

## **Schlussbericht zum FuE-Vorhaben**

**0329809 B**

### **„Thermische Untergrundspeicherung auf höherem Temperaturniveau: Begleitforschung mit Messprogramm Aquiferspeicher Reichstag“**

**Laufzeit: 01.11.1999 – 30.09.2003**

**Institut für Angewandte Geowissenschaften  
der Justus-Liebig-Universität Gießen  
Diezstraße 15, 35390 Gießen  
(seit 01.04.2004 geschlossen)**

**Projektleiter: Prof. Dr. Klaus Knoblich (bis 31.3.2002)  
Dr. Burkhard Sanner (ab 01.04.2002)**

**Bericht: Dr. Burkhard Sanner, 31.08.2004**

**Das Vorhaben war Teil des Annex 12  
"High Temperature Underground Thermal Energy Storage"  
im Implementing Agreement  
"Energy Conservation through Energy Storage"  
der International Energy Agency IEA**



## Inhaltsverzeichnis

<b>1. AUFGABENSTELLUNG UND PROJEKTMANAGEMENT</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Aufgabenstellung</b>	<b>4</b>
1.2.1 Zielsetzung	4
1.2.2 Arbeitsprogramm	4
1.2.3 Projektpartner	5
<b>1.3 Vorgeschichte des Projekts</b>	<b>6</b>
<b>1.4 Zusammenfassende Darstellung der 1. Projektphase (0329809 A)</b>	<b>7</b>
<b>1.5 Projektverlauf der 2. Projektphase (0329809 B)</b>	<b>8</b>
1.5.1 Projektmanagement	8
1.5.2 Monitoring Aquiferspeicher Reichstag	8
1.5.3. In-situ-Testgeräte	9
1.5.4. IEA ECES Annex 12 und 13	10
1.5.5 Weitere Arbeiten	10
<b>2. ENERGETISCHES MONITORING DER AQUIFERSPEICHER</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Anlagenbeschreibung</b>	<b>12</b>
2.1.1 Energiekonzept, Energiebedarf	12
2.1.2. Wärmespeicherung im Aquifer	13
2.1.3 Kältespeicherung im Aquifer	14
<b>2.2 Messprogramm</b>	<b>15</b>
<b>2.3 Messergebnisse</b>	<b>16</b>
<b>2.4 Modellierung</b>	<b>22</b>
<b>3. CHEMISCHES MONITORING DER AQUIFERSPEICHER</b>	<b>25</b>
<b>3.1. Durchführung der Probenahmen</b>	<b>25</b>
3.1.1 Allgemeines	25
3.1.2 Messparameter und eingesetzte Analysenverfahren	26
<b>3.2 Probenahmen</b>	<b>28</b>
<b>3.3 Bewertung der chemischen Entwicklung der Aquiferwässer</b>	<b>31</b>
3.3.1 Wärmespeicher	31
3.3.2 Kältespeicher	31
3.3.3 Schlussfolgerung	31

<b>4. ARBEITEN ZU MOBILEN MESS- UND TESTGERÄTEN</b>	<b>34</b>
<b>4.1 Messgerät für Erdwärmesonden (Thermal Response Test)</b>	<b>34</b>
4.1.1 Entwicklung des Thermal Response Tests	34
4.1.2 Versuchsdurchführung	35
4.1.3 Versuchsauswertung	36
4.1.4 Erfahrungen mit dem Thermal Response Test in Deutschland	37
4.1.5 Seminar und Vergleichsversuch in Mol, Belgien	37
4.1.6 Literatur zum Thermal Response Test	39
<b>4.2. Testgerät für Aquiferspeicher-Wasserchemie</b>	<b>41</b>
4.2.1 Versuchsaufbau	42
4.2.2 Allgemeiner Betrieb der Versuchsanlage	44
4.2.2 Ergebnisse der Stuttgarter Versuche	45
4.2.3 Wasserbehandlung mit CO <sub>2</sub>	46
4.2.4 Ergebnisse der Lüneburger Versuche	47
<b>5. IEA ECES ANNEX 12</b>	<b>51</b>
<b>6. VERÖFFENTLICHUNGEN</b>	<b>52</b>
<b>6.1 Veröffentlichungen aus dem IAG zu Themen des Projekts</b>	<b>52</b>
<b>6.2 Berichte und Unterlagen der Projektpartner</b>	<b>53</b>
6.2.1 Unterlagen GTN	53
6.2.2 Unterlagen Universität Lüneburg	53
6.2.3 Unterlagen Universität Stuttgart	53
<b>6.3 Veröffentlichungen aus dem IAG in der ersten Projektphase</b>	<b>53</b>
<b>ANHANG</b>	<b>55</b>

# 1. Aufgabenstellung und Projektmanagement

## 1.1 Einleitung

Wärmespeicherung ist eine wichtige Technik, wenn es darum geht, Wärmenachfrage mit einem Wärmeangebot zur Deckung zu bringen. Der Untergrund hat sich als ideales Medium für die Speicherung größerer Wärmemengen über längere Zeiten (z.B. Jahreszeiten) herausgestellt. Nach Anlagen zur Speicherung sommerlicher Sonnenwärme zur Nutzung für die Heizung im Winter bekommt nun auch die Speicherung von Abwärme stärkere Bedeutung. Die Effektivität eines Wärmespeichers hängt vom erreichten Temperaturniveau und der Minimierung von Wärmeverlusten ab. Während Wärmespeicherung im Bereich von 10-40 °C bereits erfolgreich demonstriert wurde, haben höhere Temperaturniveaus bis zu 150 °C in den 80er Jahren viele Probleme in Versuchs- und Pilotanlagen bereitet.

Wärmespeicherung ist eine wichtige Technik, wenn es darum geht, Wärmenachfrage mit einem Wärmeangebot zur Deckung zu bringen. So passen in unseren Breiten natürliches Wärmeangebot und Wärmenachfrage zeitlich meist nicht zusammen. Ebenso entsteht bei Industrieprozessen und Stromerzeugung Wärme, die oft nicht gleichzeitig zur Wärmeversorgung verwendet werden kann und daher zumindest zeitweise nur Abwärme ist. In all diesen Fällen kann Wärmespeicherung eine Lösung zur Überbrückung der zeitlichen Lücke zwischen Wärmeproduktion und Wärmeverbrauch sein. Diese Lücke kann Stunden, Tage, Wochen oder eben auch die Jahreszeiten umfassen.

Während es für kurzfristige Speicherung verschiedene erprobte Varianten der Wärmespeicherung gibt, mit Wasser oder besonderen Phasenwechselmaterialien, ist ein geeignetes Speichermedium für längere Zeiträume der Untergrund. Die entsprechenden Speichertechniken sind Aquiferspeicher (Grundwasser), Erdwärmesondenspeicher (Gestein) oder Kavernenspeicher (Wasser, in Fels). Die Effektivität eines Wärmespeichers hängt vom erreichten Temperaturniveau und der Minimierung von Wärmeverlusten ab. Während Wärmespeicherung im Bereich von 10-40 °C bereits erfolgreich demonstriert wurde, haben höhere Temperaturniveaus bis zu 150 °C in den 80er Jahren viele Probleme in Versuchs- und Pilotanlagen bereitet.

Heute sind nur einige wenige Untergrund-Wärmespeicher höherer Temperatur in Betrieb. Abwärme aus der Kraft-Wärme-Kopplung ist die hauptsächliche Wärmequelle, aber auch Sonnenwärme wird eingesetzt. Im Rahmen der ersten Phase dieses Projektes (0329809 A) wurde in der Arbeitsgruppe zu Annex 12 im IEA Implementing Agreement ECES das Arbeitsgebiet folgendermaßen definiert:

- Unterirdische thermische Energiespeicherung umfaßt jede Speicherung von Wärme, Kälte oder beidem im natürlichen Untergrund.
- Hohe Temperaturen im Rahmen dieses Vorhabens beziehen sich auf niedrigste Speicher-Ladetemperaturen in der Größenordnung von 50 °C.
- Der Speicherzeitraum kann von kurz (Tage) bis lang (Jahreszeiten) betragen. Saisonale Speicherung setzt voraus, daß der Speicher noch mindestens drei Monate nach Ende der Ladeperiode Energie zurückgibt.

## 1.2 Aufgabenstellung

### 1.2.1 Zielsetzung

Das Vorhaben sollte dazu dienen, die Funktion der Wärmespeicherung im Aquifer auf höherem Temperaturniveau an einem konkreten Beispiel in Deutschland zu untersuchen. Damit sollte festgestellt werden, ob die in der Anlagenplanung vorhergesagten Erwartungen an Energieeinsparung und Emissionsminderung, aber auch an Zuverlässigkeit, Versorgungssicherheit und Komfort erfüllt werden können. Die Treffsicherheit der Simulationen zur Anlagenauslegung (s. Kap. 2) soll ebenso überprüft werden wie die vermutete Entwicklung des Wasserchemismus während des Anlagenbetriebs (Kap. 3).

Für die Erleichterung der Anlagenplanung sollte ein Testverfahren für Wasserchemie (bei Aquiferspeichern) entwickelt, getestet und beispielhaft eingesetzt werden. Das seit Ende der 90er Jahre in IEA-Zusammenarbeit entstandene Verfahren des Thermal Response Test zur Bestimmung der thermischen Untergrundparameter (bei Erdwärmespeichern) sollte im Bereich höherer Temperaturen erprobt und angewendet werden. Mit diesen mobilen Testeinrichtungen sollen aussagekräftige Untergrunddaten für thermische und hydrochemische Parameter in der Entwurfsphase zur Verfügung gestellt werden.

Um möglichst umfangreiche Ergebnisse mit begrenztem Mitteleinsatz zu erreichen und an den Erfahrungen in anderen Ländern zu partizipieren, in denen z.T. bereits seit längerem Hochtemperatur-Untergrundspeicher betrieben und/oder einschlägige Untersuchungen gemacht wurden, wurde das Vorhaben in eine Zusammenarbeit im Rahmen der Annexes 12 und 13 im Implementing Agreement "Energy Conservation through Energy Storage" der IEA eingebracht. Deutschland trat dabei als Operating Agent von Annex 12 auf (seit Dez. 1997).

### 1.2.2 Arbeitsprogramm

Es sollte die Funktion eines großen Aquiferspeichers für hohe Temperaturen (70 °C) untersucht und die ersten Betriebsjahre messtechnisch begleitet werden. Vorgesehen war die Erfassung wichtiger Daten der beiden Speicher (der Schwerpunkt der Messungen sollte auf dem Wärmespeicher liegen, doch sollte zur Komplettierung auch der Kältespeicher untersucht werden):

- Energiebilanz
- Umweltverhalten
- Betriebsverhalten, Optimierungsmöglichkeiten der Betriebsführung
- Klärung geologischer, hydrogeologischer, thermodynamischer, geo-/hydrochemischer und geotechnischer Fragen während des Anlagenbetriebs
- Übertragbarkeit, Grundlagen für neue Projekte

Grenze des Monitoring der Speicher und Schnittstelle zu evtl. anderen Untersuchungen waren die Wärmeübertrager Grundwasser/Gebäudetechnik.

Für den Wärmespeicher waren bereits in der Entwurfsphase diverse Computermodelle verwendet worden, um die korrekte Auslegung zu erreichen. Dazu wurden

durch GTN die Programme FEFLOW und CFEST eingesetzt. Es wurde vorgesehen, während des Monitorings die Modellierungen mit den jeweils neuen Erkenntnissen zu kalibrieren und fortzuführen. Insgesamt soll eine komplexe Modellierung des thermodynamischen und hydrodynamischen Speicherverhaltens angestrebt werden. Anschließend sollten die Modellaussagen in der Betriebsphase mit Messwerten validiert werden. Im Wärmespeicher mit hohen Temperaturgradienten ist freie Konvektion zu erwarten. Während des Anlagenbetriebs sollte eine Modellierung dieser speziellen hydraulischen Transportmechanismen erfolgen und durch Messungen überprüft werden.

Das Monitoring sollte durch geo-/hydrochemische Untersuchung des Speichers ergänzt werden, um die technischen Lösungen zu überprüfen. Untersuchungen dieser Parameter während des Speicherbetriebs können neben einer Optimierung der Anlage am Reichstag vor allem der Erarbeitung neuer technischer Lösungen dienen. Besonders sind im Wärmespeicher zu beachten:

- Kalklösung/-ausfällung
- Fluid-Matrix-Interaktionen anderer Art
- Gelöste Gase (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>)

Die Besonderheiten der mineralisierten Wässer machen spezielle chemische Analyseverfahren erforderlich; nach einer Phase umfassender Untersuchungen sollte auch hier eine Konzentration auf sensibel reagierende Parameter erfolgen. Ebenso wie die Geo-/Hydrochemie sollte auch das mikrobiologische Speicherverhalten während Bau und Betrieb des Speichers untersucht werden. Die chemische Analytik wurde durch das Institut für Ökologie und Umweltchemie der Universität Lüneburg durchgeführt.

Für die Eignungsuntersuchung von Standorten für Aquiferspeicher sollte ein mobiles Testgerät für wasserchemische Veränderungen bei Aufheizung gebaut und getestet werden; die Verwendung der Testprozedur zur Funktionsprüfung in bestehenden Hochtemperatur-Aquiferspeichern sowie die Möglichkeit zur Automatisierung von Wasserbehandlungsanlagen mit diesem Verfahren sollte untersucht werden.

Für die Standortuntersuchung bei Erdwärmesonden-Speichern (und bei anderen Anlagen mit Erdwärmesonden) sollten mobile Geräte zur Durchführung von Thermal Response Tests untersucht und erprobt werden sowie die entsprechenden Auswertverfahren bewertet werden.

### 1.2.3 Projektpartner

Das Vorhaben wurde in Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und Privatunternehmen durchgeführt.

Zuwendungsempfänger, Koordination:

- Institut für Angewandte Geowissenschaften der Justus-Liebig-Universität, Gießen

Unteraufträge:

- |   |      |
|---|------|
| • Institut für Ökologie und Umweltchemie der Universität Lüneburg | IÖU  |
| • Institut für Siedlungswasserbau der Universität Stuttgart       | ISWA |
| • Geothermie Neubrandenburg GmbH, Neubrandenburg                  | GTN  |

Zusammenarbeit ohne FuE-Verträge:

- Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Univ. Stuttgart ITW

- Landtechnik Weihenstephan der TU München, später übergegangen auf ZAE Bayern, Garching
- UBeG GbR, Wetzlar

LTW  
ZAE  
UBeG

Zusammenarbeit im Rahmen von IEA ECES

- Forschungszentrum VITO, Mol, Belgien
- Environment Canada, Dartmouth N.S., Kanada
- IF Technology, Arnhem, Niederlande
- Groenholland, Amsterdam, Niederlande
- Institute of Mathematical Physics, TU Lund, Lund, Schweden
- Institute of Hydraulical Engineering, TU Luleå, Luleå, Schweden
- Sweco, Malmö, Schweden

VITO  
EC  
IF  
GH  
IMP  
IHE  
Sweco

### 1.3 Vorgeschichte des Projekts

- 1992 Die Projektidee eines Aquifer-Kältespeichers wurde gemeinsam durch das Institut für Angewandte Geowissenschaften (IAG) die Universität Gießen und Kaiser Bautechnik Duisburg in das Energiekonzept für den Wettbewerbsvorschlag Norman Foster zum Umbau des Reichstagsgebäudes eingebracht.
- 1993/94 Nachdem der Vorschlag Norman Foster den Wettbewerb gewonnen hatte, erfolgten Machbarkeitsstudie, Vorplanung und Verteidigung durch Kaiser Bautechnik und IAG.
- 1995 Vorschlag für tiefliegenden Aquifer-Wärmespeicher durch GTN Neubrandenburg, das Konzept wurde entsprechend ergänzt. Die beiden Aquiferspeicher wurden in ein Gesamtkonzept für den Energieverbund der Bauten des Deutschen Bundestages in Berlin eingebunden, das neben dem Reichstagsgebäude die neu zu errichtenden Gebäude für Abgeordnetenbüros, Verwaltung etc. umfasst.
- 1995-97 Kühn, Bauer und Partner übernahm die Energieplanung zum Reichstag, GTN führte nunmehr die Untersuchungen und (Fertig)planung des Aquiferspeicherkonzepts durch. Dabei 1996 erste Tiefbohrung (>300 m) zur Exploration.
- 1997/98 Bau der Aquiferspeicher (Bohrungen, Wärmeübertrager etc); im Herbst 1998 startete ein Probetrieb.
- 1997-99 Erstes Vorhaben zur Begleitforschung (0329809 A), koordiniert durch IAG. Darin seit Dezember 1997 IEA ECES Annex 12; das Vorhaben schloss mit der Veröffentlichung eines internationalen Berichtes zum Stand der Technik 1999.
- 1999 Das Speichersystem mit beiden Aquiferspeichern wurde offiziell in Betrieb genommen. Allerdings war das Gesamtsystem mit dem Verbund noch nicht fertig.
- Ende 1999 bewilligte der BMWi das begleitende Forschungsprogramm zu den Aquiferspeichern am Reichstag (0329809 B), das durch IAG koordiniert und gemeinsam mit den Universitäten Stuttgart und Lüneburg sowie GTN durchgeführt wurde.

2002 Im Verlauf des Jahres 2002 wurden schließlich die letzten Komponenten des Gesamtsystems angeschlossen. Erst jetzt, 10 Jahre nach dem ersten Konzept, ist der geplante Vollbetrieb möglich.

#### **1.4 Zusammenfassende Darstellung der 1. Projektphase (0329809 A)**

Das Ziel dieser Phase des Vorhabens, die vom 01.10.1997 bis zum 30.06.1999 lief, war die Vorlage eines Berichts zum Stand der Technik von Wärmespeicherung in Aquiferen auf höherem Temperaturniveau und einer Studie über geeignete Einbindungen in Energiesysteme und besonders vielversprechende Systemkonzepte, in internationaler Kooperation im Rahmen von IEA ECES Annex 12 "High Temperature UTES". Daraus abgeleitet werden sollten Bedarf und mögliche Schwerpunkte weiterer FuE-Arbeiten und die Vorbereitung der 2. Phase sowohl des nationalen Projektes als auch von Annex 12.

Im Juni 1996 war auf einem Workshop anlässlich des Treffens des Executive Committee von IEA ECES in Halifax, Kanada, die Notwendigkeit, aber auch die Sinnhaftigkeit weiterer Arbeiten zur Untergrund-Wärmespeicherung festgestellt worden. Am 28.-29.4.97 wurde dann ein Workshop zu Hochtemperatur-Untergrundspeichern in Berlin durchgeführt, an dem Experten aus mehreren Ländern teilnahmen. Der Workshop diente einer erneuten Bestandsaufnahme der Kenntnisse und Erwartungen in den einzelnen Ländern und weiterhin der Abstimmung über konkrete Inhalte und Zeitplan von Annex 12.

Nachdem das nationale Vorhaben zum 1.10.97 bewilligt worden war, wurde zu einem Kick-off meeting am 3.12.98 am Sitz der IEA in Paris eingeladen. Dort wurde mit internationaler Beteiligung der endgültige Textvorschlag beschlossen und am 4./5.12.98 dem Executive Committee vorgestellt. Das Executive Committee beschloß daraufhin die Einrichtung des Annex und setzte Deutschland als Operating Agent ein.

Das erste Experts Meeting in Annex 12 fand am 17.6.1998 in Gießen statt, gemeinsam mit dem ebenfalls neu eingerichteten Annex 13 (15.-16.6.1998). Im Jahr 1998 wurde die Faktensammlung zu den bisherigen Versuchen und Erfahrungen mit Hochtemperatur-Untergrundspeichern durchgeführt. Deutschland, Schweden und die Niederlande bearbeiteten jeweils ihr Land, und Deutschland (IAG) außerdem Speicher in Dänemark, Frankreich, der Schweiz und den USA. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse von Annex 6, auf den neuesten Stand gebracht mit zusätzlichen Informationen aus Kanada, Japan und den Niederlanden, wurde im Unterauftrag durch das Institut für Siedlungswasserbau der Universität Stuttgart erstellt.

Am 14.-16.10.1998 fand das 2. Experts Meeting in Annex 12 statt, diesmal in Malmö, Schweden. Die bisherigen Ergebnisse wurden vorgestellt; das Treffen diente aber hauptsächlich der Diskussion erfolversprechender Systemkonzepte mit Hochtemperatur-Untergrundspeicherung. Im Frühjahr 1999 wurden die noch fehlenden Daten zusammengetragen und ein Berichtsentwurf erstellt. Dieser wurde am 12.6.1999 einem halbtägigen Treffen von Experten des Annex 12 vorgestellt und dort diskutiert (am Rande des Annex-8-Meetings in Storforsen, Schweden).

Der endgültige Bericht zum Stand der Technik wurde dann noch 1999 veröffentlicht:  
SANNER, B. (Hrsg.) (1999): High Temperature Underground Thermal Energy Storage, State-of-the-art and Prospects. - Giessener Geologische Schriften 67, 158 S., Giessen

Im Zeitraum des Vorhabens wurde außerdem die deutsche Mitarbeit an IEA ECES Annex 8 und Annex 13 wahrgenommen sowie das Blatt 3 der Richtlinie VDI 4640 erstellt, das unterirdische thermische Energiespeicherung zum Gegenstand hat. Der Entwurf (Gründruck) dieser Richtlinie erschien im Februar 2000.

## **1.5 Projektverlauf der 2. Projektphase (0329809 B)**

### 1.5.1 Projektmanagement

Am 19./20.1.2000 fand ein erstes offizielles Treffen der verschiedenen Projektpartner in Berlin statt. Dabei wurden Wege der Informations- und Datenübergabe, Betreuungsmöglichkeiten im Reichstagsgebäude, Messprogramm und chemische Untersuchungen abgestimmt. Regelmäßige weitere Projekttreffen wurden nach Möglichkeit mit Sitzung im IEA-Rahmen oder anderen Tagungen verknüpft (z.B. Frühjahrestreffen 2001 im Annex 12 in Nijmegen oder Herbsttreffen 2001 in Neubrandenburg). Am 27.10.2003 erfolgte schließlich die Vorstellung der Ergebnisse im BMWA, Außenstelle Bonn.

### 1.5.2 Monitoring Aquiferspeicher Reichstag

Eine genaue Bearbeitung und Festlegung des Meßprogramms auf Basis der im Gebäude verfügbaren Datenpunkte erfolgte bei einem Gespräch zwischen GTN und IAG Anfang 2000. GTN erreichte nach langwierigen Abstimmungsgesprächen mit den Betreibern im Reichstagsgebäude eine befriedigende Art der Datenerfassung und -übergabe (seit August 2000 alle 2 Wochen Rohdaten auf CD). Frühere Daten seit Betriebsbeginn 1999 wurden, soweit möglich, übernommen bzw. rekonstruiert; hierbei sind noch einige Lücken zu verzeichnen. Die bisherige Betriebsgeschichte (vor August 2000) konnte dennoch im wesentlichen dargestellt werden.

Das Monitoring verlief schließlich wie folgt (Datenerfassung funktionierte nach den Anlaufschwierigkeiten ab Herbst 2000 reibungslos):

- Aufzeichnung Rohdaten durch die Betreiber
- Übergabe auf CD an GTN alle 2 Wochen
- Umarbeitung der Rohdaten, Sichtung, erste Auswertung durch GTN
- Weitergabe bearbeiteter Daten an Univ. Gießen

Im Jahr 2001 lief die Datenerhebung und -aufzeichnung im Reichstagsgebäude planmäßig weiter. Leider konnten in beiden Speichern (Wärme und Kälte) noch keine vollständigen Zyklen gemessen werden, da sich der Gesamtausbau des Energieverbands Plenarbereich Reichstagsgebäude verschleppte.

Im Jahr 2002 waren neben der weiteren Datenaufzeichnung erste Versuche mit Kälteeinspeicherung wie auch die Wärmeeinspeicherung mit erhöhter Leistung möglich, auch wenn die Gesamtanlage noch nicht vollem Betrieb war.

An den in Tab. 1-1 aufgelisteten Tagen fanden Probenahmen im Reichstag zur Wasseranalytik statt (näheres in Kap. 3).

Tab. 1-1: *Probenahme Aquiferwasser Reichstag*

Datum	Betriebszustand
4.5.2000	Wärmespeicher laden, Kältespeicher entladen
13.7.2000	Wärmespeicher versuchsweise entladen
5.-10.1.2001	Wärmespeicher laden, dann versuchsweise über mehrere Tage entladen
8.5.2001	Wärmespeicher versuchsweise entladen
1.10.2002	Wärmespeicher beladen, Kältespeicher entladen
27.5.2003	Wärmespeicher entladen, Kältespeicher entladen
16.9.2003	Wärmespeicher entladen, Kältespeicher entladen

### 1.5.3. In-situ-Testgeräte

Die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung der In-Situ-Testgeräte für Aquiferspeicher und Erdwärmesonden erfolgte seit Projektbeginn. Mit dem Thermal Response Test wurden bereits im Jahr 2000 routinemäßig Messungen gemacht, wobei auch hohe Temperaturen bis ca. 50 °C erreicht wurden (Standort Wärmespeicher Attenkirchen, Gerät Landtechnik Weihenstephan).

