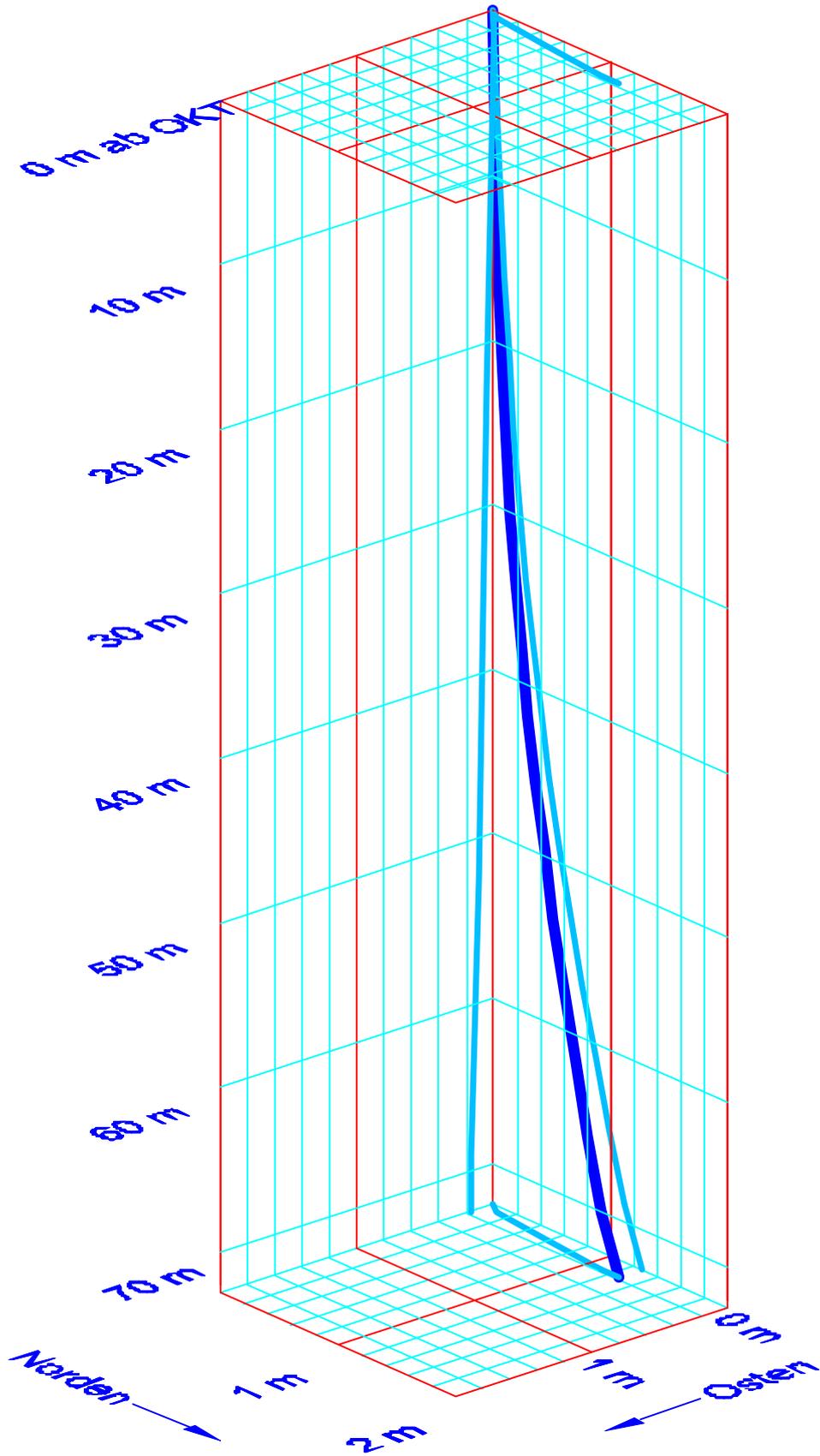


Abbildung 3 3 D Ansicht Bohrloch 70m, X-Y Koordinaten 10 fach überzeichnet

4 Simulationsvergleich FRACTure und EED

4.1 Aufgabenstellung (Diplomarbeit M. Salton)

Bei der 70 m-Sonde soll eine Überlastung simuliert werden, d.h. die Sonde soll so stark belastet werden, bis die Hinterfüllung gefriert. Nach dem anschliessenden Auftauen, was durch Abschaltung der Belastung erreicht wird, soll die Sonde wiederum zum Einfrieren gebracht werden. Dieser Gefrier- Tau-Zyklus soll mehrfach wiederholt werden. Die Modellrechnung soll die Grundlagen für den Versuch im Feld liefern. Die Zeitdauer und Intensität der Belastung bzw. Dauer der Entlastung sollen ermittelt werden, welche für die gewünschten Effekte nötig sind. Der Zweck dieses Versuches ist, den Einfluss der Gefrier- und Auftauprozesse auf die Hinterfüllung zu untersuchen. Diese kann, wie sich in der Praxis gezeigt hat, an Stabilität und Festigkeit einbüßen und an Volumen verlieren. Dadurch ist ein guter Kontakt zwischen Sonden und Bohrlochwand nicht mehr gewährleistet, was sich auf die Sondenleistung auswirkt. Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll für beide Erdwärmesonden-Anlagen ein FE-Gitter gebaut werden, um mit diesen diverse Modellsimulationen durchführen zu können.

Bei der 265m-Sonde soll eine Modellsimulation gemäss einem vorgegebenen Belastungsprofil durchgeführt werden. Der zu simulierende Zeitraum beträgt 10 Jahre. Die Resultate dieser Modellrechnung sollen mit den Werten verglichen werden, welche Herr Rohner durch eine Berechnung mit dem Programm EED erhalten hat

4.2 Gittersensitivität (Zusammenfassung Kapitel 5.2.7 Diplomarbeit)

Herr Salton hat verschiedene Versuche für die räumliche und zeitliche Diskretisierung im Hinblick auf die Rechenzeitoptimierung in Abhängigkeit der Genauigkeit gemacht. Er ist zum Schluss gekommen, dass ein relative grobes Gitter bei einem Zeitschritt von 100 Sekunden genügend genaue Resultate für die Aufgabenstellung liefert (Rechendifferenz < 0.1 K).

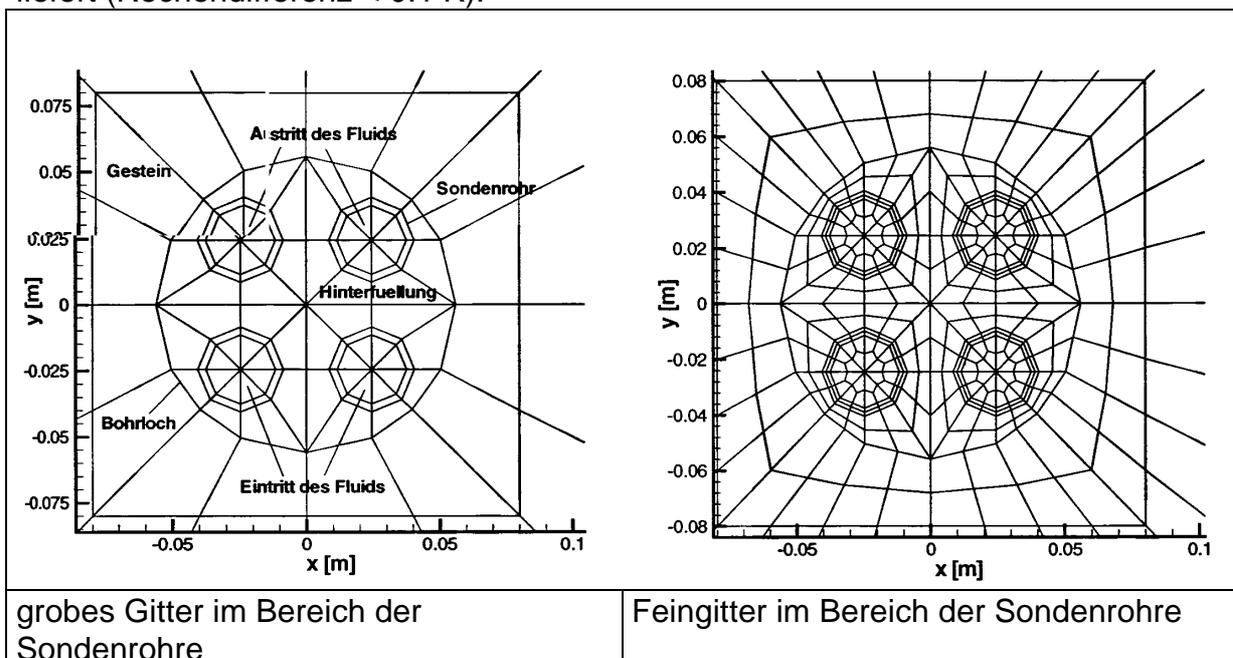


Abbildung 4 Modellgitter um die Erdwärmesonde Bohrung 1: 70 m ø 115 mm

4.3 Simulation Gefrierzyklus

(Kapitel 5.3 Diplomarbeit M. Salton) Mit der kurzen EWS 2 (70 rn) soll ein Unterkühlungsversuch durchgeführt werden. Die Sonde soll so stark überlastet werden, dass die gesamte Hinterfüllung einfriert. Danach wird die Sonde bis zum Auftauen der Hinterfüllung wieder abgeschaltet. Dieser Prozess soll 10mal wiederholt werden, d.h. es sollen 10 Gefrier- bzw. Auftauzyklen durchlaufen werden. Da nicht bekannt

