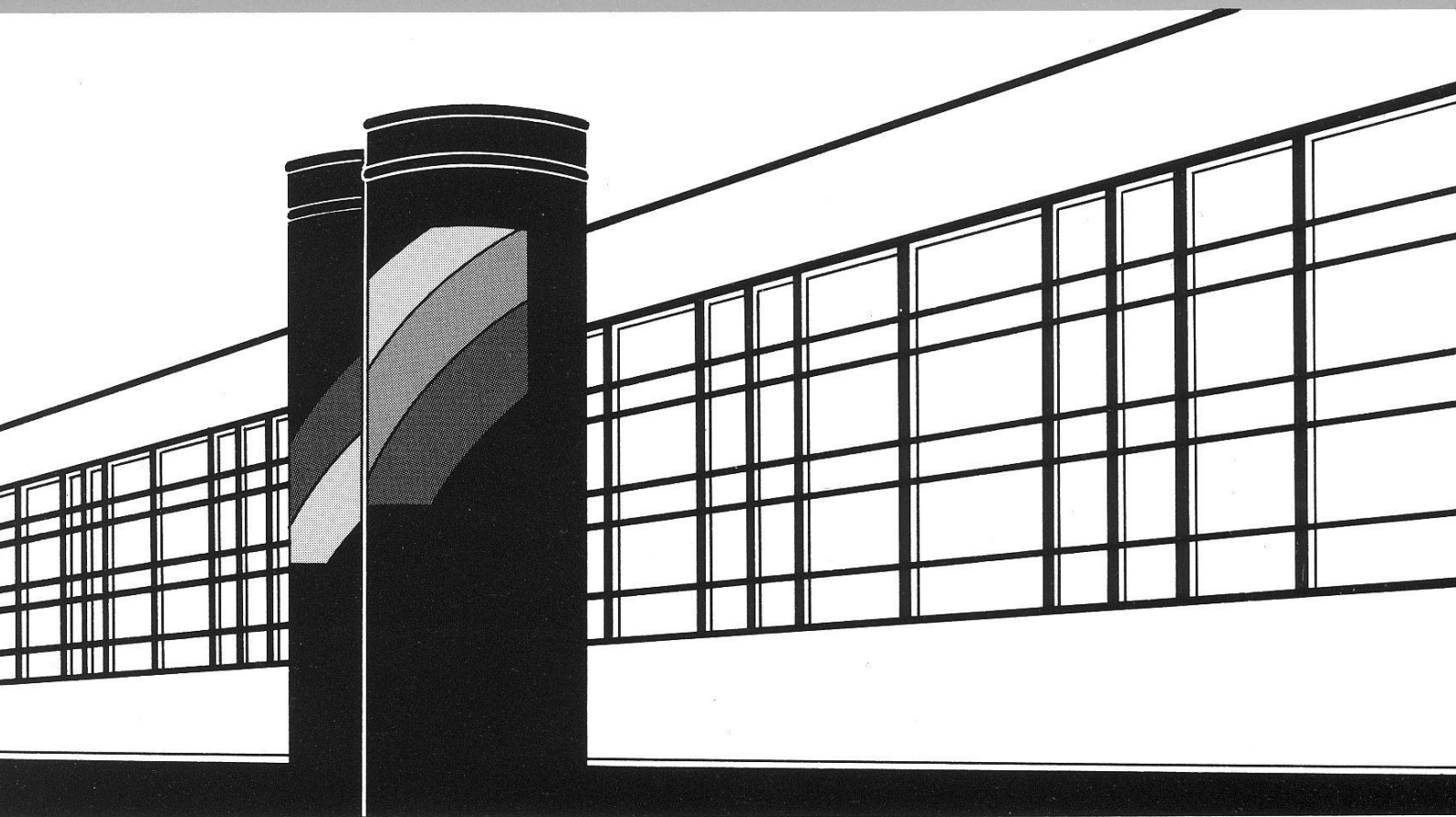


Institut für Wasserbau · Universität Stuttgart

Mitteilungen



Heft 205 Hrsg.: J. Braun & H.-P. Koschitzky

VEGAS-Kolloquium 2011

Flache Geothermie

- Perspektiven und Risiken

Heft 205 **VEGAS-Kolloquium 2011**
Flache Geothermie
- Perspektiven und Risiken

Herausgeber:

Jürgen Braun

Hans-Peter Koschitzky

Tagungsband zur Veranstaltung
in Kooperation mit dem
Landesforschungszentrum Geothermie
am KIT, Karlsruhe

06. Oktober 2011
Universität Stuttgart,
Campus Stuttgart-Vaihingen

Eigenverlag des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart

Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

VEGAS-Kolloquium 2011, Flache Geothermie - Perspektiven und Risiken -
von Jürgen Braun & Hans-Peter Koschitzky (Hrsg.), Institut für Wasserbau, Universität
Stuttgart.

Stuttgart: Inst. für Wasserbau, 2011

(Mitteilungen / Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart: H. 205

ISBN 978-3-942036-09-2

Gegen Vervielfältigung und Übersetzung bestehen keine Einwände, es wird lediglich
um Quellenangabe gebeten.

Herausgegeben 2011 vom Eigenverlag des Instituts für Wasserbau

Druck: DCC Kästl, Ostfildern

VORWORT

Mit der Neuausrichtung in der deutschen Energiepolitik kommen auf Bund und Land ganz neue Herausforderungen zu. Die oberflächennahe Geothermie als etabliertes Verfahren mit inzwischen mehreren zehntausend Bohrungen/EWS-Anlagen allein in Baden-Württemberg ist bereits heute in der Lage, den Bedarf an Heiz- und Kühlleistung bei sich abzeichnender Klimaerwärmung sowohl in privaten als auch gewerblichen Bereichen subventionsfrei und wirtschaftlich darzustellen. Unabhängigkeit von Importen und Ölpreis, geringer Platzbedarf und die nahezu ortsunabhängige Einsetzbarkeit sind weitere Vorteile der flachen Geothermie.

Entscheidende Herausforderungen für den Einsatz und die Akzeptanz dieser Systeme in urbanen Räumen und im komplexen Untergrund sind die Funktionalität der Systeme, deren Qualitätssicherung und Überwachung, das Kosten-Nutzenverhältnis und das Wärmemanagement im Grundwasserbereich.

Den Perspektiven und Risiken der Flachen Geothermie widmet sich das VEGAS-Kolloquium 2011. Mit theoretischen Ansätzen und Praxisbeispielen werden im Kolloquium sowohl die grundlegenden physikalischen, chemischen und biologischen Effekte geothermischer Nutzungssysteme vorgestellt. Die technischen und ökonomischen Aspekte in der Umsetzung und der Überwachung der Anlagen stellen einen weiteren Themenschwerpunkt dar. Vor dem Hintergrund der Schäden, die an einigen Standorten aufgetreten sind (z.B. Staufen, Leonberg), liegt ein wesentliches Augenmerk des VEGAS-Kolloquiums auf der Qualitätssicherung und den Risiken bei unsachgemäßer Ausführung flacher Geothermieanlagen.

Wichtige Funktion des jährlichen VEGAS-Kolloquiums ist der Knowhow-Transfer von der Wissenschaft zur Praxis durch die Diskussion zwischen Wissenschaftlern, Industrie und Consultants, privaten und kommunalen Grundstückbesitzer sowie Vertretern der Umweltverwaltung. Daraus werden die Anforderungen und Erwartungen der Praxis an zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte entwickelt.

Stuttgart, im Oktober 2011

Jürgen Braun und
Hans-Peter Koschitzky



Kolloquium 2011

Flache Geothermie Perspektiven und Risiken

Donnerstag, 06. Oktober 2011

Universität Stuttgart

Campus Stuttgart-Vaihingen

Ingenieurwissenschaftliches Zentrum IWZ

Pfaffenwaldring 9, Hörsaal V 9.01

in Kooperation mit dem

Landesforschungszentrum Geothermie, LFZG

am KIT, Karlsruhe



VEGAS - Kolloquium 2011 - Programm

Donnerstag, 06. Oktober

Campus Stuttgart-Vaihingen, IWZ, Pfaffenwaldring 9, Hörsaal V 9.01

9:00 Begrüßung und Eröffnung

Jürgen Braun, PhD.

Wissenschaftlicher Leiter, VEGAS, Universität Stuttgart

Prof. Dr. Frank Schilling

Leiter des Landesforschungszentrums Geothermie, LFZG

Grußwort

Ministerialdirigent Karl Greißing,

Leiter der Abteilung Energie, Ministerium für Umwelt, Klima und

Energiewirtschaft (UM) Baden-Württemberg

Perspektiven, technische Nutzung

Moderation: Jürgen Braun, PhD, VEGAS, Universität Stuttgart

**9:15 Kombination von Flacher Geothermie und Bodensanierung -
Praxiserfahrungen in den Niederlanden**

Charles G.J.M. Pijls, MSc, Tauw, Deventer, Niederlande

9:40 Geothermie und Grundwasser-Mikrobiologie

Dr. Kathrin R. Schmidt, Technologiezentrum Wasser, TZW, Karlsruhe

10:05 Technische und ökonomische Entwicklungen in der Tunnelgeothermie

*Prof. Dr.-Ing. Christian Moormann, Dipl. Geol. Marcus Schneider,
Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart*

**10:30 Nutzung wärmerohrbasierter CO₂-Erdsonden am Beispiel eines
Schnee- und Eisfreihaltungssystems**

*Dr. Roman Zorn, Geothermisches Labor, European Institute of Energy
Research, KIT, Karlsruhe*

10:55 Kaffeepause

Modellierung und Monitoring

Moderation: Dr. Birgit Müller, Landesforschungszentrum Geothermie, LFZG,
Karlsruhe

- 11:20 Modellierung von Kälte- und Wärmefahnen in der oberflächennahen Geothermie**
Jun.-Prof. Dr. Philipp Blum, Institut für Angewandte Geowissenschaften, KIT, Karlsruhe
- 11:45 Thermisch genutzte P&T-Anlagen - Potentiale und Risiken**
Dr. Bernd Flemisch, Institut für Wasserbau, LH2, Universität Stuttgart
- 12:10 In-situ-Mess- und Monitoringtechniken bei Geothermieranlagen**
Dr.-Ing. Nobert Klaas, VEGAS, Universität Stuttgart
- 12:35 Stand der Messtechnik bei der Qualitätsüberprüfung der EWS-Hinterfüllung**
Dipl.-Geol. André Voutta, A. Voutta Grundwasserhydraulik, Herrenberg
- 13:00 Mittagspause mit Imbiss**
mit Ausstellung zur Überwachung und Qualitätssicherung von EWS-Anlagen

Ausführung und Qualitätssicherung

Moderation: Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky, VEGAS, Universität Stuttgart

- 14:00 Qualitätssicherung EWS in der Schweiz**
Dr. Walter J. Eugster, Polydynamics Engineering, Zürich, Schweiz
- 14:25 Zeitliche Entwicklung von Vorgängen des Anhydritschwellens**
Dipl.-Ing. Thomas Mutschler, Institut für Boden- und Felsmechanik, KIT, Karlsruhe
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Fröhlich, Gesellschaft für Baugeologie und - Messtechnik, Limburg
- 14:50 Planung und Ausführung von EWS-Anlagen, QS mit Fokus auf geothermischer Vorerkundung und fachtechnische Begleitung der EWS-Bohrung**
Dr. Claus Heske, CDM Bochum

15:15 Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS)

Dipl.-Ing. Eva de Haas, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (UM) Baden-Württemberg

15:40 Bohrverfahren, Bohrtechnik und Umgang mit schwieriger Geologie

Frank Burkhardt, Burkhardt GmbH & Co. KG, Neuweiler

16:05 Kaffeepause mit Ausstellung (s.o.)

16:30 Podiumsdiskussion

Perspektiven und Risiken der Flachen Geothermie

Moderation: Prof. Dr. Frank Schilling, Institut für Angewandte Geowissenschaften, KIT; Karlsruhe

Impulsstatements

Dr. Walter J. Eugster

Polydynamics Engineering, Zürich, Schweiz

Dipl.-Ing. Eva de Haas

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (UM) Ba-Wü

Prof. Dr. Thomas Kohl

Lehrstuhl Geothermie, KIT, Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Christian Moormann

Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart

Ca. 17:30 Ende

Inhaltsverzeichnis

VEGAS - Kolloquium 2011 - Programm	VIII
Inhaltsverzeichnis	1
1 Combination of Shallow Geothermal Energy Systems and Soil Remediation – Practical Experiences in the Netherlands <i>Kombination von Flacher Geothermie und Bodensanierung - Praxiserfahrungen in den Niederlanden</i>	5
1.1 Background	5
1.1.1 Use of geothermal energy in the Netherlands	5
1.1.2 Changing Soil Policy in the Netherlands	7
1.2 Hydrological and Geochemical Effects of Shallow Geothermal systems	7
1.2.1 Hydrological effects	7
1.2.2 Geochemical and biological effects	9
1.2.3 Resume	10
1.3 Practical experiences	10
1.3.1 General	10
1.3.2 Utrecht	10
1.3.3 Eindhoven	11
1.3.4 Zwolle	11
Sources (Dutch)	12
2 Geothermie und Grundwasser-Mikrobiologie	13
2.1 Bedeutung des Grundwassers für Mensch und Umwelt	13
2.2 Temperaturabhängigkeit von Mikroorganismen	13
2.3 Geothermie: Auswirkungen auf Grundwasser-Mikrobiologie	14
2.3.1 Temperatur	15
2.3.2 Hydrogeologie	17
2.3.3 Hydrochemie	17
2.3.4 Schadstoffbelastungen	17
2.4 Geothermie und Altlasten	19
2.5 Zusammenfassung	19
Danksagung	20
Literatur	20

3 Technische und ökonomische Entwicklungen in der Tunnelgeothermie	25
3.1 Einleitung	25
3.2 Verfahrenstechniken der Tunnelgeothermie	25
3.2.1 Hydrogeothermisches Verfahren	26
3.2.2 Absorbertechnologisches Verfahren	26
3.3 Energetische Aspekte der Tunnelgeothermie	28
3.4 Ökonomische Aspekte der Tunnelgeothermie	28
3.5 Tunnelgeothermie am Beispiel Stuttgart-Fasanenhof	29
3.5.1 Technische Baugrundausrüstung	30
3.5.2 Technische Gebäudeausrüstung (TGA)	31
3.5.3 Messergebnisse	31
3.6 Schlussbemerkung	33
Literatur	34
4 Nutzung wärmerohrbasierter CO₂-Erdsonden am Beispiel eines Schnee- und Eisfreihaltungssystems	37
Kurzfassung	37
4.1 Einleitung	37
4.2 Grundprinzip	38
4.3 Feuerwehrrampe in Bad Waldsee	39
4.3.1 Benötigte Wärmeleistung	39
4.3.2 Planung der Wärmerohrlängen	40
4.3.3 Umsetzungsplan	41
4.3.4 Messtechnik	43
4.4 Messergebnisse	43
4.5 Zusammenfassung und Ausblick	46
Danksagung	46
Literatur	47
5 Modellierung von Kälte- und Wärmefahnen in der oberflächennahen Geothermie	49
Kurzfassung	49
5.1 Theorie	49
5.2 Testfeld Kilchberg	52
5.3 Validierung	54
5.4 Zusammenfassung und Ausblick	55
Danksagung	56
Literatur	56

6	Thermisch genutzte P&T-Anlagen - Potentiale und Risiken	57
6.1	Einleitung	57
6.2	Identifizierung der für den Wärmetransport relevanten Parameter	57
6.3	Eingesetzte Software und numerische Modelle	58
6.4	Ergebnisse	59
6.5	Ausblick: Schadstofftransport	61
	Literatur	61
7	In-situ-Mess- und Monitoringtechniken bei Geothermieranlagen	63
7.1	Einführung	63
7.2	Mess- und Probennahmetechniken	64
7.2.1	Temperatur	64
7.2.2	Hydrochemie	66
7.3	Feldanwendungen	66
7.3.1	Standort Kilchberg	67
7.3.2	Standort Bad Wurzach	67
7.3.3	Standort VEGAS	68
7.4	Numerische Modelle	69
7.5	Ergebnisse und Ausblick	70
	Literatur	70
	Finanzierung	71
8	Stand der Messtechnik bei der Qualitätsüberprüfung der EWS-Hinterfüllung	73
8.1	Einführung	73
8.2	Prinzip der Identifikation von Fehlstellen	73
8.2.1	Messung des thermischen Verhaltens der Hinterfüllung einer Erdwärmesonde (Kurz-thermal Response Test)	74
8.2.2	Die Messung der Dichte der Hinterfüllung	76
8.2.3	Die Kombination beider Methoden	78
8.3	Fazit	80
9	Qualitätssicherung Erdwärmesonden in der Schweiz	81
9.1	Einleitung	81
9.2	Markt	81
9.3	Qualitätssicherung	82
9.4	Schlussbemerkungen	85
	Bibliographie	86
10	Zeitliche Entwicklung von Vorgängen des Anhydritschwellens	87
10.1	Einleitung	87
10.2	Versuchstechnik	89

10.2.1	Versuchsapparatur	89
10.2.2	Versuchsablauf	91
10.3	Versuchsergebnisse	91
10.4	Zusammenfassung und Ausblick	93
	Literatur	94
11	Planung und Ausführung von Erdwärmesonden-Anlagen, Qualitätssicherung mit Fokus auf geothermischer Vorerkundung und fachtechnischer Begleitung der EWS-Bohrung	97
11.1	Einleitung	97
11.2	Planungsgrundlagen	98
11.3	Vorerkundung	99
11.3.1	Pilotbohrung	100
11.3.2	Der EGRT als Planungs- und Optimierungstool	100
11.4	Fachtechnische Begleitung der Bohrungen	102
11.5	Zusammenfassung	103
	Literatur	104
12	Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS)	107
12.1	Aktuelle Situation	107
12.2	Pressemitteilung UM Baden-Württemberg vom 18.08.2011	108
12.3	Pressemitteilung UM Baden-Württemberg vom 08.09.2011	109
13	Bohrverfahren, Bohrtechnik und Umgang mit schwieriger Geologie	111
13.1	Einführung	111
13.2	Einteilung der Bohrverfahren	111
13.3	Spülbohrverfahren	112
13.3.1	Drehendes direktes Spülbohren	112
13.3.2	Drehschlagendes direktes Spülbohren (Imlochhammerbohren)	113
13.4	Kombinationsbohrverfahren	115
13.4.1	Hohlbohrschneckenbohrverfahren	116
13.4.2	Überlagerungsbohrverfahren	117
13.5	Schwierige Geologie/ bohrtechnische Herausforderungen	119
13.6	Zusammenfassung	121
	Quellenangaben	121
	Podiumsdiskussion Perspektiven und Risiken der Flachen Geothermie	123
	Autorenverzeichnis	125
	Verzeichnis der Mitteilungshefte des Instituts	129

1 Combination of Shallow Geothermal Energy Systems and Soil Remediation – Practical Experiences in the Netherlands

Kombination von Flacher Geothermie und Bodensanierung - Praxiserfahrungen in den Niederlanden

Charles G.J.M. Pijls, Jan Boode
 Tauw, Deventer, Niederlande
charles.pijls@tauw.nl, jan.boode@tauw.nl

1.1 Background

1.1.1 Use of geothermal energy in the Netherlands

In the Netherlands in 2010 3,8 % of the energy is produced with renewable energy sources. Geothermal energy has been applied successfully as a renewable energy source in the Netherlands since 1990. Geothermal energy represents about 1,5 % of the available renewable energy in the Netherlands in 2009.

The different systems applied in the Netherlands are presented in table 1.

Table 1: Overview of geothermal systems in The Netherlands in 2009 [1]

System	Type	Subtype	Systems in NL in 2009
Shallow systems	Open	Recirculation	980
		Doublet	
	Closed	-	More than 20.000
Deep geothermal	-	-	1

Currently more than 20.000 geothermal systems are operational in the Netherlands. Most of these systems are small scale private owned closed systems with glycol as a heat transfer agent. Although only 1 deep geothermal application is realised in the Netherlands, the project contributes 10 % of all geothermal energy in the Netherlands. Most of the open systems are doublets, systems in shallow aquifers with a separate heat and cold storage area in the aquifer. In most of the projects doublets are applied. 180 million m³ water is pumped in and from aquifers to enable geothermal energy as an energy resource.

In this article we will focus on open systems (figure 1). These are systems that operate in shallow aquifers with a depth of more than 5 meter up to about 150 meter and an aquifer thickness of more than 5 meters. Extraction rates are generally from 5 m³/hr up to several 500 – 800 m³/hr. The heating efficiency is 30-50 % and the cooling efficiency is 50-80 %. Two open systems can be distinguished:

(1) Doublet system. Heat is stored in a warm well in warm seasons when buildings are cooled with groundwater from a cold well. In cold seasons water flow is switched and heat is extracted from the warm well with a heat pump. Extracted water is infiltrated in the cold well.

(2) Recirculating systems. Heat (with heat pumps) and cold are extracted from a continuously recirculating system.

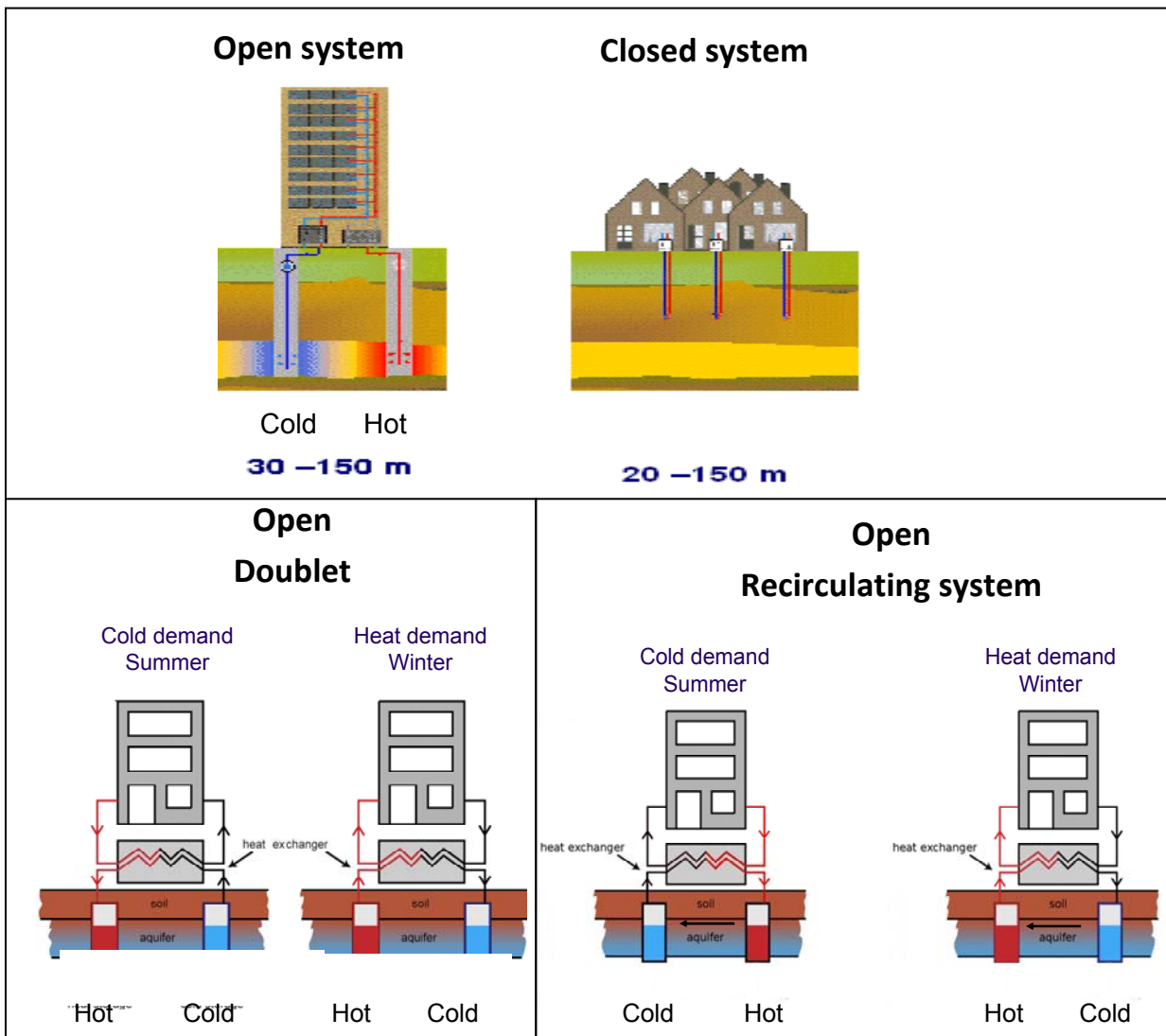


Figure 1 Open and closed geothermal systems and open doublet and recirculating systems (source www.nvoe.nl)

Besides for geothermal energy the subsurface in the Netherlands is extensively used for drinking water supply and subsurface infrastructure. The explosive growth of shallow geothermal systems is causing subsurface logistical issues:

Interference of geothermal systems with each other in aquifers influences performance and reduces efficiency

Geothermal systems interfere with contaminants in the aquifer

1.1.2 Changing Soil Policy in the Netherlands

Since the recognition of soil contamination as an unwanted situation soil contamination policy changes and develops in the Netherlands in a continuous process. The Netherlands were one of the first countries that faced the challenge of dealing with soil contamination. Pro-active and far reaching soil policy was developed already in the early eighties. The extent of soil contamination and practical and technical limitations of treatment strategies have taken soil policy from the desire of a complete removal of soil contamination within one generation to a risk based and cost effectiveness driven treatment policy. Most cities have to deal with extensive plumes of mobile contaminants such as chlorinated solvents and its degradation products and aromatic solvents in their aquifers. There is a need to treat these, often interfering, groundwater plumes while taking other subsurface soil functions into account.