Während der Projektlaufzeit existierten drei Geräte in Deutschland, von denen zwei unmittelbar (Landtechnik Weihenstephan, UBeG Wetzlar) und eines mittelbar (Aetna Wildau) aus den IEA-Aktivitäten hervorgegangen sind. Bei einem IEA-Workshop in Mol im Oktober 2000 wurde neben theoretischem Austausch auch ein Test mit praktischem Geräteeinsatz und -vergleich durchgeführt (s. Kap. 4.1); dabei waren von deutscher Seite die Geräte LTW und UBeG im Einsatz. Im Herbst 2001 fand in Lausanne ein internationaler Workshop zu thermischen Response Test statt, der durch die Projektgruppe aktiv mitgestaltet wurde. Die Proceedings (erschienen Anfang 2002) sind zu erhalten unter:

<http://www.geothermie.de/literatur/gtvpublish.htm#ISBN 3-932570-43-X>

Das Testgerät für die Hydrochemie möglicher Aquiferspeicher-Standorte konnte bis Ende 2000 zwar weitgehend fertiggestellt, entgegen der Planung aber erst Anfang 2001 in Betrieb genommen werden. Es wurde dann während der Frühjahrstreffen des Annex 12 in Nijmegen in Betrieb vorgestellt. Weitere Meßreihen wurden 2001 auf Pellworm und in Stuttgart gefahren. Betriebserfahrungen liegen mittlerweile vor, eine Art Standardprozedur wurde abgestimmt, und eine erste Veröffentlichung lanciert. Im Jahr 2002 wurde das Gerät an mehreren Standorten eingesetzt, die inzwischen adaptierte Standardprozedur zur Bestimmung der maximalen Einspeisetemperatur ohne hydrochemische Probleme konnte untermauert werden.

#### 1.5.4. IEA ECES Annex 12 und 13

Die Arbeiten zu Annex 12 wurden bei folgenden Experts Meetings abgestimmt, es fand ein Austausch von Informationen zu Anlagen und zum Monitoring statt, und es wurden gemeinsame Datensammlungen durchgeführt:

18.-19.05.2000	Arnhem, NL	(Gastgeber IF Technology)
12.-13.10.2000	Mol, B	(Gastgeber VITO)

Bei dem Treffen in Mol wurde gemeinsam mit Annex 13 ein Workshop zum Thermal Response Test mit praktischem Geräteeinsatz und -vergleich durchgeführt (s. Kap. 4.1).

24.-25.04.2001	Nijmegen, NL	(Gastgeber IF Technology)
08.-09.11.2001	Neubrandenburg, D	(Gastgeber GTN)
15.-16.04.2002	Malmö, S	(Gastgeber Sweco)

Die Mitarbeit in Annex 13 (Zuarbeit zu Berichten) verlief wie vorgesehen, es wurden besonders Beiträge zu den Bereichen Thermal Response Test, optimierte Erdwärmesonden und Brunnenausbau geliefert. Folgende Treffen wurden besucht:

- Herbsttreffen 2000 in Mol, B
- Frühjahrestreffen 2001 in Nijmegen, NL
- Herbsttreffen 2001 in Adana, TR
- Frühjahrestreffen 2001 in Malmö, S
- Herbsttreffen 2002 in Amsterdam, NL

Die Berichte von den Experts Meetings Annex 12 sowie die Berichte des Operating Agent an das Executive Committee von IEA ECES wurden bereits jeweils nach Fertigstellung an PTJ übermittelt.

#### 1.5.5 Weitere Arbeiten

In Verbindung mit dem FuE-Vorhaben wurden noch folgende Arbeiten durchgeführt:

- Mitarbeit an der Arbeitsgruppe zu Kosten für Langzeit-Wärmespeicher bei ITW / BEO; verschiedene Treffen in den Jahren 2000-2002, Vorstellung von Ergebnissen bei BMWi in Bonn im Januar 2001
- Mitarbeit (Leitung des Richtlinienausschusses) an der Richtlinie VDI 4640. Blatt 3, das die unterirdische thermische Energiespeicherung zum Inhalt hat, konnte 2001 erscheinen. Inzwischen wurde die Revision der Blätter 1 (Grundlagen) und 2 (erdgekoppelte Wärmepumpen) in Angriff genommen.
- Diverse Vorträge und Schulungen, z.B. in Verbindung mit der Geothermischen Vereinigung e.V. (GtV), dem Haus der Technik in Essen, OTTI/LTW/ZAE in Freising und Garching, u.a.
- In den Jahren 2001, 2002 und 2003 wurden jeweils Kurse bei Veranstaltungen der „International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy“ (Sitz Skopje, Mazedonien) gegeben:  
2001 International Geothermal Days Bad Urach, in Verbindung mit GtV, mit dreitägigem Kurs zur Oberflächennahen Geothermie und Energiespeicherung.

2002 International Geothermal Days Thessaloniki/Griechenland, thermische Untergrundspeicher werden mit einer gemeinsamen Lehrveranstaltung der Universitäten Gießen und Adana/Türkei vorgestellt (Ergebnis von IEA-Zusammenarbeit).

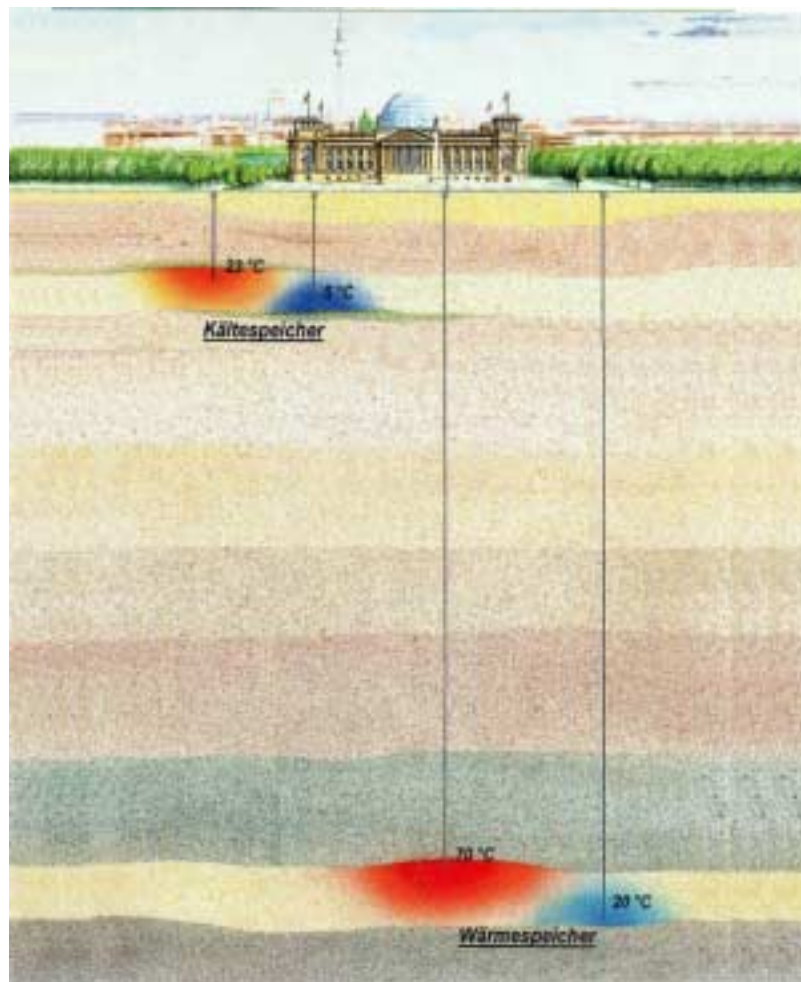
2003 International Geothermal Days Izmir/Türkei, mit Lehrveranstaltung zu thermischen Untergrundspeichern durch IAG, IÖU und Univ. Adana/Türkei

Das Kursmaterial von 2001 und 2002 konnte bis zur Schließung des IAG als pdf-Files geladen werden unter:

<http://www.uni-giessen.de/~gg1068/html/literatur.html>

Das Material von 2001 ist außerdem noch über die Website der GtV verfügbar:

<http://www.geothermie.de>



Graphik: GTN

## 2. Energetisches Monitoring der Aquiferspeicher

### 2.1. Anlagenbeschreibung

#### 2.1.1 Energiekonzept, Energiebedarf

Der Energieverbund im Berliner Spreebogen umfasst neben dem Reichtagsgebäude und dem Bundeskanzleramt die benachbarten Parlamentsgebäude „Jakob-Kaiser-Haus“, „Paul-Löbe-Haus“ und „Marie-Elisabeth-Lüders-Haus“ (in Abb. 2-2 noch als „Alsenblock“, „Luisenblock“ und „Dorotheenblöcke“ bezeichnet), in denen die Sitzungsräume der Bundestagsausschüsse und der Fraktionen sowie die Abgeordnetenbüros untergebracht sind. Stromerzeugung und Warmwasserbereitung erfolgen durch zwei mit Pflanzenöl angetriebene Blockheizkraftwerke (elektrische Gesamtleistung 3.200 kW). Der Reststrom für Spitzenlastzeiten und Ersatzstromversorgung wird aus dem öffentlichen Netz bezogen. Die von den beiden BHKW auf einem Temperaturniveau von 110°C produzierte Wärme wird direkt zur Versorgung von Hochtemperatur- und teilweise von Niedertemperatur-Heiznetzen genutzt. Zusätzlich dient sie dem Antrieb von diversen Absorptionskältemaschinen oder –wärmepumpen.

Tab. 2-1: Energiebedarf des Gebäudeensembles:

Strom	8.600 kW	19.500 MWh/a
Wärme	12.500 kW	16.000 MWh/a
Kälte	6.200 kW	2.800 MWh/a

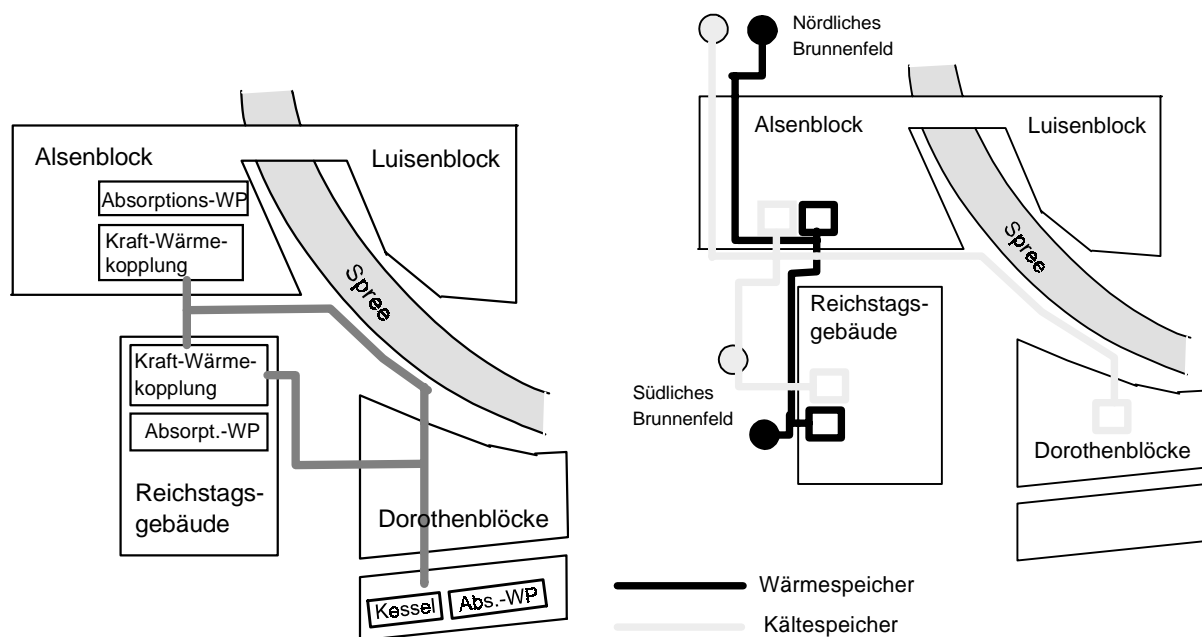


Abb. 2-2: Energieverbund Parlamentsbauten (links) und Lage der Speicherbrunnen (rechts)



Tabelle 2-4: Kenndaten des Wärmespeichers

<b>Sommer</b> (Beladung)	• mittlere Fördertemperatur	20°C
	• Injektionstemperatur	70°C
	• eingelagerte Wärme	2.650 MWh/a
<b>Winter</b> (Entladung)	• Fördertemperatur	65-30 °C
	• entnommene Wärme	2.050 MWh/a
<b>Bilanz</b>	• Förderaufwand	280 MWh
	• Verhältnis genutzter zu eingelagerter Wärme	77 %

\* Kenndatenermittlung auf Basis dynamischer Simulationsrechnung: Temperaturveränderungen während des Entladezyklus sind berücksichtigt. Das System befindet sich noch nicht in „eingeschwungenem Zustand“.

### 2.1.3 Kältespeicherung im Aquifer

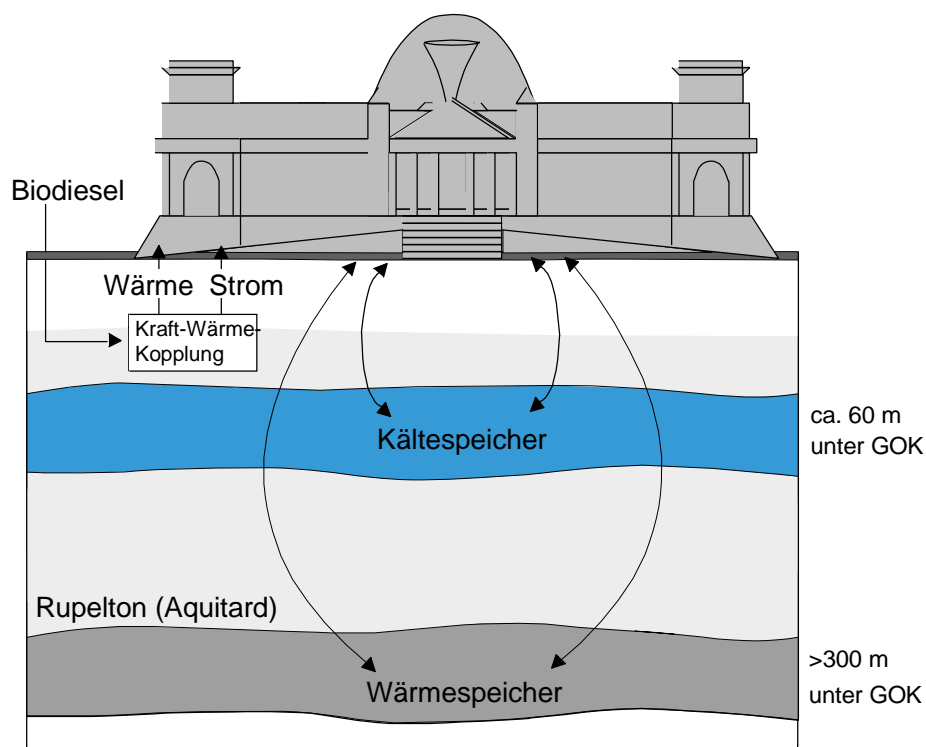


Abb. 2-5: Lage des Kältespeichers (schematisch)

In einer deutlich geringeren Tiefe (ca. 50 m) wurde unter dem Spreebogen ein weiterer Aquiferspeicher erschlossen. Er dient primär der Gebäudekühlung. Süßes Grundwasser (max. 300 m<sup>3</sup>/h aus 5 Bohrungen) wird dazu im Winter auf 5 °C abgekühlt. Im Wesentlichen geschieht dies bei Außentemperaturen unterhalb 0 °C in trockenen Kühltürmen mittels Umgebungskälte.

Die im Winter in den Erdboden eingelagerte Kälte versorgt im Sommer Hochtemperatur-Kühlsysteme (16 °C / 19 °C) im direkten Wärmehaushalt. Absorptionskältemaschinen, die mit der Abwärme der Blockheizkraftwerke betrieben werden, bedienen die Niedertemperatur-Kältenetze. Der Rückkühlungsbedarf dieser Maschinen wird durch die oben genannten Kühltürme sowie bei hohen Außentemperaturen durch den Kältespeicher gedeckt, der so auf maximal 30 °C erwärmt wird. Auf diesem Wege bildet sich erneut die Wärmequelle der Wärmepumpen für den nächsten Winter.

*Tabelle 2-6: Kenndaten des Kältespeichers*

<b>Sommer</b> (Entladung)	• Fördertemperatur	6-10°C
	• Injektionstemperatur	15-28°C
	• entnommene Kälte	3.950 MWh/a
<b>Winter</b> (Beladung)	• Mittlere Fördertemperatur	22°C
	• Injektionstemperatur	5°C
	• eingelagerte Kälte	4.250 MWh/a
<b>Bilanz</b>	• Förderaufwand	220 MWh
	• Verhältnis genutzter zu eingelagerter Kälte	93 %

*\* Kenndatenermittlung auf Basis dynamischer Simulationsrechnung: Temperaturveränderungen während des Be- und Entladezyklus sind berücksichtigt. Das System befindet sich noch nicht in „eingeschwungenem Zustand“.*

## 2.2 Messprogramm

Eine genaue Bearbeitung und Festlegung des Meßprogramms auf Basis der im Gebäude verfügbaren Datenpunkte erfolgte bei einem Gespräch zwischen GTN und IAG Anfang 2000. GTN erreichte nach langwierigen Abstimmungsgesprächen mit den Betreibern im Reichstagsgebäude eine befriedigende Art der Datenerfassung und -übergabe (seit August 2000 alle 2 Wochen Rohdaten auf CD). Frühere Daten seit Betriebsbeginn 1999 wurden, soweit möglich, übernommen bzw. rekonstruiert; hierbei sind noch einige Lücken zu verzeichnen. Die bisherige Betriebsgeschichte (vor August 2000) kann dennoch im wesentlichen dargestellt werden.

Die Art der Datenaufzeichnung erforderte an einer Reihe von Stellen Kalibrierfaktoren (Beispiel: Eine Temperatur von -20 bis +100 °C wird in 100 diskreten Schritten erfaßt; der Ablesewert 20 bedeutet also +4 °C, der Wert 40 entspricht 28 °C). Mangels ausreichender Dokumentation der Betreiber wurden einige dieser Faktoren erst aus den Betriebsmessungen erkannt, teilweise war dazu der Rückförderversuch nötig. Inzwischen dürften alle Kalibrierfaktoren bekannt sein, und die relevanten Datenreihen wurden korrigiert.

Das Monitoring verlief schließlich wie folgt (Datenerfassung funktionierte nach den Anlaufschwierigkeiten ab Herbst 2000 reibungslos):

- Aufzeichnung Rohdaten durch die Betreiber
- Übergabe auf CD an GTN alle 2 Wochen
- Umarbeitung der Rohdaten, Sichtung, erste Auswertung durch GTN
- Weitergabe bearbeiteter Daten an Univ. Gießen

### 2.3 Messergebnisse

Von Betriebsbeginn im Jahr 1999 an bis zum Herbst 2002 konnten sowohl der Wärme- als auch der Kältespeicher nur in jeweils einer Betriebsrichtung gefahren werden:

- Der Wärmespeicher wurde im Beladebetrieb gefahren, wobei anfangs die Temperaturen wegen der noch fehlenden weiteren BHKW-Gruppe im Paul-Löbe-Haus nur im Bereich von 40-50 °C liegen konnten. Eine sinnvolle Nutzung des eingespeicherten Wasser ist bei diesen Temperaturen nicht gegeben.
- Der Kältespeicher wurde nur im Entladebetrieb (Kühlbetrieb) gefahren, da die Rückkühlanlage auf dem Dach des Paul-Löbe-Hauses noch fehlte; dadurch wärmte sich der Untergrund um die Injektionsbrunnen (nördliche Brunnengruppe) stetig auf.

Seit Herbst 2002 ist das Paul-Löbe-Haus mit der zugehörigen Technik fertiggestellt und die Anlage kann voll betrieben werden.

Die Beladung des Aquifers für den Wärmespeicherbetrieb erfolgt nun möglichst nahe der maximal zulässigen Temperatur von 70 °C. Bei hohem Wärmeüberschuss im Sommer kann kontinuierlich eingespeichert werden. Typisch war bisher jedoch der stundenweise Einspeicherbetrieb. Der Aquifer-Wärmespeicher am Reichstagsgebäude wurde bis zum Herbst 2002 ausschließlich beladen, so dass das erste reguläre Betriebsjahr mit der Ausspeicherung im Winter 2002/2003 abgeschlossen wurde. Abb 2-7 zeigt den Temperaturverlauf über den gesamten Jahreszyklus. Die Beladung begann im April mit mittleren Temperaturen um 55 °C und lief über den gesamten Sommer. Nach einer Phase mit nur sporadischer Einlagerung startete Ende November die Rückförderung des warmen Wassers (blaue Kurve). Die Wärmeentnahme erfolgte im Unterschied zur Beladung kontinuierlich. Selbst die mittleren Raten waren höher als beim Beladen, so dass die über den Sommer eingelagerte Wassermenge schneller rückgefördert war.

In den Abb. 2-8 bis 2-11 sind typische Betriebszustände der beiden Speicher dargestellt.

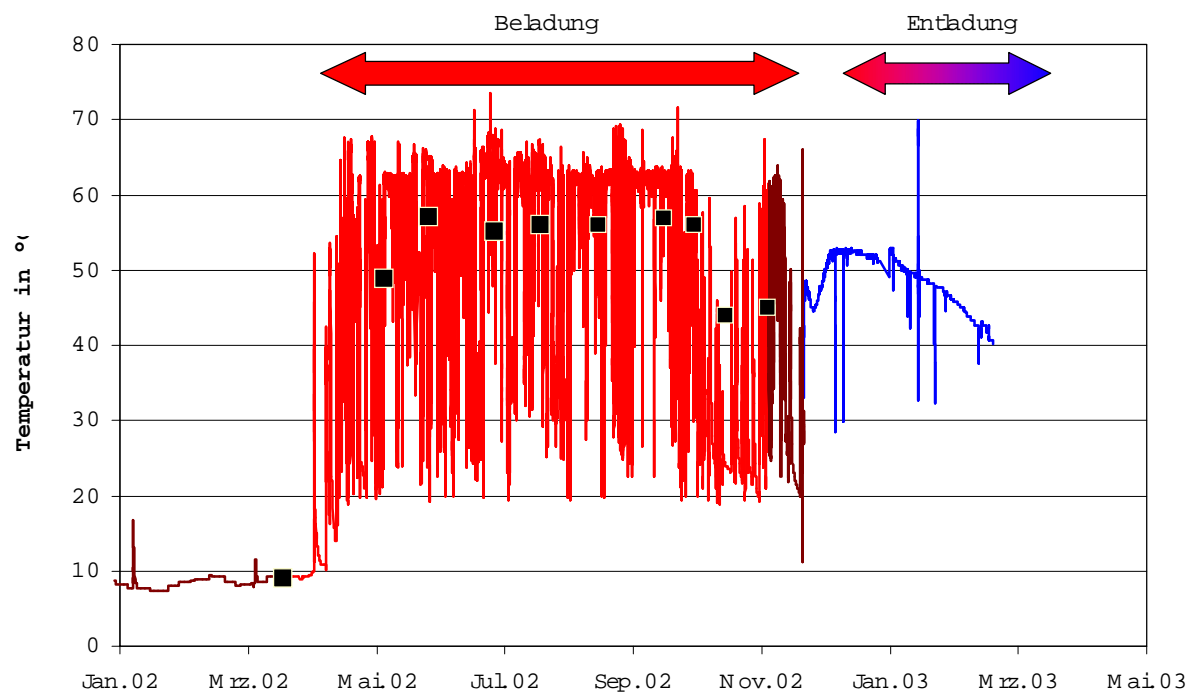


Abb 2-7: Jahressgang der Brunnenkopftemperatur an der warmen Seite des Wärmespeichers (Graphik GTN)