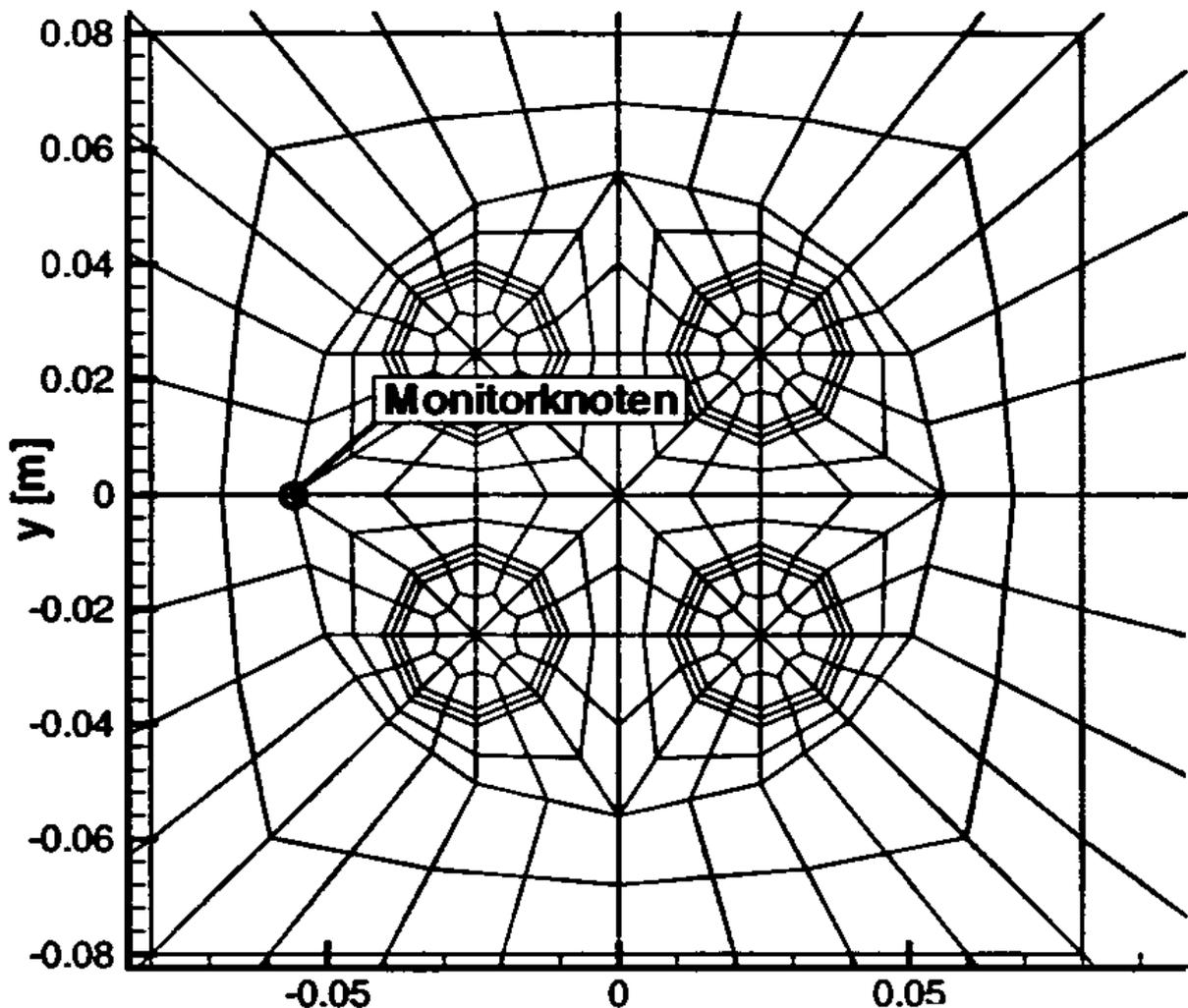


Abbildung 5 Monitorknoten im Modellgitter

ist, wie lange und mit welcher Eintrittstemperatur die Sonde gefahren werden muss, um die gewünschten Effekte zu erzielen, wird der Versuch modelliert. Die latente Wärme wird bei der Modellierung nicht berücksichtigt.

Die Hinterfüllung gilt als gefroren, wenn sie eine Temperatur von mindestens $-1,5^{\circ}\text{C}$ erreicht hat. Betrachtet wird ein horizontaler Schnitt durch die Sonde in 31 rn Tiefe. In dieser Tiefe wird ein Monitorpunkt an der Grenze zwischen Hinterfüllung und Bohrlochwand definiert wie in der Abbildung ersichtlich ist. Hat dieser Punkt die gewünschte Temperatur von $-1,5^{\circ}\text{C}$ erreicht, ist die gesamte Hinterfüllung gefroren. Erreicht er dann beim Auftauen wieder eine Temperatur von $+2,5^{\circ}\text{C}$ gilt die Hinterfüllung als aufgetaut.

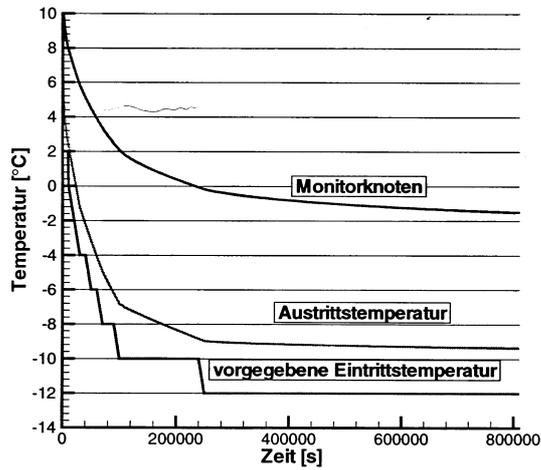


Abbildung 6 : Abkühlung EWS, Eintritts- Austritts- und Monitorknotentemperatur über die Zeit im ersten Gefrierzyklus

Für den Versuch wird aus technischen Gründen (begrenzte Kälteleistung) die erste Abkühlung schrittweise vorgenommen. Die erste Abkühlung auf die gewünschte Temperatur von -1.5°C am Monitorpunkt nimmt einen Zeitraum von 225 h bzw. knapp $9\frac{1}{2}$ Tagen in Anspruch, wobei innerhalb der ersten drei Tage die Eintrittstemperatur des Fluids von 2°C auf -12°C gesenkt wird. Die spezifische Leistung nahm in dieser Zeit von ca. 130 W/m auf 64 W/m ab.

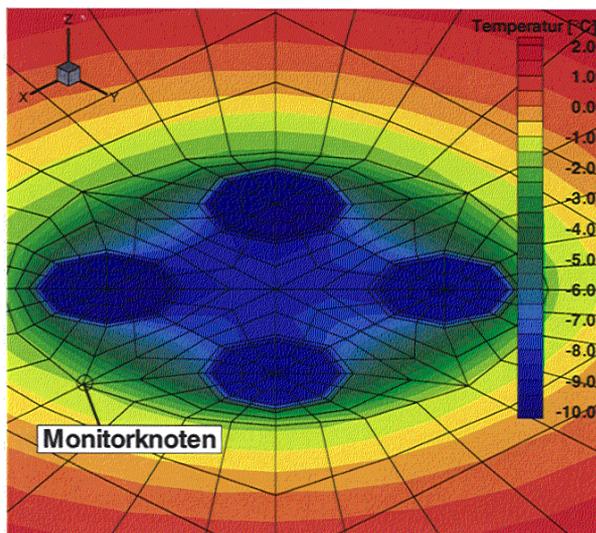


Abbildung 7 Temperaturverteilung Querschnitt bei 31 m Tiefe nach Ende des ersten Gefrierzyklus

Temperaturfeld in 31 m Tiefe nach der ersten Abkühlungsphase ($t = 810'000\text{ s}$) Die Temperatur am Monitorknoten beträgt -1.51°C . Im Zentrum der Bohrung liegen die Temperaturen unter -8°C .