The combination of groundwater plume treatment and shallow open geothermal systems is considered a win-win situation. This article presents the effects of combining soil remediation and geothermal systems.

1.2 Hydrological and Geochemical Effects of Shallow Geothermal systems

1.2.1 Hydrological effects

The hydrological effects of open geothermal systems differ depending on the type of system: doublets or recirculating systems. A Modflow model was constructed to demonstrate the effects of geothermal systems on a groundwater plume in both geothermal systems. An aquifer model was built with two wells. The standard RT3D package is not able to recharge aquifers with contaminants with concentrations that depend on the concentration in the extraction well. RT3D was modified to enable infiltration of contamination extracted from an extraction well.

Figure 2 presents the results of an alternating doublet. Groundwater is pumped with a flow rate of 5 m³/hr, in alternating directions during 0,5 year. Natural groundwater flowrate is 25 m/year. Figure 3 presents the results of a system that continuously recirculates in one direction.

Figure 2 presents the doublet configuration with a well distance of 75 meter. A groundwater contamination plume with a level of 10.000 µg/l contamination is defined. Retardation or biodegradation is not taken into account. Figure 2.2 presents the reference situation with a plume migration after 6 years without a geothermal system. The plume is small with a high level of contamination in the groundwater. Figure 2.3 and 2.4 present the plume distribution in an active doublet after 2 and 6 years. Although the total contaminant mass in figure 2.2 and 2.4 is equal, the extent and volume of the contamination has increased considerably due to the geothermal wells. Mixing strongly decreases the contaminant concentration by at least a factor 20. Furthermore the width of the off site plume has increased

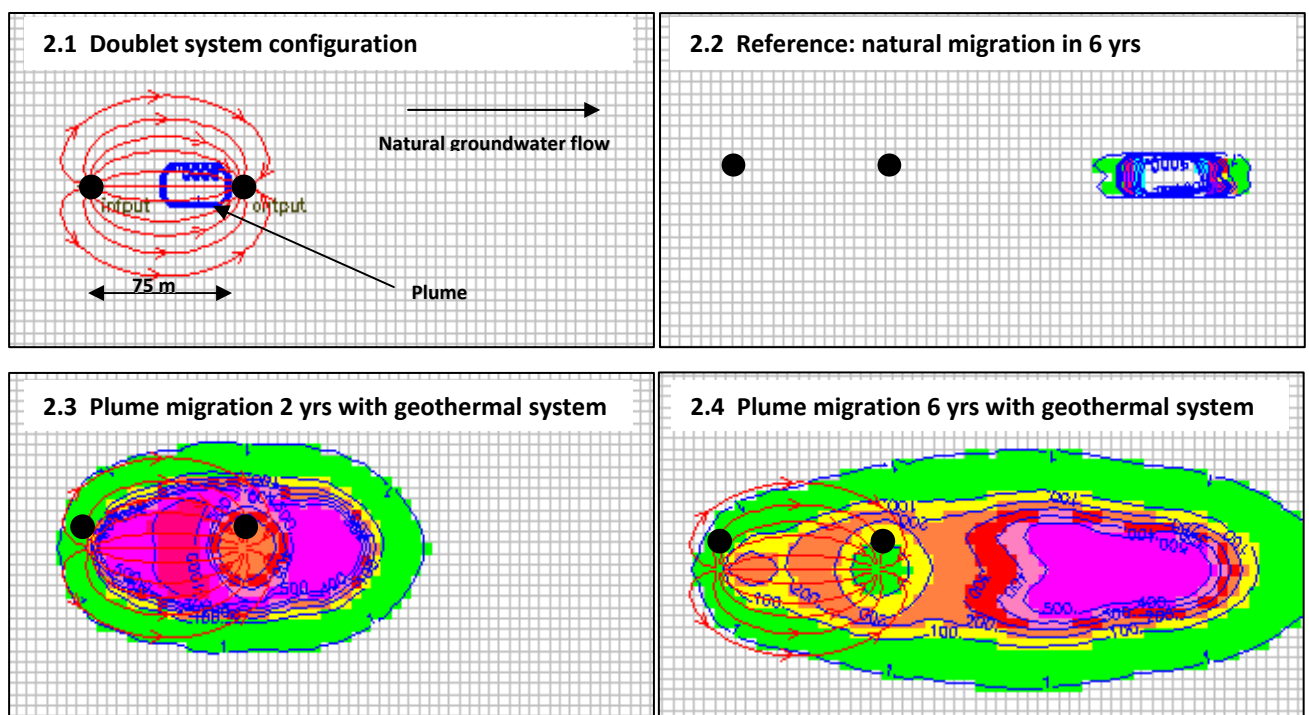


Figure 2 DOUBLET: Plume migration (black dots represent geothermal wells, red lines present groundwater flow paths with 1 year travel time between markers)

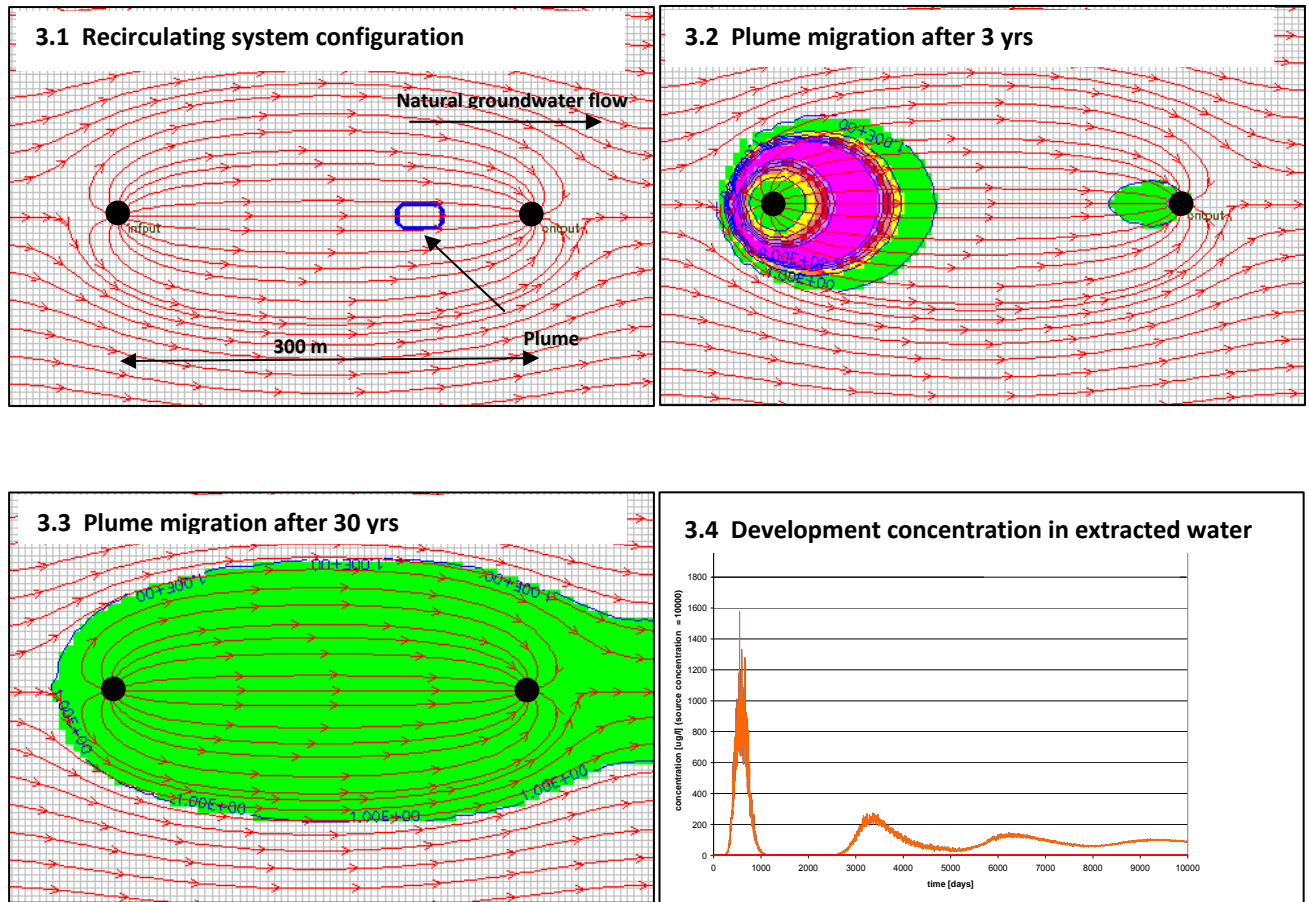


Figure 3 RECIRCULATING SYSTEM: Plume migration and development of concentration in extracted groundwater (black dots represent geothermal wells, lines present groundwater flow paths with 1 year travel time between markers)

Figure 3.1 presents the configuration of a recirculation system with a 300 meter well distance. A recirculating system reduces contaminant mass leaving the hydrological system. Figure 3.2 presents the migration of the plume after 3 years. The extraction captures the plume completely and reinjects the contaminated groundwater up-gradient in the aquifer. Concentrations in the infiltration well are decreasing again as the plume is being pushed from the infiltration well into the aquifer. After 30 years the plume has redistributed due to dispersion over a large area. Mixing the recirculating water in a large volume reduces groundwater concentration more than 100 times. Part of the plume has migrated off site. Due to the loss of contaminant mass from the system the contaminant concentration will further decrease in time.

1.2.2 Geochemical and biological effects

The groundwater mixing and introduction of heat and cold can have effects on geochemical and biological processes in the subsurface. With the current systems temperatures will be increased up to a level of 15-20°C.

Temperatures increase will not lead to significant changes in geochemical processes in the temperature range (5°-18°C) of most shallow geothermal systems [2]. Increased mobilisation or enhanced precipitation processes are expected at temperatures above 30-35°C. Currently research [3] is undertaken into possible changes of microbial population. Microbial degradation will not be increased because temperature effects are too small. It is expected that the reduction of contaminant concentration will decrease the concentration dependant first order degradation rate.

Extraction of groundwater by geothermal systems will lead to enhanced mixing of groundwater in aquifers. Differences in the geochemical composition in an aquifer will be averaged. In the Netherlands several aquifers are situated below organic rich layers, a situation which allows natural degradation of chlorinated solvents to proceed to in the top of the aquifer. When a geothermal system mixes groundwater in the aquifer, bacteria that are able to degrade chlorinated solvents may be introduced in the deep aquifer, increasing the potential for natural degradation. However the change in geochemistry will deteriorate environmental conditions for a sustainable degradation.

1.2.3 Resume

Shallow geothermal systems mainly function as a mixing system. Model calculations have demonstrated that geothermal systems reduce groundwater contaminations in concentration by orders of magnitude and redistribute contaminants over a large groundwater volume. Hydraulic containment may still be necessary because contamination can leave the geothermal system. The effect of stimulated biodegradation by elevated temperatures in the soil is negligible.

Hydraulic containment is achieved easily by extracting a part of the groundwater flow that is pumped in the geothermal system.

1.3 Practical experiences

1.3.1 General

In the Netherlands several shallow geothermal projects have been realised in contaminated aquifers. Actual data on the effect of the geothermal systems is limited as the systems are in operation only for a short time. A research program has been established to investigate the overall effects of the geothermal systems [3].

1.3.2 Utrecht

In the city centre of Utrecht the aquifer is contaminated with chlorinated hydrocarbons by historical industrial activities. Redevelopment of the area and soil contamination interfere with each other. A plan was developed to combine soil remediation with use of shallow geothermal energy (doublets). Groundwater quality will be monitored and if required additional measures, such as injection of substrates will be evaluated.

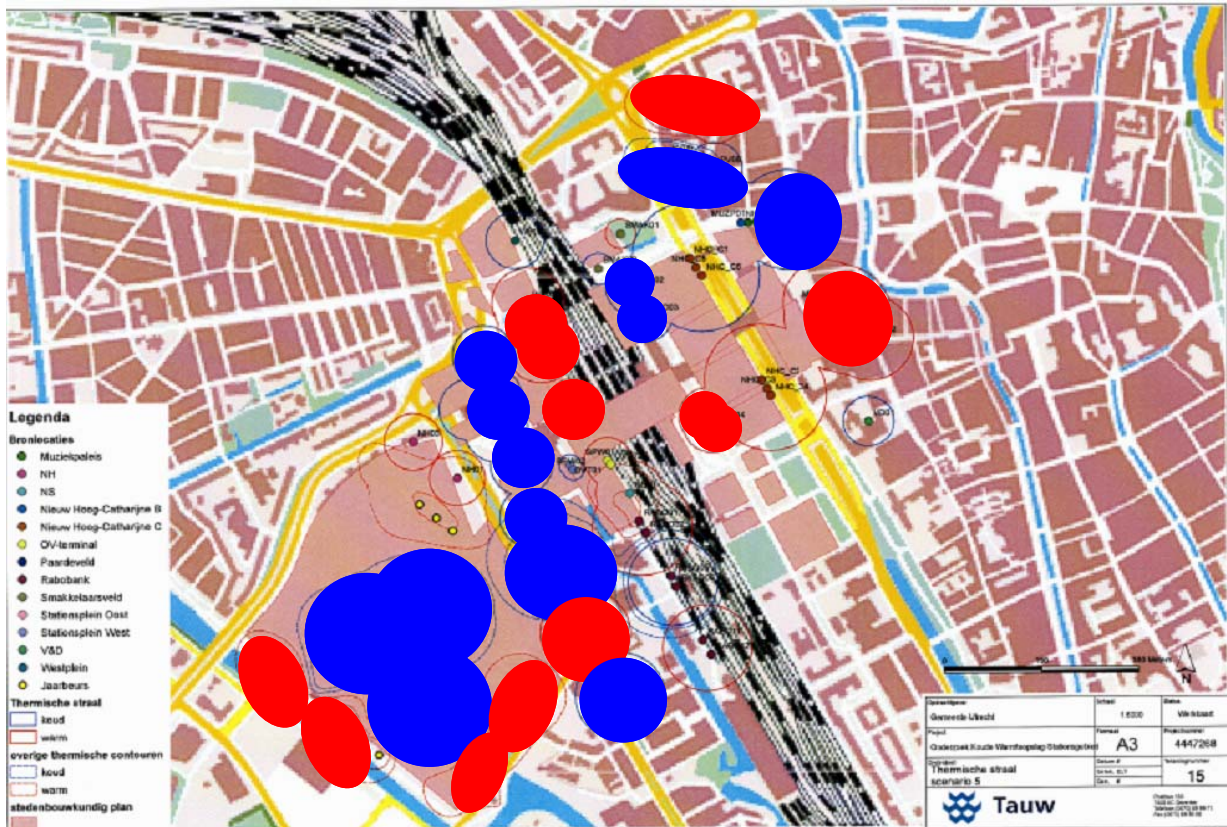


Figure 4 Geothermal Systems in Utrecht Centre

1.3.3 Eindhoven

The industrial estate of Strijp in Eindhoven is redeveloped into a light industrial, commercial and rural area. A recirculating geothermal system containing the groundwater contamination with a capacity of about 600 m³/hr is installed in 2008 (www.sanergy.nl) and a second system will be installed in the near future. Objective of the systems is to contain the groundwater contamination and to enable use of geothermal energy. The effects of the system are currently under study.

1.3.4 Zwolle

A deep groundwater contamination with vinyl chloride (VC) in the municipality of Zwolle moves into the catchment area of the drinking water facility Engelse Werk south of the city. The contaminant plume with vinyl chloride (VC) is a major threat to drinking water, given the mobility, depth and size of the contamination. The VC contaminants are detected at a depth of approximately 90 m below ground level and have migrated southwards into the drinking water catchment area.

The four northernmost extraction wells are used as interception wells for the contamination plume. In the current situation, about 10 million m³/year are extracted. The interception wells extract an additional 1.5 million m³/year. The remediation measure con-

sists of a groundwater extraction with one deep well and sustainable processing of the extracted groundwater. The four interception wells continue to extract groundwater and will eventually remediate the residual plume.

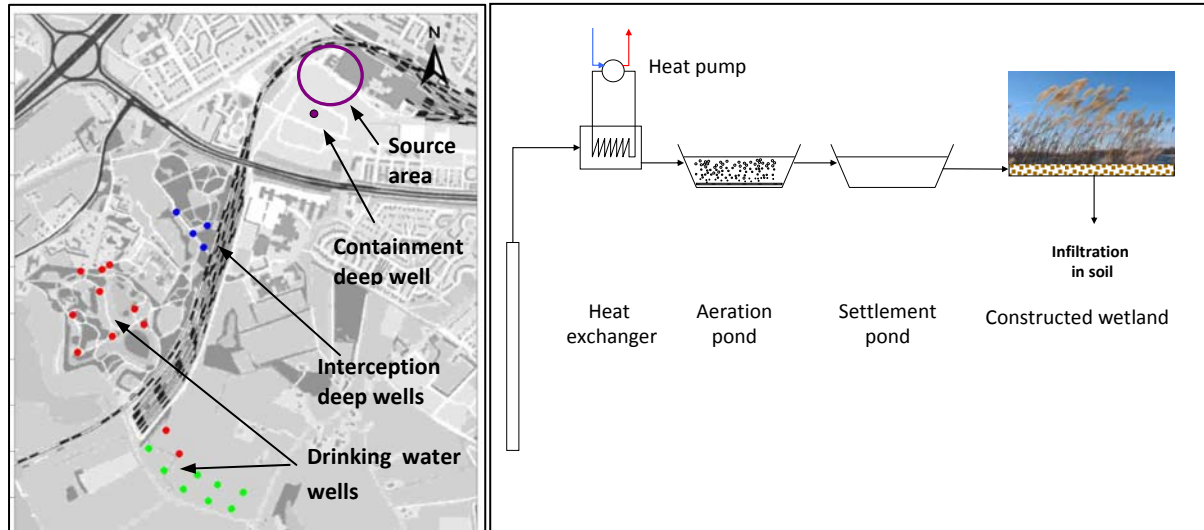


Figure 5 Groundwater situation in Zwolle and schematic of the groundwater treatment

An important objective of the remediation strategy is to use sustainable approaches to perform the remediation. Remediation is considered sustainable if extracted water is treated and used effectively. A building for temporary accommodation of drug addicts is constructed near the groundwater extraction. It was decided to use the energy in extracted groundwater for heating and cooling of the building, minimising the energy use in the building.

The system is installed in 2010 and is in operation for 1 year.

Sources (Dutch)

- [1] 2010, CBS, “Hernieuwbare energie in Nederland 2009”
- [2] 2004, IF Technology, “Temperature effects on groundwater quality. Summary of existing knowledge”. Report commissioned by NOVEM. Arnhem
- [3] Research Program “Meer met Bodemenergie”; www.meermetbodemenergie.nl

2 Geothermie und Grundwasser-Mikrobiologie

Kathrin Schmidt, Andreas Tiehm

DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe

kathrin.schmidt@tzw.de, andreas.tiehm@tzw.de

2.1 Bedeutung des Grundwassers für Mensch und Umwelt

Grundwasser stellt das größte Gewässer-Ökosystem dar. Als Bestandteil des Wasserkreislaufs interagiert es mit den Oberflächengewässern sowie dem Erdreich. Dadurch hat Grundwasser eine wichtige Bedeutung sowohl für die damit verbundenen Ökosysteme als auch für die Land- und Forstwirtschaft. Grundwasser-Ökosysteme bieten einer Vielzahl von Bakterien (Mikrobiologie, Flora) und Tieren (Metazoen, Fauna) Lebensraum. Viele Arten der Grundwasser-Tiere sind endemisch, d.h. sie kommen nur im Grundwasser vor (LUBW, 2006; Steube et al., 2009; Stein et al., 2010).

Im Grundwasser sind große Mengen an Wasser gespeichert. Das von der Oberfläche infiltrierende Wasser wird durch die Grundwasser-Organismen von z.B. Kontaminanten und Nährstoffen gereinigt (DVWK, 1988; Stieber et al., 2005; Brielmann et al., 2011; Stein et al., 2010). Dies ist von großer Bedeutung für den Menschen, da Grundwasser das größte Süßwasser-Reservoir darstellt (Stein et al., 2010). Rund zwei Drittel des Trinkwassers werden in Deutschland sowie europaweit aus Grundwasser gewonnen (Steube et al., 2009; BMU, 2011).

Diese Nutzung naturgegebener Prozesse durch den Menschen wird auch als „Ökosystemdienstleistung“ bezeichnet, um den ökonomischen Wert unserer natürlichen Umwelt deutlich zu machen. Wie bereits beschrieben gehören Wasser-Reinigung und -Speicherung zu den Ökosystemdienstleistungen von Grundwasserleitern (Tiehm et al., 2010).

2.2 Temperaturabhängigkeit von Mikroorganismen

Mikrobiologische Aktivität ist in hohem Maß von der Umgebungstemperatur abhängig (DVWK, 1988; Brielmann et al., 2009). Generell beschleunigt sich mikrobielle Aktivität bei Temperaturerhöhung (Abbildung 1, links; Koolman und Röhm, 1998). Dies gilt jedoch nur innerhalb des Toleranzbereiches der jeweiligen Art (Abbildung 1, rechts). Organismen können in der Regel einen relativ weiten Temperaturbereich (von Minimum bis Maximum) tolerieren, während sie ihr optimales Wachstum nur in einem vergleichsweise engen Temperaturbereich (Optimum) zeigen (Abbildung 1, rechts). Verschiedene Bakterien haben dabei unterschiedliche Ansprüche an die Umgebungstemperatur: Die Spanne reicht von psychrophilen Arten, die bei Temperaturen von knapp unter 0°C bis ca. 28°C

existieren, bis hin zu den hyperthermophilen Organismen, die bei Temperaturen zwischen ca. 85°C und ca. 110°C anzutreffen sind (Fuchs und Schlegel, 2007).