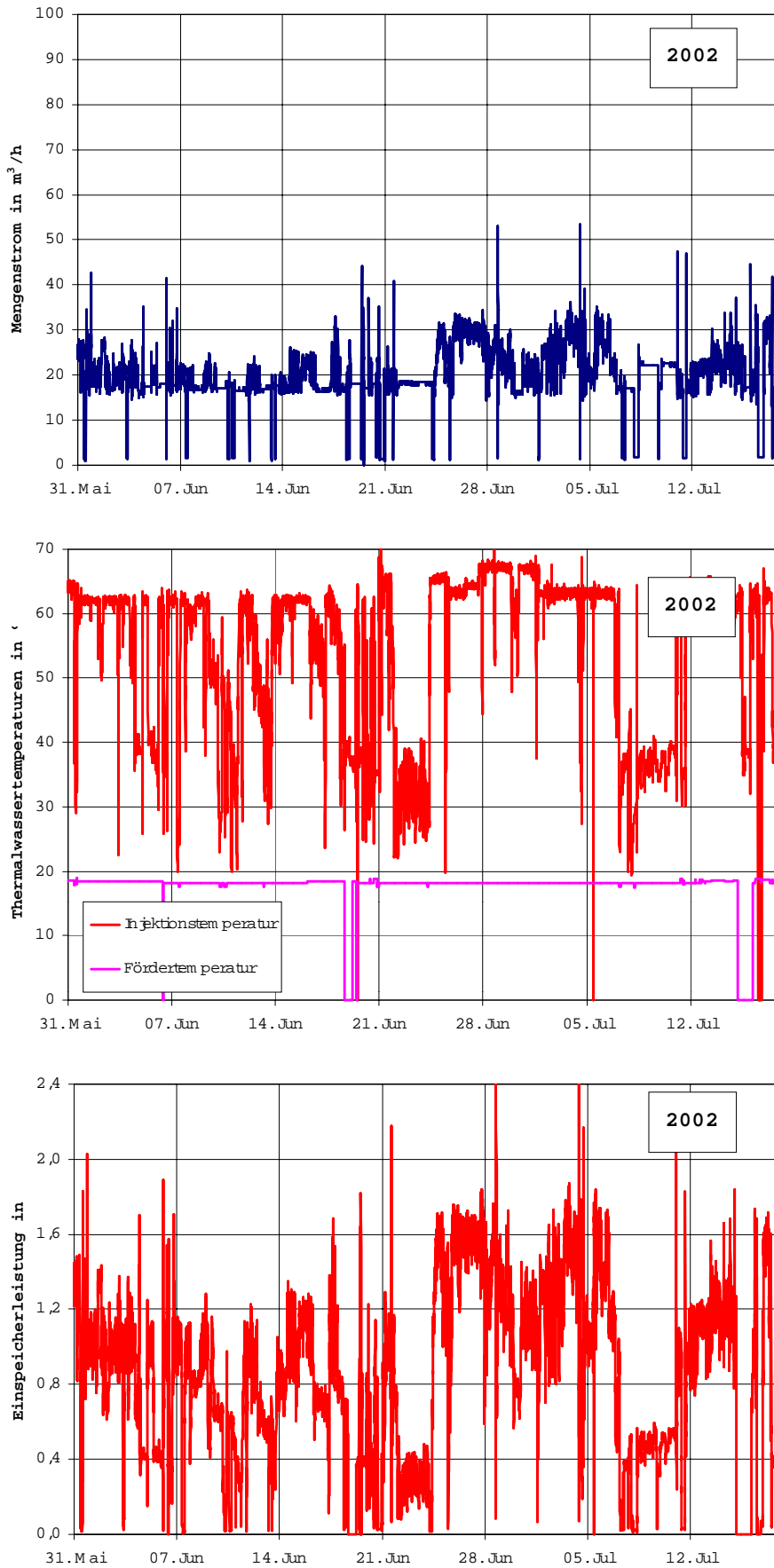


Abb. 2-8: Wärmespeicher: Volumenstrom, Temperaturen und Leistung bei der Wärmeeinspeisung im Sommer 2002

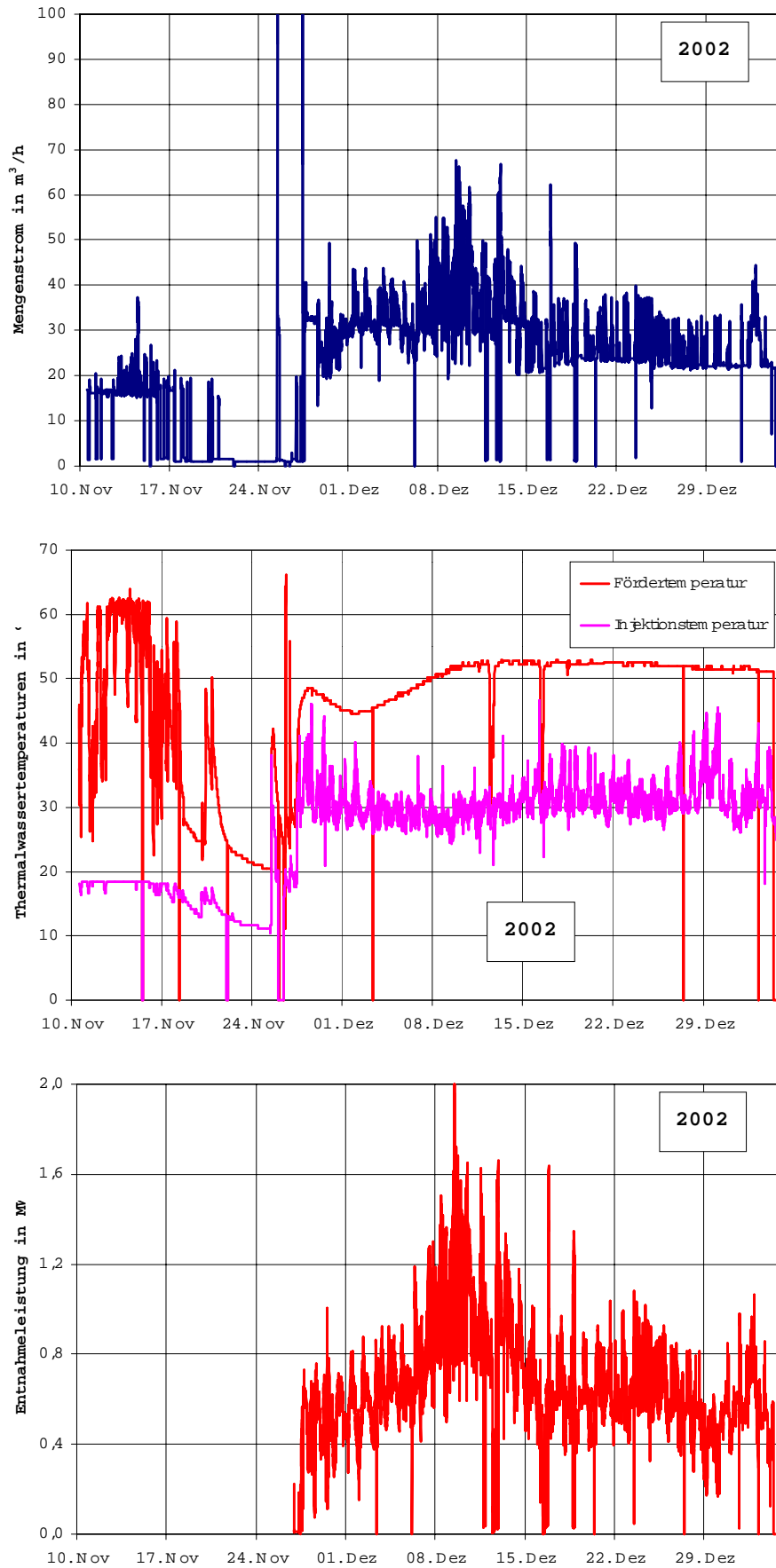


Abb. 2-9: Wärmespeicher: Volumenstrom, Temperaturen und Leistung bei der Wärmeentnahme im Winter 2002/03

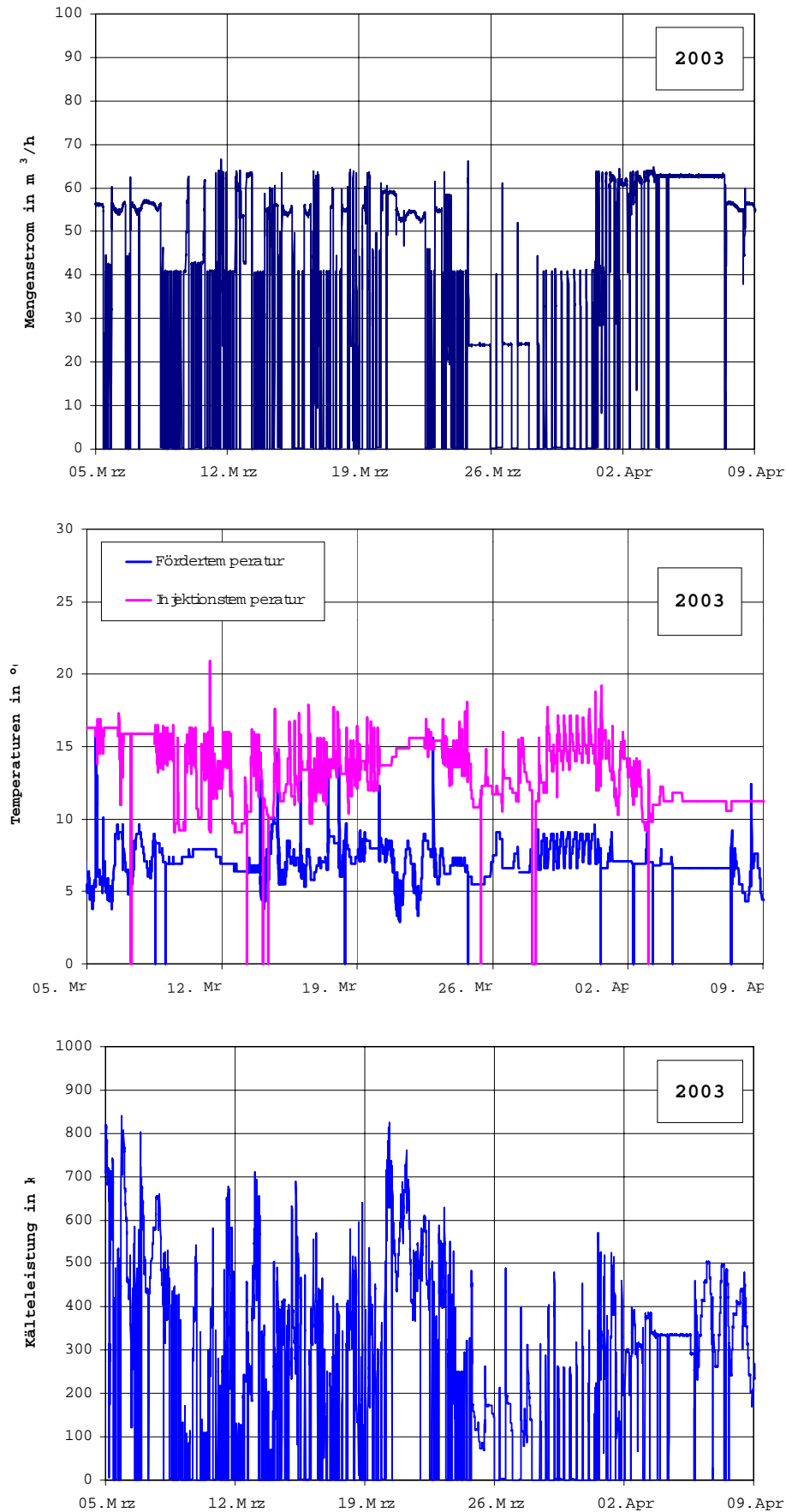


Abb. 2-10: Kältespeicher: Volumenstrom, Temperaturen und Leistung beim Kühlbetrieb im Frühjahr 2003

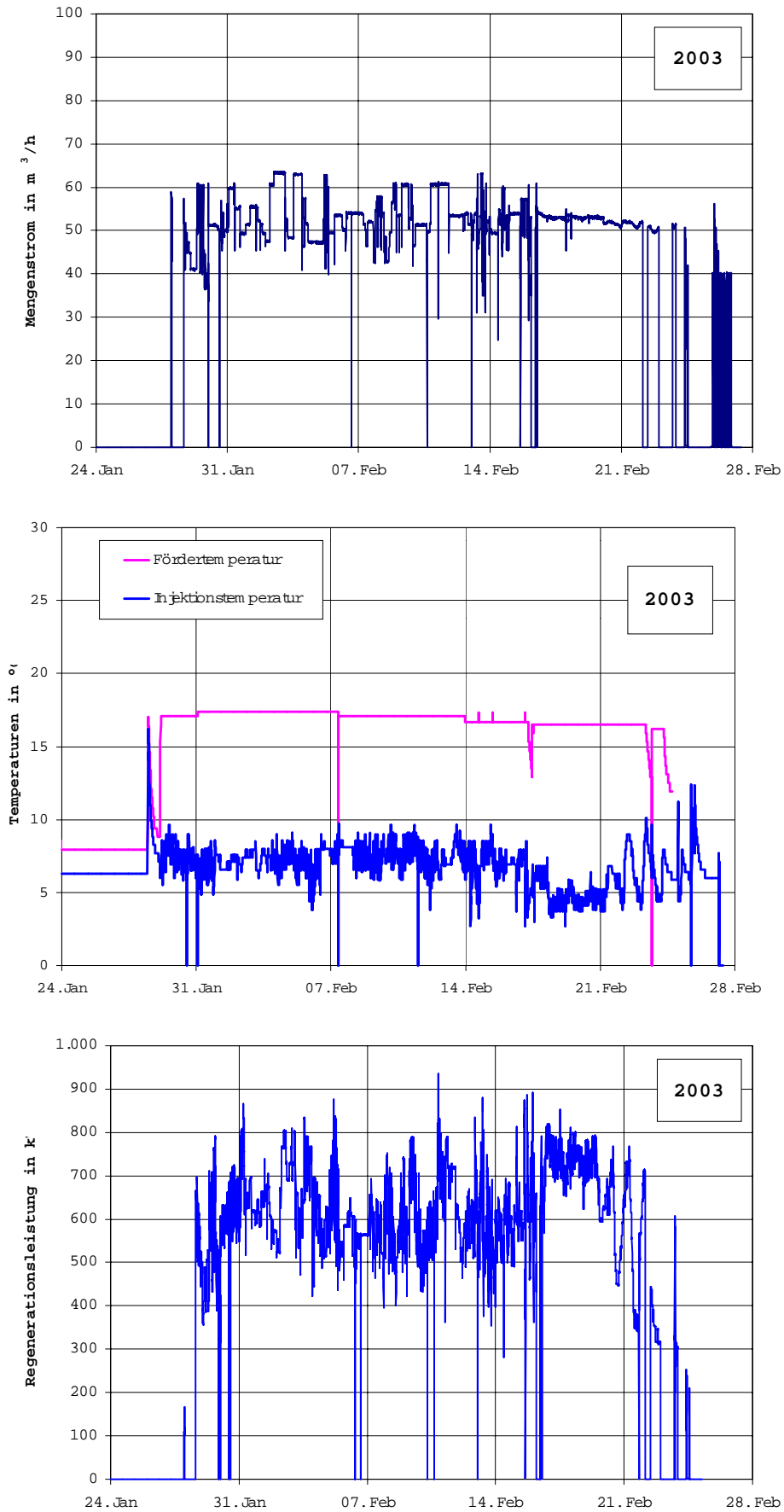


Abb. 2-11: Kältespeicher: Volumenstrom, Temperaturen und Leistung beim Regenerationsbetrieb im Winter 2002/03

## 2.4 Modellierung

Bereits in der Entwurfs- und Planungsphase sind numerische Simulationen durchgeführt worden, um das Betriebsverhalten des Speichers zu prognostizieren (1993/94 durch IAG, danach durch GTN). Im Rahmen von Projekt 0329809 B wurden nun die vorhandenen Modelle für den Wärme- bzw. Kältespeicher mit den während des Baus gewonnenen Untergrunddaten neu kalibriert und das bisherige, gemessene Betriebsverhalten simuliert. Die Arbeiten sind in den GTN-Berichten im Detail dokumentiert (s. 6.2).

Obwohl der Betrieb der Anlage unter den endgültigen Bedingungen erst am Ende der Projektlaufzeit möglich wurde, konnte die Aussagekraft der Modelle dennoch bereits an einigen Punkten mit gemessenen Daten überprüft werden.

Für den Wärmespeicher ist dies die Rückfördertemperatur im Winter 2002/2003. Abb. 2-12 zeigt hier den Vergleich der gemessenen mit den berechneten Daten. Die Übereinstimmung ist, nach anfänglich sehr schwankenden Messwerten, schließlich sehr eng geworden.

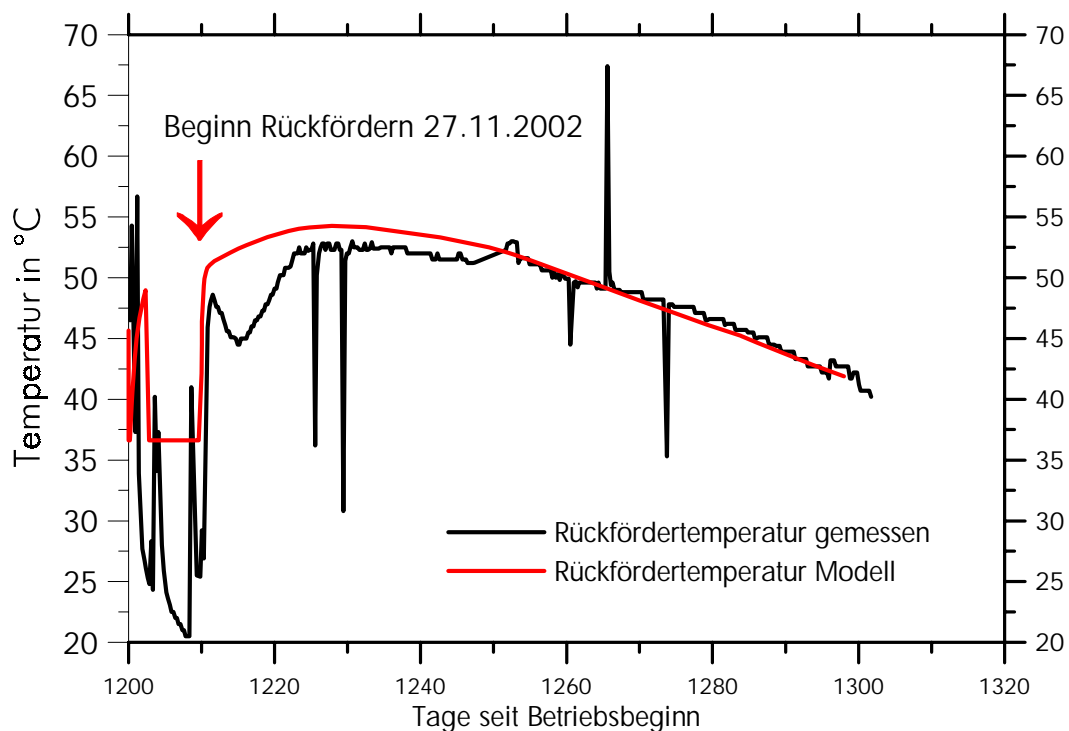


Abb. 2-12: Wärmespeicher: Vergleich der gemessenen und berechneten Rückfördertemperatur im Winter 2002/03

Auch beim Kältespeicher wurde eine Validierung des Modells möglich. Die Blase erwärmten Wassers hat sich im Verlauf von 3 Jahren ohne winterliche Rückkühlung bis in den Bereich des Beobachtungspegels 1 ausgedehnt. Dies ist sowohl aus der Modellierung zu erkennen (Abb. 2-13), als auch aus den Temperaturprofilen in Abb. 2-14. Es ist nun möglich, die Temperaturentwicklung an diesem Pegel den berechneten Werten an der gleichen Stelle im Modellgebiet gegenüberzustellen. Die Übereinstimmung ist recht zufriedenstellend.

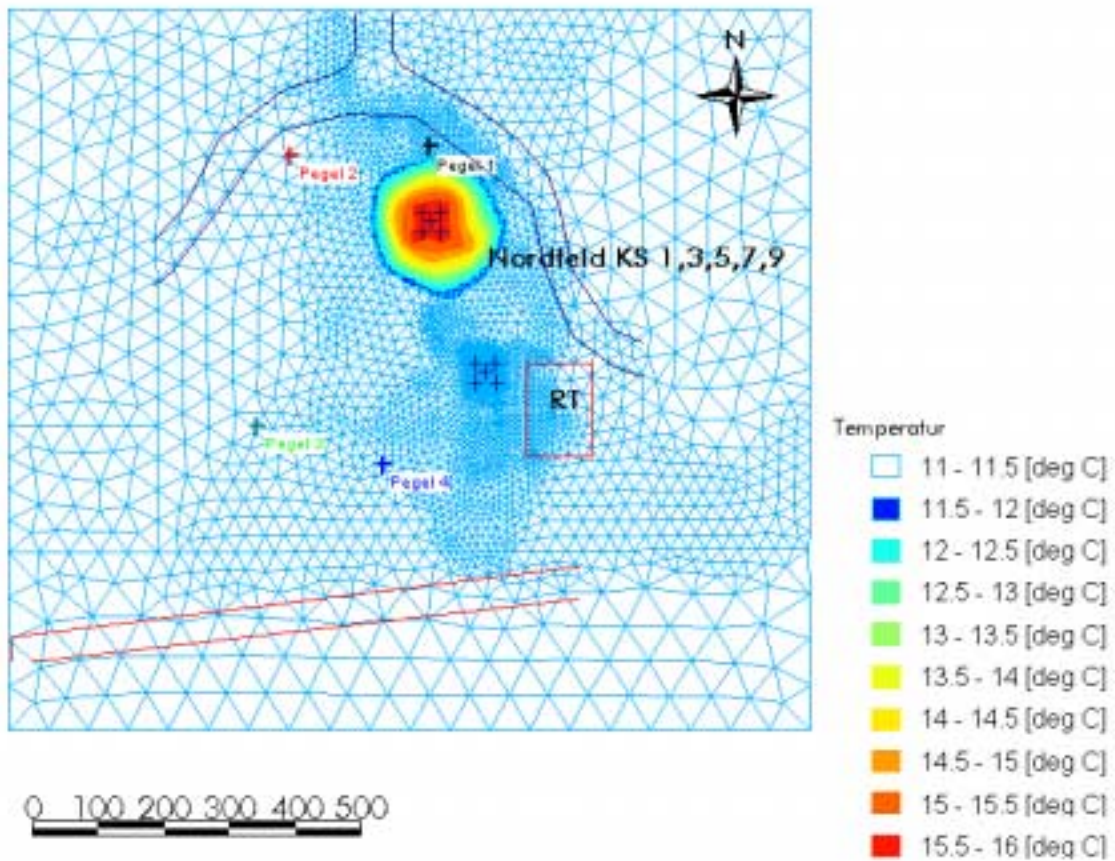


Abb. 2-13: Kältespeicher: Simulierte Temperaturverteilung im März 2002

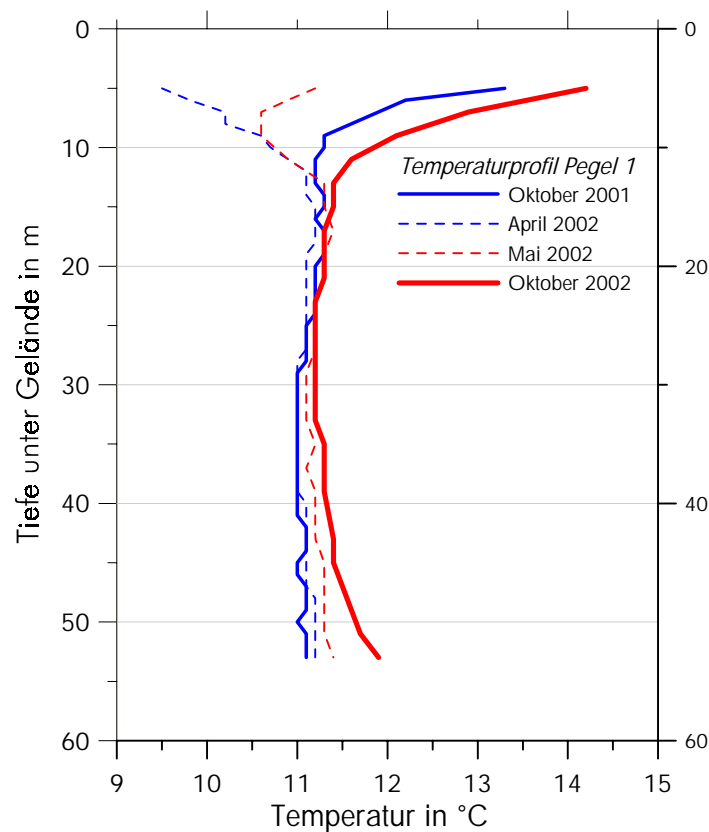


Abb. 2-14 Kältespeicher; Temperaturprofile in Beobachtungspegel 1

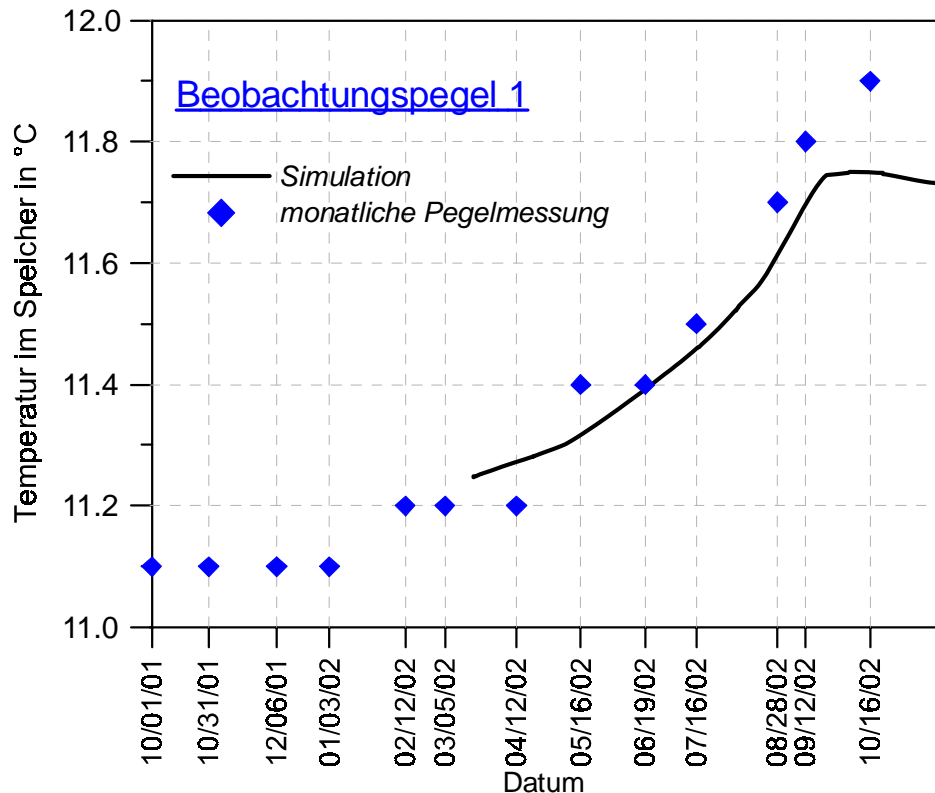


Abb. 2-15: Vergleich der Temperaturentwicklung an Pegel 1 mit den berechneten Werten an der gleichen Stelle im Modellgebiet; der Anstieg von Anfang April 2002 bis Ende September 2002 ist deutlich zu sehen (Wärmeeintrag aus Raumkühlung).