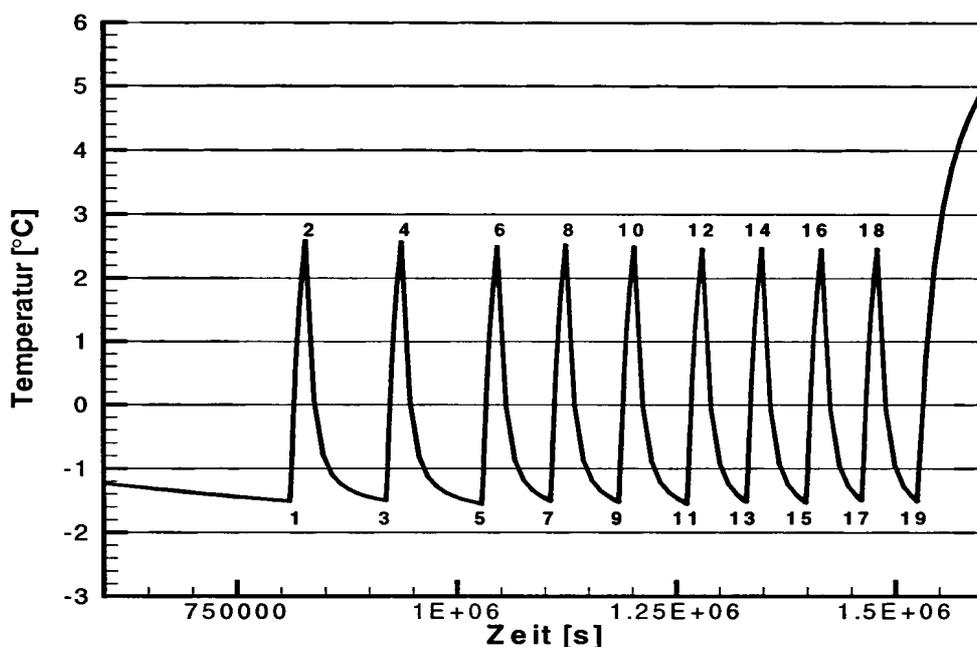


Abbildung 8 An- bzw. Abschaltzeitpunkt der Kühlung mit der jeweiligen aktuellen Temperatur des Monitorknotens. Versuchsdauer ca. 18 Tage für 10 Gefrier- Tauzyklen.

Die Modellierung der Gefrierzyklen hat die benötigten Grundlagen für die Versuchsdurchführung geliefert. Es konnte ermittelt werden, wie die Abkühlung vorgenommen werden muss, um die Leistung der Kühlung nicht zu überschreiten. Weiter konnten die Kühl- bzw. Auftauzeiten, welche in Anspruch genommen werden, mit dieser Modellierung in Erfahrung gebracht werden.

4.4 Simulation mit vorgegebenem Lastprofil

An der EWS 1 (265m) wurde von E. Rohner ein vorgegebenes Belastungsprofil mit dem Programm EED, welches speziell auf die Dimensionierung von Erdwärmesonden ausgelegt ist (siehe Kapitel 3.4), berechnet. Diese vorgegebene Belastung der Sonde soll nun mit dem Programm FRACture ebenfalls simuliert werden und die Resultate verglichen werden. Als Vergleichswert dienen die Austrittstemperaturen aus der Sonde. Dieser Vergleich ist problematisch, da sich das Programm EED grundsätzlich von FRACture unterscheidet. Wie in Kapitel 3.4 (Diplomarbeit M. Salton) beschrieben, ist EED ein Programm, das speziell auf die Dimensionierung von Erdwärmesonden ausgelegt wurde. Im Gegensatz zum FE-Programm FRACture, wo der gesamte zu untersuchende Raum diskretisiert und berechnet wird, werden bei EED sämtliche erforderliche Parameter, wie Sondenkonfiguration, Sondenlänge, Bohrlochdurchmesser aus einer Liste ausgewählt. Die für die Berechnung notwendigen Parameter lassen sich nicht für die unterschiedlichen Modellbereiche einzeln spezifizieren. So werden Durchschnittswerte verwendet. Berechnet werden können z.B. die Austrittstemperaturen Fluids oder die erforderliche Sondentiefe bei gegebener Leistung. Bei FRACture wird jeder Knotenpunkt im Gitter berechnet und kann somit auch als Ausgabe gewählt werden. EED geht von einem homogenen Untergrund aus, d.h. es ist nicht möglich verschiedene horizontale Schichten zu definieren wie dies bei FRACture gemacht wurde. Ausserdem wird mit einer einzigen durchschnittlichen Formationstemperatur gerechnet.

Bei EED besteht die Möglichkeit, ein jährliches Belastungsprofil vorzugeben. Die Laufzeiten der Wärmepumpe, die Belastung der Anlage, usw. ändern sich täglich. Dies ist mit FRACture kaum nachzuvollziehen, da jede Änderung der Randbedingungen mit der verwendeten Version manuell im Input-File definiert werden muss. Deshalb werden die Temperaturdaten und Wärmepumpenlaufzeiten für die Eingabe in FRACture monatlich gemittelt.

Die durch Herr M. Salton ausgeführten Berechnungen zeigten aber dennoch eine gute Übereinstimmung der beiden Modelle, vorallem im relevanten Bereich während der Heizsaison.

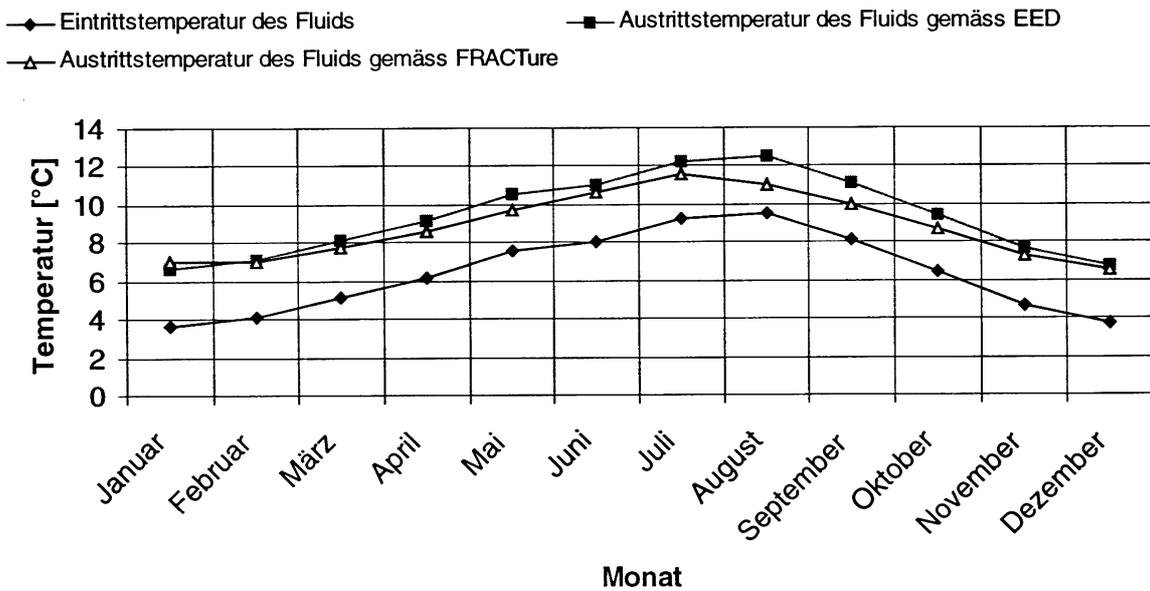


Abbildung 9 Ein- und Austrittstemperatur des Fluids im ersten Betriebsjahr bei der 265m EWS

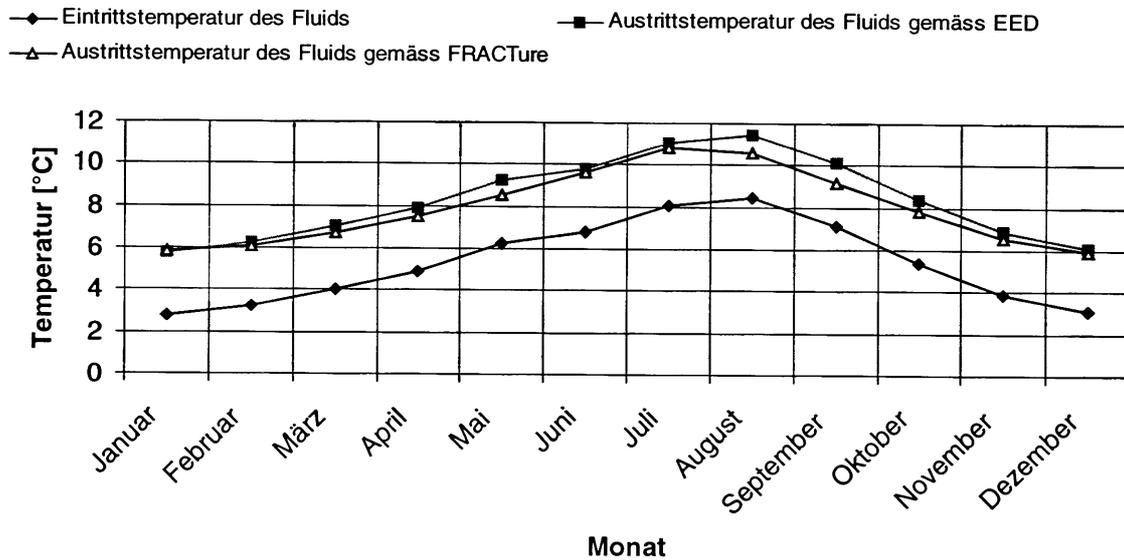


Abbildung 10 Ein- und Austrittstemperatur des Fluids im zehnten Betriebsjahr bei der 265m EWS

Während der Heizsaison 00/01 und 01/02 werden nun die berechneten Resultate in der Praxis nachgemessen. Aufgrund der zu erwartenden Differenz in den Randbedingungen müssten dann die theoretischen Daten nachgerechnet werden, um einen direkten Vergleich zu erhalten.