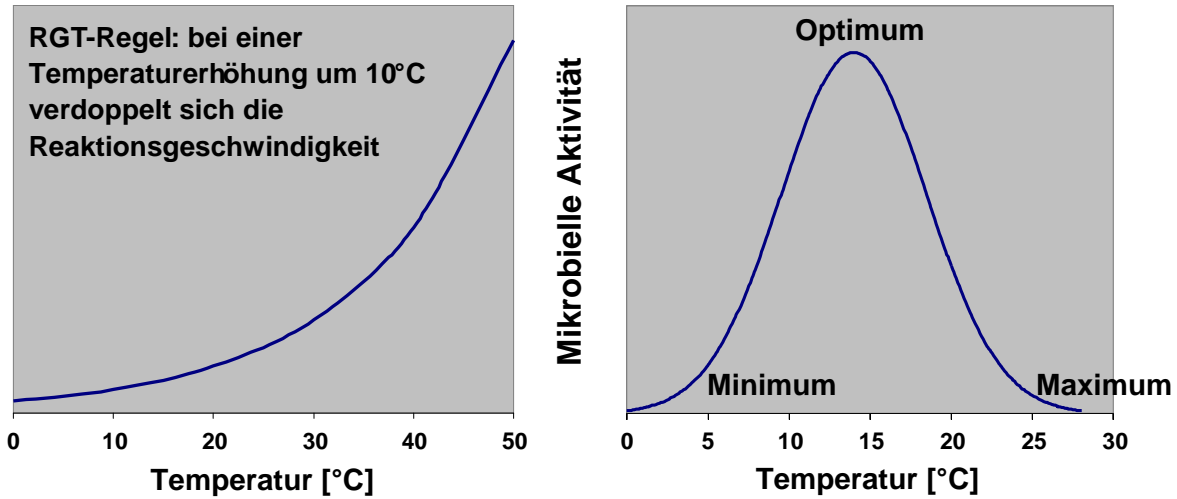


Abbildung 1 Exemplarische Darstellungen zur Temperaturabhängigkeit von Mikroorganismen. Links: Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit mit steigender Temperatur; Rechts: Toleranzbereich mit Minimum, Optimum und Maximum.

2.3 Geothermie: Auswirkungen auf Grundwasser-Mikrobiologie

Jede Geothermie-Anwendung (Gebäude-Heizung/ -Kühlung, Kälte-/ Wärmespeicherung, geschlossene/ offene Systeme) stellt einen Eingriff in den Untergrund und somit in den Lebensraum der Grundwasser-Mikroorganismen dar (Abbildung 2).

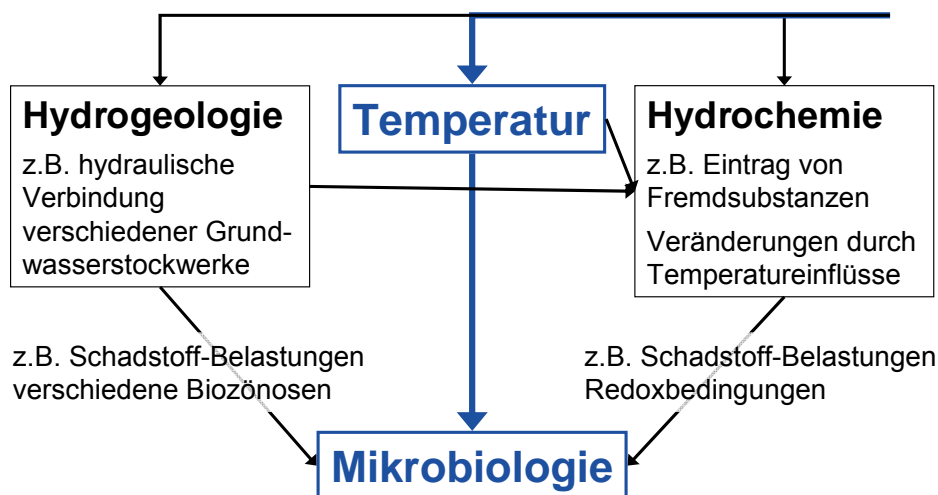


Abbildung 2 Beeinflussung der Grundwasser-Mikrobiologie durch Geothermie-Anwendungen.

Durch Bohrtätigkeiten kann es zu Änderungen der hydraulischen Verhältnisse kommen (Butscher et al., 2011), was wiederum Auswirkungen auf Hydrochemie (Raisig, 2011) und Mikrobiologie haben kann. Temperaturveränderungen können Mikroorganismen sowohl direkt (Brielmann et al., 2009 und 2011) als auch indirekt über Veränderungen der Hydrochemie beeinflussen. Des Weiteren kann es bei Bau und Betrieb einer Geothermie-Anlage zum Eintrag von Hygiene-relevanten Keimen (Bonte et al., 2011; Butscher et al., 2011) oder von Fremdstoffen (z.B. Spülzusätze bei der Bohrung, Bohrlochhinterfüllung, Wärmeträgerfluide) und somit zu Schadstoffbelastungen im Untergrund kommen (Klotzbücher et al., 2007; Butscher et al., 2011; DVGW, 2010; Hähnlein et al., 2011).

2.3.1 Temperatur

Anthropogen unbeeinflusste Aquifere sind durch relativ stabile Umweltbedingungen gekennzeichnet (Stein et al., 2010). Die Grundwassertemperaturen liegen in der Regel zwischen 9°C und 14°C (LfU, 2001; Abbildung 3) mit geringen jahreszeitlichen Schwankungen von ± 1°C (DVWK, 1988). Bei Geothermie-Anwendungen kann es sowohl zu einer Abkühlung (Nutzung zur Gebäude-Heizung) als auch zu einer Erwärmung (Nutzung zur Gebäude-Kühlung) des Grundwassers kommen.

Nach VDI-Richtlinie 4640 ist in Deutschland eine Temperaturveränderung des Grundwassers um ± 6°C akzeptabel, wobei die Grundwasser-Temperaturen innerhalb von 5°C und 20°C bleiben müssen (Hähnlein et al., 2011; Abbildung 3). In anderen europäischen Ländern sind Temperaturveränderungen bis zu ± 11°C innerhalb der Grenzen zwischen 0°C und 30°C erlaubt (Hähnlein et al., 2011). Es werden jedoch auch Temperaturveränderungen bis zu <0°C sowie bis zu >60°C für möglich gehalten (Schippers und Reichling, 2006).

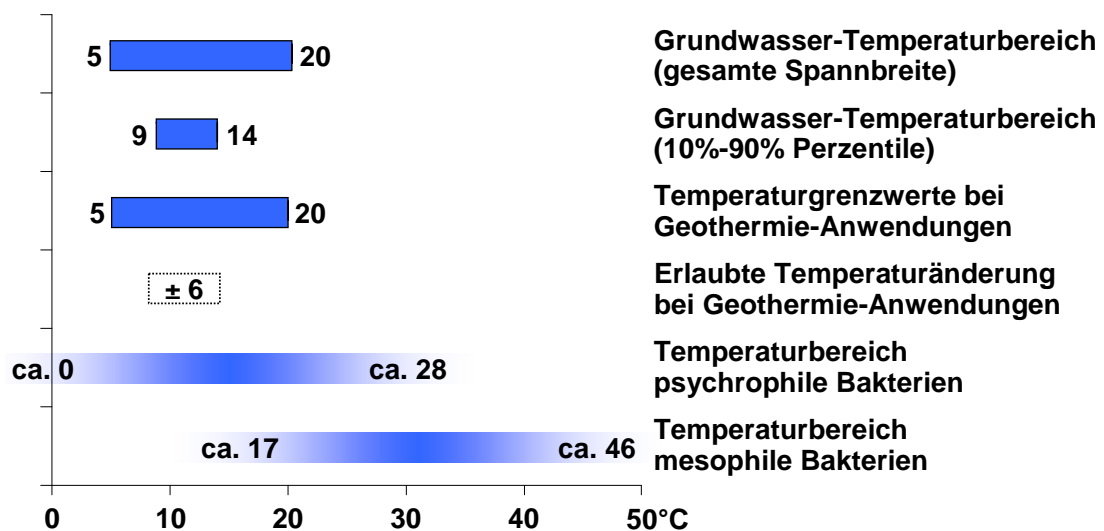


Abbildung 3 Gegenüberstellung der natürlichen Grundwasser-Temperaturbereiche, der Temperaturgrenzwerte bei Geothermie-Anwendungen sowie der Temperaturbereiche von psychrophilen und mesophilen Bakterien. Werte aus LfU, 2001; Hähnlein et al., 2011; Fuchs und Schlegel, 2007.

Bei natürlichen Grundwassertemperaturen gedeihen bevorzugt psychrophile Bakterien. Lediglich im höheren Temperaturbereich spielen auch mesophile Arten eine Rolle (Abbildung 3). Veränderungen der Grundwassertemperatur können zu Veränderungen der mikrobiologischen Gemeinschaften führen, da unterschiedliche Arten bei verschiedenen Temperaturen unterschiedlich gut wachsen (Abbildung 4).

In einer Feldstudie an einem aeroben, nährstoffarmen Aquifer führte eine Temperaturerhöhung von $11 \pm 1^\circ\text{C}$ auf maximal 18°C zu einer erhöhten mikrobiologischen Biodiversität, d.h. einer Erhöhung der Artenvielfalt. Dies ist eine bekannte Reaktion bakterieller Gemeinschaften auf moderate Störungen. In der gleichen Studie konnte keine statistisch signifikante Veränderung der bakteriellen Aktivität, der Gesamtzellzahl, der Koloniezahl, sowie der Anzahl an coliformen Keimen und *Escherichia coli* beobachtet werden (Brielmann et al., 2009 und 2011).

Laborversuche mit Sedimentproben zeigten ebenfalls keine bzw. kaum Reaktionen der Gesamt- sowie der Lebendzellzahl bei Temperaturen zwischen 8°C und 30°C (Schippers und Reichling, 2006) bzw. der Gesamtzellzahl bei Temperaturen zwischen 4°C und 45°C (Brielmann et al., 2011).

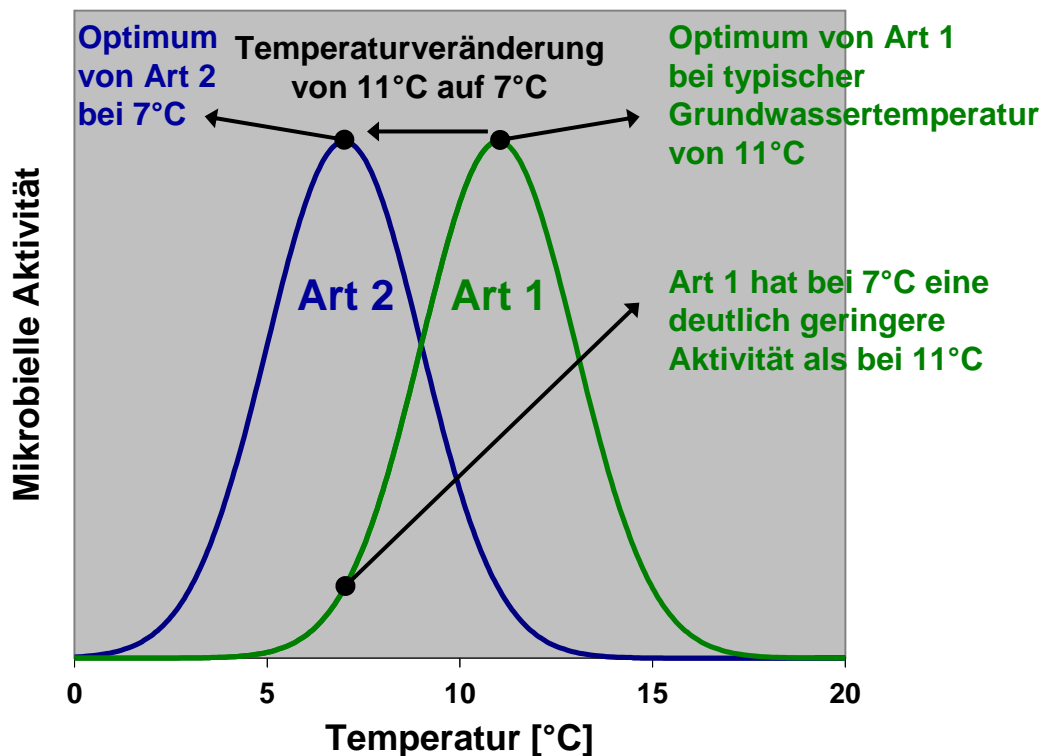


Abbildung 4 Auswirkung einer Temperaturveränderung auf mikrobielle Aktivitäten zweier Arten mit unterschiedlichen Temperaturoptima.

2.3.2 Hydrogeologie

Durch das Durchteufen von trennenden Horizonten kann es zur hydraulischen Verbindung zwischen verschiedenen Grundwasserstockwerken kommen (DVGW, 2010; Saner et al., 2010; Butscher et al., 2011; Raisig, 2011; SGD, 2011). Dies kann z.B. zum Austreten von artesisch gespanntem Grundwasser, zum Versiegen von Quellen und zu Änderungen der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers durch Mischung verschiedener vorher getrennter Grundwässer führen (Butscher et al., 2011; Raisig, 2011; SGD, 2011). Durch Änderungen der Hydrochemie können sich die Lebensbedingungen der Grundwasser-Mikroorganismen ändern. Des Weiteren ist eine Vermischung verschiedener Biozönosen, d.h. verschiedener Lebensgemeinschaften, denkbar.

2.3.3 Hydrochemie

Lösungsgleichgewichte von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen in Wasser können von der Temperatur abhängig sein (Brielmann et al., 2011). Eine Veränderung der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers durch die bei Geothermie-Anwendungen auftretenden Temperaturveränderungen (DVGW, 2010) und/ oder die Mischung unterschiedlich mineralisierter Wässer (Bonte et al., 2011; Raisig, 2011; SGD, 2011) ist daher möglich. Dadurch hervorgerufene Veränderungen der Redoxbedingungen sowie der Lebensbedingungen für Grundwasser-Mikroorganismen sind denkbar (SGD, 2011). Laborversuche mit Grundwasser- und Bodenproben zeigten zunehmende Konzentrationen von Kalium und Silizium mit steigender Temperatur zwischen 2°C und 50°C (Arning et al., 2006) sowie abnehmende Sauerstoff-Konzentrationen mit steigender Temperatur zwischen 4°C und 45°C (Brielmann et al., 2011). Im Temperaturbereich zwischen 11°C und 18°C konnten in Felduntersuchungen keine Veränderungen der Konzentrationen von gelöstem organischem Kohlenstoff, Sauerstoff, Phosphat, Chlorid, Nitrat, Sulfat, Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium beobachtet werden (Brielmann et al., 2009).

In Laborversuchen mit Torf und Sand wurde bei Temperaturen zwischen 45°C und 95°C eine Mobilisierung von organischen Substanzen beobachtet (Brons et al., 1991). Diese Organik kann den Grundwasser-Bakterien als Nahrung dienen, so dass es zu einer starken Vermehrung von Bakterien und dadurch zu einer erhöhten Sauerstoff-Zehrung bis hin zur Einstellung anaerober Milieubedingungen kommen kann (DVWK, 1988; Bonte et al., 2011; Brielmann et al., 2011). Bei erhöhtem Nährstoff-Angebot in Kombination mit erhöhter Temperatur kann eine Vermehrung von pathogenen Mikroorganismen nicht ausgeschlossen werden (Brielmann et al., 2011).

2.3.4 Schadstoffbelastungen

Kontaminationen des Grundwassers können z.B. durch das Anbohren bislang unbekannter Deponien oder Altlasten geschehen (SGD, 2011). Durch die Schaffung von Wegsamkeiten von der Oberfläche bis ins Grundwasser wird die Schutzfunktion der Deckschichten (Stieber et al., 2005) beeinträchtigt, so dass Schadstoffe leichter von der Oberfläche ins Grundwasser gelangen können (Butscher et al., 2011; SGD, 2011).

Bei Bau und Betrieb von Geothermie-Anlagen kann es zum Eintrag von Fremdstoffen in den Untergrund kommen (Klotzbücher et al., 2007; DVGW, 2010; Butscher et al., 2011; Hähnlein et al., 2011). In den bei Bohrlochinterfüllungen verwendeten Zementen können toxische Substanzen enthalten sein, die ein grundwassergefährdendes Potential haben (Butscher et al., 2011). Spülzusätze wie z.B. Carboxymethylcellulose können zu einer organischen Belastung des Grundwassers führen, was wiederum ein erhöhtes Bakterien-Wachstum mit erhöhter Sauerstoff-Zehrung zur Folge haben kann (Hölting, 1996; DVGW, 1998).

Die in den Erdwärmesonden zirkulierenden Wärmeträgerfluide können im Falle einer Leckage ebenfalls zu organischen Belastungen des Grundwassers führen. Der Hauptbestandteil der meisten Fluide ist Ethylen- oder Propylenglykol, welche als biologisch abbaubar gelten und eine geringe Toxizität aufweisen. Außerdem enthalten die Fluide weitere Additive wie z.B. Korrosions-Inhibitoren, Biozide, Benetzungsmittel, Farb- und Duftstoffe (Klotzbücher et al., 2007; Ilieva et al., 2010 und 2011). Die derzeit gängigen Wärmeträgerfluide sind in die Wassergefährdungskategorie 1 eingestuft (HLUG, 2007). Da die genaue Zusammensetzung der Wärmeträgerfluide als Betriebsgeheimnis behandelt wird, können derzeit wenig Aussagen über ihr Umweltverhalten (z.B. biologische Abbaubarkeit, Toxizität) getroffen werden. Vergleichende ökotoxikologische Untersuchungen mit dem Leuchtbakterienhemmtest zeigten erhöhte Toxizitäten der Wärmeträgerfluide gegenüber ihren Hauptbestandteilen Ethylen- oder Propylenglykol (Abbildung 5).

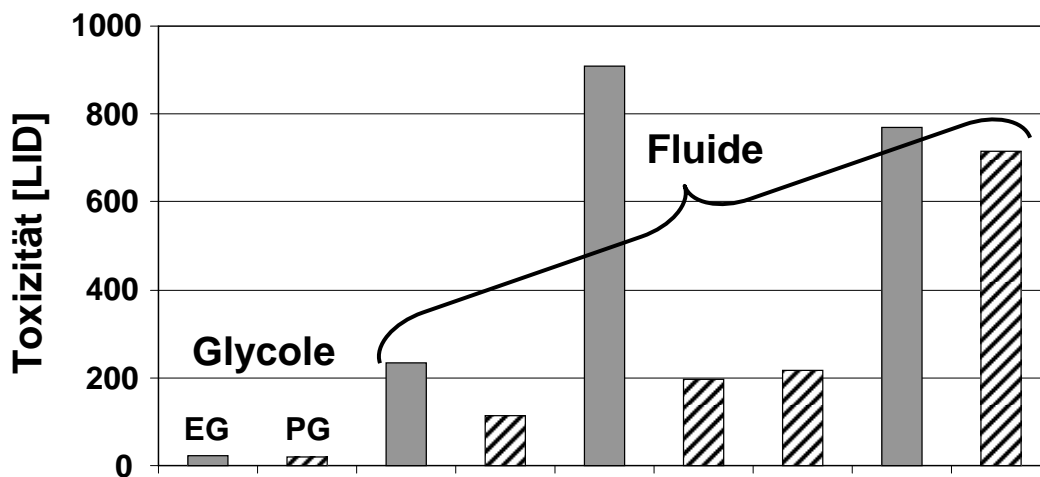


Abbildung 5 Ökotoxizität (Leuchtbakterienhemmtest) von Wärmeträgerfluiden und ihrer Hauptbestandteile Ethylen- oder Propylenglykol (EG/ PG). (LID = Lowest Ineffective Dilution). Graue Balken: Fluide auf EG-Basis, schraffierte Balken: Fluide auf PG-Basis.

2.4 Geothermie und Altlasten

Bei bereits bestehenden Altlasten können Veränderungen der Fließverhältnisse im Grundwasser, wie sie bei Geothermie-Anwendungen auftreten können, zu einer Mobilisierung der Altlasten-Schadstoffe führen (Butscher et al., 2011).

Auf der anderen Seite gibt es bereits Ansätze zur Nutzung von Synergien durch die Kombination von Geothermie-Anwendung mit Altlastensanierung (Drijver et al., 2010; Pijls, 2011 im vorliegenden Tagungsband). Es ist denkbar, dass biologische Abbauprozesse durch Durchmischungs- und Mobilisierungseffekte sowie eine Temperaturerhöhung im Untergrund stimuliert werden können (Brielmann et al., 2011; Abbildung 6). Dabei müssen jedoch die Temperatur-Maxima der jeweiligen Abbauer beachtet werden (Abbildung 6). Bei Geothermie-Anwendungen mit Einrichtungen zur Grundwasser-Förderung und -Reinjektion können diese zur Einbringung Abbau-stimulierender Substanzen genutzt werden.

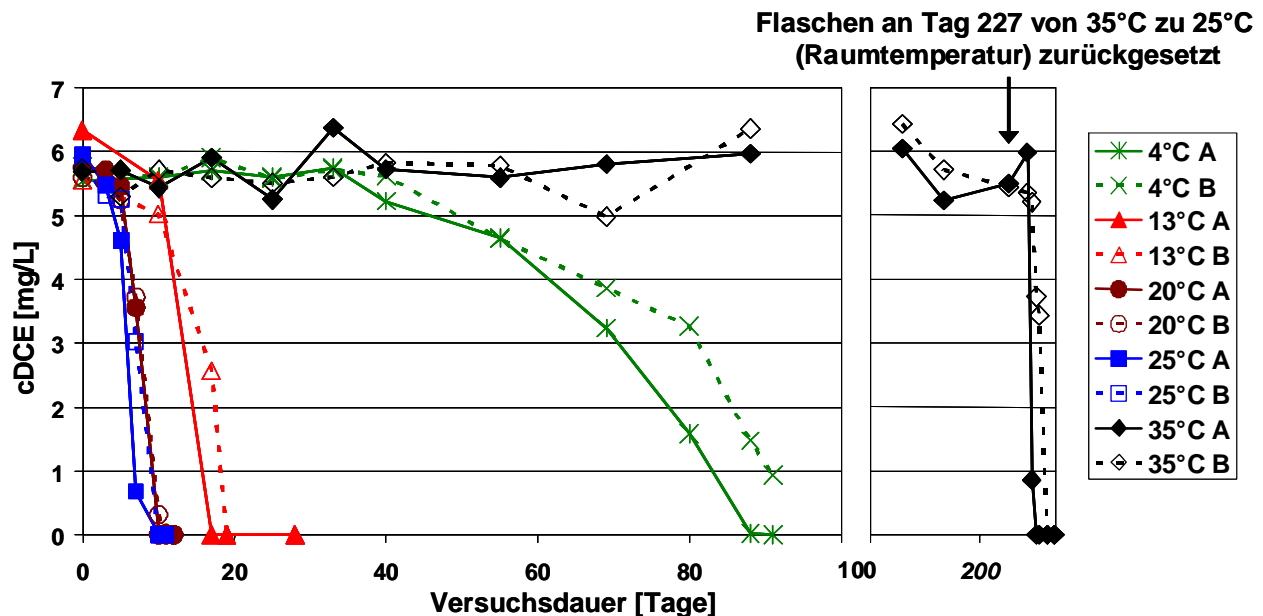


Abbildung 6 Aerobier Abbau von cis-1,2-Dichlorethen (cDCE) mit Grundwasser-Mikroorganismen bei verschiedenen Inkubationstemperaturen. Abbildung aus Schmidt, 2009.

2.5 Zusammenfassung

Trotz der inzwischen sehr weit verbreiteten Anwendung von Geothermie-Anlagen ist nach wie vor wenig über deren Auswirkungen auf die unterirdische Umwelt bekannt. Veränderungen der Milieubedingungen im Lebensraum Grundwasser durch Geothermie-Anwendungen können Auswirkungen auf die dortigen Lebensgemeinschaften und damit auch auf die für den Menschen wichtige ökologische Funktionalität des Grundwassers

haben. Eine Verschlechterung der ökologischen Funktionalität kann negative Folgen für das Grundwasser als Trinkwasserressource haben, da nur ein gesundes Grundwasser-Ökosystem zur Bereitstellung von gutem Trinkwasser in der Lage ist. Andererseits können durch eine moderate Temperaturerhöhung des Grundwassers nutzbringende mikrobiologische Abbauprozesse stimuliert werden. Bei der weiteren Entwicklung der geothermischen Energiegewinnung sollten Auswirkungen auf Grundwasser-Ökosysteme umfassender einbezogen werden.

Danksagung

Die Autoren danken dem DVGW e.V. sowie dem badenova Innovationsfonds für die finanzielle Förderung im Rahmen des Projektes „Wärmeträgerfluide in der Geothermie: Exemplarische Gefährdungsabschätzung anhand von Strukturaufklärung, Abbaubarkeit und Toxizität“.