Die Kalibrierung der Modelle mit den beim Bau festgestellten Untergrundverhältnissen und die Validierung mit gemessenen Werten erlaubt nunmehr für die Zukunft, das Betriebsverhalten beider Speicher vorherzusagen. Dies erschließt neue Optimierungsmöglichkeiten für die Betriebsstrategie der Speicher. Die Modelle können aber auch zur Überwachung eines korrekten Speicherbetriebs eingesetzt werden.

### 3. Chemisches Monitoring der Aquiferspeicher

Zur Beurteilung der chemischen Entwicklung der Aquiferwässer in Kälte- und Wärmespeicher wurden über die Projektlaufzeit verteilt Proben genommen und analysiert. Vorgesehen war neben der Beprobung des natürlichen Rohwassers (erfolgte am 4.5.2000) vor allem die Untersuchung des jeweils rückgeführten Wassers in einem neuen Speicherzyklus. Wegen der verspäteten Inbetriebnahme des Gesamtsystems kam es während der Projektlaufzeit jedoch nicht zu einem vollen Speicherzyklus.

Die Durchführung von Probenahme und Analytik erfolgte im Unterauftrag durch die Universität Lüneburg, die Auswertung durch die Universität Gießen.

#### 3.1. Durchführung der Probenahmen

##### 3.1.1 Allgemeines

Die Probenahmen erfolgten übertage aus dem Förderstrom des jeweiligen Aquifers. Die relevanten Probenahmestellen sind den Ergebnisberichten der jeweiligen Probenahme zu entnehmen. An keiner Stelle war zur Durchführung der Probenahme der Einsatz einer Pumpe nötig, da es sich bei allen beprobten Systemen um technische Anlagen mit gepumpten Wasserkreisläufen handelt.

Vor der eigentlichen Probenahme erfolgte die Online-Messung der folgenden Parameter:

- Temperatur
- Leitfähigkeit
- pH-Wert
- Redox-Potential
- Sauerstoffgehalt

Zur Online-Messung wurden die Elektroden an einem Stativ befestigt und in einen PE-Becher eingehängt, der über einen am Becherboden endenden Schlauch permanent mit gefördertem Grundwasser durchströmt wurde (ca 6 l/min). Ein Beispiel für diese Online-Messung zeigt Abb. 3-1. Die Online-Messwerte wurden in Zeitintervallen von 5 bis 10 Minuten dokumentiert und, sobald sich eine Stabilisierung aller Parameter eingestellt hat, die eigentliche Probenahme vorgenommen. Dazu wurde der Volumenstrom im Probenahmeschlauch auf ca. 1,5 l/min reduziert und der vorbereitete Probenflaschensatz erst gespült (mit Ausnahme der Mikrobiologieprobenflasche, BSB-Flasche mit CaCO<sub>3</sub>) und dann möglichst blasenfrei befüllt.

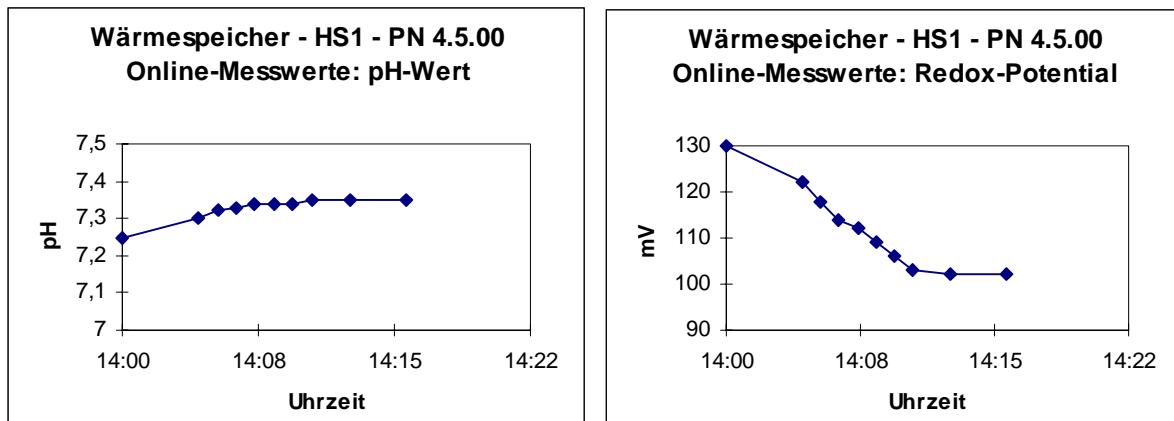


Abb. 3-1: Online-Messung von pH-Wert und Redox-Potential bis zur Stabilisierung während der Probenahme am 4.5.2000

### 3.1.2 Messparameter und eingesetzte Analysenverfahren

Die chemische Analytik wurde jeweils in Anlehnung an die gültigen Normen (deutsche Einheitsverfahren) durchgeführt. Abweichungen davon erfolgte in Absprache mit dem Projektleiter. Tabellen 3-2a und 3-2b listen die untersuchten Parameter und die verwendeten Verfahren auf.

Die unter dem Oberbegriff Mikrobiologie zusammengefassten Parameter wurden an das IWW (Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH) fremdvergeben.

Tabelle 3-2a: Zusammenstellung der Messparameter – a) vor-Ort-Parameter

	Kürzel	Einheit	DEV-Kapitel	Methoden	Verw. Meth.
pH-Wert	pH	1	C5	Elektrom.	Elektrom.
Redoxpotential	EH	mV	C6	Elektrom.	Elektrom.
elektrische Leitfähigkeit (Ref:25°C)	LF	$\mu\text{S}/\text{cm}$	C8	Elektr. LF	Elektr. LF
Sauerstoff-Gehalt	O2	mg/l	G22	Amperom.	Amperom.
Temperatur	T	°C	C4	Elektr. LF	Elektr. LF
Färbung (visuell)	Farbe		C1	Visuell	Visuell
Trübung (visuell)	Trübe		C2	Visuell	Visuell
Geruch	Smell			Olfaktorisch	Olfaktorisch
Bodensatz	Satz			Visuell	Visuell
Nitrit	$\text{NO}_2^-$	mg/l	Merck-ST	Photomet.	Photomet.
Ammonium	$\text{NH}_4^+$	mg/l	Merck-ST	Photomet	Photomet
Sulfid - gelöst	$\text{S}^{2-}$	mg/l		Photom	Photom

Tabelle 3-2b: Zusammenstellung der Messparameter – b) Laborparameter

Physik.-Chem. Parameter					
pH-Wert	pH		C5	Elektrom.	Elektrom.
Mineralisation (rechn.)	---	mg/l	---	Rechn.	Rechn.
Trockenrückstand (105°C)	TS	mg/l	H1	Abdampf	Abdampf
Trockenrückstand (180°C)	TS	mg/l	H1	Abdampf	Abdampf
Dichte	Rho	g/cm <sup>3</sup>	C9	Pykno	Pykno

Summenparameter & Sonstige:					
Säurekapazität pH4,3 (m-Wert)	SK	mmol/l	H7	Titration	Titration
Basenkapazität pH 8,2 (-p-Wert)	BK	mmol/l	H7	Titration	Titration
Härtehydrogencarbonat	KH	mmol/l	H6-H7-D8	Rechn.	Rechn.
		°dH	H6-H7-D8	Rechn.	Rechn.
Gesamthärte	GH	mmol/l	H6	Rechn.	Rechn.
		°dH	H6	Rechn.	Rechn.
Kohlendioxid - frei,gelöst	CO <sub>2</sub>	mg/l	D8	Rechn.	Rechn.
Gelöster organischer Kohlenstoff	DOC	mg/l	H3	Vergabe	Vergabe
An A-Kohle ads. Org. Halogenverb.	AOX	mg/l	H14	Coulom.	Coulom.

Kationen:					
Kalium	K <sup>+</sup>	mg/l	E27 / E13 / E22	FAA / ICP	
Natrium	Na <sup>+</sup>	mg/l	E27 / E14 / E22	FAA / ICP	ICP
Calcium	Ca <sup>2+</sup>	mg/l	E22	ICP	ICP
Magnesium	Mg <sup>2+</sup>	mg/l	E 22	ICP	ICP
Ammonium	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	E5	Photom.	Photom.
Barium	Ba <sup>2+</sup>	mg/l	E22	ICP	ICP
Mangan	Mn <sup>2+</sup>	mg/l	E22	ICP	ICP
Aluminium	Al <sup>3+</sup>	mg/l	E22	ICP	ICP
Eisen - gesamt	Fe	mg/l	E22	ICP	ICP
Strontium	Sr <sup>2+</sup>	mg/l	E22	ICP	ICP
Chrom	Cr	mg/l	E10 (E22)	GAA (ICP)	ICP
Nickel	Ni	mg/l	E11 (E22)	GAA (ICP)	ICP
Zink	Zn	mg/l	E22	ICP	ICP
Blei	Pb	mg/l	E6 (E22)	GAA (ICP)	ICP
Kupfer	Cu	mg/l	E22	ICP	ICP
Cadmium	Cd	mg/l	E19	GAA	ICP
Quecksilber	Hg	mg/l	E12 / E31	CVAA	CVAA
Arsen	As	mg/l	Keine DEV / D18	GAA / Hydrid	ICP

Anionen:					
Chlorid	Cl <sup>-</sup>	mg/l	D1/D19/D20	Tit. / IC	IC
Sulfat	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	D19 / D20 / E22	IC / ICP	IC
Hydrogencarbonat	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	D8	Rechn.	Rechn.
Nitrat	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	D19 / D20	IC	IC
ortho-Phosphat	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/l	D11 / D19	Phot./ IC	Phot./ IC
Silicium - gesamt (berechnet als SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	E22	ICP	ICP
Bor - gesamt (berechnet als BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup> )	BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>	mg/l	E22	ICP	ICP

Mikrobiologie:			
Koloniezahl (20°C), (Agar-NB 44h)	CFU	1/ml	TVO
Koloniezahl (36°C), (Agar-NB 44h)	CFU	1/ml	TVO

### 3.2 Probenahmen

Da sich beide Aquiferspeicher während der Projektlaufzeit noch nicht im endgültigen, jahreszeitlich-zyklischen Betrieb befanden, konnte sinnvolle Probenahme von eingespeichertem Wasser nur während kurzer Zeiträume im Probe-Rückförderbetrieb erfolgen. Die Bundestagesverwaltung hat hier dankenswerterweise sehr gut kooperiert und bei diesen seltenen Vorkommnissen die Terminierung und Koordinierung der Probenahme ermöglicht. Erstmals konnte rückgefördertes Wasser aus dem Wärmespeicher am 13.7.2000 beprobt werden.

Da im Kältespeicher in den ersten Jahren nur Kühlbetrieb gefahren wurde, d.h. Pumprichtung immer von kälteren (Süd) zu wärmeren (Nord) Brunnen, wurde darauf verzichtet, das natürliche Grundwasser aus dem südlichen Brunnenfeld wiederholt zu beproben. Erst nachdem für den Winter 2002/03 die erste Rückkühlung des Kältespeichers bevorstand, wurde im Herbst 2002 der Kältespeicher erneut beprobt.

Folgende Probenahmen wurden durchgeführt:

- Kältespeicher
  - 04.05.2000 kalte Brunnengruppe
  - 01.10.2002 kalte Brunnengruppe
  - 27.05.2003 kalte Brunnengruppe
  - 16.09.2003 kalte Brunnengruppe
- Wärmespeicher
  - 04.05.2000 kalter Brunnen
  - 13.07.2000 warmer Brunnen
  - 05.01.2001 kalter Brunnen
  - 8.-10.01.2001 warmer Brunnen
  - 08.05.2001 warmer Brunnen
  - 01.10.2002 kalter Brunnen
  - 27.05.2003 warmer Brunnen
  - 16.09.2003 warmer Brunnen

Die eingehenden Dokumentationen und Beurteilungen der Probenahmen sowie die kompletten Analyseergebnisse sind im Teilbericht Universität Lüneburg enthalten.

Nachfolgend wird die Entwicklung einiger für den Anlagenbetrieb wichtiger Schlüsselparameter während der Probenahmen am 4.5.2000 und am 13.7.2000 dargestellt; in Kap. 3.3. wird eine Bewertung der Entwicklung der Wasserchemie über den Untersuchungszeitraum versucht.

Während der ersten Probenahme, die am 4.5.2000 stattfand, wurden Proben an drei unterschiedlichen Punkten im obertägigen Wärmespeichersystem entnommen. Die Anlage befand sich dabei im Einspeicherbetrieb, d.h. Entnahme aus dem kalten Brunnen, Erwärmung über den Wärmetauscher, und Injektion in den warmen Brunnen. In Abb. 3-3 sind die Ergebnisse an den drei Punkten dargestellt:

- kalt, vor Filter Rohwasser aus dem kalten Brunnen
- kalt, nach Filter Wasser aus dem kalten Brunnen nach Durchlaufen der Filter
- kalt, vor Inj. Wasser aus dem kalten Brunnen, nach Durchlaufen der Wärmetauscher, vor Injektion in den warmen Brunnen

In Abb. 3-3 (oben) ist deutlich die Temperaturzunahme zwischen dem zweiten und dem dritten Probenahmepunkt zu sehen, wo das Wasser die Wärmetauscher durchströmt. Wie zu erwarten war, blieben die meisten relevanten Parameter trotz der Erwärmung gleich. Lediglich das Redox-Potential wird durch Filter und Erwärmung beeinflusst. Beachtenswert ist auch, dass die für temperaturbedingte Ausfällungen kritischen Parameter Gesamthärte (GH), Calcium (Ca) und Hydrogenkarbonat ( $\text{HCO}_3$ ), die in Abb. 3-3 (unten) dargestellt sind, keine Veränderung zeigen. Eine Erwärmung um 20 °C reicht hier offensichtlich nicht aus; Temperaturen von mehr als etwa 40 °C konnten jedoch in der ersten Phase, vor Anschluss der BHKWs im Paul-Löbe-Haus, nicht erreicht werden.

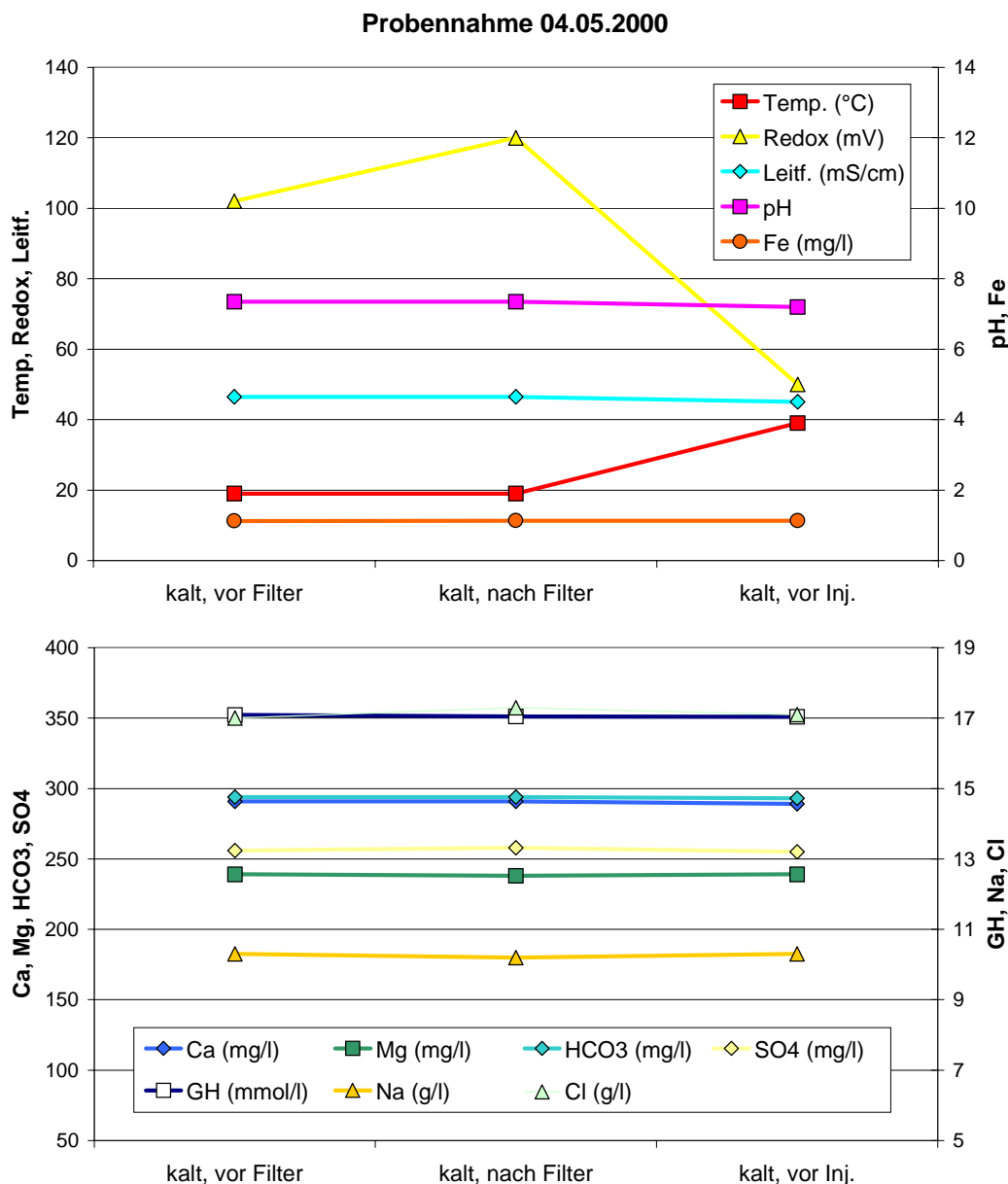


Abb. 3-3: Verlauf wichtiger Parameter an verschiedenen Stellen im obertägigen Wärmespeicherkreislauf während der Probenahme am 4.5.2000 (Erläuterung s. Text)

Die erste Rückförderung von erwärmtem, eingespeichertem Wasser aus dem Wärmespeicher fand am 13.7.2000 statt. Dabei sollte als Rückfördertest einige Tage Wasser aus dem warmen Brunnen entnommen werden und in den kalten zurückgefördert werden. Nach etwa 3,5 Stunden mußte der Versuch jedoch wegen eines Systemfehlers abgebrochen werden. Im zugehörigen Probenahmebericht der Universität Lüneburg heißt es dazu:

Hintergrund und Ziel der Probenahme: Nach einer längeren Periode der Wärmeeinspeicherung sollten am 13.7.2000 Anlagenkomponenten und Pumpen zur Wärmeabgabe getestet werden. Dazu wurde die Strömungsrichtung am 13.7.00 um 10:33 Uhr umgekehrt und mit anfänglich ca. 60 m<sup>3</sup>/h und ab 13:50 Uhr mit ca 100 m<sup>3</sup>/h Solewasser von der warmen Seite zur kalten Seite des Aquifers gepumpt. Um ca. 14:04 Uhr erfolgte eine Notabschaltung des Systems, da ein falsch kalibrierter Füllstandssensor eine volle Abfallssolegrube signalisierte. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden ca. 210 m<sup>3</sup> Sole gepumpt.

Die Schlüsselparameter dieser Probenahme sind in Abb. 3-4 über die kumulative Fördermenge dargestellt. In der ersten Stunde dürfte weitgehend Wasser aus dem System selbst (Rohrleitungen, Brunnensteigrohr) entnommen worden sein, bevor dann Wasser aus dem Aquifer nachströmte. Dies erklärt auch die im Lauf der Entnahme steigende Wassertemperatur. Gegen Ende ist ein leichter Anstieg bei Eisen (Fe) zu sehen, ansonsten bleiben die Parameter weitgehend konstant bis auf das Redox-Potential, das sich erratisch verhält.

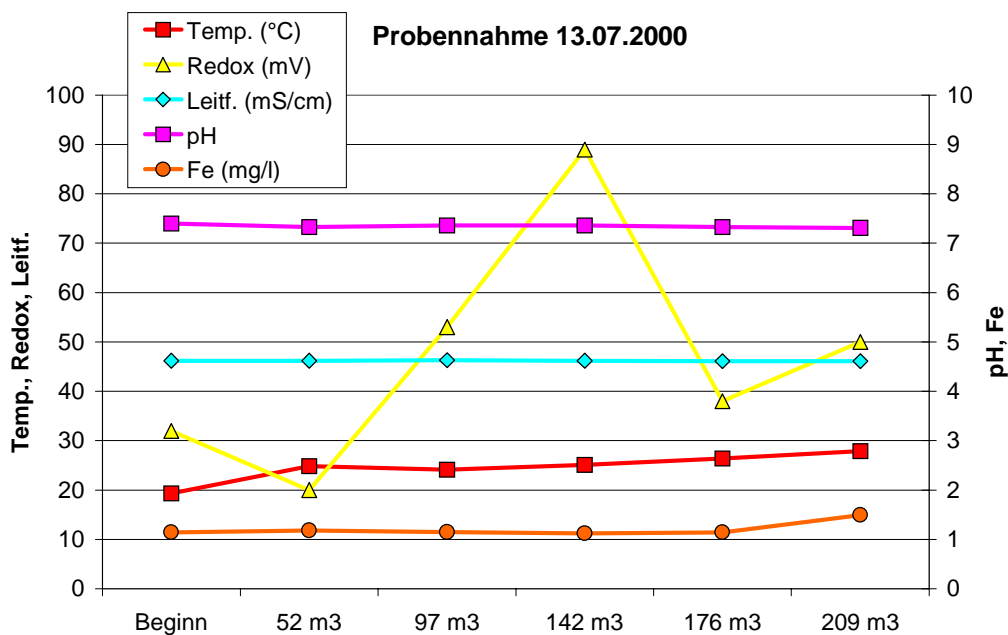


Abb. 3-4: Zeitliche Entwicklung einiger Schlüsselparameter über die ausgespeicherte Wassermenge während des ersten Rückfördertests

### 3.3 *Bewertung der chemischen Entwicklung der Aquiferwässer*

#### 3.3.1 Wärmespeicher

In der nachfolgenden Abb. 3-5 ist die Entwicklung ausgewählter Parameter über den Untersuchungszeitraum dargestellt. Dabei wurde zwischen Entnahmen aus dem ungestörten Aquifer (kalter Brunnen, gestrichelte Linien) und Rückförderung aus dem warmen Brunnen (durchgezogene Linien) unterschieden. Während der Projektlaufzeit kam es zu keiner längerfristigen Rückförderung, so dass das Wasser im kalten Brunnen wenigstens bis zum Herbst 2002 als unbeeinflusst angesehen werden kann.

Die Temperatur aus dem kalten Brunnen liegt bei rund 19 °C, während im warmen Brunnen ursprünglich 39 °C eingespeichert und dann zwischen 25 und 30 °C zurückgefördert werden. Leitfähigkeit, pH-Wert und Eisen (Fe) ändern sich nicht merklich, wobei auch keine Unterschiede zwischen warmem und kaltem Brunnen zu sehen sind. Das Redox-Potential ist, wie zu erwarten, im warmen Brunnen höher als im kalten und schwankt stark. Bei den für Belagsbildung wichtigen Parametern Gesamthärte (GH), Calcium (Ca) und Magnesium (Mg) zeigt sich eine leichte Erhöhung zu Beginn des Jahres 2001, die jedoch später wieder abklingt. Zwischen warmem und kaltem Brunnen ist kein signifikanter Unterschied zu sehen. Das starke Absinken der Gesamthärte in der letzten Probe dürfte wohl ein Analyse- oder Rechenfehler sein, da die Werte für die Einzelparameter nicht so stark zurückgehen.

Insgesamt ist die Beeinflussung des Aquifers im Wärmespeicher über den Projektzeitraum vernachlässigbar, was aber natürlich auf die noch relativ geringen Temperaturen und das Fehlen eines vollen Speicherzyklus zurückgehen kann und daher nicht unbedingt für den späteren Vollbetrieb repräsentativ ist.

#### 3.3.2 Kältespeicher

Bei der Betrachtung des Kältespeichers (Abb. 3-6) wird deutlich, dass die für Belagsbildung relevanten Werte wie Calcium (Ca), Gesamthärte (GH) und Eisen (Fe) leicht abnehmen. Der starke Rückgang der Gesamthärte bei der letzten Probe dürfte, wie bereits beim Wärmespeicher angemerkt, ein Fehler sein. Die Leitfähigkeit sinkt ebenfalls, während das Redox-Potential ansteigt. Insgesamt sind die meisten Änderungen jedoch gering, und viele Parameter bleiben recht konstant. Konkrete Aussagen lassen sich mit diesen Werten noch nicht machen.