5 Aufbau der Anlage

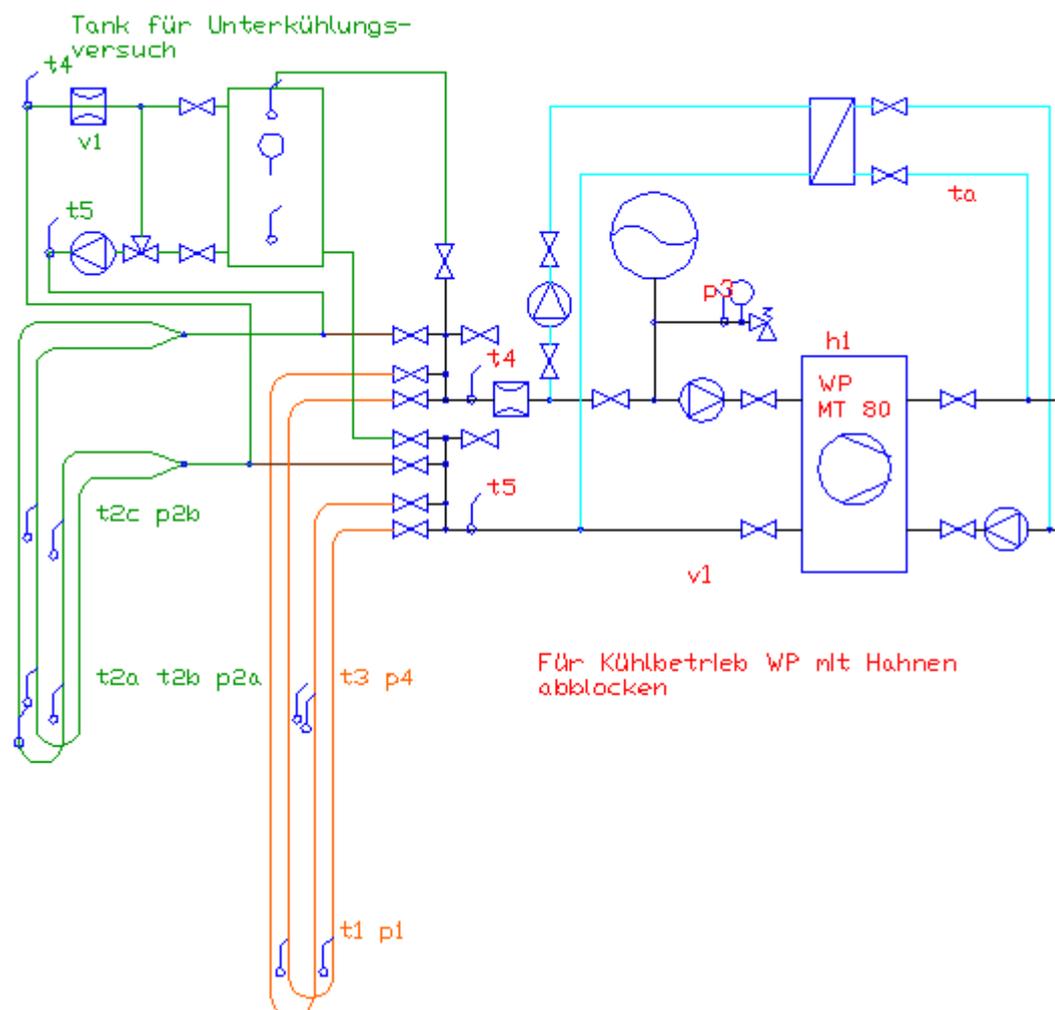


Abbildung 11 Schema der Anlage

Bei der kürzeren Erdwärmesonde (70 m) sind die Fühler in den Tiefen 35 und 70 m angebracht worden. Bei der 265m Erdwärmesonde sind die Fühler bei 70 und 264 m Tiefe befestigt.

6 Druckverhältnisse am Sondenfuss

6.1 Differenzdruck über die Zeit

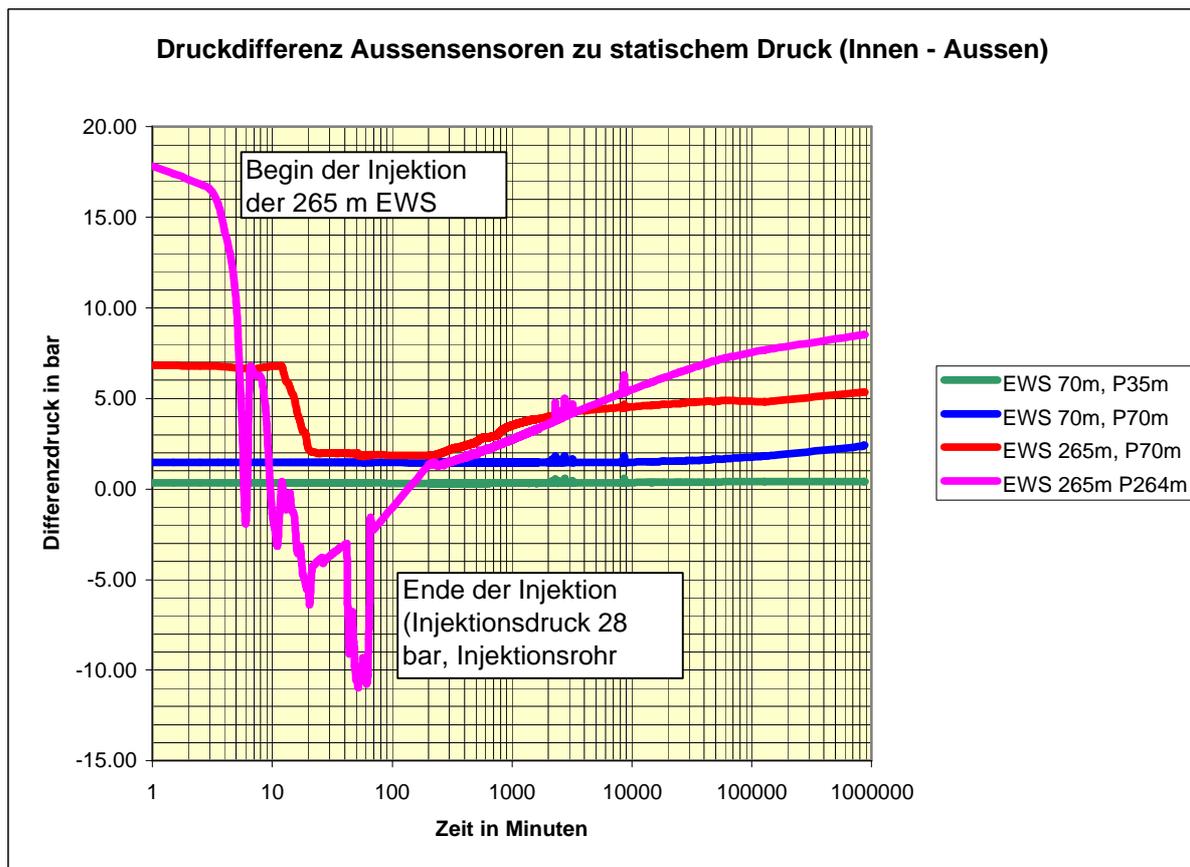


Abbildung 12 Druckdifferenz zwischen Sondenrohr innen und aussen in bar über die Zeit

Die Druckdifferenz zwischen Innen- und Aussenrohr ist nebst der Temperatur im wesentlichen für die Lebensdauer des Erdwärmesondenrohres verantwortlich. Für die verwendeten PE 100 Rohre Klasse S5 wird eine Lebensdauer von 50 Jahren bei einem Differenzdruck von 16 bar bei 20 °C Rohrtemperatur garantiert. Tiefe Temperaturen und Drücke verlängern die Lebensdauer. Im obenliegenden Diagramm ist der Differenzdruck zwischen dem aussen gemessenen Porenwasserdruck und dem statischen Innendruck aufgezeichnet. Der Anlagendruck, der zusätzlich zum statischen Druck (wassergefüllte EWS) wirkt, ist nicht dazugerechnet worden, um die durch die Injektion erzeugten Gegendrücke besser darstellen zu können. Der Anlagendruck beträgt im Betrieb zwischen 1 bis 2.5 bar.

Bei der kurzen Erdwärmesonde (70m) ergibt sich nur eine sehr kleine Druckdifferenz am Sondenfuss der nach 860'000 Betriebsminuten (597 Tage) auf 2.4 bar angestiegen ist. Bei der längeren EWS von 265 m ist der Druck in 70 m Tiefe auf 5.3 bar angestiegen. Die Injektion über dieser Messstelle ist also über die Zeit sehr stark entlastet worden (Schrumpfuntsprozesse). Am Sondenfuss hat sich ein Differenzdruck von 8.5 bar eingestellt. Im unteren Bereich ist die Schrumpfung wesentlich weniger spürbar. Eventuell kann dies auf das tixotrophe Verhalten der Injektion zurückgeführt werden. Die Druckdifferenz bedeutet für die Erdwärmesonde aber keine hohe Belastung und es kann aufgrund der jetzigen Messungen mit einer Lebensdauer von weit über 100 Jahren gerechnet werden.