Literatur

- Arning E., Kölling M., Panteleit B., Reichling J., Schulz H. D. (2006) Einfluss oberflächennaher Wärmegegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter. Grundwasser 1: 27-39.
- BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2011) Kurzinformativ. download von <http://www.bmu.de/binnengewaesser/trinkwasser/doc/3128.php> am 15.08.2011.
- Bonte M., Stuyfzand P. J., van den Berg G. A., Hijnen W. A. M. (2011) Effects of aquifer thermal energy storage on groundwater quality and the consequences for drinking water production: a case study from the Netherlands. Water Sci. Technol. 63(9): 1922-1931.
- Brielmann H., Griebler C., Schmidt S. I., Michel R., Lueders T. (2009) Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. FEMS Microbiol. Ecol. 68: 273-286.
- Brielmann H., Lueders T., Schreglmann K., Ferraro F., Avramov M., Hammerl V., Blum P., Bayer P., Griebler C. (2011) Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. Grundwasser 16: 77-91.
- Brons H. J., Griffioen J., Appelo C. A. J., Zehnder A. J. B. (1991) (Bio)geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. Wat. Res. 25(6): 729-736.

- Butscher C., Huggenberger P., Auckenthaler A., Bänninger D. (2011) Risikoorientierte Bewilligung von Erdwärmesonden. *Grundwasser* 16: 13-24.
- Drijver B. C., Henssen M. J. C., Dinkla I. J. T., Gehreis H., van Nieuwkerk E., Grotenhuis J. T. C. (2010) National research program on the effects of underground thermal energy storage (UTES). In: *ConSoil 2010, Proceedings*, 22-24 September, Salzburg, Austria: ThS B1.
- DVGW, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e.V. (1998) Merkblatt W116 Verwendung von Spülmittelzusätzen in Bohrspülungen bei Bohrarbeiten im Grundwasser.
- DVGW, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e.V. (2010) Positionspapier zur Erdwärmenutzung in Trinkwassereinzugsgebieten. download von <http://www.dvgw.de/wasser/ressourcenmanagement/gewaesserschutz/erdwaermenutzung/> am 17.08.2011.
- DVWK, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (1988) Bedeutung biologischer Vorgänge für die Beschaffenheit des Grundwassers. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- Fuchs G., Schlegel H. G. (2007) *Allgemeine Mikrobiologie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- Hähnlein S., Blum P., Bayer P. (2011) Oberflächennahe Geothermie – aktuelle rechtliche Situation in Deutschland. *Grundwasser* 16: 69-75.
- HLUG, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2007) Erdwärmenutzung in Hessen. download von http://www.hlug.de/medien/geologie/dokumente/erdwaerme/erdwaerme_web.pdf am 03.06.2009.
- Hölting B. (1996) *Hydrogeologie – Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart: 203-214.
- Ilieva D., Morasch B., Haderlein S. (2010) Risikominimierung beim Einsatz von Additiven in Wärmeträgerflüssigkeiten. Zwischenbericht für die Periode Mai 2009 – Februar 2010. Download von <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de> am 17.08.2011.
- Ilieva D., Morasch B., Haderlein S. (2011) Risikominimierung beim Einsatz von Additiven in Wärmeträgerflüssigkeiten. Zwischenbericht für die Periode Februar 2010 – Januar 2011. Download von <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de> am 17.08.2011.
- Klotzbücher T., Kappler A., Straub K. L., Haderlein S. B. (2007) Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers. *Geothermics*, 36: 348-361.

- Koolman J., Röhm K.-H. (1998) Taschenatlas der Biochemie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- LfU, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2001) Atlas des Grundwasserzustandes in Baden-Württemberg. Veröffentlichungen der Reihe Grundwasserschutz (ISSN 1437-0131), Band 19.
- LUBW, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2006) Grundwasser-Überwachungsprogramm. Reihe Grundwasserschutz (ISSN 1437-0131), Band 33.
- Raisig T. (2011) Genehmigung von Geothermieranlagen. In: Fortbildungsverband Boden und Altlasten Baden-Württemberg, Kursunterlagen, Oberflächennahe Geothermie – Planung, Ausführung, Qualitätssicherung, Seminar 05/2011, 11. Mai, Stuttgart.
- Saner D., Juraske R., Kübert M., Blum P., Hellweg S., Bayer P. (2010) Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 14: 1798-1813.
- Schippers A., Reichling J. (2006) Laboruntersuchungen zum Einfluss von Temperaturveränderungen auf die Mikrobiologie des Untergrundes. *Grundwasser* 1: 40-45.
- Schmidt K. R. (2009) Natural attenuation am Standort Frankenthal: mikrobiologischer sequentiell anaerob-aerober Chlorethen-Abbau mit Kohlenstoff-Isotopenfraktionierung. Dissertation, Technische Universität Dresden / DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe. Veröffentlichungen aus dem Technologiezentrum Wasser (ISSN 1434-5765), Band 43.
- SGD, Staatliche Geologische Dienste (2011) Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern download von http://www.infogeo.de/home/geothermie/dokumente/download_pool/FS2011_Top_6.2_Anlage_PK_Geothermie_Bericht.pdf am 16.08.2011.
- Stein H., Kellermann C., Schmidt S. I., Brielmann H., Steube C., Berkhoff S. E., Fuchs A., Hahn H. J., Thulind B., Griebler C. (2010) The potential use of fauna and bacteria as ecological indicators for the assessment of groundwater quality. *J. Environ. Monit.* 12: 242-254.
- Steube C., Richter S., Griebler C. (2008) First attempts towards an integrative concept for the ecological assessment of groundwater ecosystems. *Hydrogeol. J.* 17: 23-35.
- Stieber M., Kraßnitzer S., dos Santos C., Tiehm A. (2005) Schutzfunktion der ungesättigten Zone: Mikrobieller Abbau von PAK. In: Ressourcen- und Grundwasserschutz, Veröffentlichungen aus dem Technologiezentrum Wasser (ISSN 1434-5765), Band 28: 41-51.

Tiehm A., Müller A., Schmidt K. R. (2010) Ökosystemdienstleistungen im Grundwasser: Biologischer Schadstoffabbau in der Sanierungspraxis. Vortrag. 15. TZW-Kolloquium, 1. Dezember, Karlsruhe. In: Konzepte für eine zukunftsfähige Wasserversorgung, Veröffentlichungen aus dem Technologiezentrum Wasser (ISSN 1434-5765), Band 45: 13-29.

3 Technische und ökonomische Entwicklungen in der Tunnelgeothermie

Christian Moormann, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart

christian.moormann@igs.uni-stuttgart.de

Marcus Schneider, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart und PSP Consulting Engineers GmbH, München

marcus.schneider@igs.uni-stuttgart.de

3.1 Einleitung

Tunnelbauwerke können einen respektablen Beitrag zu regenerativen Energiekonzepten leisten, wie die bislang durchgeführten Projekte und Studien eindrucksvoll belegen. Mit geringem technischem Zusatzaufwand kann die statisch-konstruktive Funktion der Tunnelschalen um eine thermisch-energetische Funktion erweitert werden.

Im folgenden Beitrag wird ein Überblick über die im Tunnelbau verwendeten Verfahrenstechniken und technischen Entwicklungen zur Nutzung der Geothermie gegeben. Neben der so genannten hydrogeothermischen Nutzung von Tunnelbauwerken, die bislang in ihrer Anwendung auf die Schweiz beschränkt ist, sind aus Österreich und Deutschland absorbertechnologische Verfahren bekannt, bei denen in das Tunnelbauwerk integrierte Wärmeaustauscherrohre zum Einsatz kommen, in denen eine Wärmeübertragerflüssigkeit zirkuliert.

Im Zuge der technischen Umsetzung des Projektes „U6 – Stadtbahnanschluss Stuttgart-Fasanenhof“ konnte in einem in Spritzbetonbauweise hergestellten Tunnelabschnitt ein tunnelgeothermischer Pilotbereich in zwei 10 m langen Betonierabschnitten zu Forschungszwecken eingerichtet werden. Der Tunnel wurde darüber hinaus umfangreich mit Messtechnik ausgestattet, die der Ermittlung des Temperaturfeldes in Baugrund, Bauwerk und Tunnelluft dient. Es werden erste Messergebnisse im Hinblick auf die Reichweite der Temperaturentbreitung im Untergrund sowie insbesondere der energetischen Leistungsfähigkeit der Anlage vorgestellt.

Zur Bewertung der energetischen und ökonomischen Aspekte der Tunnelgeothermie werden Erfahrungswerte bestehender tunnelgeothermischer Anlagen zusammengestellt und im Abgleich mit eigenen Erfahrungswerten ganzheitlich bewertet.

3.2 Verfahrenstechniken der Tunnelgeothermie

Es können grundsätzlich zwei tunnelgeothermische Verfahrenstechniken unterschieden werden, die hydrogeothermische und die absorbertechnologische.

3.2.1 Hydrogeothermisches Verfahren

Beim hydrogeothermischen Verfahren wird das aus der Bergwasserdränage an den Tunnelportalen austretende warme Wasser (mit Hilfe von Wärmepumpen) energetisch verwertet. In der Schweiz wird dieses Verfahren bereits seit den siebziger Jahren umgesetzt. Das hydrogeothermische Verfahren arbeitet als offenes System im Gegensatz zum absorbertechnologischen, das ein geschlossenes System darstellt.

In der Schweiz werden gegenwärtig fünf Tunnelbauwerke geothermisch im Zusammenhang mit Wärmepumpen genutzt, bei einem weiteren, dem Großen St. Bernhard-Tunnel, wird die warme Tunnelluft verwertet. Das Wasser aus den Dränagen tritt an den Portalen dieser Bauwerke mit einer Schüttung von 980 l/min (Tunnel Mappo-Morettina) bis 7.200 l/min (Gotthardtunnel) aus [1]. Die Wassertemperaturen betragen dabei 12°C (Rickentunnel) bis 19°C (Hauensteintunnel). Die auf hydrogeothermischem Wege gewonnene Energie stellt im Grunde ein Nebenprodukt der aus tunnelstatischer Sicht erforderlichen Dränage zum Abbau des auf die Tunnelschale wirkenden Wasserdrucks dar. Der Energieertrag ist umso höher, je mehr Wasser mit hoher Temperatur anfällt. Das ideale Einsatzgebiet hydrogeothermischer Nutzungen in der Tunnelgeothermie wird im alpinen Raum mit seinen typischen hydrogeologischen und morphologischen Verhältnissen gesehen, in die mit Basistunnelbauwerken eingegriffen wird.

3.2.2 Absorbertechnologisches Verfahren

Absorbertechnologische Anwendungen eignen sich z.B. in innerstädtischen Bereichen bei seicht liegenden Tunnelbauwerken. Hier werden Wärmeaustauscherrohre (Absorberleitungen) in Bauteile des Bauwerks eingesetzt. Diese werden von einem Absorberfluid durchströmt, das die im Baugrund und ggf. die in der Tunnelluft gespeicherte Energie in Form von Wärme aufnimmt und der Wärmepumpe zuführt, um diese auf ein höheres Energieniveau anzuheben. Absorbertechnologische Anwendungen im Tunnelbau sind aus Österreich und Deutschland bekannt. In Abhängigkeit der Bauweise stehen unterschiedliche Einbauorte und -verfahren zur Verfügung.

Tunnelbauwerke in offener Bauweise

Hierbei handelt es sich meist um hybride Anwendungen, die mit dem Spezialtiefbau verknüpft sind, wie etwa Energieschlitzwände, Energiepfähle, aber auch thermische Aktivierungen im Fundamentbereich [2]. Im Zuge des U-Bahn-Baus in Wien (Linie U2) wurden in den letzten Jahren vier Haltestellen für die geothermische Bewirtschaftung ausgestattet [3]. Alternativ bietet sich der Einbau von Wärmeaustauscherrohren in der Tunnelwand an.

Tunnelbauwerke in bergmännisch konventioneller Bauweise

Der in bergmännischer Bauweise erstellte Lainzer Tunnel wurde in einem Pilotbereich des Bauloses LT 22 mit einem so genannten Energievlies zwischen Außen- und Innenschale ausgestattet [3]. Dabei handelt es sich um die erste Anwendung dieser Art bei

einer Spritzbetonbauweise. Im Rahmen des nachfolgend vorgestellten Forschungsprojekts „GeoTU6“ wurde dieses Modell modifiziert und mit weiteren wissenschaftlichen Schwerpunkten versehen. In Stuttgart konnte somit im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die erste in Spritzbetonbauweise hergestellte Anlage zur Gewinnung geothermischer Energie in Deutschland realisiert werden [2] (Abb. 1). Das System arbeitet mit vorort montierten Absorberleitungen zwischen Tunnelaußen- und Tunnelinnenschale (Abb.2).

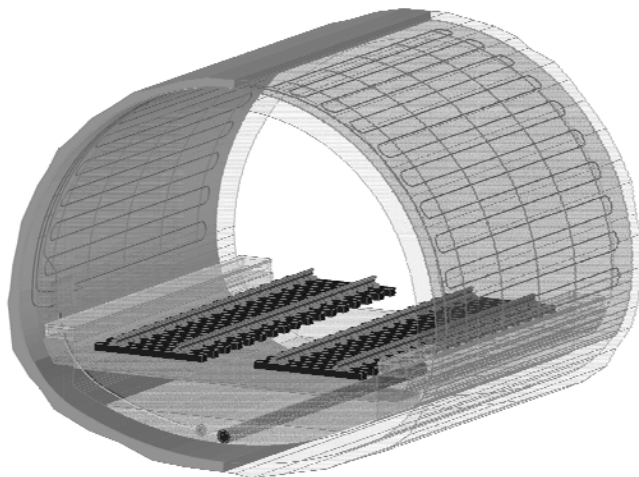


Abbildung 1
Energieblock im Fasanenhoftunnel mit Absorberleitungen zwischen Innen- und Außenschale.

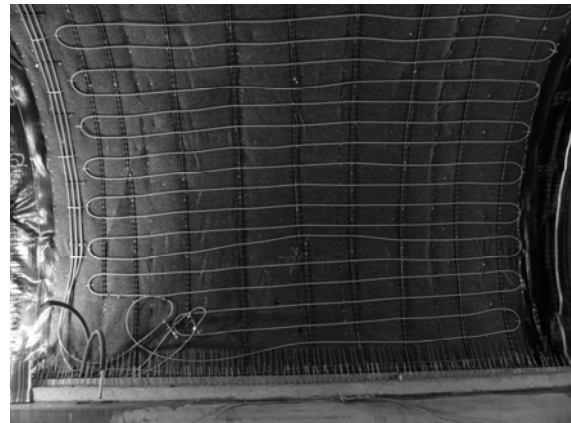


Abbildung 2
Montiertes Absorbersystem vor Durchführung der Bewehrungsarbeiten.

Als weitere Einbauorte von Wärmeaustauscherrohren kommen einer aktuellen Studie [4] zufolge weiterhin Fahrbahnplatten in Straßentunneln, der Sohlbereich des Tunnels oder Zwischendecken, die den Fahrbereich vom Abluftbereich trennen, in Frage. Eine Alternative zu den zuvor beschriebenen flächenhaft wirkenden Absorbersystemen stellen so genannte thermisch aktivierte Anker dar, die im Zuge des Vortriebs als Sicherungsmittel eingebaut werden können. In der Literatur werden Ankergehäuse mit integrierter Koaxialsonde und mit einfachem PE-Rohr genannt. Derartige Anker wurden bisher in einem Testfeld in Wien eingebaut.

Tunnelbauwerke in bergmännisch maschineller Bauweise

Mit der Konstruktion eines thermisch aktivierten Tübbings konnte die Absorbertechnologie auf die maschinelle Tunnelbauweise übertragen werden [5]. Über den Einsatz thermisch aktivierter Tübbings wird in [6] und [7] am Beispiel des Tunnels Jenbach (Unterinntal) berichtet. Hier wurden über einen Bereich von rund 54 m 27 Tübbingringe mit einer Ringteilung von 7 + 1 als sog. „Energietübbings“ eingebaut. Die Absorberleitungen wurden an der äußeren Bewehrungslage der Tübbings fixiert. Die Kopplung mit dem benachbarten Tübbingstein erfolgt in der Längsfuge des Tübbingrings.

Darüber hinaus gibt es eine Reihe von theoretischen Überlegungen, wie z.B. [8], wo über eine Planungsstudie für eine geothermische Bewirtschaftung für den in Stuttgart geplanten Tunnel Rosenstein (Straßentunnel) berichtet wird oder in [9], wo die geothermische Nutzung des Fildertunnels im Zuge des Bahnprojekts Stuttgart 21 im Rahmen einer Studie untersucht wurde. In der Schweiz gibt es Konzeptstudien zur geothermischen Ausrüstung im Rahmen des Tunnelbauprojekts CEVA in Genf oder für die bei Luzern projektierten Allmendtunnel und Hubelmatttunnel [4].

3.3 Energetische Aspekte der Tunnelgeothermie

Beispiele für das hydrogeothermische Verfahren sind der Hauenstein-Tunnel mit einem geothermischen Potential von ca. 2,3 MW_t thermischer Leistung, der Furka-Tunnel mit ca. 3,7 MW_t oder der Ricken-Tunnel mit ca. 0,5 MW_t [10].

Die beiden absorbertechnologisch ausgestatteten Tunnelblöcke des Lainzer Tunnels liefern nach [3] eine dauerhafte spezifische Entzugsleistung von 14,2 W/m².

Die oben angesprochene Studie über den geplanten zweiröhrigen Straßentunnel Rosenstein [8] zeigt die Möglichkeit der Deckung des Heiz- und Kühlbedarfs der Tunnel-Betriebszentrale (45 kW bzw. 50 kW) mit sechs bzw. sieben thermisch aktivierten Tunnel-Blöcken in der nördlichen bzw. in der südlichen Tunnelröhre.

Die Geothermieanlage des Tunnels Jenbach wurde nach [6] auf eine Leistung von rund 43 kW dimensioniert. Dabei entfallen rund 28 kW auf eine gasbetriebene Wärmepumpe und ca. 15 kW auf die Entzugsleistung aus der Erde. Die spezifische Entzugsleistung wird von den Anlagenerstellern mit 10 W/m² bis 20 W/m² angegeben [7].

Bei der im weiteren Verlauf vorgestellten Testanlage im Fasanenhofunnel Stuttgart wurde im Vorfeld zunächst konservativ für den grundlastdeckenden Betrieb eine langfristige spezifische Entzugsleistung für den Heiz- und Kühlfall angenommen, die zwischen 5 W/m² und 10 W/m² liegt bzw. für zwei Energieblöcke rund 1,8 kW bzw. 3,6 kW thermischer Leistung beträgt [2]. Mit der seit April 2011 arbeitenden Anlage wurde zunächst ein stationärer, für den Kühlfall konzipierter Grundsatzversuch über drei Monate gefahren. Die spezifische Entzugsleistung betrug anfangs rund 33 W/m² und pendelte sich später unter quasi-stationären Verhältnissen bei 15 W/m² ein. Die Gesamtentzugsleistung der Anlage betrug dann 2,8 kW (vgl. Abb. 4).

3.4 Ökonomische Aspekte der Tunnelgeothermie

Über die Kostenseite tunnelgeothermischer Anwendungen wurde in der Literatur bislang wenig berichtet. Bei zwei der drei ausgeführten Projekte, Lainzer Tunnel und Fasanenhofunnel, steht die Forschung im Vordergrund. Die Anlage in Stuttgart hat zusätzlich zu der Anlage im Lainzer Tunnel noch eine gebäudetechnische Aufgabe, in dem Sie in das Raumlufkonzept der Haltestelle eingebunden ist.

Anhand der in Stuttgart gemachten Erfahrungen für die aus zwei Blöcken bestehende Testanlage wurden die Kosten für eine fiktive Komplettausrüstung des Tunnels überschlägig ermittelt.

Die Kosten pro Tunnelmeter tunnelgeothermischer Ausrüstung werden auf 350 € bis 500 € geschätzt. Darin sind enthalten:

- Materialkosten (Fixierleisten, Wärmeaustauscherrohre, Anschlussleitungen, Hauptleitung, Formteile, Ventile),
- Personalkosten (Montage und Zusammenschluss der Leitungen),
- sonstige Kosten (z.B. erhöhter Schalungsaufwand, Druckprüfungen).

Hinzu kommen auslegungsspezifische Kosten für Wärmepumpen, Umwälzpumpen und übergeordnete Installationsarbeiten samt Material. Es ergibt sich die in Tabelle 1 dargestellte Kostenschätzung für den 380 m langen bergmännischen Tunnelabschnitt unter Zugrundelegung einer langfristigen Entzugsleistung von ca. 2,8 kW/Block bzw. 95 kW. In diese Kostenschätzung sind Planungskosten und Erschließungskosten bis zum Energienutzer nicht eingerechnet. Die Tabelle 1 zeigt, dass die Investitionskosten im vorliegenden Fall etwa 3 % der Rohbaukosten (ohne Betriebstechnik) betragen würden.

Tabelle 1: Überschlägige Kostenermittlung für die geothermische Ausrüstung des gesamten bergmännisch hergestellten Fasanenhof-Tunnels.

Material-, Personal- und sonstige Kosten	425 €/m * 380 m = 162.000 €
Wärmepumpe, Umwälzpumpe, übergeordnete Installationsleistungen	79.000 €
Gesamtinvestitionskosten Tunnelgeothermie	241.000 €
Investitionskosten pro Tunnelmeter	634 €
Investitionskosten pro kW	2.340 €
Rohbaukosten nur bergmännischer Tunnel (ohne Betriebstechnik)	7.600.000 €
Anteil an den Rohbaukosten	3,2 %

3.5 Tunnelgeothermie am Beispiel Stuttgart-Fasanenhof

Das interdisziplinäre Forschungsprojekt „GeoTU6“ hat die Untersuchung der tunnelgeothermischen Nutzung in einem innerstädtischen Bereich zum Ziel und wird durch

die Institute für Geotechnik und für Gebäudeenergetik der Universität Stuttgart bearbeitet. Die konstruktive Umsetzung eines tunnelgeothermischen Messstandes konnte in einem Teilabschnitt des bergmännisch vorgetriebenen Fasanenhof-Tunnels in Stuttgart realisiert werden. Forschungsschwerpunkte sind neben anderen:

- Die Messung der Vor- und Rücklauftemperaturen sowie der Massenströme zur Bestimmung der thermischen Leistung,
- numerische Untersuchungen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit der geothermischen Absorbersysteme und zum Anteil der Tunnelluft an der Energieextraktion,
- numerische Untersuchungen zur Bestimmung der Reichweite der Temperaturveränderung im umgebenden Baugrund sowie
- die Bestimmung von Auslegungskenngrößen für zukünftige geothermische Anwendungen im Tunnelbau.

Die tunnelgeothermische Versuchsanlage besteht aus der technischen Baugrund- und der technischen Gebäudeausrüstung und wird im weiteren Verlauf erläutert.

3.5.1 Technische Baugrundausrüstung

Der VBI hat den Begriff technische Baugrundausrüstung (TBA) 2010 eingeführt [11] und als „..... sämtliche Anlagenteile der Geothermieanlage, die im Baugrund und am Konstruktionsaußenbereich des Gebäudes bis zum quellenseitigen Verteiler zur Energiegewinnung installiert werden“ definiert. Im vorliegenden Fall liegt die Schnittstelle zwischen technischer Gebäudeausrüstung (TGA) und TBA am Eintritt zum Betriebsraum. Die TBA wird nachfolgend erläutert.

Zwei 10 m lange Betonierabschnitte der Innenschale wurden im Gewölbebereich zwischen Spritzbetonaußen- und Ortbetoninnenschale bei vorgegebenem Verlegeschema mit Absorberleitungen ausgerüstet und übernehmen die Funktion eines Wärmeaustauschers (Energiefeld, Energieblock oder Tunnelabsorber). Sie sind über Anschlussleitungen mit einer Hauptleitung verbunden, die auf der Tunnelsohle verlegt wurde und in einen Betriebsraum in der nahe gelegenen Haltestelle Europaplatz führt. Energiefelder und Leitungssystem bilden gemeinsam den Absorberkreis. In den Energiefeldern wurden aus Redundanzgründen jeweils zwei Teilkreisläufe ausgebildet. Diese wurden mit rund 400 m Absorberleitung auf eine Fläche von rund 180 m² pro Block verteilt. Die Montage der Leitungen erfolgte auf Fixierschienen über der gemäß ZTV-ING einzubauenden Trennlage (Geotextil) zwischen beiden Tunnelschalen [12].