#### 3.3.3 Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die bisher gewonnenen Daten für eine abschließende Beurteilung des geo- und hydrochemischen Verhaltens des Wärmespeichers noch nicht ausreichen. Dafür müsste der Betrieb der Anlage über mehrere komplette Speicherzyklen beobachtet werden; der erste solche Zyklus begann jedoch erst gegen Ende der Projektlaufzeit.

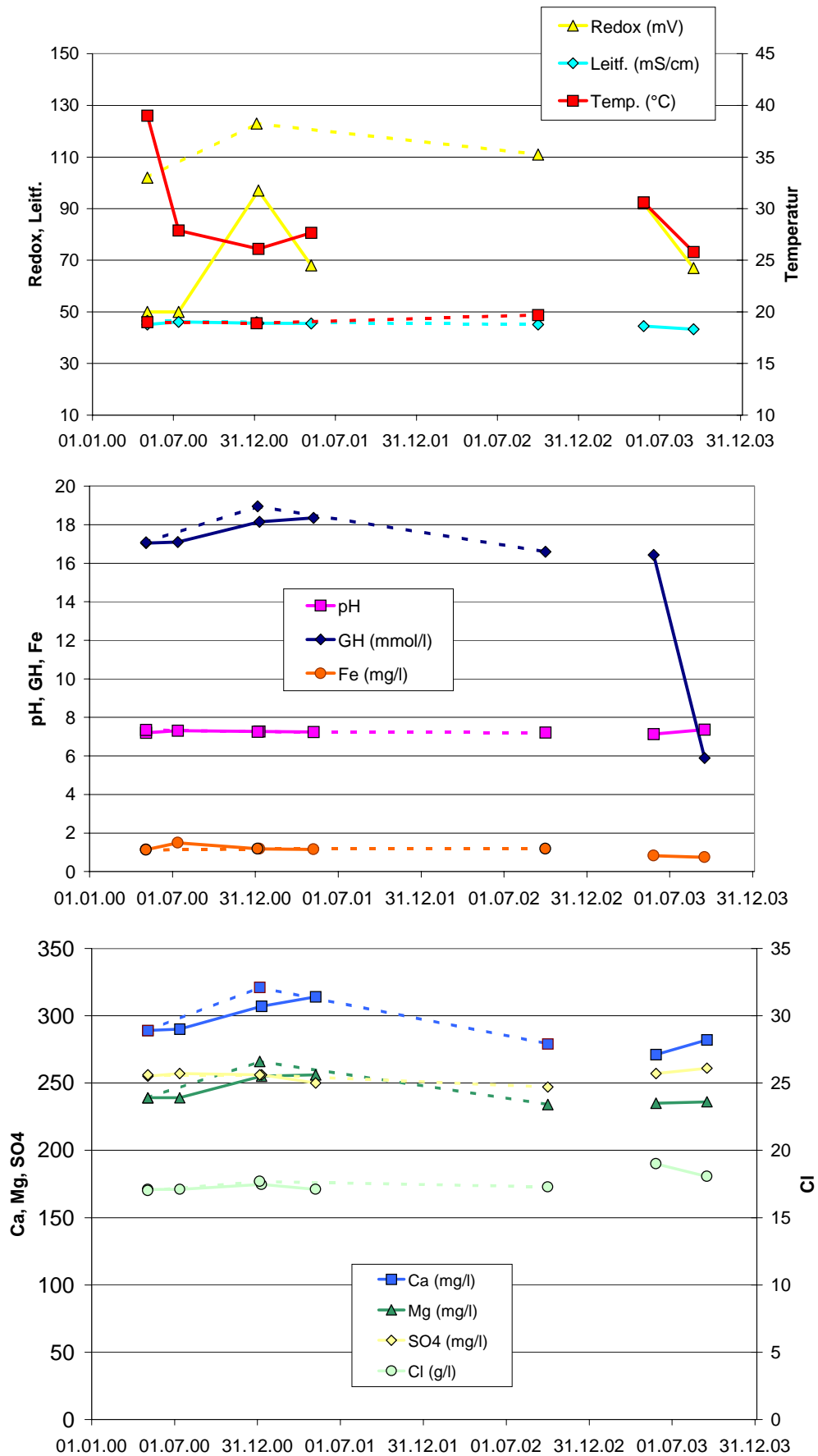


Abb. 3-5: Entwicklung Wasserchemie Wärmespeicher, durchgezogene Linien: warmer Brunnen, gestrichelte Linien: kalter Brunnen

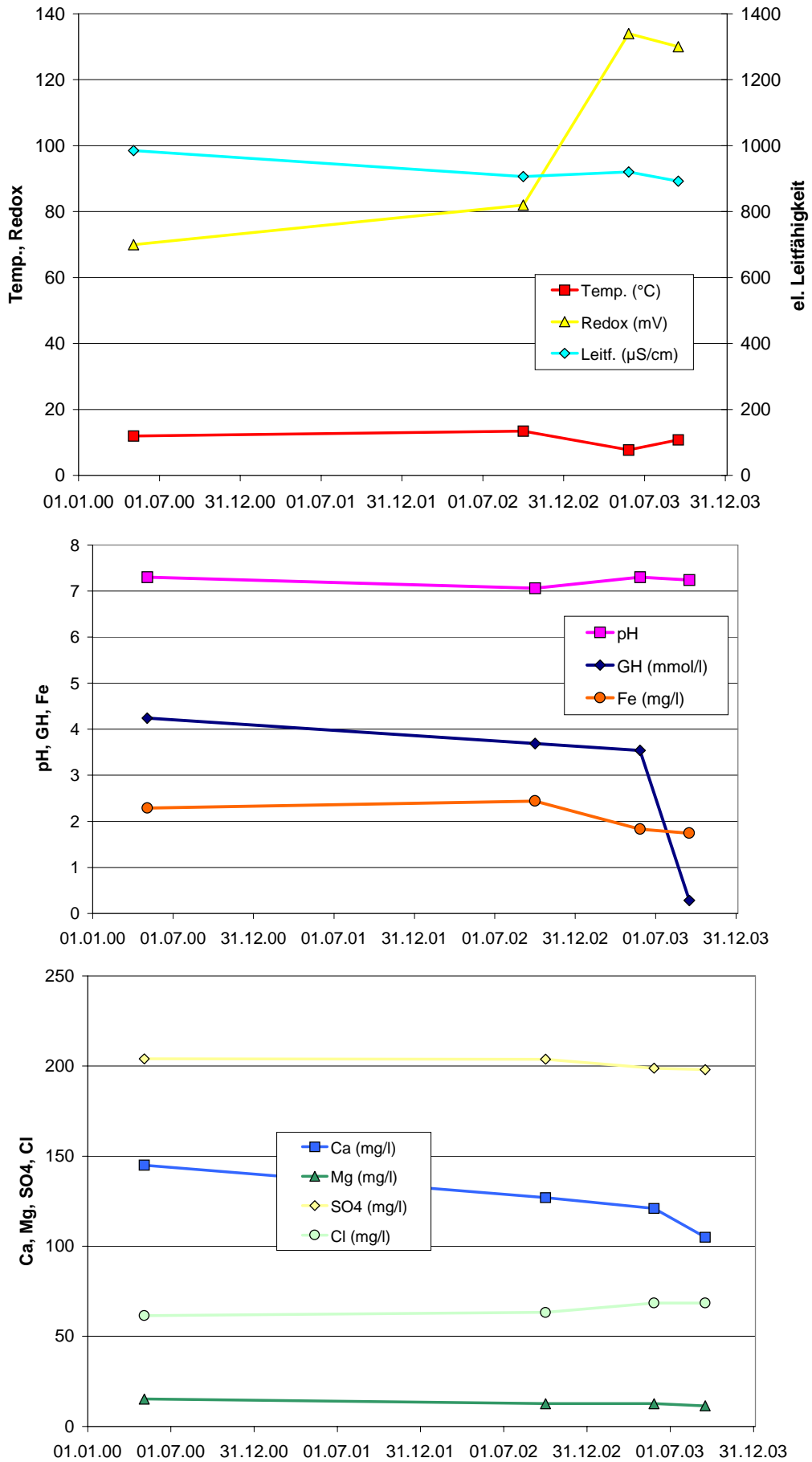


Abb. 3-6: Entwicklung Wasserchemie Kältespeicher

## 4. Arbeiten zu mobilen Mess- und Testgeräten

### 4.1 Messgerät für Erdwärmesonden (*Thermal Response Test*)

Thermische Untergrundspeicher können neben der für die Bauten des Deutschen Bundestages in Berlin verwendeten Technik des Aquiferspeichers auch mit Erdwärmesonden verwirklicht werden.

Für die Auslegung von Erdwärmesonden ist die Kenntnis der thermischen Eigenschaften des Untergrunds eine wesentliche Voraussetzung. Während bei kleinen Anlagen die Werte meist geschätzt werden und bei der Auslegung entsprechend Sicherheiten berücksichtigt werden müssen, oder die Auslegung gleich nach Erfahrungswerten vorgenommen wird, sind für größere Anlagen Untergrunduntersuchungen bis hin zu Probebohrung(en) erforderlich. Über solche Probebohrungen läßt sich die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds z.B. durch einen thermischen Response-Test (an einer fertig eingebauten Erdwärmesonde) bestimmen. Vorteile sind die Messung über die gesamte Bohrlochlänge, die Einbeziehung der Bohrlochverfüllung, und die ungestörten Untergrundverhältnisse einschließlich evtl. vorhandenen Grundwasserflusses.

Mit dem Thermal Response Test steht ein Instrument zur Verfügung, daß bereits bei mittelgroßen Erdwärmesondenanlagen eine Optimierung und Absicherung der Auslegung durch direkt vor Ort ausgeführte Messungen ermöglicht.

#### 4.1.1 Entwicklung des Thermal Response Tests

Die theoretischen Grundlagen für den Thermal Response Test wurden über mehrere Jahrzehnte hinweg geschaffen (u.a. durch CHOUDARY, 1976; MOGENSEN, 1983; CLAESSON et al., 1985; CLAESSON & ESKILSON, 1988; HELLSTRÖM, 1991), bevor es Mitte der 90er Jahre zu ersten praktischen Umsetzungen kam. Diese erfolgte mit stationären Tests z.B. bei der Untersuchung eines Erdwärmesonden-Wärmespeichers in Linköping (HELLSTRÖM, 1997).

Auch Meßgeräte für die Wärmeleitfähigkeit, die mit einer sogenannten „needle probe“ (Nadelsonde) arbeiten, funktionieren im Grunde nach dem gleichen Prinzip. Dabei wurde in den 80er Jahren in Kanada ein Gerät für die Messung der Wärmeleitfähigkeit in den obersten 1-3 m der Erde entwickelt, das mit einer entsprechend langen und starken Sonde ausgerüstet ist, die in den Boden eingeschlagen wird.

Für Erdwärmesonden, die Tiefen von 10 bis mehrere 100 m erreichen, wurde 1995 an der TU Luleå in Schweden eine mobiles Meßgerät zur direkten thermischen Leistungsmessung entwickelt (EKLÖF & GEHLIN, 1996; GEHLIN & NORDELL, 1997). Seit Mitte 1996 wurde eine ähnliche Entwicklung an der Oklahoma State University in den USA betrieben (AUSTIN, 1998). In Deutschland fand der erste Responsetest im Sommer 1999 statt (SANNER et al., 1999). Ein etwas anders aufgebautes Gerät wurde in den Niederlanden entwickelt und getestet (VAN GELDER et al., 1999); es nutzt statt der elektrischen Widerstandsheizungen der vorgenannten Anlagen eine

Wärmepumpe, um die Temperatur in der Erdwärmesonde auch absenken zu können. Dieses Verfahren bringt jedoch durch das dynamische Verhalten der Wärmepumpe gewisse Probleme mit sich.

Nach Kenntnis der Autoren existieren (neben den vorgenannten) Geräte in Großbritannien, Kanada (CRUICKSHANKS et al., 2000), Norwegen, der Schweiz und der Türkei; weitere sind in der Entwicklung (Frankreich?). In Deutschland stehen mindestens drei mobile Geräte für den Thermal Response Test im Einsatz (Landtechnik Weihenstephan der TU München, Aetna Energiesysteme GmbH in Wildau und UBeG GbR in Wetzlar).

#### 4.1.2 Versuchsdurchführung

Der Thermal Response Test (Schema s. Abb. 4-1) ist ein geeignetes Mittel zur Bestimmung der scheinbaren Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds und des thermischen Bohrlochwiderstands (bzw. der Wärmeleitfähigkeit der Bohrlochverfüllung). Es wird eine Temperaturkurve erhalten, die mit verschiedenen Methoden ausgewertet werden. Der wesentliche Ergebnisparameter ist ein Maß für das gesamte Wärmetransportvermögen des Untergrunds, dargestellt in Form einer Wärmeleitfähigkeit. Darin gehen jedoch auch Anteile evtl. vorhandenen konvektiven Wärmetransports und andere Störsignale ein, so daß hier korrekt von der scheinbaren Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_s$  gesprochen werden soll (gelegentlich auch als effektive Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{eff}}$  bezeichnet).

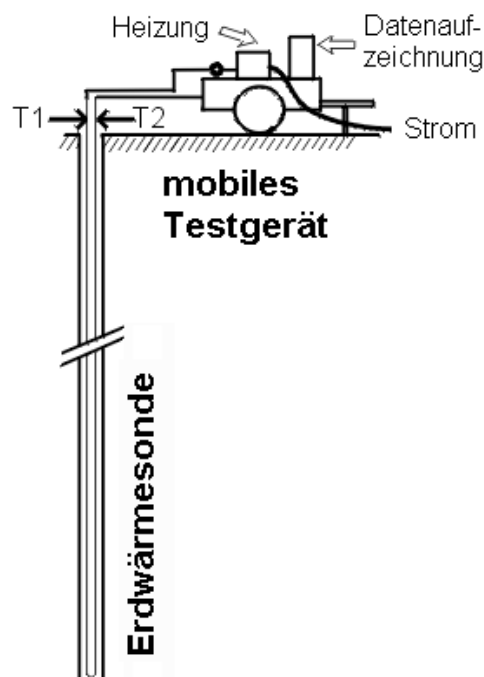


Abb. 4-1: Schema eines mobilen Aufbaus für den Thermal Response Test (Zeichnung UBeG)

Neben ausreichender Genauigkeit bei der Messung von Temperaturen und Wärmeleistung ist vor allem die Versuchsdauer wichtig. Sie sollte in keinem Fall weniger als zwei Tage betragen. In den USA, wo die Methode verstärkt kommerziell angewendet

wird, besteht der Wunsch, die Meßzeiten deutlich zu kürzen, um Kosten einsparen zu können. Zwar besteht die Empfehlung einer Mindestmeßzeit von 50 Stunden (SKOUBY, 1998; SPITLER et al., 1999a), die allerdings auch angezweifelt wird (SMITH, 1999); man wünscht Versuchszeiten von weniger als 12 Stunden (u.a. um das Testgerät nicht über Nacht an der Baustelle belassen zu müssen).

Grundsätzlich gibt es für eine Verkürzung des Meßzeitraums physikalische Grenzen, da sich ein ausreichend stabiler Wärmefluß auch in der Umgebung des Bohrloches einstellen muß. In den ersten Stunden wird der Temperaturverlauf noch wesentlich durch die Bohrlochverfüllung bestimmt. Durch längere Meßzeiten können auch Störungen reduziert werden, wie sie z.B. durch Wärmeentwicklung beim Abbinden des Verfüllmaterials oder durch Schwankungen bei der Energieversorgung entstehen.

Kürzere Meßzeiten bedeuten immer einen Verlust an Genauigkeit, der nur teilweise durch aufwendigere Auswertemethoden (z.B. Parameterbestimmung mit numerischer Simulation, s.u.) ausgeglichen werden kann. In einer Untersuchung von SPITLER et al. (1999a) zeigten nach 50 Stunden verschiedene Auswertemethoden eine Abweichung von  $\pm 5\%$  gegenüber dem Mittel aller Methoden, bei der Benutzung der Werte bis lediglich 20 Stunden waren bereits Abweichung von  $\pm 15\%$  zu verzeichnen. Es ist daher im Einzelfall zu prüfen, ob eine aufwendigere Auswertung oder eine längere Messung im Einzelfall wirtschaftlicher ist. Wegen der physikalischen Grenzen sollte die Meßzeit aber auf jeden Fall deutlich höher liegen als die berechnete Mindestzeit.

#### 4.1.3 Versuchsauswertung

Der einfachste Weg zur Auswertung eines thermischen Response Tests beruht auf der KELVIN'schen Linienquellentheorie. Diese wurde bereits in den 40er Jahren für die Berechnung erdgekoppelter Wärmepumpenanlagen verwendet, um die Temperaturentwicklung im Erdreich zeitabhängig zu erfassen (INGERSOLL & PLASS, 1948). Eine Approximation wird durch folgende Formel ermöglicht, die bei EKLÖF & GEHLIN (1996) gegeben ist:

$$k = \frac{Q}{4 \pi H \lambda_{eff}} \quad [1]$$

mit

k	Steigung des Kurvenabschnitts bei logarithmischer Zeitachse
Q	Eingespeiste bzw. entzogene Wärmeleistung (W)
H	Länge der Erdwärmesonde (m)
$\lambda_{eff}$	Effektive Wärmeleitfähigkeit, d.h. inkl. konvektivem Wärmetransport und anderer standortbezogener Einflüsse (W/m/K)

Die effektive Wärmeleitfähigkeit ist dann:

$$\lambda_{eff} = \frac{Q}{4\pi H \cdot k} \quad [2]$$

Für die Auswertung nach der Linienquellentheorie ist eine ausreichende Laufzeit des Versuchs erforderlich.

Eine andere Art der Auswertung, bei der sich wechselnde Verhältnisse besser erfassen lassen, ist die Parameterbestimmung mit Hilfe numerischer Simulation. Dazu wird ein numerisches Modell der Erdwärmesonde aufgebaut, mit dem die Fluidtem-

peraturen vorhergesagt werden können. Durch gezielte Parametervariation wird nach den Eingangswerten gesucht, mit denen der Temperaturverlauf am genauesten errechnet wird. Schwankungen der Umgebungstemperaturen oder der Wärmeleistung können hierbei direkt eingegeben werden. Eine solche, erheblich aufwendigere Auswertemethode konnte bei Messungen an dem Erdwärmesondenspeicher in Linköping entwickelt und erprobt werden (HELLSTRÖM, 1997), da diese im Rahmen eines FuE-Projekts stattfanden. Weitere Arbeiten zur Parameterbestimmung durch numerische Simulation haben u.a. an der Oklahoma State University in den USA stattgefunden (SPITTLER et al., 1999b; SPITTLER et al., 2000) bzw. am Oak Ridge National Lab, aber auch in Europa.

#### 4.1.4 Erfahrungen mit dem Thermal Response Test in Deutschland

Der erste Thermal Response Test in Deutschland wurde im Sommer 1999 mit dem Gerät der UBeG GbR an einer Probebohrung für ein größeres Bürogebäude in Langen (südliche Frankfurt) durchgeführt (s.a. MANDS et al., 2000). Ebenfalls im Sommer 1999 fand der erste Versuch mit dem Gerät der Landtechnik Weihenstephan statt. Er erfolgte an einer 35 m tiefen Erdwärmesonde in Attenkirchen bei Freising, die als Probebohrung für einen Erdwärmesondenspeicher niedergebracht worden war. Wegen der vorgesehenen Nutzung der geplanten Anlage als Hochtemperatur-Wärmespeicher (bis ca. 80 °C) besteht die Erdwärmesonde aus einem einfachen Polybuten-U-Rohr; es wurde deshalb auch mit deutlich höheren Temperaturen und sehr langer Meßzeit gearbeitet. Beim Untergrund handelt es sich im wesentlichen um Schluff und Ton mit einer geringeren Wärmeleitfähigkeit, wodurch sich die Startzeit (Mindestzeit) der Messung verlängert. Abb. 3 zeigt die Meßwerte und die Regressionsgerade für eine Versuchsdauer von 250 Stunden.

Seit den ersten Versuchen und vor allem auch im Rahmen von Projekt 0389809 B wurden die Geräte weiterentwickelt und die Auswertemethodik verfeinert. Die Erfahrung zeigt, daß vor allem eine wirksame Entlüftung des Erdwärmesondenkreislaufs wichtig ist. Eine Fernüberwachung hat sich als sehr hilfreich erwiesen, um bei längerer Versuchsdauer eine regelmäßige Kontrolle zu haben. Auch unvorhergesehene Ereignisse wie z.B. das Kappen der Netzversorgung oder das Manipulieren an Fühlern durch Unbefugte sind vorgekommen. Neben der Versorgung aus dem Netz ist mindestens ein Versuch auch mit einem Stromaggregat betrieben worden. Der Thermal Response Test hat sich auch in Deutschland als zuverlässiges Instrument erwiesen.

#### 4.1.5 Seminar und Vergleichsversuch in Mol, Belgien

Am 14.10.2000 fand im flämischen Forschungszentrum (VITO) in Mol ein Workshop zu Erfahrungen mit dem Thermal Response Test statt. Er war als gemeinsames Vorhaben der Annexes 12 und 13 des Energiespeicherprogramms der IEA organisiert und brachte die in Europa mit dem Thermal Response Test arbeitenden Personen zu Diskussion und Erfahrungsaustausch zusammen, insgesamt 20 Teilnehmer aus 9 Ländern (B, CH, D, J, NL, S, TR, UK, USA).

Vorträge aus Schweden, Deutschland, den Niederlanden und der Schweiz informierten über die Erfahrungen in diesen Ländern. Diskutiert wurden die Zuverlässigkeit

der Ergebnisse, eingesetztes Gerät, Versuchsdauer, vertikale Auflösung (Schichten); weiterhin die Analogien des Thermal Response Test mit dem Pumpversuch in der Hydrogeologie. Die Anwendbarkeit hydrogeologischer Methoden für die Versuchsauswertung sollte untersucht werden. Die folgenden Empfehlungen für die Versuchsdurchführung wurden gegeben:

- Versuchsdauer                    mindestens etwa 50 Stunden, bis zu 100 Stunden
- Temperaturänderung        mindestens 10 K gegenüber der Anfangstemperatur, bis zum gewünschten Betriebstemperaturniveau
- Durchflußrate                Fließen sollte turbulent sein (oder mit der für den Betrieb gewünschten Durchflußrate, falls bereits bekannt)

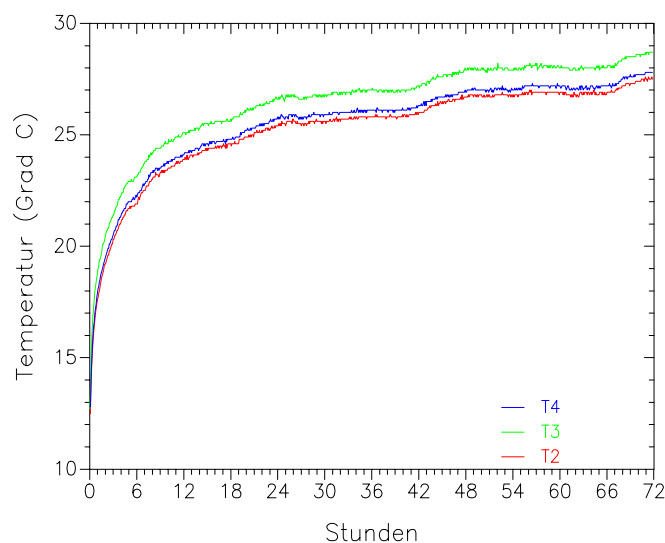
Der Standort Mol bot aber auch die Möglichkeit, einen Vergleich von Messungen mit drei verschiedenen Responsetest-Geräten zu erhalten. In Mol standen drei eng benachbarte Erdwärmesonden in praktisch identischer Geologie zur Verfügung, die für die Standortuntersuchung des geplanten Erdwärmespeichers „TESSAS“ installiert worden waren. Es handelt sich dabei um Doppel-U-Sonden, wobei in jeder Bohrung ein anderes Verfüllmaterial zum Einsatz kam:

- Mol-Sand (Wiedereinfüllung des beim Bohren geförderten, anstehenden Sandes)
- Gemischter Sand (Einfüllung eines in der Kornverteilung optimierten Sandes)
- Benonit (Verpressung mit der üblichen Bentonit-Zement-Suspension)

Im Sommer 2000 wurden an allen drei Erdwärmesonden Responsetests durch Groenholland (NL) durchgeführt, in den Tagen vor und während des Workshops im Oktober 2000 erfolgten Tests mit den Geräten der Landtechnik Weihenstephan und UBeG Wetzlar (beide D). Das holländische Gerät benutzt eine Wärmepumpe als Wärme-/Kältequelle, die beiden deutschen Geräte verfügen über elektrische Widerstandsheizung.