6.2 Beulen der EWS bei zu grossem Aussendruck beim Injizieren

Wird ein Rohr mit zu grossem Aussendruck belastet beult es nach innen aus (Knicken nach Euler) Für das verwendete $\varnothing 40 \times 3.7$ mm PE 100 SDR 11 S5 Material liegt die kritische Belastung bei 20 °C für eine 10-stündige Belastung bei 7.6 bar Druckdifferenz (zwischen Innen und aussen). Nach „Abbildung 12 Druckdifferenz zwischen Sondenrohr innen und aussen in bar über die Zeit“ wurde ein maximaler Differenzdruck von 10.9 bar gemessen. Das Rohr hätte kollabieren können. Damit dies nicht geschieht wurden die Erdwärmesondenrohre während dem Injizieren am Sondenkopf geschlossen. Dort wurde ein maximaler Druckanstieg um 6 bar während dem Injizieren gemessen. Der effektive Differenzdruck im Spitzenfall hat also $10.9 - 6.0 \rightarrow 5.9$ bar betragen. **Werden tiefe Erdwärmesonden mit hohem Druck injiziert, so sind vor dem Injizieren die Erdwärmesonden unbedingt vollständig mit Wasser zu füllen und dicht zu schliessen, damit die Rohre durch den Aussendruck nicht zusammengedrückt werden.**

6.3 Differenzdruck bei Schockkühlung

Wird plötzlich kalte Sole in die Erdwärmesonde eingeleitet, so zieht sich die Sonde entsprechend der Temperatur zusammen und entlastet dabei die Injektionsmasse. Dadurch steigt der massgebende Differenzdruck, d.h. der auf das Rohr wirkende Druck an.

Druckverhältnisse 70 m EWS bei Schockkühlung

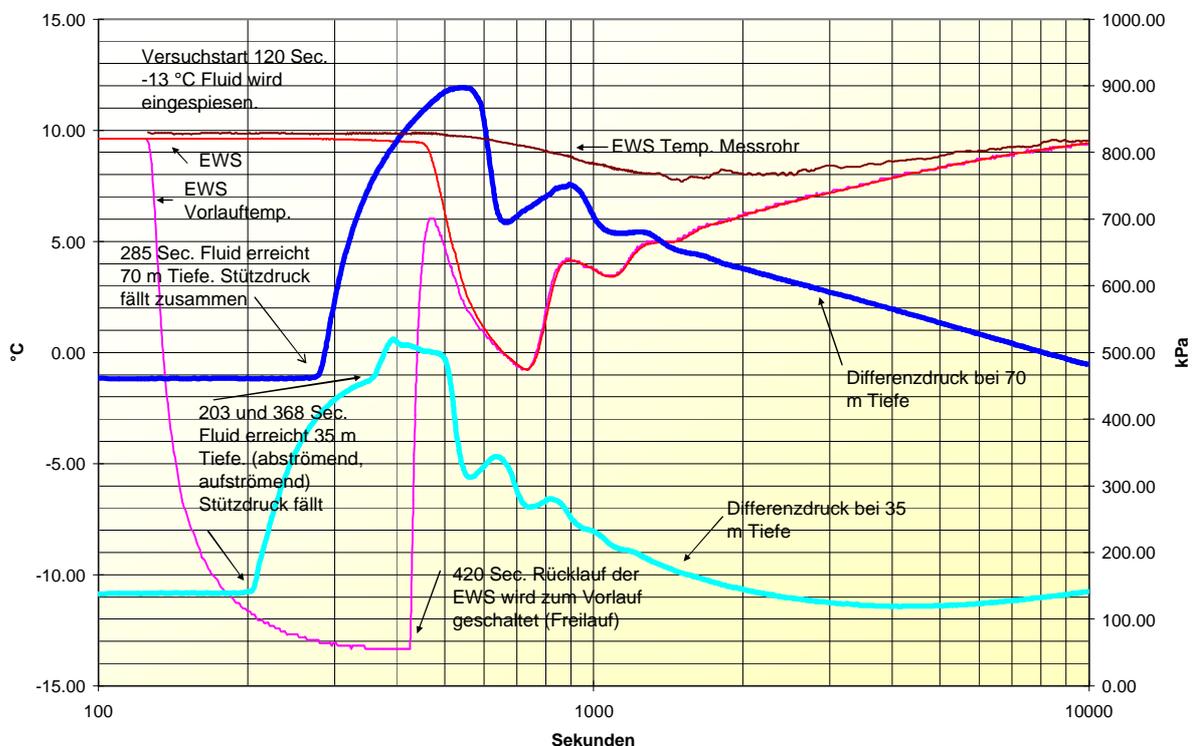


Abbildung 13 Druckdifferenz zwischen Sondenrohr innen und aussen bei Schockkühlung

Nach dem „Stossversuch“ normalisiert sich der Druck wieder. Die gemessenen Druckverhältnisse haben keine grosse Auswirkung auf die Lebensdauer, zeigen jedoch gut die Zusammenhänge zwischen Temperatur und Druck auf.

7 Temperaturganglinien

Vor der Inbetriebsetzung der Erdwärmesonden ist die Temperaturganglinie mit einem Kabelot in der Erdwärmesonde aufgenommen worden. Dabei ist der Grundwasserträger über der Konglomeratschicht gut erkennbar. Das Grundwasser wird in der Nähe gefasst. Über das Jahr wird eine ziemlich konstante Temperatur um 11 °C gemessen.

Temperaturganglinie 70 m und 265 m EWS

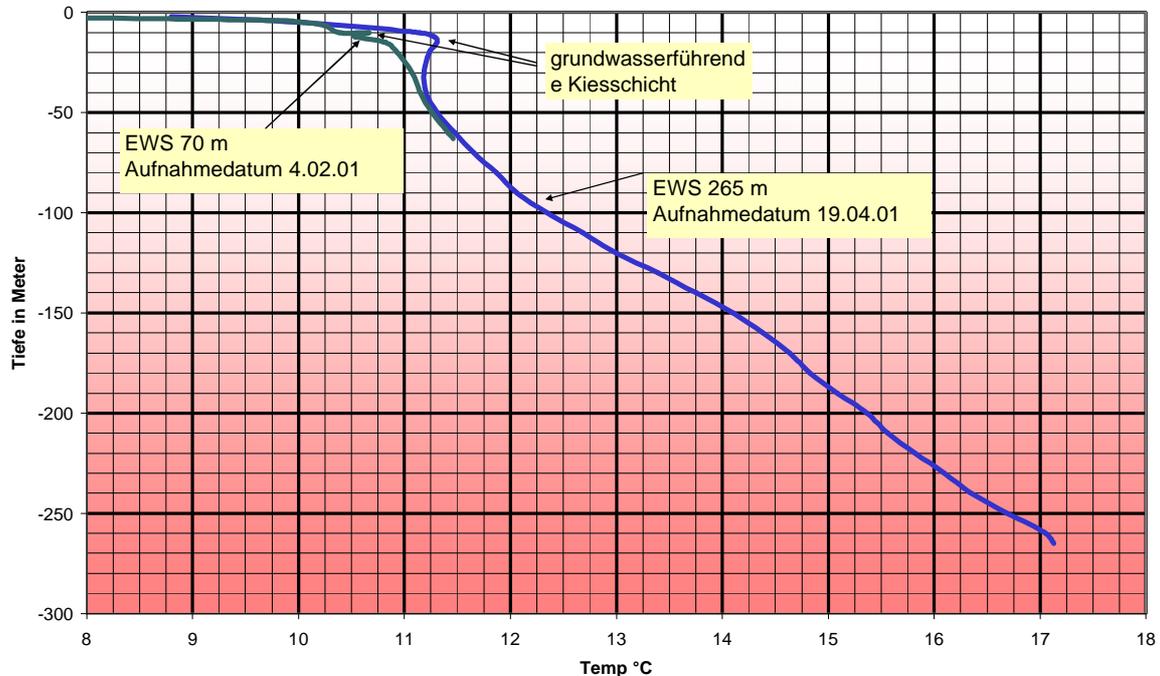


Abbildung 14 Temperaturganglinie bei der 70 und 265 m

Die erste Ableitung der Temperaturganglinie ergibt den Temperaturgradienten. Der Gradient gibt bei konstantem Energiefluss Aufschluss über die Wärmeleitfähigkeit.

Nach dem Bohrprofil sind sämtliche „Höcker“ in der „Abbildung 15 Temperaturgradient der beiden Erdwärmesonden“ Schichten mit schwarzem, hartem Konglomerat. Die Wärmeleitfähigkeit wird für eine andere Arbeit noch bestimmt.