Zur Verwendung kamen hochdruckvernetzte PE-Rohre (25 x 2,3 mm), die gegenüber herkömmlichem PE den Vorteil einer wesentlich höheren Festigkeit und Unempfindlichkeit u.a. gegenüber Kerbeinwirkungen aufweisen, die z.B. durch Bewehrungsarbeiten hervorgerufen werden können. Die Absorberleitungen wurden in der hydraulisch günstigen Parallelschaltung eingebaut. Bei der Hauptleitung handelt es sich um einen Lei-

tungstyp, der im Fernwärmeleitungsbau zum Einsatz kommt. Im Querschnitt des Außenrohrs (\varnothing 162 mm) liegen die Vor- und Rücklaufleitung (\varnothing 50 mm) aus hochdruckvernetztem PE. Der Zwischenraum ist mit Material niedriger Wärmeleitfähigkeit ausgeschäumt.

3.5.2 Technische Gebäudeausrüstung (TGA)

In einem Betriebsraum der Haltestelle Europaplatz endet die Hauptleitung aus dem Tunnel. Hier steht ein Versuchstand zum Test der Tunnelabsorber, der an die Hauptleitung angeschlossen ist. Der Versuchstand besteht aus einer Wärmepumpe, einem Wärmespeicher, diversen Regelventilen sowie den Umwälzpumpen für die Versorgung der Absorber mit Wärmeträgerflüssigkeit. Mit der gewonnenen Wärme bzw. Kälte wird ein Wärmeübertrager im Zuluftkanal der Lüftungsanlage versorgt. Damit wird die Zuluft für die Betriebsräume der Haltestelle Europaplatz vorgewärmt bzw. vorgekühlt [12].

3.5.3 Messergebnisse

Die Energieblöcke des Fasanenhof隧NELS wurden umfangreich mit Messtechnik ausgestattet. Jeder Block wurde mit drei Temperaturmesslanzen ausgerüstet, die 5,0 m bzw. 10,0 m tief in den Baugrund reichen, eine dritte Messlanze ist lotrecht nach oben ausgerichtet. Die Temperaturmessung im Baugrund wird von Thermistorenketten übernommen, die zwischen 8 und 12 Sensoren mit variablen Abständen zwischen 0,5 m und 1,75 m aufweisen. Ergänzend wird in den Energieblöcken auch die Betontemperatur in je vier Messstellen mit jeweils sechs Thermoelementen und die Lufttemperatur an vier Stellen pro Energieblock gemessen. Pro Energiefeld wurden insgesamt 56 Temperatur-Sensoren eingebaut.

In Abb. 3 sind die im Zeitraum von Mai 2010 bis Februar 2011 aufgezeichneten Monatsmittel-Temperaturen über die Entfernung von der Tunnelinnenschale des Energieblockes 73 aufgetragen, die in Tunnelluft, Bauwerksbeton und Untergrund gemessen wurden. In diesem Zeitraum erfolgte noch keine tunnelgeothermische Nutzung. Die mittleren Tunnellufttemperaturen im beobachteten Zeitraum haben eine Schwankungsbreite von ca. 14,5 K. Mit Eintritt der „Temperaturwelle“ in die Tunnelschale wird die Schwankungsbreite auf etwa 8,1 K abgedämpft. Im geologischen Nahfeld des Tunnels werden zunächst Temperaturdifferenzen von rund 6,4 K beobachtet, die mit zunehmender Entfernung vom Tunnel abnehmen und sich vergleichmäßigen. Ab einer Entfernung von rund 7 m sind die Schwankungen $< 0,4$ K. Die absoluten Temperaturwerte liegen dann bei ca. 11,8°C.

Die Messergebnisse repräsentieren das sekundäre Temperaturfeld im Umfeld des Tunnels. Dieses entsteht durch Störung des ursprünglichen primären Temperaturfeldes infolge Herstellung des Tunnelbauwerks z.B. durch Hydratationswärme beim Abbinden des Betons, durch Wärmequellen wie Baumaschinen und infolge Durchströmung des Bauwerks mit Außenluft. Auch das primäre Temperaturfeld war vermutlich bereits durch tiefreichende Bauwerke oder Gründungen vor Tunnelherstellung gestört. Dieser

Effekt wird in der Literatur (z.B. [13]) als „urban heat island effect“ beschrieben. Durch die geothermische Nutzung des Tunnels entsteht ein tertiäres Temperaturfeld in der Tunnelumgebung.

In der Abbildung 4 sind die im Zuge des stationären Grundsatzversuchs für den Kühlfall gemessenen Wärmestromdichten der beiden Teilkreisläufe des Energieblockes 82 gegen die Temperatur der Tunnelluft und der Außenluft aufgetragen. Die Wärmestromdichte \dot{q} in W/m^2 wird aus dem Wärmestrom \dot{Q} in W und der thermisch aktivierten Fläche A in m^2 berechnet (Glg. 1.1).

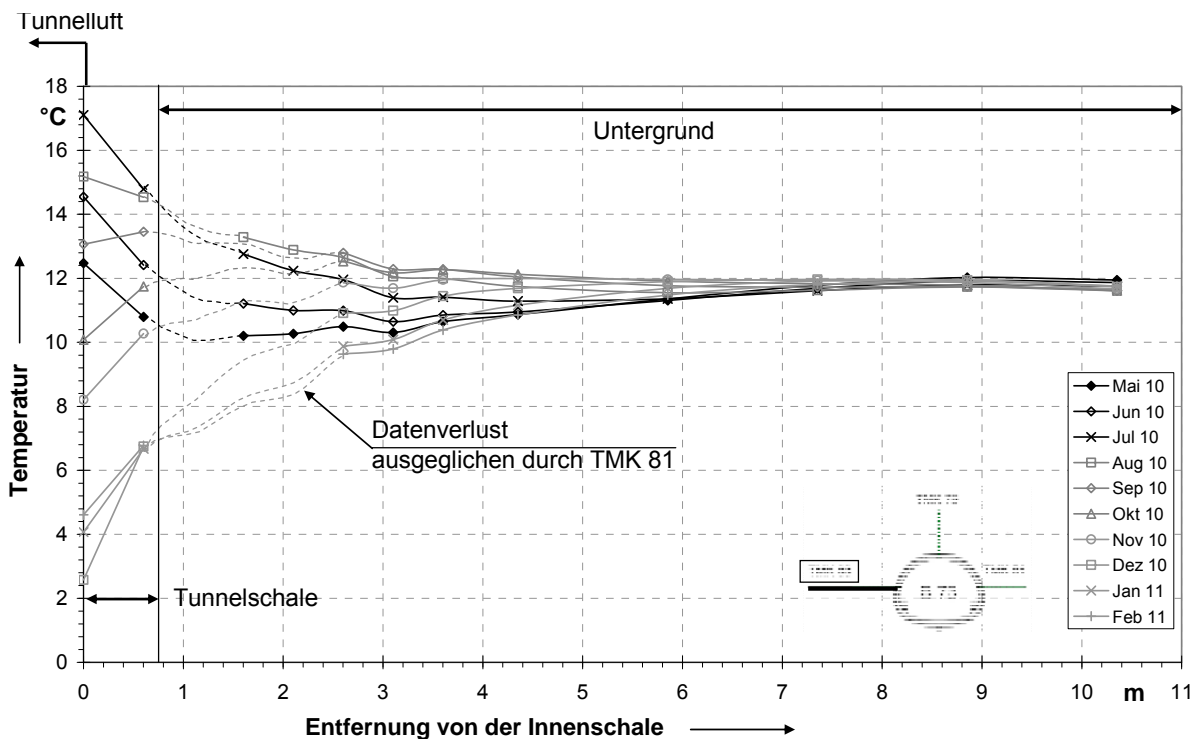


Abbildung 3 Temperatur-Monatsmittelwerte von Tunnelluft, Beton der Tunnelinnenschale und Untergrund, gemessen in der nördlichen Thermistorenkette 83 des Blockes 73 im Zeitraum Mai 2010 bis Februar 2011.

Der Wärmestrom ergibt sich aus dem Volumenstrom \dot{V} in l/h , der Dichte des Absorberfluids ρ_{Fluid} in kg/m^3 , dessen Wärmekapazität C_p in kJ/kgK und der Temperaturdifferenz ΔT zwischen Vor- und Rücklauf in K (vgl. Glg. 1.2).

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A}, \quad (0.1)$$

und

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho_{\text{Fluid}} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (0.2)$$

Der Wärmestrom bzw. die Wärmestromdichte zeigt eine sehr starke Abhängigkeit von den Schwankungen der Temperatur der Tunnelluft, die u.a. abhängig ist von der Temperatur der Außenluft, des Abstands von den Portalen, der Strömungsgeschwindigkeit

der Tunnelluft sowie Wärmequellen (z.B. Zügen). Mit Zunahme der Außentemperaturen und in deren Folge der Zunahme der Tunnellufttemperaturen sinkt die Leistung der tunnelgeothermischen Anlage im Kühlfall (siehe auch Ausführungen in Abschnitt 1.3).

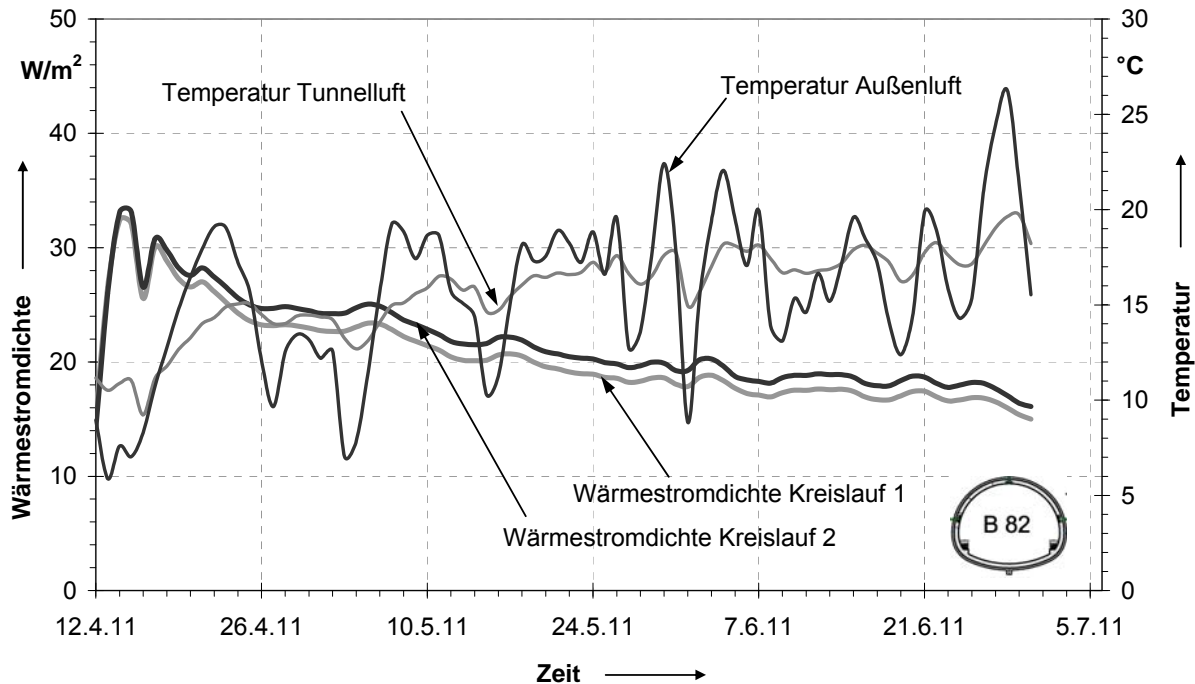


Abbildung 4 Messergebnisse des stationären Grundsatzversuchs, gemessen in Block 82. Dargestellt sind der Verlauf der Wärmestromdichte und der Lufttemperaturen gegen die Zeit.

3.6 Schlussbemerkung

Aufgrund der seichten Lage des Fasanenhof-Tunnels und der damit verbundenen Beeinflussung des Temperaturfelds im Umfeld des Tunnels durch die Oberflächentemperaturen sowie durch die Tunnelluft, stellt die Berechnung tunnelgeothermischer Fragestellungen im innerstädtischen Bereich eine hochgradig instationäre Aufgabe dar.

Die begleitende Messkampagne erlaubt die Kalibrierung der numerischen Modelle. Projektbegleitende FE-Simulationen dienen der Untersuchung der Leistungsfähigkeit des Absorbersystems und der Analyse des Temperaturfeldes im Baugrund infolge der geothermischen Bewirtschaftung des Tunnels.

Die konstruktiven Modifikationen, die erforderlich sind, um aus einem Tunnel einen thermisch aktivierten Tunnel herzustellen, sind grundsätzlich gering. Die erforderlichen zusätzlichen Tätigkeiten können gut in den allgemeinen Arbeitsablauf für die Bauwerkskonstruktion integriert werden.

Die Investitionskosten für die tunnelgeothermische Ausrüstung liegen im vorliegenden Fall bei etwa 3 % der Rohbaukosten bzw. unter 1 % der Gesamtkosten und sind damit gering. Angesichts der Nachhaltigkeit einer solchen Investition sollte heute zumindest bei Tunnelprojekten im innerstädtischen Bereich die Ausstattung mit einer entsprechenden tunnelgeothermischen Verfahrenstechnik integraler Bestandteil der Planungen sein. Die Tunnelgeothermie besitzt somit ein großes Entwicklungspotenzial.

Literatur

- [1] Rybach, L (2008): Tunnelwärmenutzung: Grundlagen und Beispiele aus der Schweiz. Tunnel – Sonderausgabe IUT 2008, S. 74- 80.
- [2] Schneider, M., Moormann, Chr.: GeoTU6 - ein tunnelgeothermisches Forschungsprojekt = GeoTU6 - a geothermal Research Project for Tunnels. Tunnel, Jg. 29.2010, Nr. 2, S. 14-21.
- [3] Markiewicz, R. (2004): Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau – Dissertation TU Wien.
- [4] Bruderer, W., Rausch, M., Kühn, W., Mégel, Th., Rohner, E., Iglesias, E., Wetzig, V. (2010): Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Systemevaluation. Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Straßen. Forschungsauftrag FGU 2008/006, 1330.
- [5] Schneider, M., Vermeer, P.A. (2007): Geothermie im Tunnelbau; Stand der Technik und Entwicklungen. Symposium "Maschineller Tunnelbau: Möglichkeiten und Zukunftsprspektiven", Hochschule für Technik, Stuttgart, 2007, S. 2/17-16/17.
- [6] Frodl, S., Franzius, J. N.; Bartl, T. (2010): Design and construction of the tunnel geothermal system in Jenbach / Planung und Bau der Tunnel-Geothermieanlage in Jenbach – Geomechanics and Tunnelling 3: 658-668.
- [7] Franzius, J. N., Pralle, N. (2011): Turning segmental tunnels into sources of renewable energy. Civil Engineering 164, S. 35 – 40.
- [8] Hofmann, K., Schmitt, D. (2010): Geotthermie im Tunnelbau - Konzept für die Nutzung der Geothermie am Beispiel des B10-Tunnels Rosenstein – Geotechnik 33: 135-139.
- [9] Schlosser, T., Schmidt, M., Schneider, M., Vermeer, P. (2007): Potenzial der Tunnelbaustrecke des Bahnprojektes Stuttgart 21 zur Wärme- und Kältenutzung – Studie des Zentrums für Energieforschung Stuttgart. Stuttgart 2007.

- [10] Wilhelm, J., Rybach, L. (2003): The geothermal potential of Swiss Alpine tunnels – Geothermics 32: 557-568.
- [11] Verband Beratender Ingenieure VBI (2010): Leitfaden Oberflächennahe Geothermie. Band 18, 2.Auflage, Berlin.
- [12] Schneider, M., Moormann, Chr., Vermeer, P.A.: Der Beitrag des Tunnelbaus zu regenerativen Energiekonzepten. Veröffentlichungen zur 18. Tagung für Ingenieurgeologie Berlin, 16.-19. März 2011/ (Hrsg.) J. Tiedemann, Berlin: Fachsektion Ingenieurgeologie der DGGT, 2011, S. 153-159.
- [13] Allen, A., Milenic, D., Sikora, P. (2003): Shallow gravel aquifers and the urban “heat island” effect: a source of low enthalpy geothermal energy – Geothermics 32: 568-578.

4 Nutzung wärmerohrbasierter CO₂-Erdsonden am Beispiel eines Schnee- und Eisfreihaltungssystems

Roman Zorn¹, Hagen Steger², Pia Orywall³ und Thomas Kölbel³

¹ Geothermisches Labor, European Institute of Energy Research, KIT, Karlsruhe
roman.zorn@eifer.org

² KIT Campus Süd, Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)

³ EnBW Baden Württemberg AG, Karlsruhe

Kurzfassung

Eine viel versprechende Alternative zu klassischen Sole betriebenen Erdsonden stellen CO₂-Erdwärmesonden nach dem Prinzip des Wärmerohrs dar. Selbstzirkulierende CO₂-Erdwärmesonden versprechen besonders vorteilhaft zu sein, weil gegenüber dem Betrieb einer Sole-Erdwärmesonde keine zusätzliche Energie für den Betrieb einer Solepumpe erforderlich ist. Dazu besteht ein weiterer wesentlicher Vorteil von CO₂-Sondenlösungen darin, dass CO₂ im Allgemeinen unbedenklich für Grundwasser ist und somit eine ideale Lösung für wasserwirtschaftlich sensible Gebiete zur Verfügung steht. Im Folgenden wird exemplarisch die praktische Umsetzung eines Schnee- und Eisfreihaltungssystems mittels CO₂ Wärmerohre beschrieben.

4.1 Einleitung

Normalerweise werden Sole-Erdwärmesonden eingesetzt, um die im Untergrund vorhandene Energie verfügbar zu machen. Ein innovativer und viel versprechender Ansatz sind darüber hinaus CO₂-Erdwärmesonden nach dem Prinzip des Wärmerohrs. Eine nach diesem Prinzip aufgebaute vertikale Erdwärmesonde mit CO₂ als Wärmeträger nutzt für den Energietransport den Phasenwechsel des „kalten“ flüssigen CO₂ zum „warmen“ gasförmigen CO₂.

Erdgekoppelte, mit Ammoniak betriebene Wärmerohre werden bereits zur Beheizung von Brücken und Strassen verwendet sowie zum Durchfrieren von Permafrostböden eingesetzt, um die mechanische Stabilität solcher Böden zu gewährleisten (Nydahl et al. 1987, Vasilew 1988, Fukada et al. 1990, Kovalev et al. 1992, Tanaka et al. 1992, Ochterbeck 2003). Ergebnisse eines 18 m tiefen Wärmerohrs gekoppelt mit einer Wärmepumpe werden bei Kruse (2004) beschrieben. Theoretische Berechnungen von Wärmerohren können z.B. bei Hegab und Colwell (1994) entnommen werden. Kommerziell umgesetzte Wärmerohrlösungen für den privaten Hausbaubereich beschreibt z.B. Mittermayer (2007). Zorn et al. (2008) haben erfolgreich das derzeit tiefste CO₂

betriebsfähige Wärmerohr umgesetzt (250 m tief, siehe auch Zorn et al 2006, Zorn et al. 2007a und 2007b).

In Feldmann (2004) und Staudacher (2010) wird unter anderem die Anwendung von Wärmerohren zur Beheizung von Weichen und Bahnschwellen vorgestellt.

4.2 Grundprinzip

Eine nach dem Prinzip des Wärmerohrs aufgebaute vertikale Erdwärmesonde mit CO₂ als Wärmeträger nutzt für den Energietransport den Phasenwechsel von „kaltem“ flüssigem CO₂ in „warmes“ gasförmiges CO₂. In der Heizzone (Erdreich) verdampftes CO₂ steigt im Sondenrohr an die Oberfläche (Abb. 1).

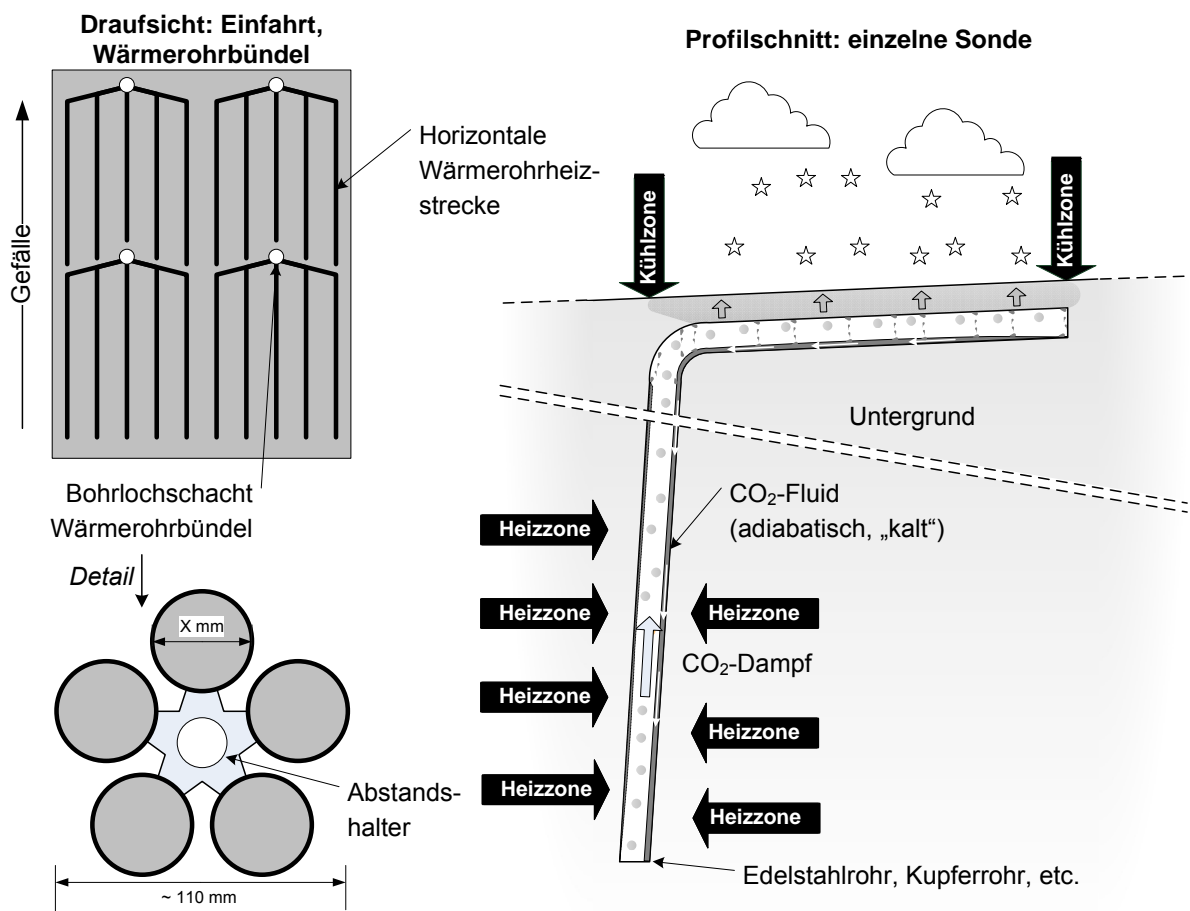


Abb. 1: schematische Ansicht möglicher Wärmerohrkonzeppte für eine selbsttätige Schnee- und Eisfreihaltung.

Im Gegensatz zur Verwendung von Wärmerohren in Verbindung mit Wärmepumpen, bei der das Wärmerohr über den Verdampferkreislauf der Wärmepumpe gekühlt wird, ist die Kühlzone bei einer Schnee- und Eisfreihaltung rein meteorologisch bedingt, da

der Wärmerohrkreislauf direkt in die Rampenfläche integriert wird (Direktverdampferwärmerohrsystem). Sinkt die Temperatur unter die Kondensationstemperatur der CO₂-Phase im Wärmerohr, startet der selbsttätige Wärmerohrkreislauf und beheizt die Rampe (Zorn et al. 2009).