Grunddaten der Bohrungen:

- Erdwärmesondenlänge                    30,5 m
- Erdwärmesondenbauart                    Doppel-U-Sonde aus Polybutene
- Bohrlochdurchmesser                    150 mm
- Ausgangstemperatur (Mittelwert über 30,5 m Erdwärmesondenlänge)    12,5 °C
- Temperaturkurve (Versuch UBeG):



Die Ergebnisse der verschiedenen Versuche (Tab. 4-2) ergeben für die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs einen Wert jeweils um etwa 2,5 W/m/K. Aufgrund der gleichen geologischen Verhältnisse ist eine solche Übereinstimmung auch zu erwarten. Lediglich der Versuch Groenholland/Bentonit weicht davon ab; hier ist ggf. zu prüfen, ob es bei der Versuchsdurchführung zu irgendwelchen Unregelmäßigkeiten gekommen ist. Bei der Auswertung mit einem Simulationsmodell (Tab. 4-3) sind die Unterschiede weniger stark. Bei dieser Auswertung wird übrigens nicht der thermische Bohrlochwiderstand erhalten, sondern stattdessen die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials (je höher die Wärmeleitfähigkeit, desto geringer der Bohrlochwiderstand). Auf jeden Fall zeigen die Ergebnisse, daß mit dem Thermal Response Test wiederholbare und verlässliche Ergebnisse zu erhalten sind.

Tab. 4-2: Ergebnisse der Vergleichsmessungen in Mol; Auswertung nach dem Linienquellenprinzip

Verfüllmaterial:	Groenholland	UBeG	Weihenstephan
Mol-Sand	$\lambda = 2,47 \text{ W/m/K}$ $r_b = 0,06 \text{ K/(W/m)}$	-	$\lambda = 2,47 \text{ W/m/K}$ $r_b = 0,05 \text{ K/(W/m)}$
Gemischter Sand	$\lambda = 2,40 \text{ W/m/K}$ $r_b = 0,1 \text{ K/(W/m)}$	-	$\lambda = 2,51 \text{ W/m/K}$ $r_b = ?$
Bentonit	$\lambda = 1,86 \text{ W/m/K}$ $r_b = 0,08 \text{ K/(W/m)}$	$\lambda = 2,49 \text{ W/m/K}$ $r_b = 0,13 \text{ K/(W/m)}$	-

Tab. 4-3: Ergebnisse der Messungen in Mol durch Groenholland, ausgewertet mit einem 2D-Simulationsmodell (Verfüllung mit Sand zeigt korrekterweise eine ähnliche Wärmeleitfähigkeit wie die des Erdreichs, das hier ja auch überwiegend aus Sand besteht)

	Mol-Sand	Gemischter Sand	Bentonit
Erdreich	$\lambda = 2,56 \text{ W/m/K}$	$\lambda = 2,47 \text{ W/m/K}$	$\lambda = 2,26 \text{ W/m/K}$
Verfüllung	$\lambda = 2,42 \text{ W/m/K}$	$\lambda = 2,52 \text{ W/m/K}$	$\lambda = 1,25 \text{ W/m/K}$

#### 4.1.6 Literatur zum Thermal Response Test

- AUSTIN, W. (1998): Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties. - 164 p., MSc-thesis, OSU, Stillwater OK
- CHOUDARY, A. (1976): An approach to determine the thermal conductivity and diffusivity of a rock in situ. - PhD-thesis, OSU, Stillwater OK
- CLAESSON, J., EFTRING, B., ESKILSON, P. & HELLSTRÖM, G. (1985): Markvärme, en handbok om termiska analyser. - 3 Bände, SCBR T16-18:1985, Stockholm
- CLAESSON, J. & ESKILSON, P. (1988): Conductive Heat Extraction to a deep Borehole, Thermal Analysis and Dimensioning Rules. - Energy 13/6, S. 509-527, Oxford
- CRUICKSHANKS, F., BARDSLEY, J. & WILLIAMS, H. (2000): In-Situ Measurement of Thermal Properties of Cunard Formation in a borehole, Halifax, Nova Scotia. - Proc. TERRASTOCK 2000, pp. 171-175, Stuttgart

- EKLÖF, C. & GEHLIN, S. (1996): TED - a mobile equipment for thermal response test. - 62 p., Master's thesis 1996:198E, Luleå University of Technology
- GEHLIN, S. & NORDELL, B. (1997): Thermal Response Test - a Mobile Equipment for Determining Thermal Resistance of Borehole. - Proc. MEGASTOCK '97, pp. 103-108, Sapporo
- GEHLIN, S. (1998) Thermal Response Test - In-situ measurements of thermal properties in hard rock. - Lic. thesis1998:37, Luleå University of Technology, Luleå
- GEHLIN, S. & HELLSTRÖM, G. (2000): Recent Status of In-Situ Thermal Response Tests for BTES Applications in Sweden. - Proc. TERRASTOCK 2000, pp. 159-164, Stuttgart
- HELLSTRÖM, G. (1991): Ground Heat Storage, Thermal Analysis of Duct Storage Systems, I. Theory. - 262 S., Dept. Mathematical Physics, University of Lund, Lund.
- HELLSTRÖM, G. (1994): Fluid-to-ground thermal resistance in duct ground heat storage. - Proc. CALORSTOCK '94, pp. 373-380, Espoo/Helsinki
- HELLSTRÖM, G. (1997): Thermal response test of a heat store in clay at Linköping, Sweden. - Proc. MEGASTOCK '97, pp. 115-120, Sapporo
- INGERSOLL, L.R. & PLASS, H.J. (1948): Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. - Heating, Piping & Air Conditioning 20/7, S. 119-122, Chicago
- MANDS, E., SANNER, B., SAUER, M. & SEIDINGER, W. (2000): Das Low Energy Office der Deutschen Flugsicherung in Langen mit geothermischer Wärme/Kälte-Speicherung. - Ber. 6. Geoth. Fachtagung Herne, GtV, Geeste
- MANDS, E. & SANNER, B. (2001): In-situ-determination of underground thermal parameters. - Proc. International Geothermal Days Germany 2001, Supplement, S. 45-54, GtV, Geeste
- MOGENSEN, P. (1983): Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages. - Proc. Int Conf Subs Heat Storage, S. 652-657, SCBR, Stockholm
- SANNER, B., REUSS, M. & MANDS, E. (1999): Thermal Response Test - eine Methode zur in-situ-Bestimmung wichtiger thermischer Eigenschaften bei Erdwärmesonden. - Geothermische Energie 24/25, Geeste
- SANNER, B., REUSS, M., MANDS, E. & MÜLLER, J. (2000a): Thermal Response Test - Experiences in Germany. - Proc. TERRASTOCK 2000, pp. 177-182, Stuttgart
- SANNER, B., REUSS, M., MANDS, E. & MÜLLER, J. (2000b): Erfahrungen mit dem Thermal Response Test in Deutschland. - Proc. Geothermische Fachtagung Herne, GtV, Geeste, im Druck
- SKOUBY, A. (1998): Thermal Conductivity Testing. - in: SKOUBY, A., Proper Engineering + Thermally Enhanced Grouts = GeoExchange Savings, The Source, 11-12/98, p. 5, Stillwater OK
- SMITH, M. (1999): Comments on In-Situ Borehole Thermal Conductivity Testing. - The Source 1-2/99, Stillwater OK
- SPITLER, J., REES, S. & YAVUZTURK, C. (1999a): More Comments on In-situ Borehole Thermal Conductivity Testing - The Source 3-4/99, Stillwater OK
- SPITLER, J., YAVUZTURK, C. & JAIN, N. (1999b): Refinement and Validation of In-situ Parameter Estimation Models. - Kurzbericht, OSU, Stillwater, OK; <http://www.mae.okstate.edu/Faculty/spitler/pdfs/insitu.pdf>
- SPITLER, J.D., YAVUZTURK, C. & REES, S.J. (2000): In Situ Measurement of Ground Thermal Properties. - Proc. TERRASTOCK 2000, pp. 165-170, Stuttgart
- VAN GELDER, G., WITTE, H.J.L., KALMA, S., SNIJDERS, A. & WENNEKES, R.G.A (1999): In-situ-Messung der thermischen Eigenschaften des Untergrunds durch Wärmeentzug. -

Tagungsband OPET-Seminar Erdgekoppelte Wärmepumpen zum Heizen und Klimatisieren von Gebäuden, Cottbus, pp. 56-58, GtV, Geeste

#### **4.2. Testgerät für Aquiferspeicher-Wasserchemie**

Nachfolgend werden Aufbau und Funktion der Versuchsanlage (MTE) sowie das Konzept der Arbeiten damit dargestellt. Es wurden Experimente zur Charakterisierung des Versuchsaufbaus, insbesondere des Wärmeübertragers, gemacht und darauf aufbauend ein Standardverfahren (Scaling-Test) ausgearbeitet, mit dem Grundwasser auf sein Verhalten bei Aufnahme von thermischer Energie mit Hilfe des Versuchsaufbaus untersucht werden kann. Eine weitere Versuchslinie diente der kontinuierlichen Überwachung von Wärmetauschern gegen Scaling durch genaue Messung der Wärmeübertragerleistung.

Das MTE wurde in der Projektlaufzeit an acht verschiedenen Standorten zur Untersuchung von Grundwässern unterschiedlicher hydrogeochemischer Zusammensetzung und hydrogeologischer Herkunft eingesetzt. Dabei wurde eine maximale Speichertemperatur für Hochtemperaturwärmespeicher nach der Standardmethode für die jeweiligen Grundwasserbedingungen abgeleitet. Die Ergebnisse dieser Feldversuche sind im gesonderten Bericht der Univ. Stuttgart ausführlich beschrieben und diskutiert (s. Kap. 6-2). Darüber hinaus gehende Testserien mit dem mobilen Testgerät dienten zur Untersuchung von potentiellen Einflüssen auf die Kalkbelagbildung im Wärmeübertrager. Dazu zählten insbesondere Experimente, in denen das Grundwasser vor der Erwärmung gezielt chemisch konditioniert wurde.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Tendenz zur Kalkbelagbildung in Wärmeübertragern im Wesentlichen von der (Aufheiz-)Temperatur des Grundwassers und seiner chemischen Beschaffenheit beeinflusst wird. Dabei zeigen (hydrogen-)carbonatisch geprägte Grundwässer in Abhängigkeit von ihrer Gesamthärte (Calcium, Magnesium) ein unterschiedliches Ausmaß der Belagbildung. Ebenso kann eine erhöhte Temperaturdifferenz zwischen Heizkreislauf und Grundwasserstrom die Bildung von Kalkablagerungen im Wärmeübertrager begünstigen. Im Gegensatz dazu reduziert eine hohe Gesamtmineralisation im Grundwasser die Kalkbelagbildung auch bei Temperaturen um 90 °C erheblich. Der Einfluss von natürlichen organischen Bestandteilen im Grundwasser (gelöster organischer Kohlenstoff) auf die Ablagerungsbildung konnte aufgrund der geringen Datenbasis nicht zufriedenstellend aufgeklärt werden.

Mit Hilfe des neu entwickelten Scaling-Tests zur Abschätzung einer maximalen Speichertemperatur für Aquiferwärmespeicher konnte abgeleitet werden, dass die Erwärmung von Grundwässern auf Temperaturen bis 60 °C unter Berücksichtigung einzelner Randbedingungen durchaus möglich ist. Deutlich darüber hinaus, z.B. 80 °C, wird jedoch das Risiko von Kalkablagerungen in Wärmeübertragern sehr schnell ansteigen und gezielte Gegenmaßnahmen erforderlich machen. Untersuchungen zur chemischen Konditionierung des Grundwassers mit Kohlendioxid haben gezeigt, dass die Belagbildung im Wärmeübertrager durch CO<sub>2</sub>-Dosierung wirksam unterbunden und u.U. sogar rückgängig gemacht werden kann.

Eine generelle Aussage zum Verhalten von anderen Grundwassertypen bei Erwärmung kann aufgrund der begrenzten Zahl von untersuchten Grundwässern nicht

abgeleitet werden. Es werden deshalb stets separate Untersuchungen an geplanten HT-ATES Systemen dringend empfohlen.

#### 4.2.1 Versuchsaufbau

Das Verhalten von Grundwasser im Hinblick auf die potentielle Bildung von Ablagerungen in Wärmeübertragern sollte weitestgehend unter realen Betriebsbedingungen eines Hochtemperatur-Aquiferspeicher untersucht werden. Aus diesem Grund waren der Versuchsaufbau und das Standardtestverfahren dieser Vorgabe so weit als möglich anzupassen.

Folgende Kriterien waren für den mobilen Versuchsaufbau von besonderer Bedeutung:

- Plattenwärmeübertrager, die zur visuellen Inspektion geöffnet oder zur Reinigung an einen externen Reinigungskreislauf angeschlossen werden können
- eine leistungsfähige, möglichst umweltfreundliche und für *on site*-Messungen unabhängige Heizquelle für Temperaturen bis annähernd 100 °C im Primärkreislauf
- hochempfindliche Messgeräte zur Erfassung von Temperaturen und Massenströmen in Primär- und Sekundärkreislauf
- eine Datenerfassungseinheit und ein Modul zur Regelung der Heizquelle
- korrosionsbeständige Materialien für Rohrleitungen, Fittings und Wärmeübertrager, die auch zur Untersuchung hoch mineralisierter Grundwässer geeignet sind
- Volumenstrom im Sekundärkreislauf von annähernd 1 m<sup>3</sup>/h
- Anschlussmöglichkeiten für eine Korrosionsmesszelle sowie für Module zur Untersuchung von Methoden zur Wasserbehandlung (z.B. CO<sub>2</sub>-Dosierung)

Die Konstruktion der mobilen Versuchsanlage erfolgte am Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA) der Universität Stuttgart.

Der Versuchsaufbau wurde in einen PKW-Kofferranhänger eingebaut. Dadurch wurde es möglich, empfindliche Anlagenmodule witterungsgeschützt in den Anlagenaufbau zu integrieren. Abb. 4-4 zeigt schematisch den Aufbau der Versuchsanlage. Die wesentlichen Komponenten sind

- drei Wärmeübertrager (WT1, WT1' und WT2; *WT1 und WT1' sind baugleich*),
- eine Gastherme sowie
- eine Datenerfassungs- und Steuereinheit.

Der Versuchsaufbau besteht generell aus zwei voneinander getrennten Kreisläufen, einem geschlossenen Heizkreislauf (Primärkreislauf) und einem offenen Grundwasserstrom (Sekundärkreislauf).

Im Primärkreislauf dient eine herkömmliche Gastherme als Heizquelle. Eine zusätzliche Umwälzpumpe dient zur Erhöhung des Durchflusses im Primärkreislauf. Das zu untersuchende Grundwasser wird direkt aus einer Grundwasserbohrung in den Versuchsaufbau gepumpt. Es wird dann in einem ersten Wärmeübertrager (*WT1 oder WT1'*) erhitzt. Die Wärmeübertrager WT1 und WT1' sind parallel geschaltet, einer dient für die Experimente der Universität Lüneburg und einer für die der Universität Stuttgart.

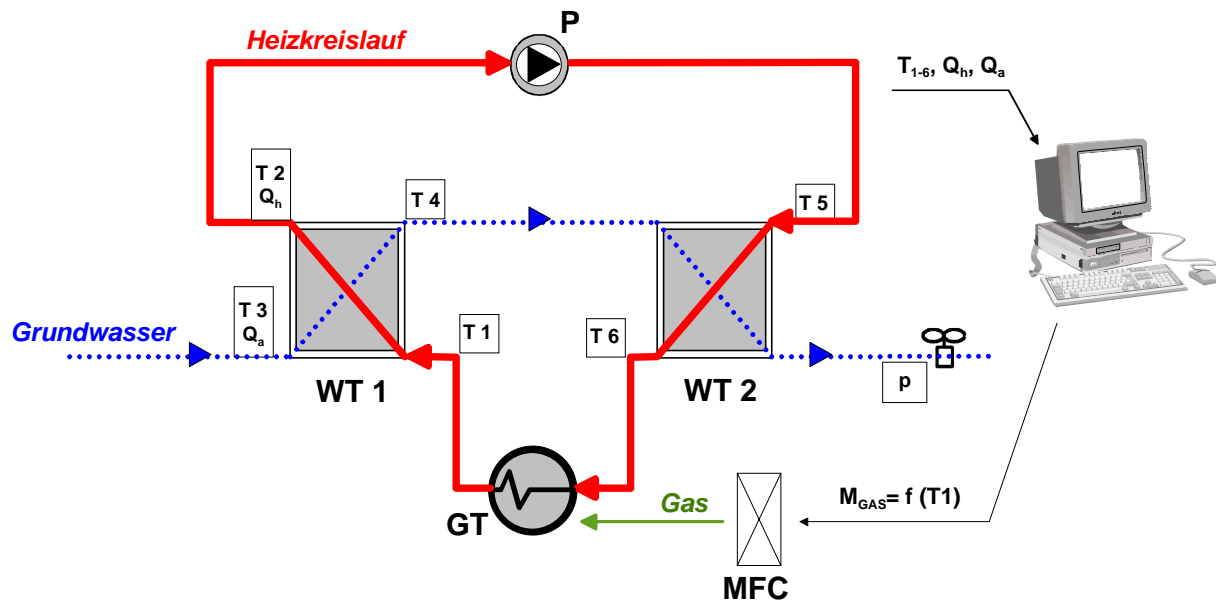


Abb. 4-4 : Schematischer Aufbau der mobilen Versuchsanlage (P: Pumpe; WT1/WT2: Wärmeübertrager; GT: Gastherme; MFC: Massflowcontroller)

Primär- und Sekundärstrom von Heiz- und Grundwasser können an geeigneten Stellen im Rohrleitungssystem vor und hinter den Wärmeübertragern A und A' mit Hilfe von Dreiweghähnen in die gewünschte Fließrichtung geleitet werden. Im nachfolgenden zweiten Wärmeübertrager B wird das erhitzte Grundwasser wieder abgekühlt. Damit kann die thermische Energie des Sekundärkreislaufes zur Energieeinsparung teilweise zurück in den Primärkreislauf übertragen werden.

Das Ausgasen von im Grundwasser gelösten Gasen (z.B.  $\text{CO}_2$ ) bei der Passage durch die Versuchsanlage wird dadurch unterbunden, dass vor dem Auslauf des Grundwassers aus der Versuchsanlage (hinter Wärmeübertrager 5) mit einem Drehschieber ein Überdruck im Sekundärkreislauf von etwa 0,2-0,25 MPa eingeregelt wird. Die Druckverhältnisse können in beiden Kreisläufen ständig visuell an Manometern abgelesen werden.

An den Ein- und Ausgängen von Wärmeübertrager A und A' sowie an den Ausgängen von Wärmeübertrager 5 werden mit Hilfe von Widerstandsthermometern Pt100 die Temperaturen der Fluide bestimmt; darüber hinaus werden in beiden Kreisläufen die spezifischen Massenströme gemessen. Bedingt durch die Anforderungen an die Mobilität der Versuchsanlage waren bereits bei der Konstruktion spezielle Vorkehrungen für den sicheren und schadlosen Transport mit einzuplanen, um eine anstehende Überführung des MTE an einen anderen Einsatzort bewerkstelligen zu können. Dazu wurden in den Versuchsaufbau an geeigneten Stellen Absperr- und Auslassvorrichtungen integriert, an denen im Bedarfsfall beide Wasserkreisläufe entleert werden konnten. Darüber hinaus war vorzusehen, einige Anlagenteile (Massendurchflussmessgeräte, Zusatzpumpe) vor dem Transport ausbauen zu können und am Einsatzort wieder einzubauen.

Während der Experimente werden kontinuierlich Temperatur- und Massenstromdaten mit Hilfe einer Datenerfassungseinheit aufgezeichnet. Die Dauer der Experimente sowie das Temperaturniveau sind frei wählbar und vor Versuchsbeginn festzulegen. Nach Versuchsende werden die jeweiligen Wärmeübertrager A und A' gereinigt.

Je nach den örtlichen Gegebenheiten wird das in der Versuchsanlage zunächst erhitze und dann wieder abgekühlte Grundwasser (ca. 35-40 °C) nach der Passage des MTEs in die Kanalisation oder einen Graben eingeleitet.

#### 4.2.2 Allgemeiner Betrieb der Versuchsanlage

In der Versuchsanlage kann der Beladevorgang eines Aquiferspeichers (Erhitzen von Grundwasser) nachgebildet werden. Die Versuchsanlage ist derart konzipiert, dass bei den Experimenten vor Ort Temperaturen und Durchflussraten in den beiden Wasserkreisläufen jederzeit variiert werden können. Die Vorbereitung einzelner Experimente erstreckt sich im Wesentlichen auf das Auffüllen und Entlüften der beiden Wasserkreisläufe, die Bereitstellung von Flüssiggas und die Kalibrierung der Durchflussmessgeräte. Das Einregeln der Massenströme und Druckverhältnisse in den Wasserkreisläufen erfolgt ebenfalls im Vorlauf der einzelnen Experimente und wird von Hand vorgenommen.

Die Steuerung der Versuchsanlage zur Temperatureinregelung erfolgt am Computer und beinhaltet die Vorgabe der Temperatur T1 im Heizkreislauf, wie beispielsweise 95 °C. Hierbei sind die zuvor eingeregelter Massenströme zu berücksichtigen, um im Grundwasserstrom das gewünschte Temperaturniveau zu erreichen. Diese Vorgehensweise erfordert eine gewisse Erfahrung mit dem Handling des Versuchsaufbaus, hat sich jedoch im Verlauf der Projektarbeit als zuverlässig erwiesen. Die Einregelung von T1 erfolgt vollautomatisch; die Kontrolle der Stabilität dieses Vorgabewertes kann aufgrund der laufend aktualisierten, visuellen Wiedergabe von Temperatur- und Durchflussdaten auf dem Computerdisplay einfach vorgenommen werden.

Ein Versuchslauf wird beendet, in dem der Gaszufluss in die Gastherme auf dem Computerdisplay interaktiv unterbrochen wird. Die Wärmeübertrager WT1 und WT1' werden nach jedem einzelnen Temperaturexperiment von etwaigen Belägen gereinigt. Sporadische Begutachtungen des Wärmeübertragers WT2 (Energierückgewinnung) und des Verbindungsrohres von WT1 nach WT2 ergaben zwar, dass sich dort bei längerer Versuchsdauer auf höherem Temperaturniveau im Grundwasser (ab etwa 80°C) ebenfalls eine Belagsbildung beobachten lässt. Deshalb wurden diese ebenfalls bei Bedarf mit einer säurehaltigen Spüllösung gereinigt. Weitere Untersuchungen wurden jedoch bis auf weiteres nicht vorgenommen.

Die Reinigung der Versuchsanlage ist erforderlich, um die Versuchsanlage vor jedem neuen Temperaturexperiment in einen definierten Ausgangszustand zurückzusetzen und so das Ausmaß der Kalkbelagsbildung für jedes einzelne Experiment separat erfassen zu können. Die Reinigung der Versuchsanlage erfolgt zunächst nur im Wärmeübertrager WT1 bzw. WT1', da nur in diesen beiden Wärmeübertragern der für die Kalkabscheidung relevante Prozess der Temperaturerhöhung stattfindet.

Im Rahmen der Arbeiten wurde der Wärmetauscher mit 5l einer 5%igen Ameisensäure gespült. Dazu wurde der Wärmetauscher vom übrigen Grundwasserkreislauf durch schließen der dafür vorgesehenen Hähne abgekoppelt und die Spüllösung mittels einer Schlauchpumpe für ca. 1h im Kreislauf durch den Wärmetauscher gepumpt. Die Bestimmung des Verdünnungsfaktors der Spüllösung durch im Wärmetauscher

enthaltene Grundwasser erfolgte durch die Zugabe eines Lithiumstandards und der Bestimmung der Li-Konzentration in der Spüllösung vor und nach dem Spülvorgang.

Zur detaillierten Vorbereitung der Vorortuntersuchungen mit der mobilen Versuchsanlage wurden chemische Analysen der Rohgrundwässer durchgeführt. Die Analysen sollten im Voraus Informationen über eine ggf. zu erwartende Kalkbelagsbildung bei Erwärmung des Grundwassers liefern. In der nach einem Versuchslauf anfallenden säurehaltigen Reinigungslösung werden nach dem Versuche die Kationen (im Labor) und Lithium quantifiziert, um die Kalkbelagsbildung zu erfassen.

#### 4.2.2 Ergebnisse der Stuttgarter Versuche

Der Bau und Einsatz des Testgeräts waren darauf ausgerichtet, in verhältnismäßig kurzer Zeit erste Erkenntnisse über das Verhalten von standorttypischen Grundwässern bei der Verwendung in Hochtemperatur Aquiferwärmespeichern, insbesondere hinsichtlich ihrer Tendenz zur Kalkbelagsbildung in Wärmeübertragern, zu erhalten. Der Prototyp-Charakter des mobilen Versuchsaufbaus ermöglichte bei Bedarf geringfügige Modifikationen des „Set-up“, das Konzept des Scaling-Tests, d.h. die Aufnahme eines Temperaturprofils, wurde jedoch grundsätzlich beibehalten. Der vergleichsweise robuste Aufbau des Testgeräts gestattete auch unter extremen Feld- und Witterungsbedingungen die Durchführung mehrerer Scaling-Tests. Bis zum Abschluss des Projekts wurde das Testgerät von der Universität Stuttgart über 3000 Stunden betrieben. Mit der verhältnismäßig einfach gehaltenen Software zur Regelung und Datenerfassung ließ sich das Testgerät einfach betreiben und überwachen. In Einzelfällen wurde der Verlauf der Experimente zwar durch Störungen (Ausfall der Stromversorgung) kurzfristig unterbrochen, davon abgesehen arbeitete das Testgerät jedoch sehr zuverlässig. Die während und nach den einzelnen Scaling-Tests fortlaufend durchgeführte Kontrolle der Prozessdaten (Temperatur, Massenströme) hat darüber hinaus ergeben, dass an den Einsatzorten des Testgeräts von gleichen Versuchsbedingungen ausgegangen werden kann.