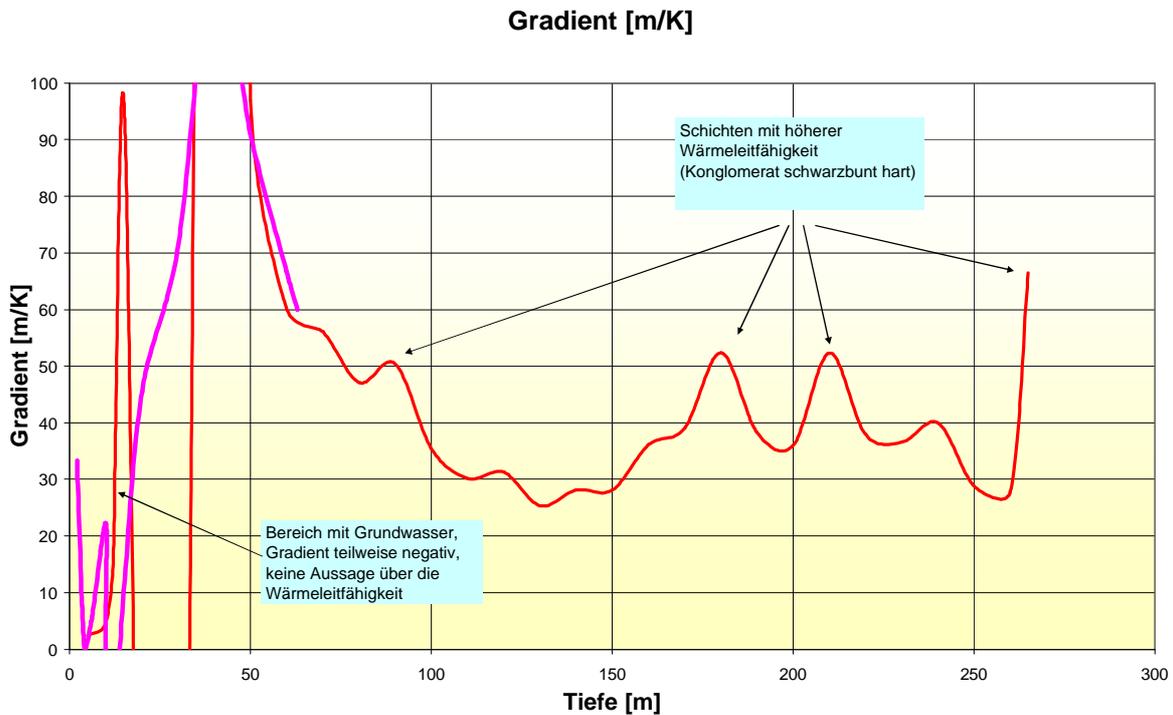


Abbildung 15 Temperaturgradient der beiden Erdwärmesonden

8 Überlastung der 70 m EWS

In mehreren Zyklen ist die EWS bis auf -10°C abgekühlt worden. Vor dem Versuch ist der Standort mit einem Lasernivellier ausgemessen worden, um Bodenverschiebungen dokumentieren zu können. Im folgenden diskutieren wir einen typischen Zyklus.

8.1 Legende zu den Diagrammen

	P_{2a} Dif.	Differenzdruck zwischen dem Druckfühler P2a in 70 m Tiefe und dem Innendruck $\rightarrow P_{2a \text{ Dif.}} = P_{\text{stat } 70\text{m}} + P_3 - P_{2a}$ [kPa]
	P_{2b} Dif.	Differenzdruck zwischen dem Druckfühler P2b in 35 m Tiefe und dem Innendruck $\rightarrow P_{2b \text{ Dif.}} = P_{\text{stat } 35\text{m}} + P_3 - P_{2b}$ [kPa]
	P_3	Anlagendruck [kPa]
	T_x	Fühler in Messrohr ausserhalb der EWS in 10 m Tiefe. Das Messrohr hat einen Durchmesser von $25 \times 2.3\text{mm}$ und ist aussen an der EWS angebracht.
	T_{2a}	Temperatur am Sondenfuss. Der Fühler ist defekt und gibt nur eine plausible Temperatur ab, wenn er gefroren ist.
	T4	Rücklauf ab EWS
	T5	Vorlauf in EWS

Tabelle 10 Legende zu den Belastungsdiagrammen

Die Anordnung der Fühler sind im „Abbildung 11 Schema der Anlage“ auf Seite 18 ersichtlich.

8.2 Belastung Beginn



Schacht 60 cm zu 70 m EWS \varnothing 32 mm. Nebst den 4 isolierten Erdwärmesondenrohren sind die Sensor-kabel, das Messrohr für den Fühler T_x und das Injektionsrohr sichtbar.

10.02.01 15:35 Vor Versuchsbeginn. Das eingebaute PVC Filterrohr ist bis oben hin mit Injektion gefüllt.

Abbildung 16 Schacht 60 cm zu 70 m EWS \varnothing 32 mm vor Versuchsbeginn.

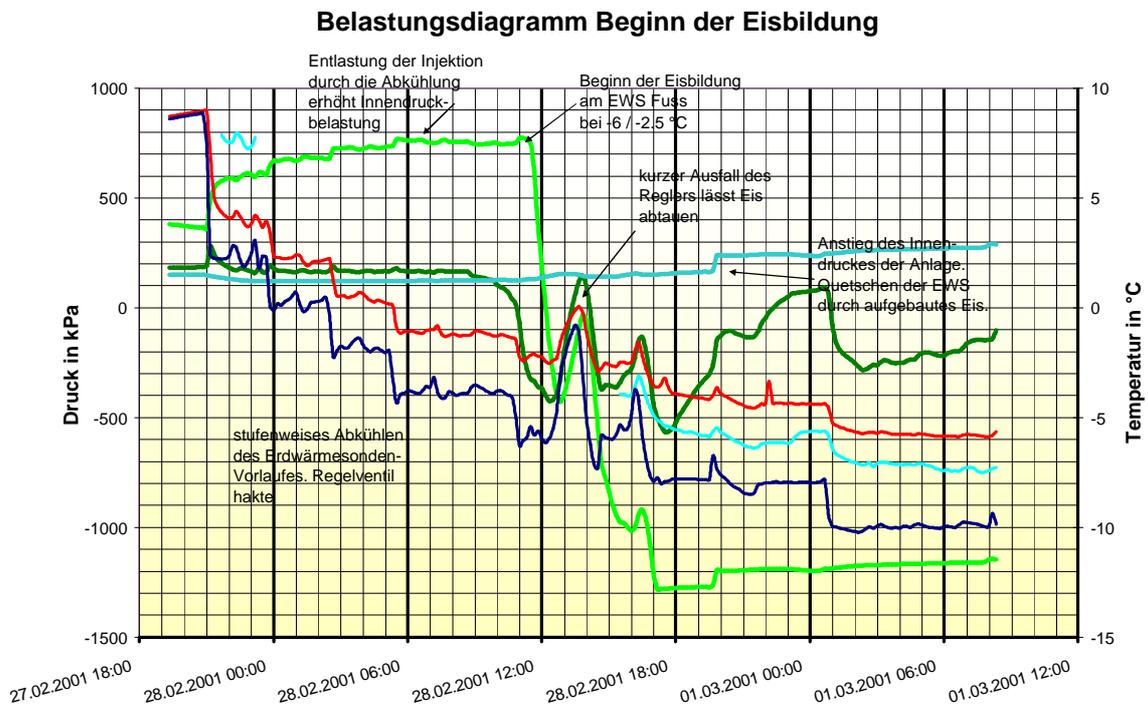


Abbildung 17 Belastungsdiagramm Eisbildung Startphase

Die Belastung der EWS ist am Anfang bei rund 50 W/m und steigert sich bis zur Eisbildung auf beinahe 100 W/m. Der Regler hatte Probleme mit Eisbildung. Aus diesem Grund ist die Temperaturganglinie etwas „ausgefranst“. Auf die Beobachtungen hatte dies aber nur einen geringen Einfluss.

Bei -6°C / -2.5°C hat die Eisbildung spürbar eingesetzt und zu einem starken Druckaufbau auf der Aussenseite der EWS geführt. Nach relativ kurzer Zeit ist der theoretische Beuldruck (nach Euler) von 7.1 bar überschritten worden. Bei 12 bar Druckdifferenz hat dann das Rohr nachgeben und der Anlagendruck ist angestiegen. Eisbildung quetsch bei den vorliegenden Randbedingungen das Rohr zusammen. Bei anderen Böden, die weich und bindig sind, wird das Erdreich verdrängt, was im Winter zu Hügeln und im Sommer zu Trichtern und Gräben führt. Im vorliegenden Fall wird der stark kiesige Boden nicht verdrängt. Die Lasernivelliermessungen über die verschiedenen Zyklen haben keine messbare Änderung ergeben.



28.02.01 10:38 Abkühlung -6°C , Beim Eintritt (links) ins Erdreich leichte Eisbildung, Austritt ebenfalls gefroren, aber noch keine Eiskristalle



01.03.01 11:42 Abkühlung -10°C , Ein- und Austritt mit Eiskristallen. Injektionsmasse wird leicht nach oben gepresst. Druck am Sondenfuß > 23 bar (P_{max} Aufnehmer). Bei 35 m 8 bar.