Bei richtiger Auslegung und Dimensionierung des Wärmerohrsystems erhält man eine selbstlaufende Schnee- und Eisfreihaltung, zu deren Aufrechterhaltung kein weiterer Energieeinsatz notwendig ist. Läuft ein solches System optimal, sind nur einmalige Investitions- und Installationskosten notwendig. Die Beheizung erfolgt allein durch die im Untergrund vorhandene Erdwärme, die mittels der Wärmerohre ohne zusätzliche elektrische Antriebsenergie verfügbar gemacht werden kann. Die CO₂ Wärmerohre werden mit der gleichen Technik wie Sole-Erdwärmesonden vertikal eingebracht. Die Schnee- und Eisfreihaltung mittels Wärmerohre ist besonders nachhaltig gerade unter Umwelt- und energetischen Gesichtspunkten (nach Zorn et. al. 2009),

- Der Einsatz umweltschädlicher Tausalze kann minimiert werden (eventuell bei extremen Wetterbedingungen notwendig)
- Eine händische und maschinelle Räumung ist kaum mehr erforderlich (eventuell bei extremen Wetterbedingungen notwendig)
- CO₂ Wärmerohre sind ungefährlich für Grundwasser und somit prinzipiell auch für Grundwasserschongebiete geeignet.

Können kostengünstige und effiziente Wärmerohrsystemkonzepte entwickelt werden, ergeben sich eine Reihe von nachhaltigen Einsatzmöglichkeiten bzw. Verwertungsmöglichkeiten dieser äußerst innovativen Schnee- und Eisfreihaltung, z. B. (nach Zorn et. al. 2009)

- Einsatz bei Brücken (besonders interessant, da Brücken aufgrund ihrer Exposition schneller als Strassen vereisen)
- Einsatz bei Strassen (insbesondere bei Gefälle, gefährlichen Kreuzungen)
- Weitere Parkflächen, Einfahrten (insbesondere Feuerwehrgebäude, Krankenhaus, Polizeieinfahrten etc.)
- Bahnsteige, Weichen etc.

4.3 Feuerwehrrampe in Bad Waldsee

Der Fokus der Schnee- und Eisfreihaltung wird derzeit auf die Eingangsrampe im hinteren Bereich des neuen Feuerwehrhauses in Bad Waldsee gelegt.

4.3.1 Benötigte Wärmeleistung

Bei der Berechnung der benötigten Wärmeleistung sind zu berücksichtigen: Betriebswärme (durchgehend oder mit Unterbrechungen), Außentemperatur, Windverhältnisse

sowie die Schmelzwärme von Eis und Schnee. Da eine genaue Ermittlung des Wärmebedarfes durch die vielen Parameter und die stark wechselnden klimatischen Bedingungen nur mit einem hohen mathematischen Aufwand durchzuführen ist, wird in der Praxis auf bewährte Werte zurückgegriffen. Als Richtwert für die benötigte Wärmeleistung ergeben sich bei permanentem Betrieb ab $<5\text{ }^{\circ}\text{C}$ Außentemperatur ca. $150\text{--}250\text{ W/m}^2$ für eine reine Eis- und Schneefreihaltung. Zu betonen ist, dass dies nur eine grobe Abschätzung ist und von vielen Faktoren abhängt (Zorn et al. 2009 und Tab. 1).

Tab. 1: Einflussfaktoren für Wärmeleistung (nach Zorn et al. 2009).

		Tendenz
Außentemperatur	steigend	--
Wind	höher	-
Verlege- bzw. Rohrabstand (an der Oberfläche)	kleiner	++
Quellentemperatur für Beheizung	kleiner	++ (da kein so großer Wärmestrahlungsverlust)
Verlegetiefe (Abstand zur Oberfläche)	kleiner	+

4.3.2 Planung der Wärmerohrlängen

Bei der weiteren Planung wurde von einer benötigten reinen Wärmeleistung von ca. 150 W/m^2 ausgegangen, d. h. für die Fläche wird ca. 25 KW Heizleistung benötigt. Der Hauptgrund dafür ist, dass eine Überdimensionierung und damit sehr hohe Investitionskosten vermieden werden konnten. Mit der Annahme realistischer Auslegungsparameter für den Untergrund ($45\text{--}50\text{ W/m}$) und eigenen Berechnungen ergibt sich eine benötigte Wärmerohrlänge im Bereich von $250\text{--}275\text{ m}$ (nach Zorn et al. 2009).

Aus einem Wärmerohrbündel mit ca. $50\text{--}60\text{ m}$ Länge kann dann ein Wärmetransport von ca. 5 KW erwartet werden (Abb. 2). Am Standort in Bad Waldsee wurde deshalb eine 4er-Wärmerohrbündelvariante mit einer Gesamtlänge von $\sim 275\text{ m}$ umgesetzt (Zorn et al. 2009).

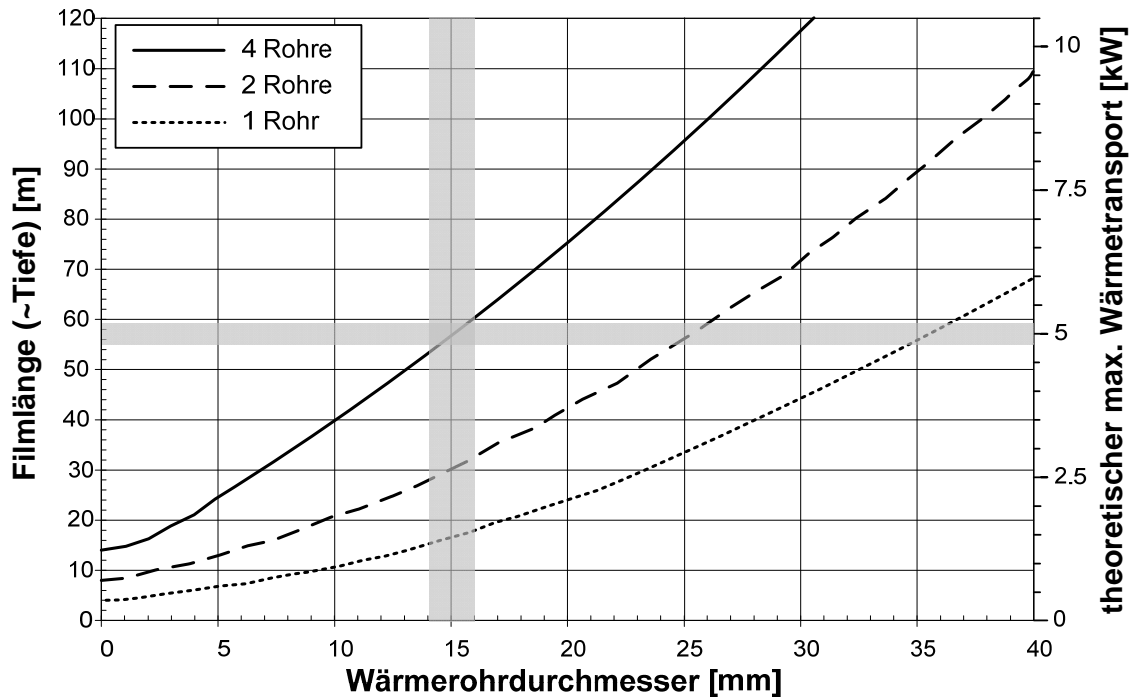


Abb. 2: theoretisch berechneter maximaler Wärmetransport und dazugehörigen Filmlängen (erforderliche Teufen) in Abhängigkeit von Anzahl der Wärmerohre (glatte Oberfläche) pro Bohrloch (die grau markierte Flächen zeigen an, dass bei einem verwendeten Innendurchmesser von 14-16 mm eine ca. 5 kW Leistung erwartet werden kann, nach Zorn et. al. 2009).

4.3.3 Umsetzungsplan

Die Schnee- und Eisfreiheit wurde auf einer Fläche von ca. 20 m x 7,50 m realisiert. Der zusammengefasste komplette Verlege- bzw. Ausbauplan kann der Abb. 3 entnommen werden. Jedes einzelne Wärmerohr (DN 16 mm und spezielles beripptes Innenrohr ~DN10) wurde im Verteilerschacht mit dem Oberflächensystem verbunden. Das zentrale Verbindungsrohr besteht aus einem DN16 Kupferrohr. Prinzipiell kann das gleiche Rohr verwendet werden, dass auch im Untergrund verwendet werden kann, mit der Einschränkung, dass das horizontale System aus einem Glattrohr beschaffen sein sollte. Im Untergrund können auch gewellte oder berippte Rohre verwendet werden, um eine größere innere Oberfläche zu erhalten, und damit einen verbesserten Wärmeübergang zwischen Untergrund und Rohr zu erhalten. Die Wärmeverteilung an der Straßenoberfläche wurde mit Hilfe einer Kammlösung umgesetzt. Im Vorfeld des Vorhabens war die Asphaltsschicht auf der Straßenrampe bereits angebracht worden. Deshalb wurden die Bohrungen am Rande der Strasse unter Einhaltung eines Mindestgrenzabstandes von 5 m angebracht. Dadurch ergaben sich auch die verwendeten Kammlösungen und Verteilersysteme.

4.3.4 Messtechnik

Die tiefenorientierte Temperaturüberwachung erfolgt punktuell mit Pt100-Sensoren und flächenhaft mit Hilfe von faseroptischen Temperaturmessungen. Die Kombination dieser beiden Messmethoden garantiert eine optimale und reproduzierbare Datenerfassung und –bewertung des CO₂-Wärmerohr basierenden Schnee- und Eisfreihaltungssystems. Bei B1 bis B4 wurde jeweils ein Strang mit 4 Temperaturmessfühlern angebracht, jeweils in die Teufen 5m, 10m, 25m, 50m. Anders als die anderen Bohrungen ist die B5 73m tief. Mit der größeren Tiefe wird das Volumenverhältnis des Untergrundwärmerohrsystems zum Oberflächenregistersystem erhöht. Zudem sollte insgesamt durch die erhöhte Länge eine größere Wärmeleistung erzielt werden können, wobei angemerkt werden muss, dass mit Innendurchmesser von 14mm die Wärmetransferaten limitiert sind. Bei der Bohrung B5 sind jeweils 2 Stränge mit 5 Temperaturfühlern in der Teufe 5m, 10m, 25m, 50m und 73m ausgestattet. Zudem wurde zusätzlich ein Hybrid-Glasfaserkabelmesssystem im Loop eingebaut, um tiefenorientierte Temperaturmessungen in 0,5m Auflösung möglich zu machen. Ebenso wird der Druck im Inneren der Rohre mit einem geeigneten Drucksensor überwacht. Das beheizte Oberflächensystem wird mit einer Wärmebildkamera qualitativ überwacht. Die meteorologischen Bedingungen am Standort werden mit Hilfe einer eigens aufgestellten Wetterstation erfasst.

4.4 Messergebnisse

Entsprechend der kühlen Außenluft reagierte das Oberflächensystem und leitet die Kühllasten in den Untergrund und kompensiert die kalten Asphalt- bzw. Bodentemperaturen (exemplarisch für Sondensysteme B1 und B2, Abb. 4 schwarze Kurven). Trotz kalter Außenluft (graue Linien) bleiben die Temperaturen entlang des Wärmerohres immer über Null Grad. Entsprechend der Abkühlung des Registersystems wurde die Kälte in den Untergrund transportiert. Deshalb spiegeln die Temperaturverläufe im Untergrund die Luft bzw. Asphalttemperaturen wider. Der Fluidtransport ist bis in 50 m Tiefe erkennbar. Logischerweise ist in den ersten Tiefenmetern ein deutlicherer Temperaturrückgang zu verzeichnen. In größere Tiefen ist der Rückgang geringer, da durch den Wärmetransport im Untergrund eine sukzessive ansteigende Verdampfung des CO₂ stattfindet und große Anteile des Fluidfilms bereits auf dem Weg nach unten verdampft. Die Rohrleitungen von den jeweiligen 5 Schächten bis zum Straßenrand sollten isoliert werden, da große Mengen an CO₂ bereits in den Zuleitungen kondensieren bevor sie die Oberflächenregistersysteme erreichen können. Deutlich erkennbar ist dies auf dem Wärmebild (Abb. 5 oben). Je kürzer der Abstand zwischen Schacht und Oberflächensystem, desto schlechter wird die Strasse beheizt. Außerdem ist zu erkennen, dass bei manchen Registersystemen nur Teilbereiche am Rand der Strasse effizienter beheizt wurden, wobei auch bei sehr lang anhaltender kalter Witterung meist

eine komplette Schnee- und Eisfreiheit der Straßenrampe erreicht wird (Abb. 5 unten).

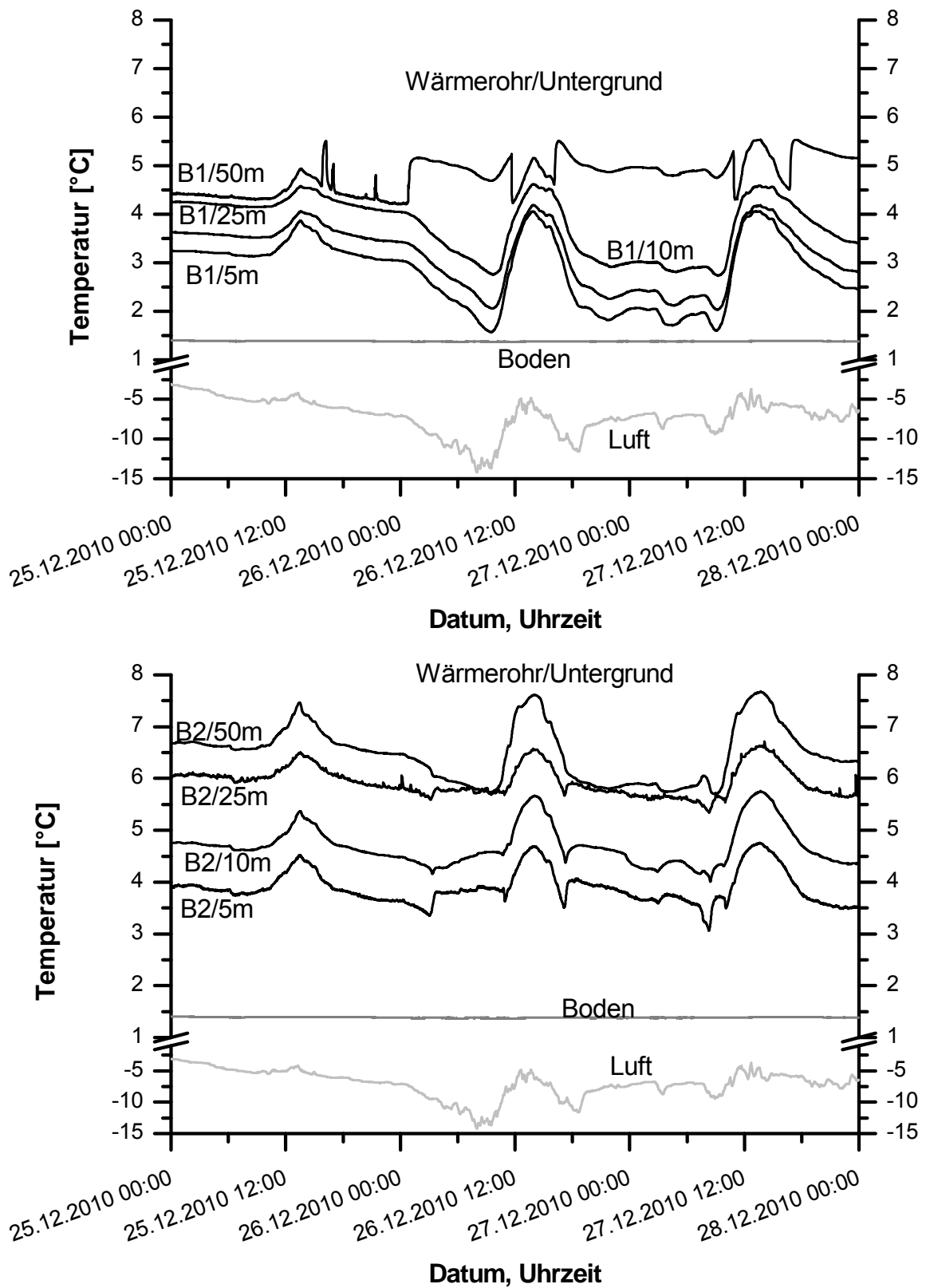
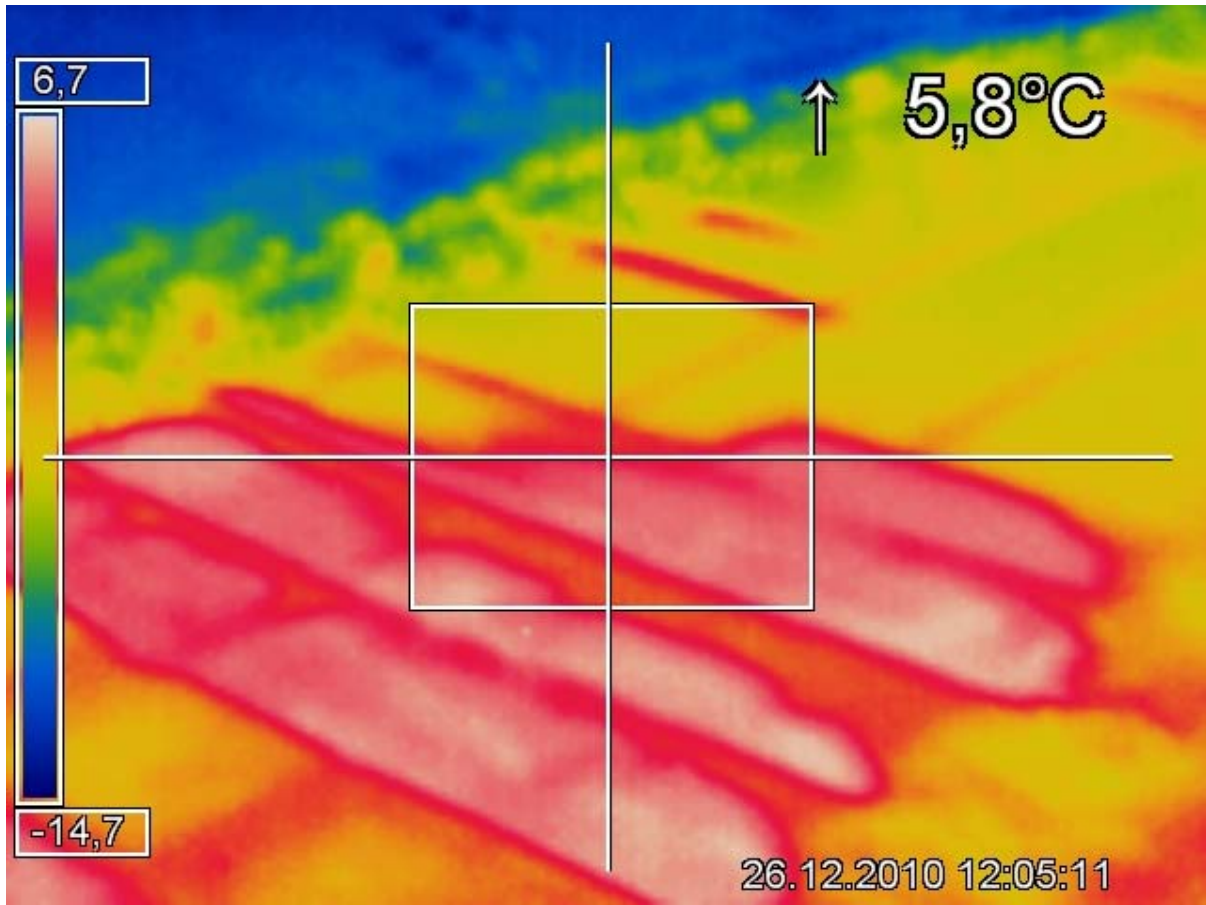


Abb. 4: Temperaturverlauf in einem Untergrundwärmerohrsystem B1 (oben) und B2 (unten) im Vergleich zu Boden- und Außenlufttemperatur.



Quelle: EnBW AG

Abb. 5: Wärmebild (oben) mit Foto (unten, Quelle EnBW)) als Beleg einer funktionierenden Schnee- und Eisfreihaltung in Bad Waldsee.

4.5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel des Vorhabens ist es, eine nachhaltige, zukunftssträchtige und innovative CO₂ betriebene Wärmerohrlösung zur selbsttätigen Schnee- und Eisfreihaltung zu entwickeln. Erstmals wurden CO₂ Wärmerohre in Verbindung mit einem Oberflächenkondensationssystem für die Schnee- und Eisfreihaltung einer Asphaltsschicht eingesetzt.

Erste Funktionstests weisen eine erfolgreiche Temperaturkompensation der Asphaltsschicht und einen CO₂ Fluidfluß bis Endteufe nach. Insgesamt sind aber die Registersysteme, die nur eine geringe Zuleitung vom Schachtsystem zur Strasse besitzen, effizienter, da die nicht vorhandene Isolierung sich bei den längeren Zuleitungen stärker bemerkbar macht und deshalb große Mengen an CO₂ schon vorher kondensieren und somit nicht genügend CO₂ in die Oberflächenregistersysteme gelangt. Um diesen Umstand zu korrigieren, wurden bereits alle freiliegenden Zuleitungen in den Schächten und die dazugehörigen erdverlegten Rohrleitungen mit einer Isolierung versehen. Nunmehr ist zukünftig eine noch effizientere Schnee- und Eisfreihaltung in Bad Waldsee zu erwarten.

Bislang wurde nicht auf eine theoretische Wärmebedarfsbetrachtung in Abhängigkeit meteorologischer Faktoren eingegangen. Dies soll in einer nächsten Projektphase intensiviert werden, um eine wirkliche Wärmehaushaltsbilanzierung des gekoppelten Wärmerohrsystems darstellen zu können.

Zudem zeigen erste Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, dass erdgekoppelte Systeme in meisten Fällen über einen sehr kurzen Amortisationszeitpunkt kostengünstiger sind als konventionelle strombetriebene Oberflächenheizsysteme.

Danksagung

Das Vorhaben wird von EnBW Baden Württemberg AG, Hol FE&D, Karlsruhe finanziert. Zudem möchten wir der Heidelberg Zement AG für die kostenlose Bereitstellung eines frostsicheren Hinterfüllmaterials und den Wieland Werken AG für die Herstellung und Lieferung der Kupferrohre danken. Ferner danken wir der Stadt Bad Waldsee (namentlich Stadtbaumeisterin Frau Denzel) für die zur Verfügung gestellte Feuerwehrrampe. Für die fachliche und auch persönliche Unterstützung des Vorhabens gilt ein besonderer Dank Herrn Alois Jäger von der BauGrund Süd Gesellschaft für Geothermie mbH und Herrn Kiwatsch des elger Architekturbüros.