Gemessen an der Dauer eines realen Ladezyklus eines Hochtemperatur-Aquiferwärmespeichers werden beim Scaling-Test die Prozessbedingungen während der Einspeicherung (Aufheizen von Grundwasser) nur über eine sehr kurze Zeitspanne (18 bis 72 Stunden) nachgebildet.

Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen liegt jedoch weniger auf der quantitativen Erfassung von Kalkablagerungen als vielmehr auf der sicheren Detektion auch kleinster Mengen von Belägen in einem Wärmeübertrager. Das Temperaturprofil wird im Vergleich zum realen Betrieb eines Hochtemperatur-Aquiferwärmespeichers unter extremen Versuchsbedingungen (Temperaturerhöhung um bis zu 80 °C) aufgenommen. Dadurch werden auch die Gleichgewichtsbedingungen von Mineralphasen im Grundwasser und im Gesteinmaterial des Aquifers drastisch verändert. Für den Fall, dass sich während des Scaling-Tests keine Calcitablagerungen detektieren lassen, kann deshalb eine maximale Temperatur zur Einspeicherung mit relativ großer Sicherheit abgeleitet werden, da der Temperaturunterschied im realen Betrieb zwischen kaltem und warmem Grundwasser nach mehreren Lade- und Entladezyklen wesentlich niedriger wird als die hier getesteten Temperaturunterschiede. Eine Übertragung der Testergebnisse auf reale Systeme ist deshalb gerechtfertigt.

Im Vergleich zu realen Speicherzyklen hat der Scaling-Test zwar nur eine kurze Dauer, jedoch lassen sich sehr wohl auch geringste Mengen kalkhaltiger Ablagerungen in einem Plattenwärmeübertrager qualitativ erfassen. Die darin enthaltene Calciummenge kann von einem operativen Calcium-Blindwert sicher unterschieden werden.

Die unterstützend durchgeführten geochemischen Simulationsrechnungen reichen lediglich für eine grobe Vorhersage über das Verhalten von Grundwasser aus. Sie können nicht den tatsächlichen Scaling-Prozess im Wärmeübertrager abbilden. Grund dafür sind die sehr komplexen Reaktionsbedingungen im Wärmeübertrager. Diese sind auf hydrodynamische und kinetische Faktoren der Abscheidung von Calcit im Plattenwärmeübertrager zurückzuführen, welche jedoch im Detail nicht mit dem gewählten Versuchsaufbau erfasst oder beschrieben werden konnten und sollten.

Die *on site*-Untersuchungen mit der mobilen Versuchsanlage an acht verschiedenen Standorten können trotz des provisorischen Charakters von Versuchsaufbau und -konzept durchweg als erfolgreich eingestuft werden. Die Scaling-Tests haben gezeigt, dass sich entgegen den erwarteten Ergebnissen unterschiedliche Grundwässer hinsichtlich der Belagbildung nicht wesentlich voneinander unterscheiden.

In der Gruppe der carbonathaltigen Grundwasserproben lassen die Grundwässer eine Erwärmung auf bis zu 70 °C im Versuchsaufbau zu, ohne dass es zur Beeinträchtigung des Anlagenbetriebes kommt. Außer für relativ harte Wässer sollten deshalb Einspeichertemperaturen von bis zu 70 °C in Betracht gezogen werden können, für sehr harte Grundwässer wird eine Obergrenze von maximal 60 °C empfohlen. Die beiden chloridisch geprägten Grundwässer konnten dagegen auf Temperaturen um 70 °C bis 75 °C erhitzt werden, ohne dass Kalkablagerungen im Wärmeübertrager beobachtet werden konnten. Da der Scaling-Test jedoch an diesen Standorten nur verkürzt durchgeführt werden konnte, besitzen diese Ergebnisse und Einschätzungen nur eine eingeschränkte Aussagekraft.

Bei geplanten Speichern sollte von der Übertragung dieser Ergebnisse auf andere Grundwässer ohne weitere Vor-Ort-Experimente in jedem Fall abgesehen werden.

#### 4.2.3 Wasserbehandlung mit CO<sub>2</sub>

Mit einer auf der Basis der Arbeiten im Rahmen des IEA ECES Annex VI modifizierten Vorrichtung zur CO<sub>2</sub>-Dosierung wurde das Grundwasser am Standort Stuttgart in mehreren Testreihen kontinuierlich und intermittierend mit CO<sub>2</sub> beaufschlagt. Dabei konnten unterschiedliche Sättigungsverhältnisse von Calcit eingestellt und untersucht werden.

Im Unterschied zu den Referenztestreihen ohne Wasserbehandlung konnte bei diesen Experimenten die Kalkbelagbildung im Wärmeübertrager erfolgreich unterdrückt bzw. der Kalkbelag im Wärmeübertrager wieder aufgelöst werden. Bei der kontinuierlichen Beaufschlagung mit Kohlendioxid reicht bereits eine vergleichsweise geringfügige Absenkung der Übersättigung von Calcit aus, um die Belagsbildung wirksam zu unterdrücken. Auch die intermittierende Dosierung von Kohlenstoffdioxid zeigt, dass ein Plattenwärmeübertrager unter Betriebsbedingungen von Calcitablagerungen befreit werden kann.

Die zur Regelung der CO<sub>2</sub>-Dosierung eigens programmierte Software ermöglicht in Verbindung mit Simulationsberechnungen zur notwendigen Dosiermenge eine bequeme chemische Konditionierung des Grundwassers. Zur Verbreiterung der Datenbasis und zur detaillierten Ausarbeitung einer Kontroll- oder Regelstrategie sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich.

#### 4.2.4 Ergebnisse der Lüneburger Versuche

Der Wirkungsgrad eines Wärmetauschers lässt sich anhand des Wärmeübergangskoeffizienten (k-Wert in W/(m<sup>2</sup>\*K)) charakterisieren. Im sauberen Zustand setzt sich dieser Wärmedurchgangskoeffizient k aus dem inneren Wärmeübergang  $\alpha_i$ , der Wärmeleitung durch die Wand  $s/\lambda$  und dem äußeren Wärmeübergang  $\alpha_a$  zusammen.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Infolge einer Belagsbildung (Verschmutzung) der Wärmübertragungsflächen erhöht sich durch die zusätzliche Schicht der Wärmedurchgangswiderstand. Der k-Wert setzt sich dann aus folgenden Größen zusammen.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a} + f \quad (\text{Gleichung 2})$$

Der Faktor f ist der durch eine Belagsbildung zusätzlich entstandene Wärmeleitwiderstand.

Nach folgender Formel kann der k-Wert auch aus den aktuellen Prozessdaten berechnet werden

$$k = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T_M} \quad (\text{Gleichung 3})$$

wobei  $\dot{Q}$  = Wärmestrom  
 A = Wärmeübertragungsfläche  
 $\Delta T_M$  = mittlere logarithmische Temperaturdifferenz

Das Ziel ist, durch die relative Änderung des k-Wertes über die Versuchsdauer Rückschlüsse auf die Belagsbildung zu ziehen.

Zur Charakterisierung der Wärmetauscher wurden Primärkennlinien aufgenommen. Bei der Aufnahme einer Primärkennlinie wird der Sekundär-Volumenstrom (Grundwasserstrom) auf einen konstanten Wert eingestellt und der Primär-Volumenstrom (Heizkreislauf) schrittweise geändert. Im Beharrungszustand wurden die Messdaten festgehalten und anschließend ein neuer Volumenstrom eingestellt. Da die Strömungsgeschwindigkeit die Haupteinflussgröße auf den Wärmeübergang ist, entstehen mit den einzelnen Messpunkten Kennlinien, die die Charakteristik des

Wärmeübergangs wiedergeben. Die so bei verschiedenen Sekundär-Volumenströmen ermittelten Kennlinien sind in Bild 4-5 graphisch zusammengefasst.

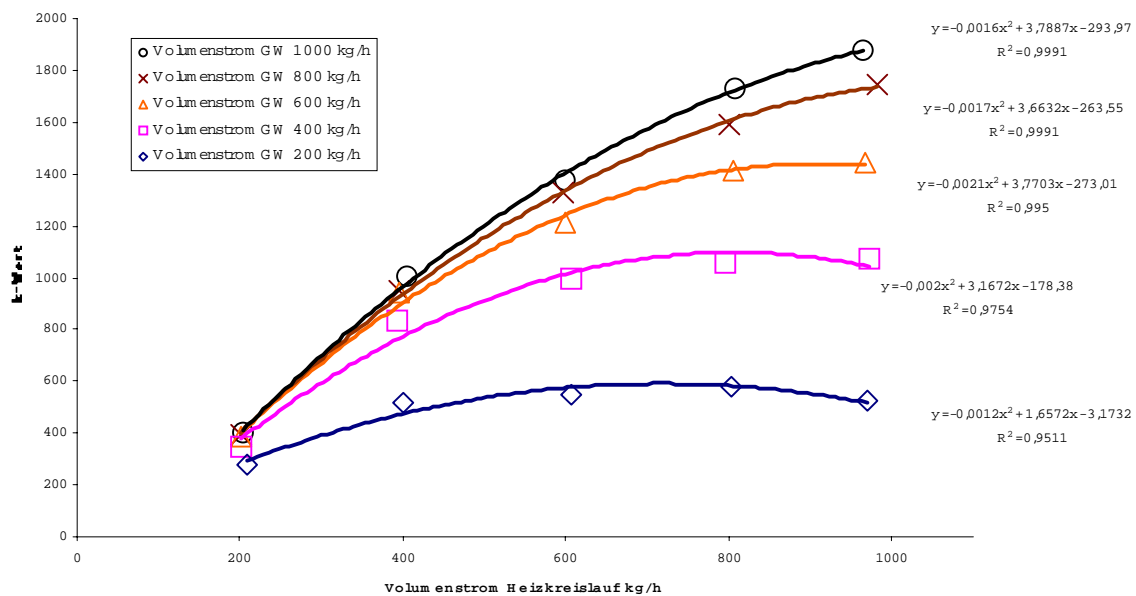


Abb. 4-5: Kennlinien zur Wärmetauschercharakteristik

Um eine Belagsbildung während der Ermittlung der Kennlinien zu vermeiden, wurde der Versuch in Lüneburg mit Leitungswasser durchgeführt. Die Kennlinien stellen den Grundzustand des Wärmetauschers dar. Zum einen dienen sie dazu festzustellen, ob durch die Reinigung des Wärmetauschers, die nach jedem Versuch durchgeführt wird, der Grundzustand wieder erreicht wird. Zum anderen wurde eine Excel-Makro mit thermodynamischen Berechnungen in Kombination mit den Primärkennlinien der Wärmetauscher erstellt, mit welchem die relevanten Temperatur- und Leistungsdaten bei relativ frei wählbaren Betriebszuständen berechnet werden können.

Um den Einfluss des Volumenstroms im Grundwasserkreislauf und der Temperatur, auf die das Grundwasser erwärmt wird, auf die Belagsbildung festzustellen, wurden in Stuttgart Büsnau auf dem Gelände der Versuchskläranlage zwei Versuchreihen durchgeführt.

In der ersten Versuchreihe wurde die Temperatur, auf die das Grundwasser aufgeheizt wurde, variiert, und der Volumenstrom im Grundwasser konstant gehalten. In der zweiten Versuchreihe wurde der Volumenstrom im Grundwasserkreislauf variiert und die Temperatur konstant gehalten. Nach jedem Versuchen wurde der Wärmetauscher auf der Grundwasserseite gereinigt. In Tabelle 4-6 sind die Ergebnisse der Ca-Analyse zusammengefasst, in Abb. 4-7 ist die graphische Auswertung dargestellt.

Tab. 4-6: Calciumgehalte

	Ca-Absolut
	g
V1	28,71
V2	27,91
V3	37,90
V4	1,25

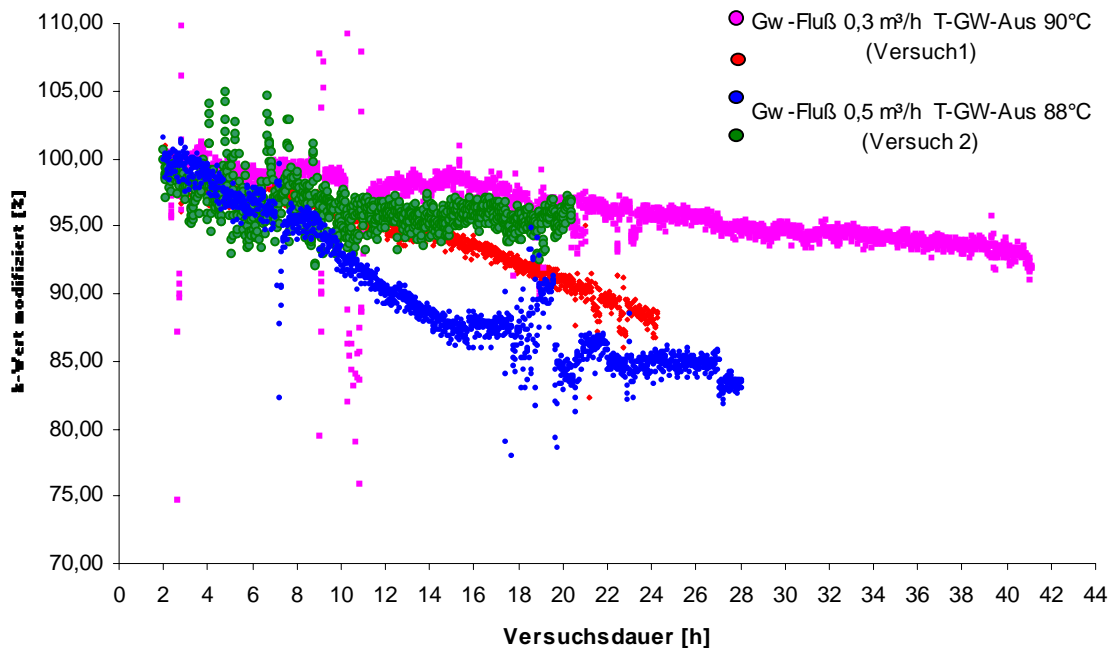


Abb. 4-7: Einfluss des Volumenstroms im Grundwasserkreislauf und der Grundwassertemperatur (erwärmt) auf die Belagsbildung

In der Graphik sind die k-Werte gegen die Zeit aufgetragen. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden die k-Werte folgendermaßen modifiziert:

$$k_t^* = \left[ \left( \frac{k_t}{\dot{V}_t} \right) / \left( \frac{k_0}{\dot{V}_0} \right) \right] * 100 \quad (\text{Gleichung 4})$$

wobei  $k_t$  = k-Wert zum Zeitpunkt t

$\dot{V}_t$  = Volumenstrom im Heizkreislauf zum Zeitpunkt t

$k_0$  = k-Wert zum Zeitpunkt 0 (Versuchsbeginn)

$\dot{V}_0$  = Volumenstrom im Heizkreislauf zum Zeitpunkt 0 (Versuchsbeginn)

Die gefundenen Ca-Konzentrationen korrelieren gut mit den Verlauf der k-Werte. Anhand der Ergebnisse der Versuche 1 und 2 lässt sich kein Einfluss des Volumenstroms im gewählten Bereich auf die Kalkbildung im Wärmetauscher feststellen. Vielmehr ist die Quantität (siehe Tabelle 14) der Kalkablagerung zumindest bis zu einem bestimmten Punkt von der Menge des durchgesetzten Wassers abhängig.

Eine Temperaturabhängigkeit der Kalkbelagsbildung lies sich durch die Versuche 2, 3 und 4 eindeutig nachweisen, während bei 70 °C (Versuch 4) kaum eine Abfall des k-Wertes über der Versuchsdauer aufgetreten ist, ist bei 80 °C (Versuch 3) und 90 °C (Versuch 2) eine deutlicher Abfall des k-Wertes aufgetreten. Diese Beobachtung spiegelt sich auch in den gefundenen Ca-Mengen wieder.

In Hinblick auf eine spätere Steuerung einer Wasserbehandlung mittels der Betriebsdaten des Wärmetauschers ist jedoch eine Aussage in einem viel kürzeren Zeitraum,  $<< 1$  h, notwendig. Problematisch dabei erweist sich die starke Abhängigkeit des K-Werts von Schwankungen der Betriebsparametern. Bei den Schwankungen gibt es zum einen unregelmäßig und spontan Auftretenden Schwankungen durch Störungen in den Betriebsbedingungen, die sich unmittelbar in starken Änderungen des K-Wertes niederschlagen. Diese Störungen lassen sich anhand des Betriebsdatenprotokolls zeitlich exakt eingrenzen. Sie führen daher nicht zu einer Fehlaussage. Durch die ständige Optimierung der verfahrenstechnischen Komponenten lassen sich diese Störungen auf ein Minimum reduzieren und stellen somit nicht das eigentliche Problem dar.

Leider ist eine periodische Schwingung aus der Regelgröße PID-out (Steuersignal für den Gasfluß in die Heiztherme (100% entspricht der maximalen Heizleistung) in allen für die Berechnung des k-Wertes relevanten Betriebsparametern als Grundrauschen vorhanden. Dieses Rauschen erschwert das Erkennen geringfügiger Änderungen im k-Wert. Es ist bisher noch nicht gelungen die genaue Ursache für diese Schwankungen zu ermitteln. Eine erste Vermutung, sie würden durch die Regelung der Heiztherme verursacht, konnte zumindest nicht als einzige Ursache verifiziert werden. Bei Versuchen, in denen die Heizleistung der Therme konstant gehalten wurde, wiesen die vorher genannten Parameter ähnliche Schwankungen auf.

Weiterhin wurden Vorrichtungen für Korrosions- und Versinterungsmessungen in das MTE integriert. Versuche mit diesen Geräten konnten jedoch bisher aufgrund organisatorischer Gegebenheiten noch nicht vor Ort durchgeführt werden, da die Entwicklung und Ausarbeitung zeitgleich mit den Einsätzen bzw. später erfolgt ist.

## 5. IEA ECES Annex 12

Der Annex 12 zum Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage der IEA hat zum Ziel, unterirdische Wärmespeicher auf höherem Temperaturniveau (>50 °C) zu untersuchen, Erfahrungen über ihre Betriebsweise zu erhalten, und noch vorhandene Barrieren z.B. bei Planungswerkzeugen zu beseitigen.

An Annex 12 sind Belgien, Deutschland und Schweden direkt beteiligt, die Niederlande und Norwegen waren zeitweilig dabei, und auch Japan, Türkei und andere Länder unterstützten vor allem in der ersten Phase auch ohne formelle Mitgliedschaft.

Die Arbeit in Annex 12 ist in verschiedene Subtasks unterteilt:

- Subtask A      State-of-the-art-report (Phase 1 von Annex 12, im Vorgängerprojekt 0329809 A im Jahr 1999 fertiggestellt)
- Subtask B:      Monitoring:  
Untersuchung von mehreren Anlagen, dabei in Deutschland:
- Bundestag Berlin (Reichstagsgebäude)      Aquiferspeicher
  - Wohnanlage Helios in Rostock      Aquiferspeicher
  - Wohngebiet Neckarsulm-Amorbach      EWS-Speicher
  - Wohngebiet Attenkirchen (gegen Ende des Vorhabens neu hinzugekommen)      EWS-Speicher
- Anlagen im Ausland:
- Hooge Burch, Niederlande, stillgelegt      Aquiferspeicher
  - Wohngebiet Anneberg, Schweden      EWS-Speicher
  - Labor in Mol, Belgien (gegen Ende des Vorhabens neu hinzugekommen)      EWS-Speicher
- Subtask C:      Aquifer Test Equipment (MTE) - Einsatz an div. Standorten, im IEA-Zusammenhang in Nijmegen
- Subtask D:      Thermal Response Test (TRT) - erfolgreich entwickelt und im Markt etabliert, im IEA-Rahmen gemeinsamer Versuch in Mol (Oktober 2001)
- Subtask F:      Wirtschaftlichkeit - Daten für 4 Anlagen evaluiert (durch Mol)
- Zusätzlich:      Update der in Phase 1 im Rahmen des Reports zusammengestellten Fact Sheets mit neuen bzw. vergrößerten Projekten.

Zu den IEA-Arbeiten wird ein eigener Bericht (auf Englisch) erstellt.

## 6. Veröffentlichungen

### 6.1 Veröffentlichungen aus dem IAG zu Themen des Projekts

- SANNER, B., REUSS, M. & MANDS, E. (1999): Thermal Response Test - eine Methode zur In-Situ-Bestimmung wichtiger thermischer Eigenschaften bei Erdwärmesonden. - Geothermische Energie 24-25/99, S. 29-33, Geeste
- SANNER, B. (1999): Annex 13 des IEA-Energiespeicherprogramms - Brunnen und Erdwärmesonden. - Geothermische Energie 26-27/99, S. 36-37, Geeste
- SANNER, B., JÄKEL, M., KNOBLICH, K., KOCH, M., POPPEI, J., REUSS, M., RUCK, W. & SEIBT, P. (2000): Wissenschaftliches Begleitprogramm zu den Aquiferspeichern für die Gebäude des Bundestags in Berlin. - DGS Sonnenforum, Freiburg, Juli 2000, elektronisch veröffentlicht
- SANNER, B. & KNOBLICH, K. (2000): IEA ECES Annex 12 - High Temperature Underground Thermal Energy Storage. - Proc. TERRASTOCK 2000, S. 17-24, Stuttgart
- SANNER, B. & KONSTANTINIDOU, E. (2000): Guideline draft (green paper) VDI 4640, part 3: Underground Thermal Energy Storage. - Proc. TERRASTOCK 2000, S. 87-92, Stuttgart
- SANNER, B., REUSS, M., MANDS, E. & MÜLLER, J. (2000): Thermal Response Test - Experiences in Germany. - Proc. TERRASTOCK 2000, S. 177-182, Stuttgart
- MANDS, E. & SANNER, B. (2001): Erfahrungen mit kommerziell durchgeführten Thermal Response Tests in Deutschland. - Geothermische Energie 32-33/01, S. 15-18, Geeste
- SANNER, B. (2001) Entwicklung und Stand des mobilen Thermal Response Test. – in: EUGSTER, W. & LALOUI, L., Proc. Workshop Geothermische Response Tests Lausanne, S. 11-20, GtV, Geeste
- MANDS, E., SANNER, B. & GRUNDMANN, E. (2001): Kommerzielle Thermal Response Tests in Deutschland. - in: EUGSTER, W. & LALOUI, L., Proc. Workshop Geothermische Response Tests Lausanne, S. 30-36, GtV, Geeste
- MANDS, E. & SANNER, B. (2001): In-situ-determination of underground thermal parameters. - in: POPOVSKI, K. & SANNER, B. (eds.), IGD Germany 2001 Bad Urach, Supplement S. 45-54, GtV, Geeste
- SANNER, B. (2001): A different approach to shallow geothermal energy - Underground Thermal Energy Storage (UTES). - in: POPOVSKI, K. & SANNER, B. (eds.), IGD Germany 2001 Bad Urach, Supplement S. 95-106, GtV, Geeste
- EUGSTER, W.J., SANNER, B. & MANDS, E. (2002): Stand der Entwicklung und Anwendung des Thermal-Response-Test. - Tagungsband 7. Geothermische Fachtagung Waren, S. 304-314, GtV, Geeste
- SANNER, B. & PAKSOY, H. (2002): Possibilities for Heating and Cooling through Underground Thermal Energy Storage in the Mediterranean area. - in: POPOVSKI, K. & FYTIKAS, M. (eds.), District heating, agricultural and agro-industrial uses of geothermal energy, IGD Greece 2002, S. 63-66, Aristotle Univ., Thessaloniki
- SANNER, B. (2003): IEA ECES Annex 12 - High Temperature Underground Thermal Energy Storage. - Proc. FUTURESTOCK 2003, Warschau
- SANNER, B. (2003): Thermally enhanced grout and the reduction of borehole thermal resistance. - Proc. FUTURESTOCK 2003, Warschau

## 6.2 *Berichte und Unterlagen der Projektpartner*

### 6.2.1 Unterlagen GTN

- Zusammenstellung Datenaufbereitung Stand 06.06.2001
- Dokumentation 19.04.2000, Datenerfassung, Betriebsschemata Speicher
- Dokumentation 30.06.2000, Simulation (Kältespeicher, Modellanpassung an Bohr- und Testergebnisse), Chemie
- Dokumentation 17.07.2001, Simulation Ist-Zustand Wärme- und Kältespeicher
- Dokumentation 02.10.2001, Chemische Simulation Wärmespeicher

### 6.2.2 Unterlagen Universität Lüneburg

- Abschlussbericht zum 30.6.2002:
  - Aufbau mobiles Testgerät
  - Experimentelle Arbeiten zum und mit dem Testgerät
  - Chemisches Monitoring der Aquiferspeicher Reichstag Berlin
- Bericht Probenahme Aquifer Reichstag 04.05.2000
- Bericht Probenahme Aquifer Reichstag 13.07.2000
- Bericht Probenahme Aquifer Reichstag 05.01.2001 bis 10.01.2001
- Bericht Probenahme Aquifer Reichstag 08.05.2001
- Bericht Probenahme Aquifer Reichstag 01.10.2002
- Bericht Probenahme Aquifer Reichstag 27.05.2003
- Bericht Probenahme Aquifer Reichstag 16.09.2003