Abbildung 18 Eisbildung am Sondenkopf

8.3 Eisbildung

Belastungsdiagramm Aufbau des Eises

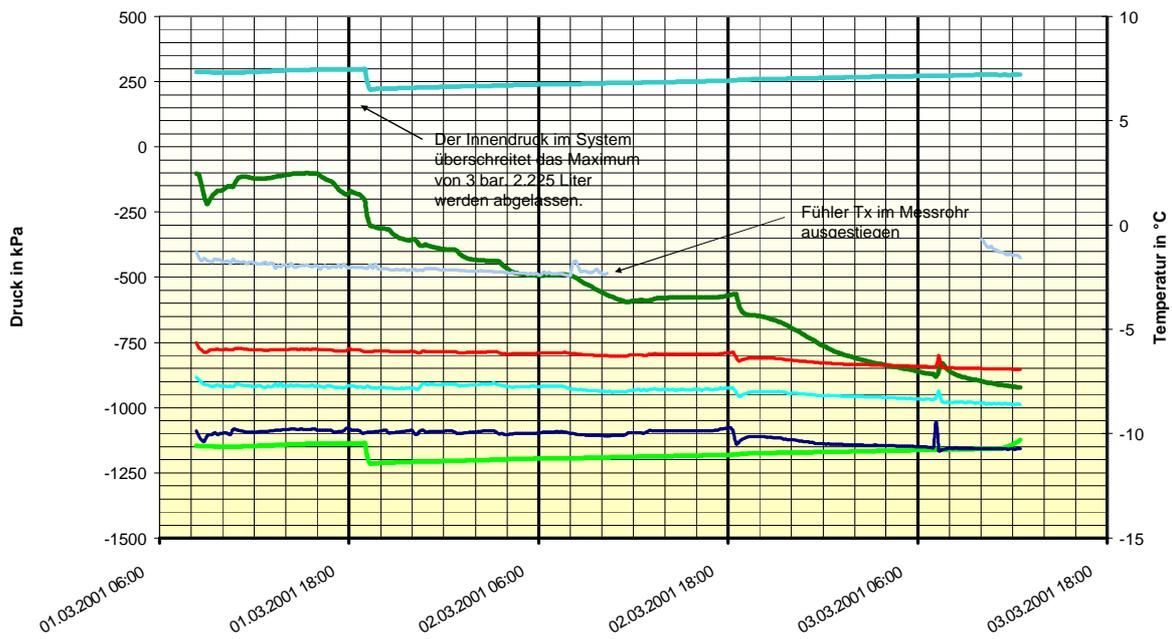


Abbildung 19 Belastungsdiagramm Eisbildung



Durch das Beulen (kollabieren) der PE Rohre wird der Querschnitt geringer. Dadurch steigt der Anlagendruck an. Auf der Anlage ist ein gewöhnliches Sicherheitsventil montiert, dass bei ca. 3 bar das überschüssige Etylenglykol (30% Protekt B Schweizerhall) ablässt. Es wurde ein Menge von 2.225 Liter ausgestossen, was einem Anteil von 1.45% entspricht. Der Fühler Tx ist leider ausgefallen. Die Verarbeitungsqualität der eingekauften Temperaturfühler (Thermistoren Fenwal 2K252) war unbrauchbar, obwohl die Spezifikation speziell für den Einbau ins Erdreich unter hohen Drücken lautete.

Auf dem Bild „Abbildung 20 gefrorene Erdwärmesonde“ sieht man die Eisbildung um die EWS. Die Injektion ist aber nicht aufgepresst worden.

Abbildung 20 gefrorene Erdwärmesonde (29.03.2001 14:34)

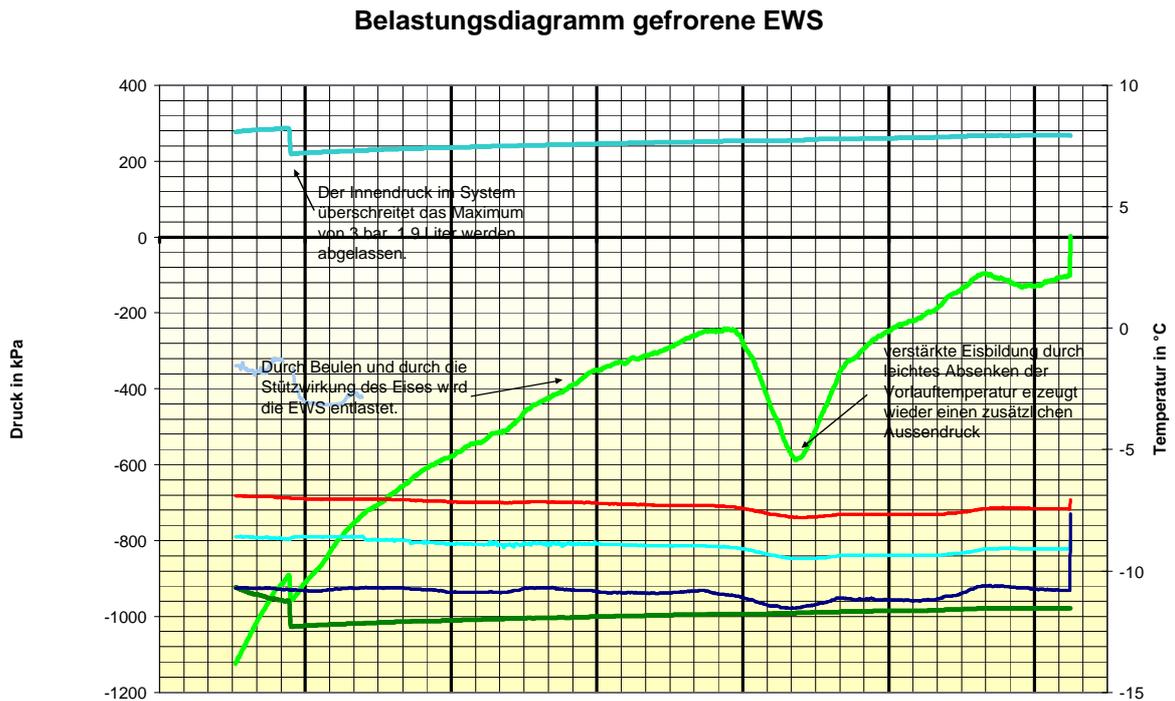


Abbildung 21 Belastungsdiagramm gefrorene EWS

8.4 Auftauphase

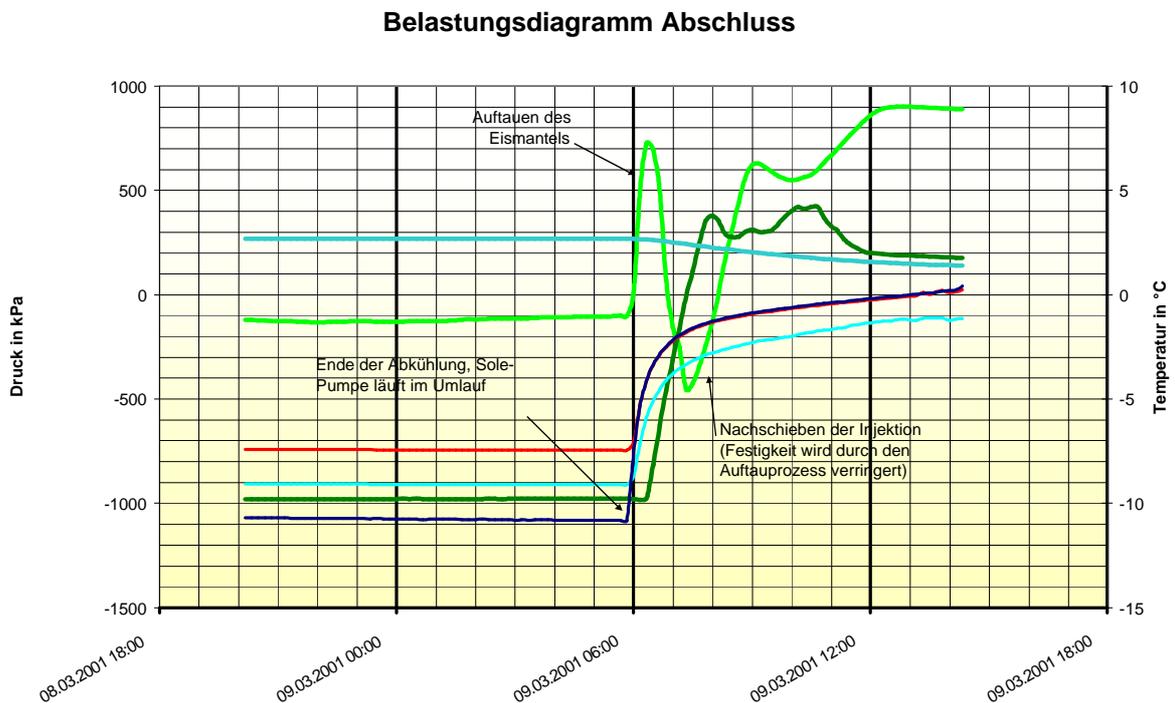


Abbildung 22 Auftauphase der EWS

Obwohl die EWS während 10 Tagen ununterbrochen stark belastet wurde ist die Sondentemperatur nach rund einem Tag wieder über 0°C angestiegen, d.h. aufgetaut. Während dem Auftauzyklus ergeben sich grosse Druckschwankungen am Sondenfuss. Zuerst wird das Volumen der Injektion beim Auftauen verringert, dies bewirkt einen höheren Innendruck. Anschliessend wird aussen an der EWS erneut

ein Druck aufgebaut. Dies könnte durch die Injektionsmasse geschehen, die beim Auftauen in einen fließfähigen Zustand übergeht, um sich anschliessen wieder zu verfestigen.