Literatur

- Feldmann, W. (2004): "Heizung von Verkehrsanlagen, Nutzung von Erdwärme und Wärmerohr.", *EI-Eisenbahningenieur*, Vol. 55(9): 84-94.
- Fukada, M., Tsuchiya, F., Ryokai, K., Mochizuki, M. and Mashiko, K. (1990): "Development of an Artificial Permafrost Storage Using Heat Pipes.", 7th International Heat Pipe Conference, Minsk, Belarus, Paper D18.
- Hegab, H.E. and Colwell, G.T. (1994): "Thermal Performance of Heat Pipe Arrays in Soil", *Numerical Heat Transfer*, A26:619-630.
- Kovalev, S., Buchalov, M. Sidorov, A., and Bayaisan, R. (1992): "The Soil Thermal Stabilization by Means of Two-Phase Thermosyphon.", 8th International Heat Pipe Conference, Beijing, China, Paper E-P41
- Kruse, H. (2004): "WÄRMEROHR - Entwicklung einer CO₂-Erdwärmesonde nach dem Prinzip des Wärmerohres.", *Ki Luft und Kältetechnik*, Vol. 40(2): 54-61
- Mittermayr, K. (2007): "Idee – Entwicklung – Feldversuche – Marktreife von selbstzirkulierenden CO₂ Sonden.", 7th Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 26.-27 April 2007, Freising, Germany.
- Nydahl, J., Pell, K., and Lee, R. (1987): "Bridge Deck Heating with Ground-Coupled Heat Pipes.", *ASHRAE Trans.*, Vol. 93 (1): 939-958.
- Ochterbeck, J.M. (2003): "Heat pipes", in: Bejan, A., and Kraus, A.D. (Eds.), *Heat Transfer Handbook*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2003, 1181–1230.
- Staudacher (2010): CO₂ Heat Pump, 10. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, OTTI-Profiforum, 19. bis 21. April 2010 LFI Hotel, Linz, Österreich.
- Tanaka, O., Koshino, H., Xiao, C., Egawa, H., Kashizawa, H., and Hamada, H. (1992): "Development of a Snow Melting Using Pipes with Electric Cartridge Heaters.", 8th International Heat Pipe Conference, Beijing, China, Paper E-P39.
- Vasilew, L. (1988): "Heat Pipes for Ground Heating and Cooling.", *Heat Recovery Systems CHP*, Vol. 8(2): 125-138.
- Zorn, R., Kölbl, Th., Rüssman, H., Steger, H., Walker-Hertkorn, S. und Schmidt, Th. (2006): Tiefe CO₂-Erdwärmesonde am Standort Nussbach (Nordschwarzwald), Geothermische Möglichkeiten im Oberrheingraben, Konferenz der Hochschule Offenburg, VDI Gesellschaft Energietechnik.
- Zorn, R., Kölbl, Th., Kruse H., Steger, H., Schmidt, Th. & S. Walker-Hertkorn (2007a): 250 Meter tiefe Selbstzirkulierende CO₂ Erdsonde nach dem Prinzip des Gravita-

tionswärmerohrs, Geothermiekongress 2007 "Energie für alle Fälle", 29.-31 Oktober 2007: S. 162-166.

Zorn, R., Kölbl, Th., Steger, H. & H. Kruse (2007b): CO₂-Erdsonde basierend auf dem Gravitationswärmerohrprinzip, bbr, Fachmagazine für Brunnen und Leitungsbau, A58(12): S. 58-65.

Zorn, R., Kölbl, Th., Kruse H., Steger, H. and Walker-Hertkorn S. (2008): Deep Borehole Heat Exchanger with a CO₂ Gravitational Heat Pipe Principle, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

Zorn, R. Kölbl, Th., Orywall, P. & H. Steger (2009): Schnee- und eisfreihaltung mittels innovativer Wärmerohrtechnik, bbr, Fachmagazine für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Geothermie, A60(12): S. 94-98.

5 Modellierung von Kälte- und Wärmefahnen in der oberflächennahen Geothermie

Philipp Blum¹, Valentin Wagner¹, Jozsef Hecht-Méndez², Peter Bayer³

¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW), philipp.blum@kit.edu

² Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften

³ ETH Zürich, Geologisches Institut, Zürich

Kurzfassung

Untiefe geothermische Anlagen, wie Erdwärmesonden (EWS) und Grundwasserwärmepumpen (GWWP) verursachen durch ihren Betrieb Temperaturanomalien im Untergrund und Grundwasser. Um die Ausbreitung dieser Anomalien abzuschätzen, gibt es zahlreiche analytische als auch numerische Modelle. Ziel dieser Arbeit ist es eine Übersicht über die unterschiedlichen Modelle und Modellansätze zu geben. Des Weiteren werden die Modelle anhand gemessener Felddaten validiert. Die vorhandenen Modelle und deren Anwendung in der Praxis werden kritisch diskutiert. Für die Validierung wurde ein Testfeld für eine GWWP, die bereits seit über 30 Jahren in Betrieb ist, bei Tübingen (Kilchberg) errichtet. Ein weiteres Testfeld für eine EWS wurde bei Bad Wurzach eingerichtet. Für die offenen geothermischen Systeme werden unterschiedliche analytische Ansätze miteinander verglichen. Die Untersuchungen umfassen die berechnete Ausbreitung der induzierten Temperaturveränderung, sowie eine Sensitivitätsanalyse der einzelnen Eingabeparameter, wie beispielsweise hydraulische Durchlässigkeit und thermische Leitfähigkeit. Die Ergebnisse zeigen deutliche Abweichungen zwischen den einzelnen analytischen Modellansätzen. Der Vergleich mit Felddaten gibt schließlich Erkenntnisse, in wieweit sich diese Temperaturveränderung stationär ausbildet und überhaupt analytisch berechnet werden kann. Mit diesen Ergebnissen können im Rahmen rechtlicher Regulierungen genauere Abschätzungen im Vorfeld getroffen werden. Im Weiteren werden Empfehlungen gegeben, welche der analytischen Lösungen in Abhängigkeit vom Untergrund für eine optimale Berechnung zu verwenden sind.

5.1 Theorie

Die Temperaturentstehung, die von geothermischen Systemen verursacht wird, kann unter Berücksichtigung bestimmter Annahmen durch spezielle analytische Lösungen als auch numerische Modelle beschrieben werden. Eine Übersicht über numerische

Simulationsmodelle, die in der oberflächennahen Geothermie verwendet werden können, sind in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Potentielle numerische Simulationsmodelle für den Einsatz in der oberflächennahen Geothermie (nach Hecht-Méndez et al., 2010).

Modell	Num. Methode	Verfügbarkeit	Dimensionen	Literatur
AST/TWOW*	FD	Kommerziell	3D	Schmidt und Hellström (2005)
COMSOL*	FE	Kommerziell	3D	Holzbecher und Kohfahl (2008)
FEFLOW*	FE	Kommerziell	2D, 3D	Diersch (2002)
FRACHEM	FE	Wissenschaftlich	3D	Bächler (2003)
FRACture*	FE	Wissenschaftlich	3D	Kohl und Hopkirk (1995)
OpenGeoSys	FE	Wissenschaftlich	3D	Kolditz et al. (2001)
HEATFLOW*	FE	Frei	1D, 2D, 3D,	Molson und Frind (2002)
HST2D/3D	FD	Kommerziell	2D, 3D	Kipp (1986)
HYDRUS-2D	FE	Kommerziell	2D	Šimůnek et al. (1999)
SEAWAT	FD	Frei	3D	Langevin et al. (2008)
SHEMAT*	FD	Kommerziell	3D	Clauser (2003)
SUTRA	FE/FD	Frei	2D, 3D	Voss und Provost (2002)
THETA*	FD	Wissenschaftlich	3D	Kangas (1996)
TOUGH2	FD	Kommerziell	1D, 2D, 3D	Pruess et al. (1996)
TRADIKON 3D*	FD	Frei	3D	Brehm (1989)
VS2DH	FD	Frei	2D	Healy und Ronan (1996)

* Simulationen im Bereich der oberflächennahen (untiefen) Geothermie bereits durchgeführt.

Für die Berechnung der Temperaturfahne, die von offenen geothermischen Anlagen verursacht werden, wurden explizit die analytischen Lösungen aus Rauch (1992), Ingerle (1988) und aus dem Leitfaden Baden-Württembergs über die Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen (Umweltministerium, 2009) betrachtet. Die analytischen Lösungen zur Berechnung der Temperaturfahne von Erdwärmesonden ist in Hähnlein et al. (2010) und Molina-Giraldo et al. (2011) detailliert beschrieben und ist daher nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Im empirischen Ansatz nach Rauch (1992) wird auf die Änderungen der Fließrichtung des Grundwassers durch saisonale Schwankung verstärkt geachtet. Er kombiniert die saisonale Schwankung mit der Dispersion zu dem sogenannten Verschwenkungswin-

kel β . Dabei geht er vom Fick'schen Gesetz der molekularen Diffusion aus, um eine Näherungslösung für den Wärmetransport zu erlangen. In seinem Ansatz behandelt Rauch (1992) den Schluckbrunnen als horizontale Wärmequelle der Breite B . Die entwickelte empirische Näherungslösung zur Berechnung der Temperaturentwicklung in x -Richtung lautet wie folgt (Rauch, 1992):

$$T(x) = \frac{B \times T_E + 2 \times (x \times \tan \beta + \sqrt{x}) \times T_u}{B + 2 \times (x \times \tan \beta + \sqrt{x})} \quad (1)$$

Der Ansatz nach Ingerle (1988) betrachtet die horizontale Ausbreitung der Temperaturfahne, unter Berücksichtigung des vertikalen Wärmeeintrags der Oberfläche. Die Temperatur des Untergrundes lässt sich nach Ingerle (1988) durch folgende Gleichung iterativ berechnen.

$$T_{i+1} = \frac{T_i + \frac{2 \cdot \Delta x \cdot \tan(\beta)}{B_i} \cdot T_u + \frac{\Delta x \cdot \varepsilon \cdot \left(1 + 0,5 \cdot \frac{2 \cdot \Delta x \cdot \tan(\beta)}{B_i}\right)}{2000 \cdot q} \cdot (2 \cdot T_0 - T_i)}{1 + \frac{2 \cdot \Delta x \cdot \tan(\beta)}{B_i} + \frac{\Delta x \cdot \varepsilon \cdot \left(1 + 0,5 \cdot \frac{2 \cdot \Delta x \cdot \tan(\beta)}{B_i}\right)}{2000 \cdot q}} \quad (2)$$

Wobei B ebenfalls der Entnahmebreite des Brunnens beziehungsweise der Fahnenbreite am Anfang des jeweiligen Einheitsvolumens entspricht, T_0 ist die ungestörte Grundwassertemperatur, T_i steht für die Eingangstemperatur des Einheitsvolumens, der Winkel β entspricht dem Verschwenkungswinkel, ε der thermischen Leitfähigkeit des Untergrundes und q der Darcy Geschwindigkeit.

Im Oktober 2009 wurde vom Umweltministerium Baden-Württemberg der Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen veröffentlicht (Umweltministerium, 2009). Dieser beinhaltet ebenfalls eine analytische Lösung zur Berechnung von Temperaturfahnen. Diese wurde von der Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH im Auftrag des Landes Baden-Württemberg entwickelt, die im Folgenden dargestellt wird.

$$\Delta T(x, y, t) = \frac{Q\Delta T_E}{4n_e m v_a \sqrt{\pi\alpha_T}} \cdot \exp\left(\frac{x-r}{2\alpha_L}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r-v_a t/R}{2\sqrt{v_a\alpha_L t/R}}\right) \quad (3)$$

mit : $r = \sqrt{x^2 + y^2} \frac{\alpha_L}{\alpha_T}$

Die Gleichungen (1), (2) und (3) wurden in dieser Studie miteinander verglichen und versucht mit den Felddaten im Testfeld Kilchberg zu validieren.

5.2 Testfeld Kilchberg

Das Testfeld Kilchberg bei Tübingen befindet sich geologisch im Bereich der Neckartal-*aue* (Abb. 1). Hier befindet sich oberflächennah der sogenannte Auelehm, der erst wenige 100 Jahre alt ist, da der Neckar erst seit Ende des 19. Jahrhunderts wirtschaftlich genutzt wird. Der Auelehm ist im Bereich Kilchbergs zwischen einem und zwei Meter mächtig. Darunter befindet sich die sogenannte Niederterrasse aus Hangschutt, verschwemmtem Verwitterungslehm und Fließerden des südlich gelegenen Rammert aus dem Pleistozän. Während der Würmeiszeit tauten die Hänge des Rammert in den Sommermonaten teilweise auf und es kam zu Solifluktion und lagerte sich unter anderem in diesem Bereich ab. Hierdurch wurde der Verlauf des Neckars nach Norden verlagert und das z. T. tiefe Rinnensystem des damals mäandrierenden Neckars mit den Schottern des mittleren Keupers verfüllt. Diese bestehen nach Bohrprofilen in den ersten zwei bis drei Meter aus Kiesen, die mit Tonen und Sand verfüllt sind. Darunter folgen weitere drei bis fünf Meter mit sandigen Kiesen. Der Gipskeuper, der in einer Tiefe von 8,31 m ansteht, bildet den lokalen Stauer (Berner, 2011).

Die Messstellen im Testfeld wurden mithilfe der Direct-Push Methode erstellt (Abb. 1). Mit dieser Methode war es ebenfalls möglich Proben zu nehmen und die vertikale elektrische Leitfähigkeit des Untergrunds zu bestimmen (Wallisch, 2010). Diese und weitere detaillierte Ergebnisse hinsichtlich der Geologie und Hydrogeologie können aus den Arbeiten von Berner (2011) und Wallisch (2010) entnommen werden. Bei der Auslegung des Testfeldes, insbesondere der Positionierung der Messstellen, musste ein Kompromiss aus den Anforderungen einer optimalen räumlichen Abdeckung des zu beobachteten Grundwasserleiters und der bereits vorhandenen Bebauung (z. B. Gebäude, Kanalisation, Leitungen, usw.) gefunden werden. Diese Einschränkungen erlauben daher derzeit keine zielführende Erweiterung des Testfeldes.

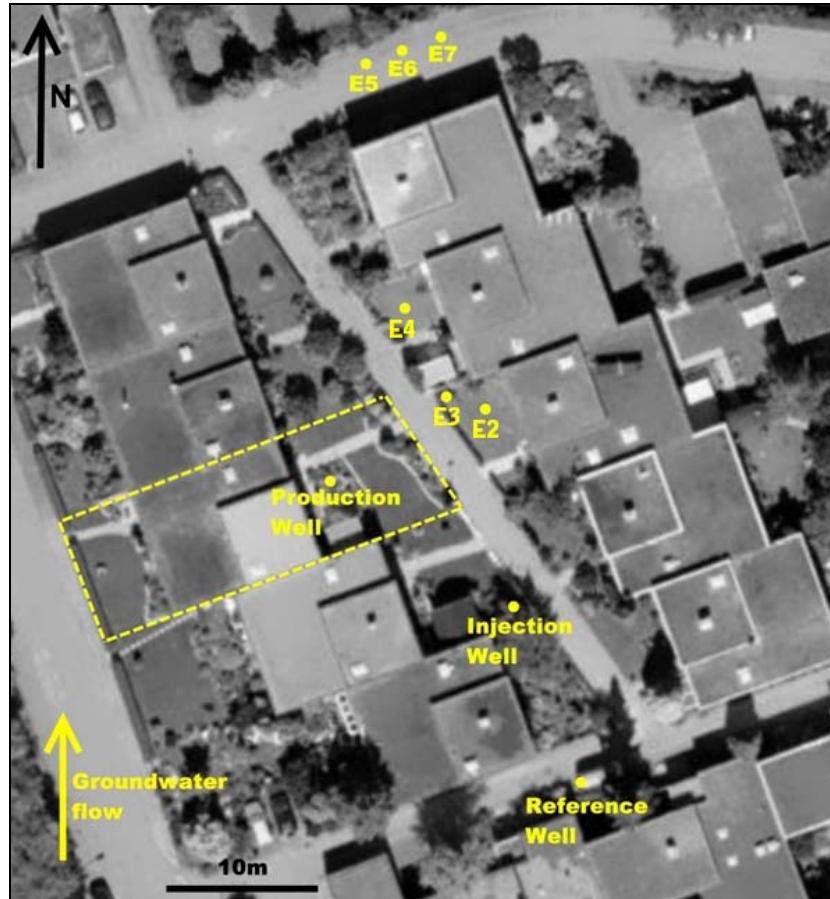


Abbildung 1: Testfeld für eine Grundwasserwärmepumpenanlage in Kilchberg bei Tübingen (Wallisch, 2010).

Die Grundwassertemperatur wurde mit einem vertikalen Abstand von 0,5 m gemessen. Die Messdaten in der Referenzmessstelle (E1) oberstromig zeigen in den ersten ein bis eineinhalb Metern der Grundwassersäule den Abkühlungstrend der Oberfläche (Abb. 2). Dieser ist schneller und ausgeprägter sichtbar als durch das Modell prognostiziert. Dies liegt darin begründet, dass die Pegelrohre nicht mit Boden gefüllt sind, welcher den Temperaturverlauf zeitlich dämpfen würde. Somit sind diese Werte für die Betrachtung der Abkühlung durch eine Grundwasserwärmepumpe (GWWP) auszuschließen. Dennoch geben die relativen Temperaturunterschiede zwischen den Pegeln Aufschluss über den Einfluss der GWWP an verschiedenen Stellen im Untersuchungsgebiet und deren Größenordnung wieder.

In fast allen Pegeln ist generell ein Abkühlungstrend bezogen auf die Referenzmessstelle (E1) von bis zu 1,1 K (Pegel E2) zu erkennen (Abb. 2). Diese Abkühlung hängt mit dem Oberflächeneinfluss und dem Betrieb der GWWP zusammen.

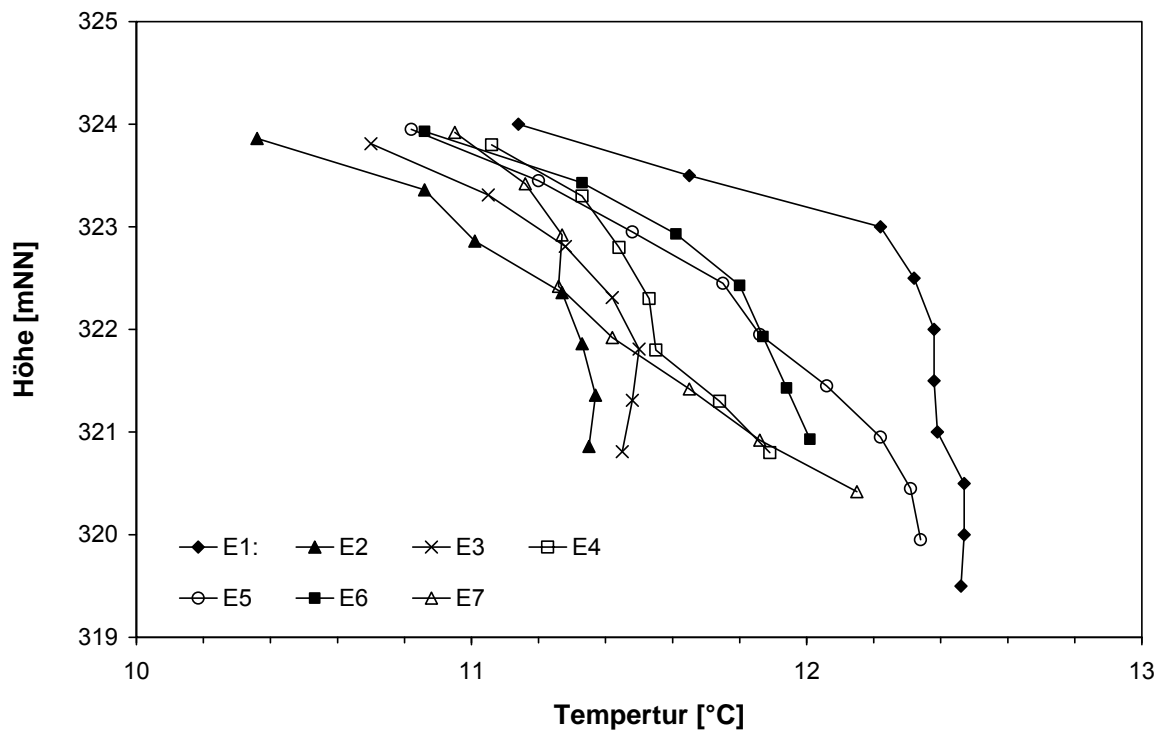


Abbildung 2: Vertikale Grundwassertemperaturprofile in den Pegeln E1 (Referenzmessstelle) bis E7 gemessen am 8. März 2010 im Testfeld Kilchberg.

5.3 Validierung

Die drei untersuchten Näherungslösungen bringen trotz vergleichbarer Eingabeparameter unterschiedliche Ergebnisse (Abb. 3). So liegt die 1 K Grenze der Näherung nach Rauch (1992) bei ca. 20 m, nach Ingerle (1988) bei ca. 40 m und nach dem Berechnungsprogramm des Leitfadens (Umweltministerium, 2009) sogar bei ca. 80 m im Abstrom der GWWP. In den räumlich zum Injektionsbrunnen nächsten Messstellen E2, E3 und E4 wurden Temperaturveränderungen unabhängig vom Oberflächeneinfluss gemessen, die um bis zu 1,1 K von der Referenztemperatur (12,5°C) abweichen. Somit liegen diese Messstellen im Bereich der Temperaturanomalie.

Die während der Temperaturmessung gewonnenen Grundwasserhöhen zeigen eine N-NE Grundwasserfließrichtung anstatt der aus vorherigen Studien (z. B. Grundwassergleichenplan des LGRB) abgeleitete nordwärts gerichtete Grundwasserfließrichtung. Da die Anordnung der Messpegel damit nicht den gesamten Bereich der Temperaturfahne abdeckt, lässt sich die Geometrie der Temperaturfahne nur bedingt beurteilen und lässt daher keine eindeutige Validierung der analytischen Modelle zu.

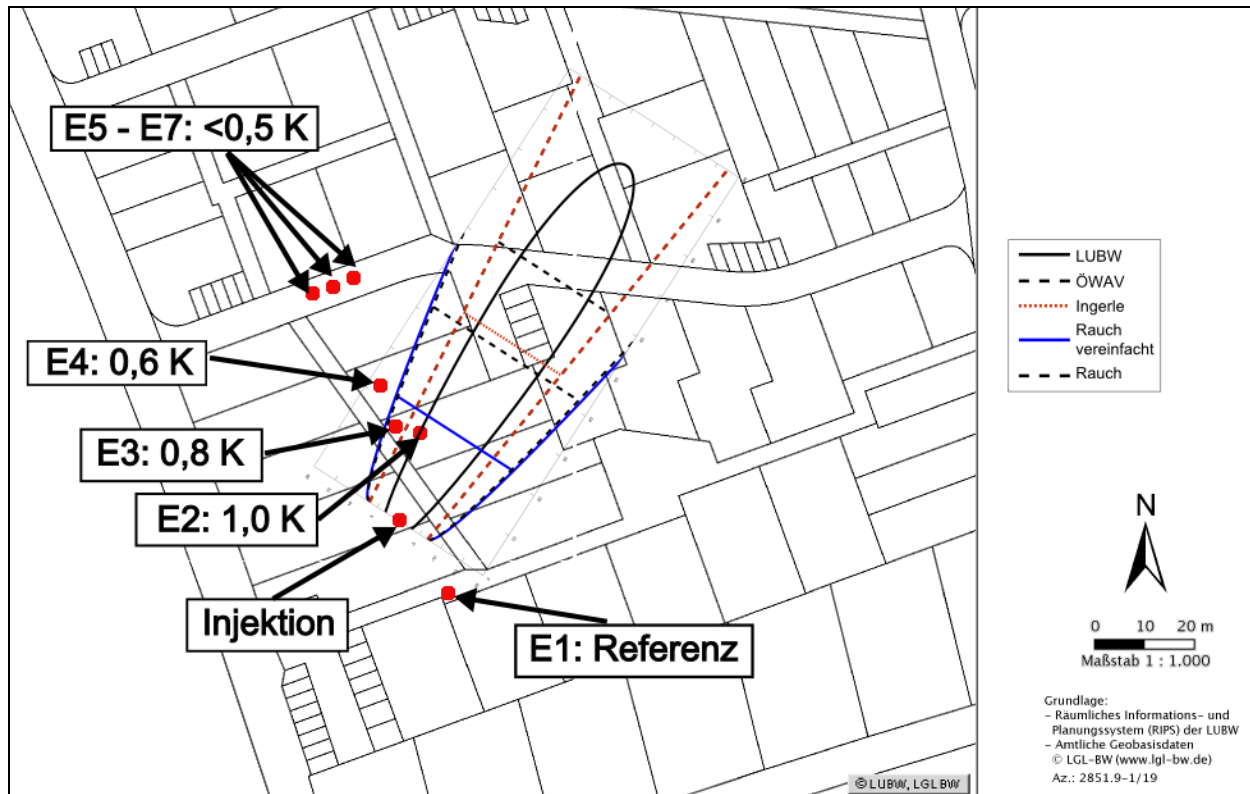


Abbildung 3: Vergleich aller Näherungslösungen mit dem Ergebnis der 1 K-Kennlinie in gemessener Grundwasserfließrichtung mit den maximalen Temperaturunterschieden zur Referenzmessstelle E1 (Berner, 2011).