### 6.2.3 Unterlagen Universität Stuttgart

- Abschlussbericht zum 30.9.2003
  - Aufbau mobiles Testgerät
  - Entwicklung des Scaling-Tests
  - Scaling-Tests an verschiedenen Grundwässern

## 6.3 *Veröffentlichungen aus dem IAG in der ersten Projektphase (0329809 A)*

SANNER, B. & KNOBLICH, K. (1998): New IEA-activity ECES Annex 12 "High Temperature Underground Thermal Energy Storage". - Proc. 2nd International Geothermal Heat Pump Conference, Richard Stockton College, S. 169-177, Pomona NJ, USA

SANNER, B. & KNOBLICH, K. (1998): Thermische Untergrundspeicher hoher Temperatur, das Vorhaben ECES Annex 12 der Internationalen Energie-Agentur IEA. - Tagungsband 5. Geothermische Fachtagung Straubing, GtV, Neubrandenburg

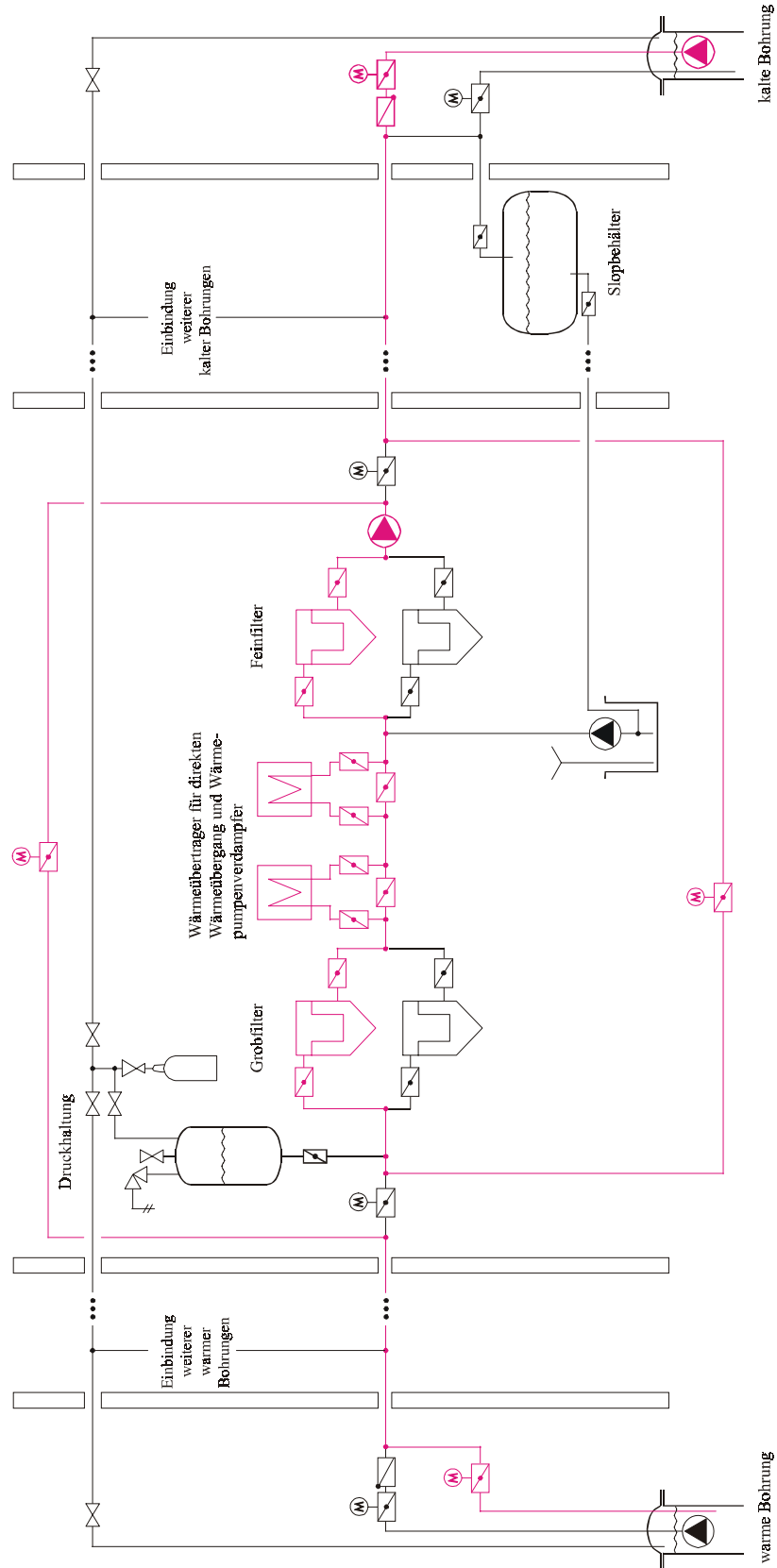
SANNER, B. & KNOBLICH, K. (1998): Thermische Untergrundspeicher auf höherem Temperaturniveau - Stand der Technik. - Proc. 11. Int. Sonnenforum Köln, S. 553-559, DGS, Solar Promotion Verlag, München.

SANNER, B., KNOBLICH, K., KOCH, M. & ADINOLFI, M. (1998): IEA ECES Annex 12: Hochtemperatur-Erdwärmesonden- und Aquiferspeicher. - BMBF-Statusbericht '98 Solarunterstützte Nahwärmeversorgung und saisonale Wärmespeicherung, S. 141-150, Steinbeis-Transferzentrum EGS, Stuttgart

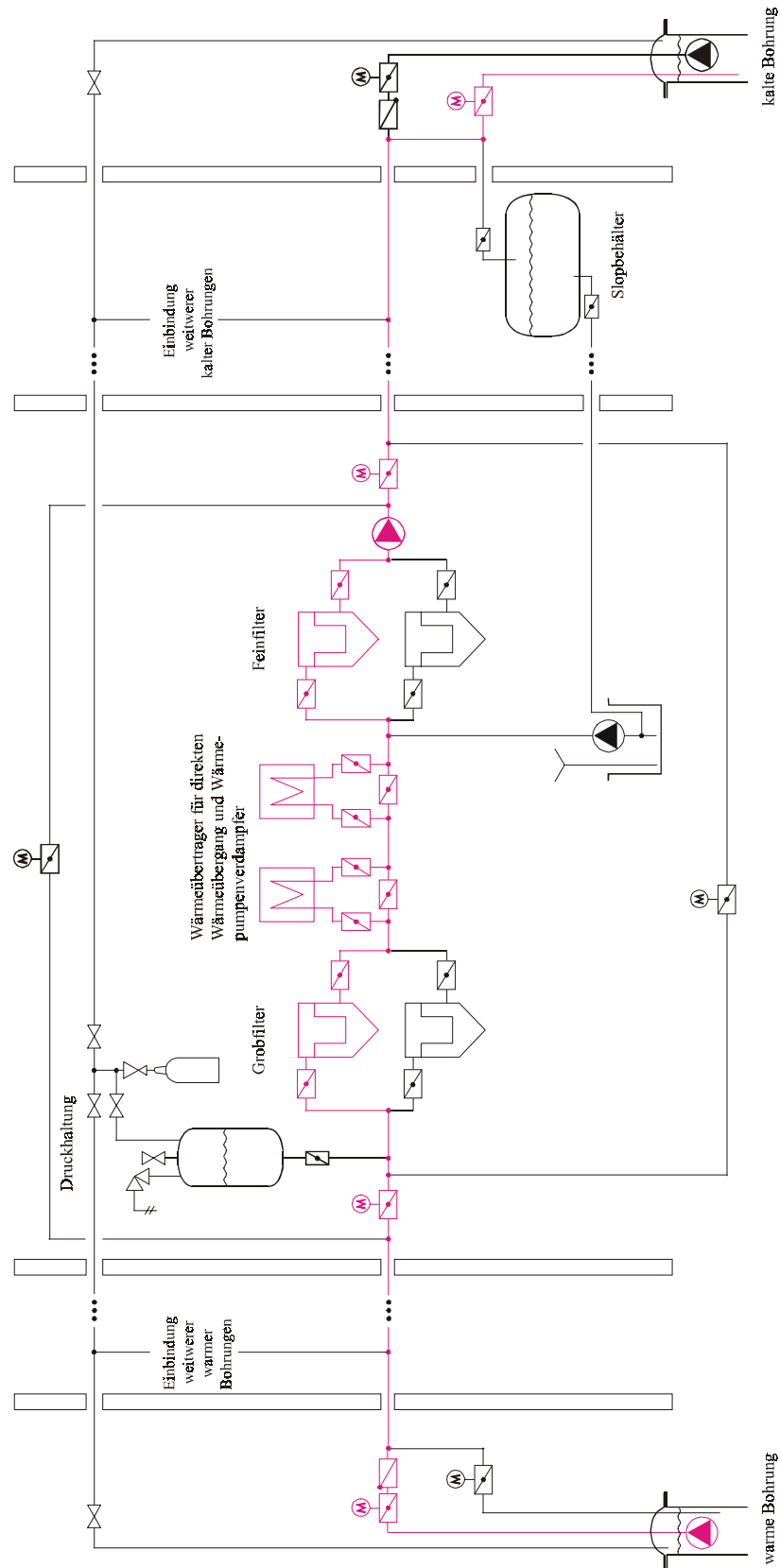
SANNER, B. & NORDELL, B. (1998): Underground Thermal Energy Storage - an International Overview. - Newsletter IEA Heat Pump Center 16/2, S. 10-14, Sittard

- SANNER, B. & HELLSTRÖM, G. (1998): Examples for Underground Thermal Energy Storage with Borehole Heat Exchangers in Central and Northern Europe. - Newsletter IEA Heat Pump Center 16/2, S. 24-26, Sittard
- SANNER, B. & KNOBLICH, K. (1999): Advantages and problems of high temperature underground thermal energy storage. - Bull. Hydrogeol. 17 (Proc. EGC Basel 99), S. 341-348, Peter Lang SA, Neuchatel/Bern
- SANNER, B. (Hrsg.) (1999): High Temperature Underground Thermal Energy Storage, State-of-the-art and Prospects. - Giessener Geologische Schriften 67, 158 S., Giessen  
(Hauptveröffentlichung der Ergebnisse der 1. Projektphase)

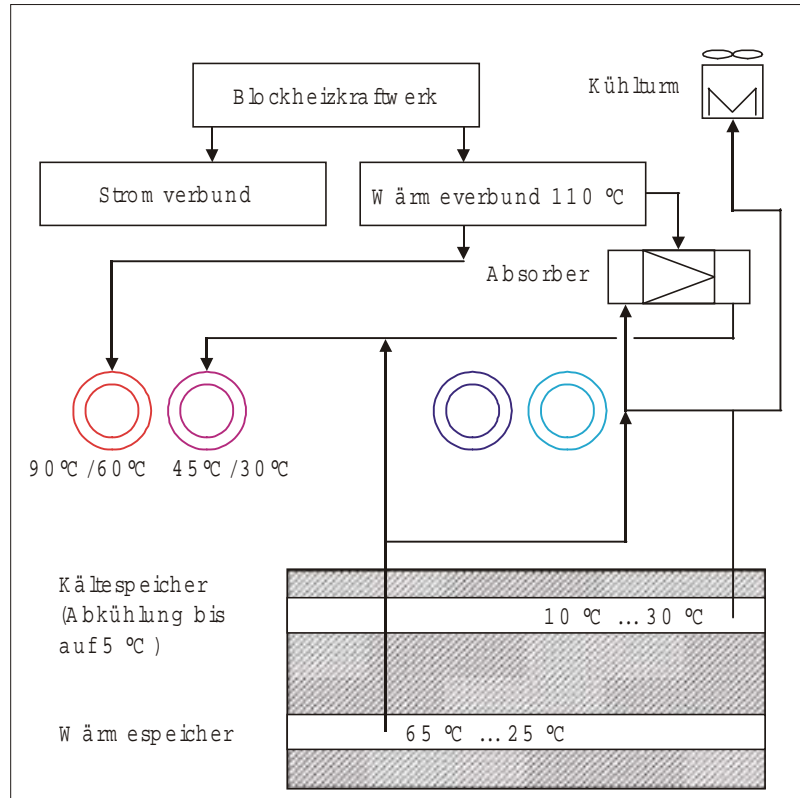




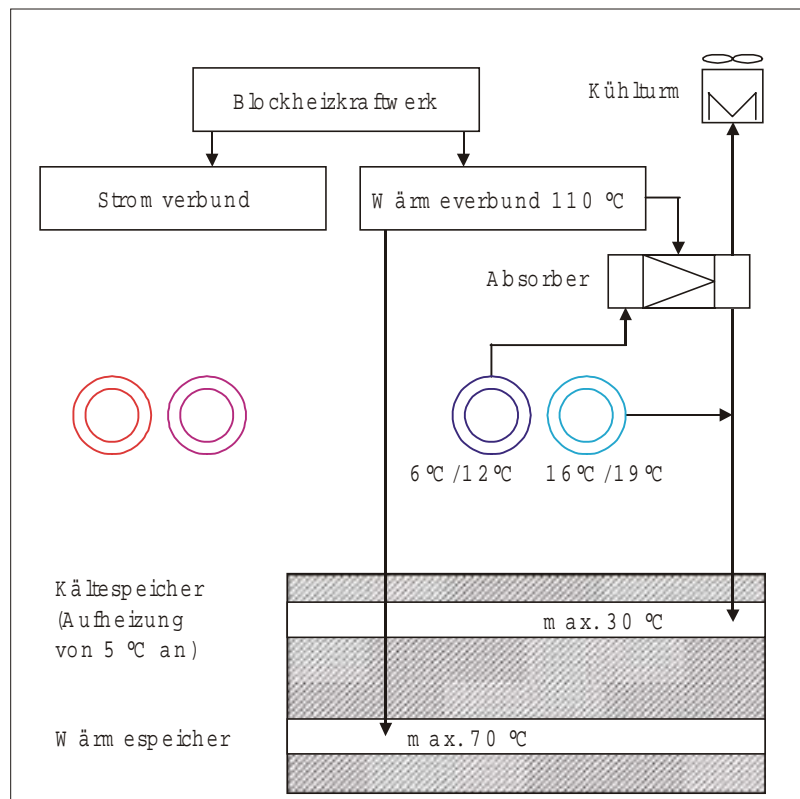
Wärmespeicher, Prinzipschema Wärmeeinlagerung (Graphik: GTN)



Wärmespeicher, Prinzipschema Wärmeauslagerung (Graphik: GTN)

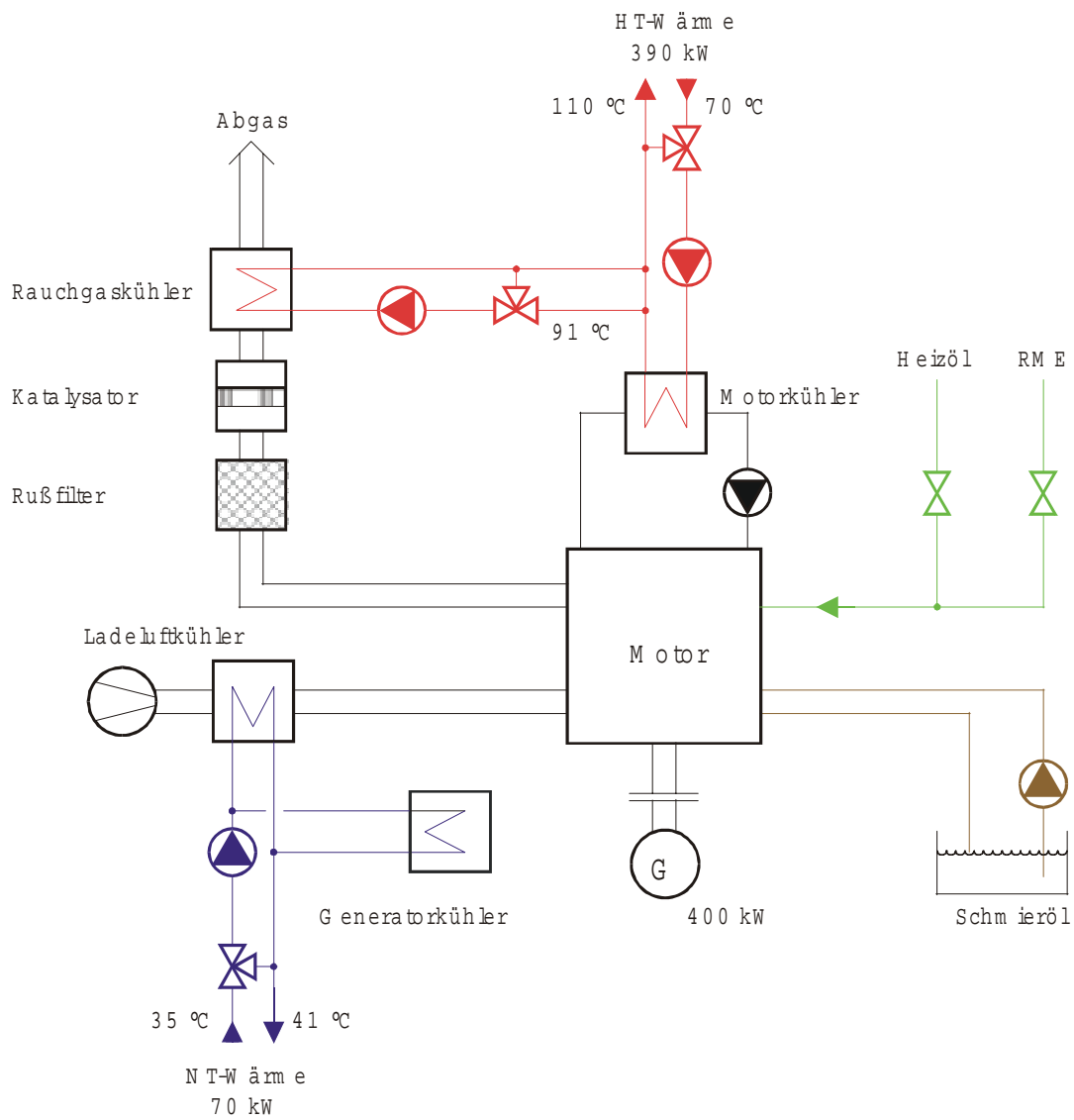


Winterbetrieb

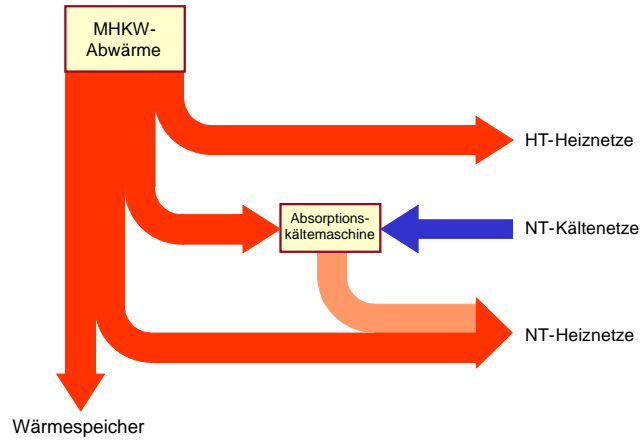


Sommerbetrieb

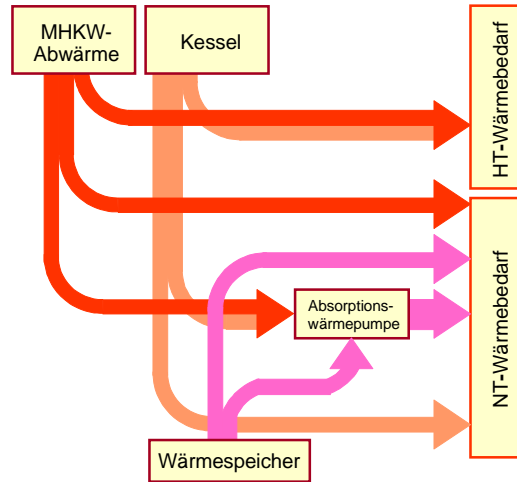
Energieströme im Energiesystem der Parlamentsbauten in Berlin (Graphik: GTN)



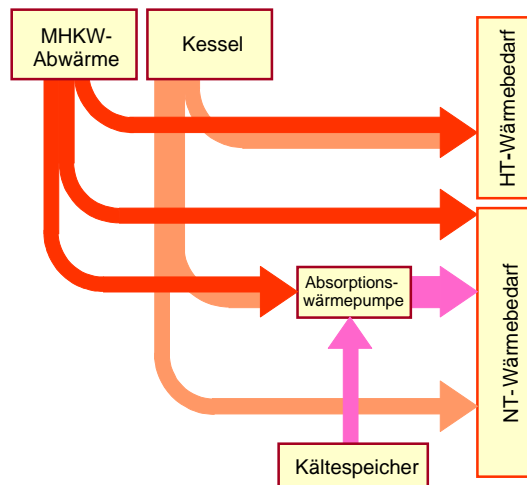
Funktionsprinzip einer MHKW-Einheit (Graphik: GTN)



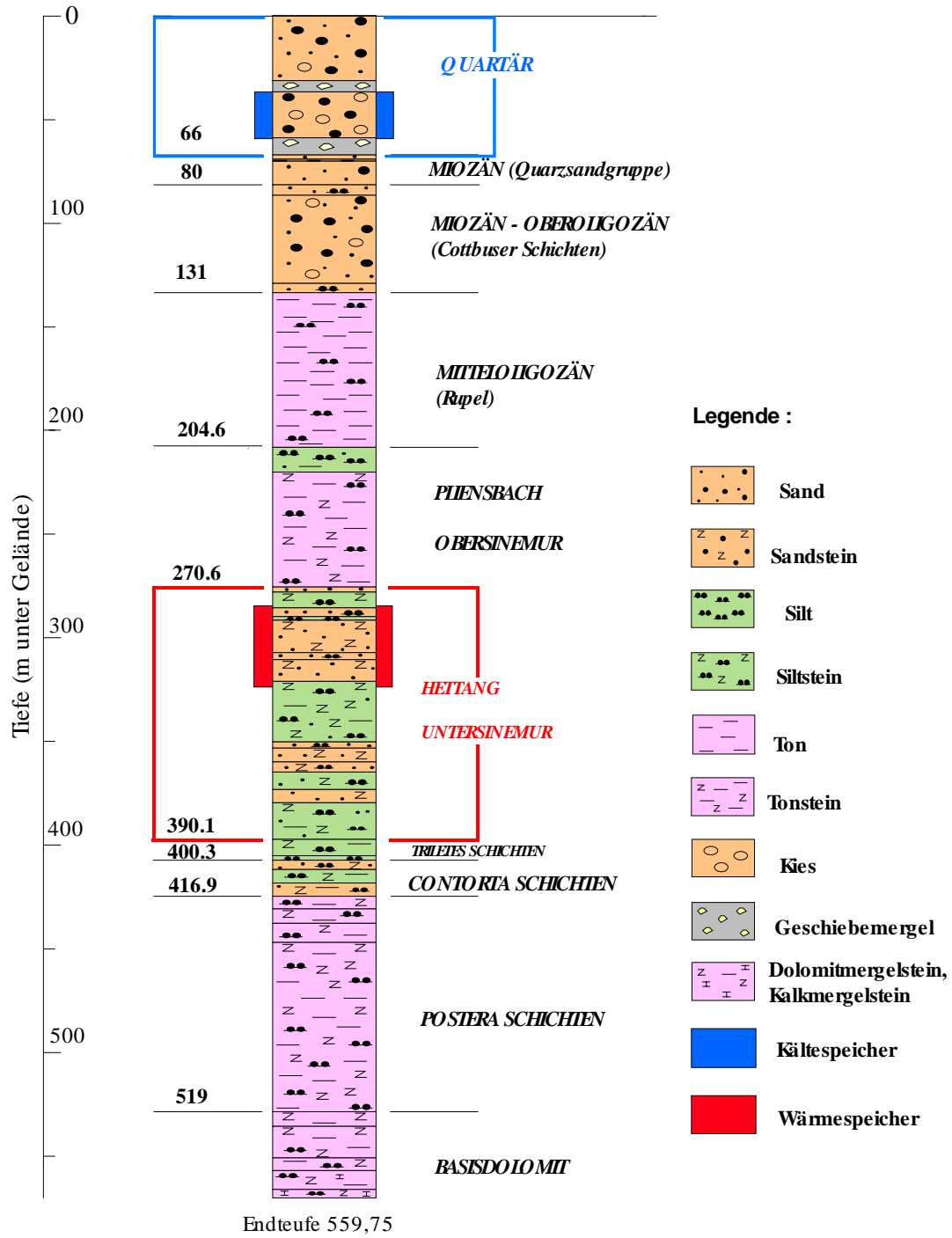
Nutzung der MCHW-Abwärme in der Sommerzeit (Graphik: GTN)



Wärmeversorgung in der Winterzeit (Wärmespeichernutzung) (Graphik GTN)



Wärmeversorgung in der Winterzeit (Kältespeichernutzung) (Graphik GTN)



Geologisches Profil am Standort Berlin-Spreebogen (Graphik: GTN)