Abbildung 23 nur geringes Nachsacken der Injektion nach den Gefrier- Tau Zyklen (28.07.01 16:07)

Diese Gefrier- Tauzyklen belasten das PE Material stark und bewirken im vorliegenden Fall eine kontinuierliche Querschnittsverringerung. Dies kann wie auch schon in Kanada festgestellt, zu einem völligen Versagen der EWS führen. Ist das Erdreich weich und bindig, kann es auch verdrängt werden, was zu Bauschäden führen kann oder auch zu grösseren Löchern über den EWS beim Auftauen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Es hat sich gezeigt, dass die Erdwärmesonde ein sehr robustes Bauteil ist, wenn die entsprechenden Auslegerichtlinien nach VDI 4640 oder nach der Broschüre „Geothermie Praktische Nutzung von Erdwärme, herausgegeben vom BFE Juni 1998“ beachtet werden. Die Lebensdauer liegt in der Grössenordnung des Gebäudes selber, dabei sind aber keine Unterhaltsarbeiten und Renovationen notwendig. Für die Erstellung der Erdwärmesonde sind relativ hohe Investitionen notwendig. Durch die extrem lange Lebensdauer und den Wegfall von Unterhaltsarbeiten ergeben sich aber tiefe Betriebskosten. Dadurch ist die Erdwärmesonde eine sehr nachhaltige Energiequelle.

Bei krasser Überlastung kann die Erdwärmesonde versagen. Bei druckfestem nicht bindigem Untergrund (Sand-, Kies-, Schotter-Gemische) besteht die Gefahr, dass die EWS abgeklemmt wird. Ist der Untergrund aus bindigem, duktilem Material (Lehm, Schluff, Silte, Feinsande), so kann durch die Eisbildung der Untergrund ver-

drängt werden. Es kommt zu Trichterbildungen. In einigen Fällen wurde auch beobachtet, dass die Sonde durch die anhängenden Eismassen abgerissen wurde.

Der Markt verlangt nach hohen Energiebezügen auf kleinem Raum. Dies ist nur durch sehr lange Erdwärmesonden deckbar. Heute werden vielfach Erdwärmesonden im Bereich von 300 bis 400 m Tiefe abgeteuft. Über die Belastung in dieser Tiefe ist noch wenig bekannt. Aufgrund der vorliegenden Messungen kann keine verlässliche Aussage über die Lebensdauer von diesen „tiefen“ Erdwärmesonden gemacht werden. Eine Messung analog der 265 m EWS würde Klarheit verschaffen.

Durch das Gefrieren der EWS entstehen Bauschäden. Unter Berücksichtigung der Richtlinien können diese vermieden werden. In der Praxis zeigt es sich aber, dass der Beachtung der Richtlinien zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt wird, da viele Planer sich der Auswirkungen nicht bewusst sind. Mit dem Dokumentieren einiger Schadensfälle und entsprechender Publikation könnte diesem Mangel abgeholfen werden.

In letzter Zeit sind neue Verfüllmaterialien auf Basis Quarz- oder Grafitmehl auf den Markt gekommen. Sie zeichnen sich durch eine wesentlich verbesserte Wärmeleitfähigkeit aus. Die Dichtigkeit ist bei richtiger Anwendung nach Herstellerangaben gewährleistet. Das Verhalten bei Überlastung (Gefrieren) und der wirtschaftliche Nutzen aufgliedert nach Anlagentypen (einfache Heizanlage, Grossanlage, Klimatisierung) ist aber nur teilweise publiziert worden.

Die Erdwärmesonde ist bei richtiger Anwendung ein sehr robustes Bauteil mit sehr langer Lebensdauer. Dadurch kann mit geringem Energieaufwand eine sehr grosse Energiemenge aus der Umwelt schonend gewonnen werden.

9212 Arnegg, Dezember 2001

Ernst Rohner

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor (E. Rohner) dieses Berichtes verantwortlich

10 Anhang (Literatur-, Tabellen- und Abbildungsverzeichnis)

Literatur

- Salton M. (1999) Untersuchungen zum Verhalten von Erdwärmesonden, Diplomarbeit an der Abteilung Erdwissenschaften der ETHZ
- EED (1996) : Eskilson, P. , Hellström, G. Lund University, Sweden. Sanner, B. Universität Giessen, Deutschland
- EED (1999) : Hellström, G. Lund University, Sweden. Sanner, B. Universität Giessen, Deutschland
- Leu, W., Keller, B., Mégel, Th. Schärli, U. Rybach, L. (1999): PC-Programm für die Berechnung geothermischer Eigenschaften der Schweizer Molasse (Tiefenbereich 0-500m). Benutzerhandbuch zu Programm SwEWS (Version 1.0) Schlussbericht.
- Werner, A., Bigler, R., et. al. (1996) Grundlagen für die Nutzung von Wärme aus Boden und Grundwasser im Kanton Bern. Thermoprogramm Erdwärmesonden, Burgdorf.
- Geothermie Praktische Nutzung von Erdwärme, herausgegeben vom BFE (1998) VDI 4640 Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 1 bis 3
- DVS Merkblätter und Richtlinien, Fügen von Kunststoffen, 9.te Auflage (2000), ISBN 3-87155-193-7

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Mischungsverhältnisse der zu untersuchenden Proben (Vorgabe)</i>	4
<i>Tabelle 2 : Wärmeleitfähigkeiten</i>	5
<i>Tabelle 3 : Wärmeleitfähigkeiten im wassergesättigten Zustand - Werte vor und nach dem Gefrieren</i>	5
<i>Tabelle 4 : Wärmekapazitäten trocken</i>	6
<i>Tabelle 5 : Wärmekapazitäten nass</i>	6
<i>Tabelle 6 : Diffusionskoeffizienten</i>	6
<i>Tabelle 7 : Geologie Bohrung 1: 70 m ø 115 mm</i>	7
<i>Tabelle 8 : Geologie Bohrung 2: 265 m ø 135 mm</i>	9
<i>Tabelle 9 : Vermessung Bohrloch 70 m</i>	11
<i>Tabelle 10 Legende zu den Belastungsdiagrammen</i>	22

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1 Ausbau 70 m Bohrung</i>	9
<i>Abbildung 2 Ausbau 265 m Bohrung</i>	10
<i>Abbildung 3 3 D Ansicht Bohrloch 70m, X-Y Koordinaten 10 fach überzeichnet</i>	12
<i>Abbildung 4 Modellgitter um die Erdwärmesonde Bohrung 1: 70 m ø 115 mm</i>	13
<i>Abbildung 5 Monitorknotent im Modellgitter</i>	14
<i>Abbildung 6 : Abkühlung EWS, Eintritts- Austritts- und Monitorknotentemperatur über die Zeit im ersten Gefrierzyklus</i>	15
<i>Abbildung 7 Temperaturverteilung Querschnitt bei 31 m Tiefe nach Ende des ersten Gefrierzyklus</i>	15
<i>Abbildung 8 An- bzw. Abschaltzeitpunkt der Kühlung mit der jeweiligen aktuellen Temperatur des Monitorknotens. Versuchsdauer ca. 18 Tage für 10 Gefrier- Tauzyklen.</i>	15
<i>Abbildung 9 Ein- und Austrittstemperatur des Fluids im ersten Betriebsjahr bei der 265m EWS</i>	17
<i>Abbildung 10 Ein- und Austrittstemperatur des Fluids im zehnten Betriebsjahr bei der 265m EWS</i>	17
<i>Abbildung 11 Schema der Anlage</i>	18
<i>Abbildung 12 Druckdifferenz zwischen Sondenrohr innen und aussen in bar über die Zeit</i>	19
<i>Abbildung 13 Druckdifferenz zwischen Sondenrohr innen und aussen bei Schockkühlung</i>	20
<i>Abbildung 14 Temperaturganglinie bei der 70 und 265 m</i>	21
<i>Abbildung 15 Temperaturgradient der beiden Erdwärmesonden</i>	22

<i>Abbildung 16 Schacht 60 cm zu 70 m EWS \varnothing 32 mm vor Versuchsbeginn.</i>	23
<i>Abbildung 17 Belastungsdiagramm Eisbildung Startphase</i>	23
<i>Abbildung 18 Eisbildung am Sondenkopf</i>	24
<i>Abbildung 19 Belastungsdiagramm Eisbildung</i>	25
<i>Abbildung 20 gefrorene Erdwärmesonde (29.03.2001 14:34)</i>	26
<i>Abbildung 21 Belastungsdiagramm gefrorene EWS</i>	26
<i>Abbildung 22 Auftauphase der EWS</i>	26
<i>Abbildung 23 nur geringes Nachsacken der Injektion nach den Gefrier- Tau Zyklen (28.07.01 16:07)</i>	27