5.4 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Validierung der analytischen Lösungen für Grundwasserwärmepumpenanlagen wurde das Testfeld Kilchberg bei Tübingen erfolgreich installiert und Temperaturprofile in 7 Messstellen gemessen. Mithilfe von Wiederholungsmessungen in diesen Messstellen konnte eine Abkühlung des Grundwassers aufgrund der GWWP von maximal 1,1 K festgestellt werden. Die analytischen Lösungen nach Ingerle (1988), Rauch (1992) und dem Leitfaden des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft in Baden-Württemberg konnten aufgrund der eingeschränkten Eingrenzung der Temperaturfahne nur bedingt angewendet werden. Nichtsdestotrotz zeigen die drei verwendeten analytischen Lösungen trotz vergleichbarer Eingabeparameter teilweise doch recht erhebliche Unterschiede bei der Berechnung der Temperaturentwicklung im Grundwasser. Die Ergebnisse zeigen jedoch sehr deutlich, dass vor allem die vor der Errichtung des Testfeldes bekannte Grundwasserfließrichtung trotz eines vorhandenen Grundwassergleichenplans die größte Unsicherheit bei der Simulation der Temperaturfahne im Grundwasser unabhängig von der analytischen Lösung darstellt.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt Herrn Helmar Engels für die Bereitstellung aller Daten seiner Grundwasserwärmepumpenanlage, die er seit 1980 in Betrieb hat. Ein aufrichtiger Dank geht an Herrn Jens Wallisch und Herrn Marc Berner für die Durchführung der Feldarbeiten, die erhobenen Daten und Auswertungen. Herr Valentin Wagner bedankt sich für die finanzielle Unterstützung durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (BW-PLUS) und Herr Jozsef Hecht-Méndez möchte sich ebenfalls für die Finanzierung seiner Promotion durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bedanken (IPSWaT).

Literatur

- Berner, M. (2011) Berechnung von Temperaturfahnen von offenen Grundwasserwärmepumpenanlagen. Diplomarbeit, Universität Tübingen.
- Hähnlein, S., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P., Grathwohl, P. (2010) Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden. *Grundwasser*, 15, 123–133.
- Hecht-Méndez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P. (2010) Evaluating MT3DMS for heat transport simulation of closed shallow geothermal systems. *Ground Water*, 48 (5), 741–756.
- Ingerle, K. (1988) Beitrag zur Berechnung der Abkühlung des Grundwasserkörpers durch Wärmepumpen. *Österreichische Wasserwirtschaft*, Jg. 40 H. 11/12.
- Molina-Giraldo, N., Blum, P., Zhu, K., Bayer, P., Fang, Z. (2011) A moving finite line source model to simulate borehole heat exchangers with groundwater advection. *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 12, 2506–2513.
- Rauch W. (1992) Ausbreitung von Temperaturanomalien im Grundwasser. Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, Universität Innsbruck. ISBN 3-900259-25-9.
- Umweltministerium (2009) Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- Wallisch, J. (2010) Techno-economic and spatial analysis of a groundwater heat pump system in South Germany. Diplomarbeit, Universität Tübingen.

6 Thermisch genutzte P&T-Anlagen - Potentiale und Risiken

Bernd Flemisch, Felix Bode

Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung, Universität Stuttgart

bernd.flemisch@iws.uni-stuttgart.de

Jürgen Braun,

VEGAS Universität Stuttgart

6.1 Einleitung

Die Grundwassersanierung bzw. –sicherung mit Hilfe der „Pump-and-Treat“-Technologie erfolgt an einer Vielzahl von Standorten weltweit. Für eine ökonomisch sinnvolle Symbiose zwischen geothermischer Nutzung und Sanierung müssen eine Vielzahl an Faktoren berücksichtigt werden. In dieser Arbeit sollen erste Schritte zur Charakterisierung der Potenziale und Risiken thermisch genutzter P&T-Anlagen unternommen werden. Hierbei wird insbesondere auf die Modellierung der relevanten Prozesse eingegangen. In den folgenden Abschnitten wird zunächst ein Modellszenario für die Identifizierung von Parametern, die für den Wärmetransport relevant sind, entwickelt. Anschließend werden die verwendete Software DuMu^x und die daraus benutzten numerischen Modelle kurz vorgestellt. Nach einer Darstellung der Ergebnisse der Parameteruntersuchung wird abschließend ein kurzer Ausblick auf das weitere Vorgehen gegeben.

6.2 Identifizierung der für den Wärmetransport relevanten Parameter

Als erster Schritt für eine Quantifizierung der Potenziale und Risiken thermisch genutzter P&T-Anlagen wird der Einfluss mehrerer typischer Parameter auf den Wärmetransport eines offenen flachen geothermischen Systems untersucht. Im Folgenden wird das Basisszenario vorgestellt, eine Übersicht über die variierten Parameter findet sich in Tabelle 1. Das Simulationsgebiet besitzt eine laterale Ausbreitung von 100x50m, die Mächtigkeit der gesättigten Zone ist 10m. Initial besitzt der Aquifer eine Temperatur von 12°C, die Fließgeschwindigkeit der Grundströmung beträgt $v_{x,0} = 0,2\text{m/d}$ von links nach rechts. Die hydraulische Leitfähigkeit des Aquifers wird auf $k_x = 10^{-3}\text{m/s}$ in lateraler und auf $k_z = 2 \cdot 10^{-4}\text{m/s}$ in transversaler Richtung gesetzt, die Wärmeleitfähigkeit und –kapazität mit $2,2\text{W/(m.K)}$ bzw. $1,8 \text{ MJ/(m}^3\text{.K)}$ angenommen. 25m vom linken Rand entfernt wird wärmeres Wasser mit einer Temperatur von $T_i = 16^\circ\text{C}$ und einer Pumprate von $q = 1,5\text{l/s}$ über die gesamte Höhe injiziert und 25m vom rechten Rand entfernt das dort ankommende Wasser mit der gleichen Rate entnommen. Als Randbedingungen

wird oben und unten Noflow gewählt, an den Seiten wird der hydrostatische Druck und das initiale Temperaturfeld vorgegeben.

Tabelle 1: Variation der Parameter

Parameter	Einheit	Basiswert	Maximalwert	Minimalwert
Hydr. Leitfähigkeit k_x	m/s	10^{-3}	10^{-2}	10^{-6}
Anisotropiefaktor k_z/k_x	-	1/5	1/1	1/50
Fließgeschw. $v_{x,0}$	m/d	0,2	1	0,02
Pumprate q	l/s	1,5	15	0,15
Injektionstemperatur T_i	°C	16	22	14
Wärmeleitfähigkeit	W/(m.K)	2,2	3,0	1,5
Wärmekapazität	MJ/(m ³ .K)	1,8	2,5	0,8

6.3 Eingesetzte Software und numerische Modelle

Für die Simulation wird der Poröse-Medien-Simulator DuMu^x eingesetzt, [1], www.dumux.org. DuMu^x wird seit 2007 am Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung der Universität Stuttgart entwickelt. Die Software baut auf der PDE-Toolbox DUNE auf, [2], und stellt numerische Modelle für eine breite Palette an Problemstellungen aus dem Bereich poröser Medien zur Verfügung, beginnend mit stationärer isothermer Einphasen-Grundwasserströmung bis hin zu zeitabhängigen nichtisothermen Mehrphasen-Mehrkomponenten-Szenarien. Bisher erfolgt der Einsatz fast ausschließlich in Forschung und Lehre, es wurden aber auch bereits mehrere Industriekooperationen erfolgreich begonnen. DuMu^x wird nach dem Open-Source-Prinzip unter der GNU General Public License entwickelt, in regelmäßigen Abständen werden stabile Releases kostenfrei zum Download bereitgestellt, außerdem ist jederzeit ein Zugriff auf den aktuellsten Entwicklungsstand in Form des SVN-Repositorys möglich.

Für die oben vorgestellte Parameterstudie wird das nichtisotherme nichtmischbare Zweiphasenmodell 2_{pni} verwendet, für die geplante Berücksichtigung der Schadstoffbeseitigung wird zunächst das nichtisotherme mischbare Zweiphasenmodell 2_{p2cni} eingesetzt, später bei Bedarf die ebenfalls bereits verfügbaren Modelle mit drei Phasen und drei oder mehr Komponenten. Alle diese numerischen Modelle bauen auf einer voll impliziten Diskretisierung der Bilanzen für Phasen- bzw. Komponentenmasse und Energie auf, als Ortsdiskretisierung wird mit der Boxmethode ein Kontrollvolumen-Finite-Elemente-Verfahren eingesetzt. Die Zeitintegration erfolgt mit adaptiver Zeitschrittweitensteuerung, für die Linearisierung wird ein Newtonverfahren eingesetzt, das Lösen der linearen Gleichungssysteme erfolgt mittels eines ILU-vorkonditionierten BiCGSTAB-Verfahrens.

6.4 Ergebnisse

Alle Rechnungen wurden mit einer uniformen Gitterweite von 1m durchgeführt. Aus der initialen Lösung heraus startend wurde solange gerechnet, bis ein stationärer Zustand erreicht war. Für das Basisszenario zeigt Abbildung 1 das resultierende Temperaturfeld in der Draufsicht, Abbildung 2 einen Querschnitt.

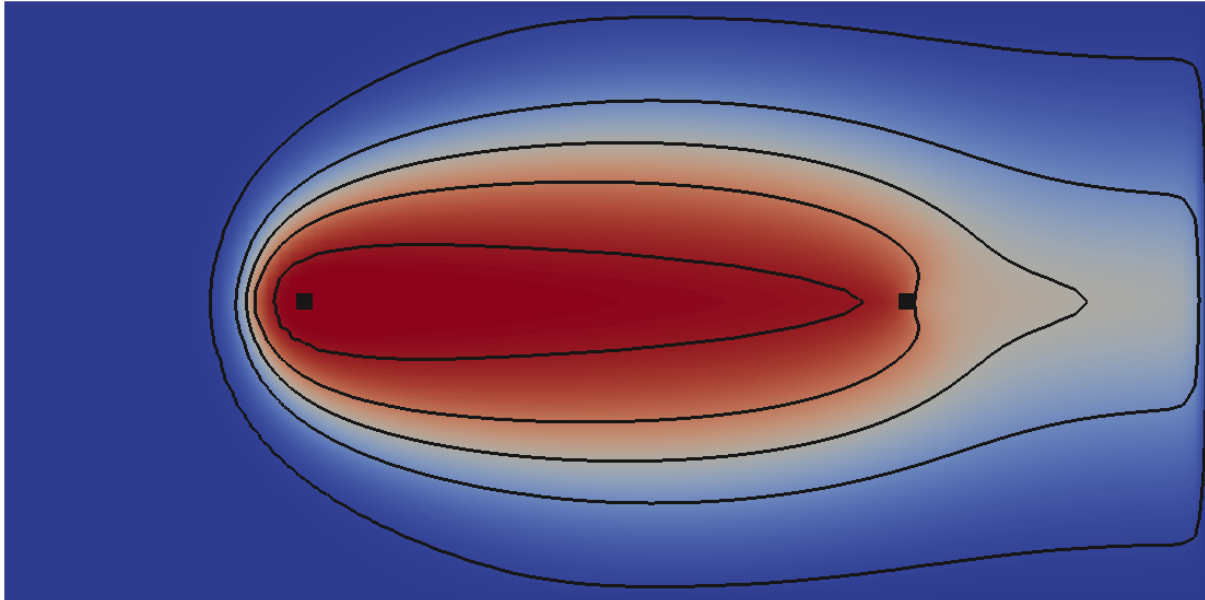


Abbildung 1: Stationäres Temperaturfeld für das Basisszenario, Draufsicht. Konturlinien bei 12.1, 13, 14, 15, 15.9 °C. Injektions- und Entnahmeklöcher sind als schwarze Quadrate gekennzeichnet.



Abbildung 2: Stationäres Temperaturfeld für das Basisszenario, Querschnitt. Konturlinien bei 12.1, 13, 14, 15, 15.9 °C. Injektions- und Entnahmeklöcher sind als schwarze Quadrate gekennzeichnet.

Es zeigt sich ein durch die Hintergrundströmung konvektionsdominiertes Temperaturfeld. Entgegen und quer zur Grundströmung ist allerdings auch eine deutliche radiale Ausbreitung um den Injektionsbrunnen herum erkennbar. Es ist offensichtlich, dass nur ein Teil der zugeführten Energie wieder durch den Entnahmeköcher extrahiert werden kann. Außerdem sind starke Einflüsse der Randbedingungen besonders am rechten Rand erkennbar. Aus Abbildung 2 wird ersichtlich, dass die Gravitation einen relativ geringen Einfluss auf das Langzeitverhalten besitzt.

Als ersten Schritt zur Quantifizierung der Parameterrelevanz zeigen Abbildungen 3-6 den Einfluss jeweils eines geänderten Parameters auf das Temperaturfeld.

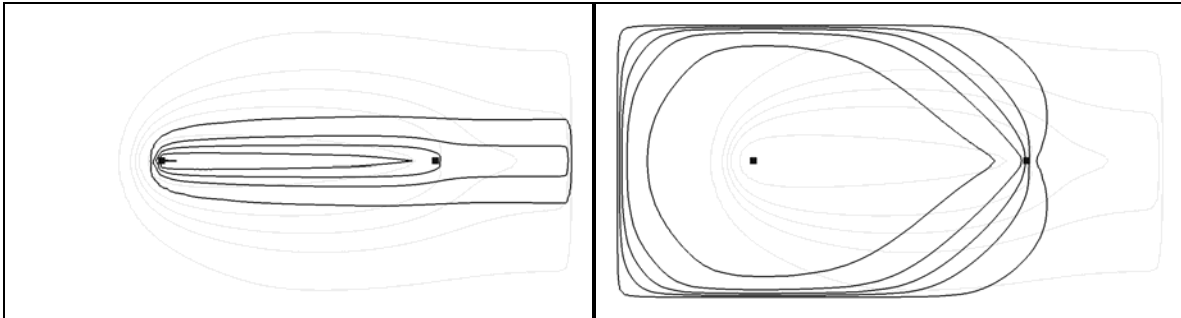


Abbildung 3: Änderung der Hintergrundfließgeschwindigkeit $v_{x,0}$. Links maximal, rechts minimal.

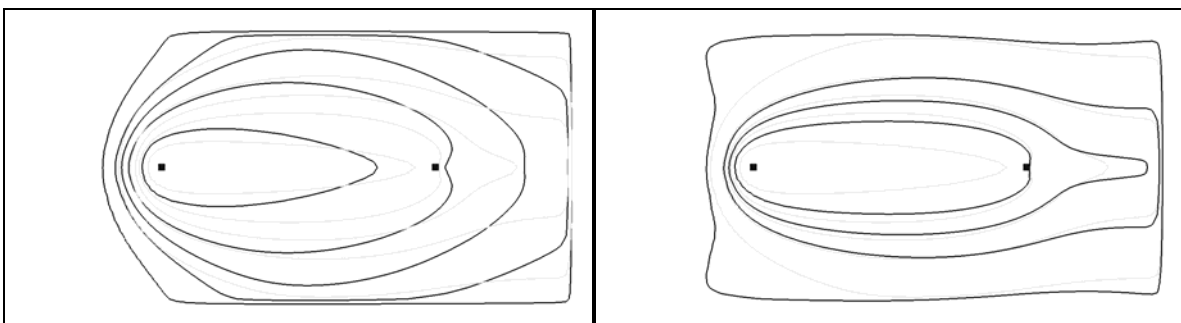


Abbildung 4: Änderung der hydraulischen Leitfähigkeit k_x . Links maximal, rechts minimal.

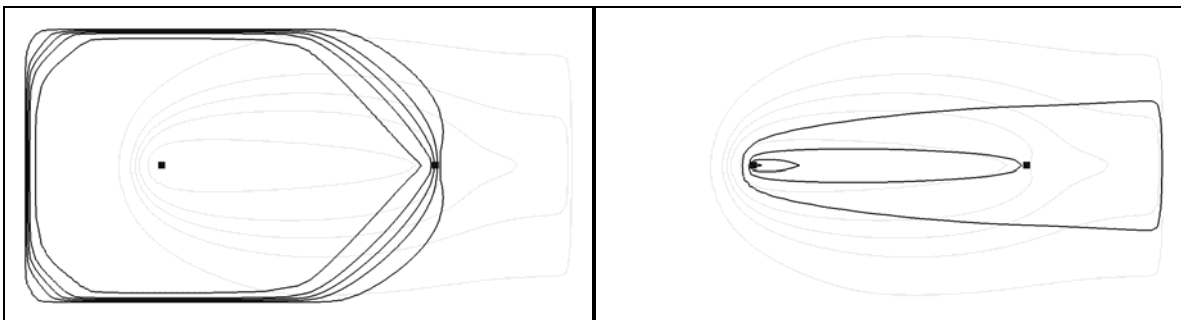


Abbildung 5: Änderung der Pumprate q . Links maximal, rechts minimal.

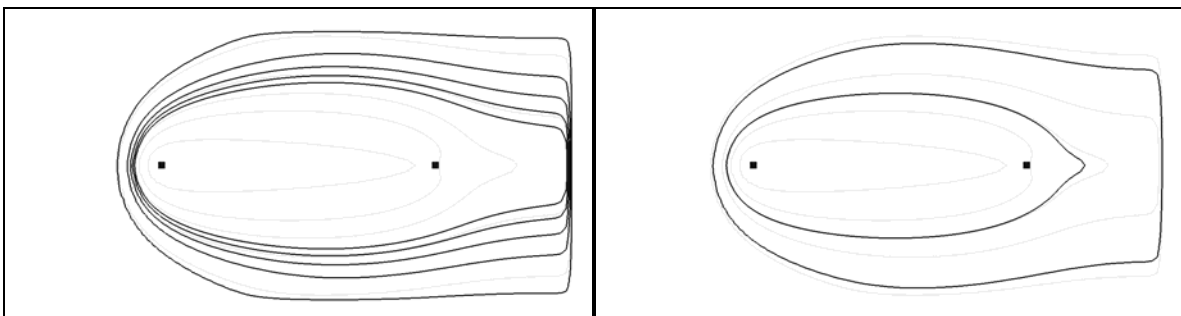


Abbildung 6: Änderung der Injektionstemperatur T_i . Links maximal, rechts minimal.

Dargestellt sind nur die Parameter, deren Änderungen einen signifikanten Einfluss auf das Temperaturfeld haben: die Hintergrundfließgeschwindigkeit $v_{x,0}$, die hydraulische

Leitfähigkeit k_x , die Pumprate q und die Injektionstemperatur T_i . Bei den anderen variierten Größen Anisotropiefaktor, Wärmeleitfähigkeit und –kapazität wurde keine nennenswerte Änderung festgestellt. Abbildung 3 macht deutlich, dass eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit der radialen Ausbreitung der Temperatur um den Injektionsbrunnen entgegenwirkt, eine Erniedrigung diese dagegen verstärkt. Im rechten Bild von Abbildung 3 wie auch in einigen darauffolgenden Bildern wird deutlich, dass das Simulationsgebiet für die entsprechende Wahl an Parametern zu klein gewählt wurde, der Einfluss der Randbedingungen ist deutlich zu groß. In Abbildung 5 zeigt sich erwartungsgemäß, dass sich auch eine Variation der Pumprate deutlich auf die radiale Ausbreitung auswirkt. Schließlich entspricht das in Abbildung 6 dargestellte Resultat einer Änderung der Injektionstemperatur ebenfalls den Erwartungen.

6.5 Ausblick: Schadstofftransport

Die Untersuchungen des vorigen Abschnitts stellen nur einen kleinen ersten Schritt auf dem Weg zur Charakterisierung der Potenziale und Risiken thermisch genutzter P&T-Anlagen dar. Nach einer weitergehenden und systematischeren Untersuchung der Parameterrelevanz für das Temperaturfeld eines offenen flachen geothermischen Systems soll der Fokus auf das damit einhergehende Sanierungspotenzial gesetzt werden. Dazu ist eine deutliche Steigerung der Modellkomplexität notwendig. Hierzu werden die Mehrphasen-Mehrkomponenten-Fähigkeiten des Simulators DuMu^x nützlich sein. Insbesondere soll die Beseitigung residuell gesättigter DNAPL-Pools durch Energiezufuhr und die Injektion von Lösungsmitteln untersucht werden.

Literatur

- [1] B. Flemisch et. al, DuMu^x: DUNE for multi-{phase, component, scale, physics, ...} flow and transport in porous media. Adv. Water Resources 2011, in press.
- [2] The DUNE Project: www.dune-project.org.

7 In-situ-Mess- und Monitoringtechniken bei Geothermieranlagen

Norbert Klaas, Gerhard Bisch, Jürgen Braun
VEGAS, Universität Stuttgart
norbert.klaas@iws.uni-stuttgart.de

7.1 Einführung

Oberflächennahe Geothermieranwendungen bieten eine Möglichkeit, die drohenden klimatischen Veränderungen durch Einsparung von fossilen Brennstoffen abzumildern. Es ist daher verständlich, dass von Seiten der Politik ein vermehrter Einsatz dieser Techniken forciert wird.

Allerdings bestehen insbesondere bei den unteren Wasserbehörden als zuständige Genehmigungsinstanzen berechtigte Bedenken – nicht nur als Ergebnis einiger spektakulärer Fehlschläge bei der Installation und dem Betrieb derartiger Anlagen. Solche Fehlschläge wurden durch entsprechende Presseberichte auch einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich und sind für eine zunehmende Skepsis in Bezug auf den vermehrten Einsatz dieser Technik verantwortlich.

Auf diese Entwicklung wurde politisch durch den Erlass von Richtlinien, mit denen ein wesentlicher Beitrag zur Erhöhung der Qualität bei der Errichtung und dem Betrieb derartiger Anlagen geleistet werden soll, bereits reagiert [1, 2, 3]. In diesen Richtlinien werden konkrete Vorgaben zur Qualitätsverbesserung bei der Installation und während des Betriebs gemacht, die unerwünschte Auswirkungen von Geothermieranlagen auf die Umwelt weitgehend verhindern sollen. Es stehen dabei Vorgaben im Vordergrund, die hydraulische Veränderungen in den betroffenen Aquiferen betreffen. Potentiell negative Auswirkungen auf die hydrochemischen und biochemischen Untergrundbedingungen werden hier kaum berücksichtigt. Es werden maximal zulässige Temperaturveränderungen genannt, jedoch sind diese in den Richtlinien verschiedener Staaten und innerhalb Deutschlands zwischen den einzelnen Bundesländern (und dort sogar zwischen den einzelnen Genehmigungsbehörden) unterschiedlich [4].

An dieser Situation ist erkennbar, dass Vorgaben teilweise auf Grund allgemeiner Besorgnisse vor unerwünschten Auswirkungen gemacht werden und weniger anhand von konkreten wissenschaftlichen Daten, mit denen die Vorgaben untermauert werden könnten. Es gibt also durchaus einen Bedarf, Geothermieranwendungen wissenschaftlich zu begleiten, die potentiellen (positiven und negativen) Auswirkungen zu erfassen und aus den Befunden wissenschaftlich fundierte Vorgaben abzuleiten. Dies würde

sowohl eine Vereinheitlichung der Vorgaben ermöglichen als auch die Gefahr unerwünschter negativer Einflüsse auf das Grundwassermilieu vermindern. Dass solche Gefahren bestehen können, wurde zum Beispiel von Brielmann et al. beschrieben und durch Untersuchungen belegt [5].

Das vom Land Baden-Württemberg finanzierte Forschungsprojekt „geomatrix.bw, Teil 3: Kosteneffiziente Messsysteme und Konzepte zur Überwachung oberflächennaher Erdwärmennutzung“ hat zum Ziel, mittels spezieller Messfelder reale Daten an Feldstandorten zu gewinnen und damit zum einen belastbare Werte zu erheben, mit denen die Temperaturveränderungen in Abhängigkeit vom Anlagenbetrieb beschrieben werden können. Zum anderen soll die Prognosefähigkeit bestehender numerischer Modelle mit diesen Felddaten als Kalibriergrößen verbessert werden. Erste Ergebnisse des in Abbildung 1 dargestellten Verbundvorhabens aus der Fachhochschule Stuttgart, der Eberhard Karls Universität Tübingen bzw. dem Karlsruher Institut für Technologie sowie der Universität Stuttgart, VEGAS, werden nachfolgend vorgestellt.

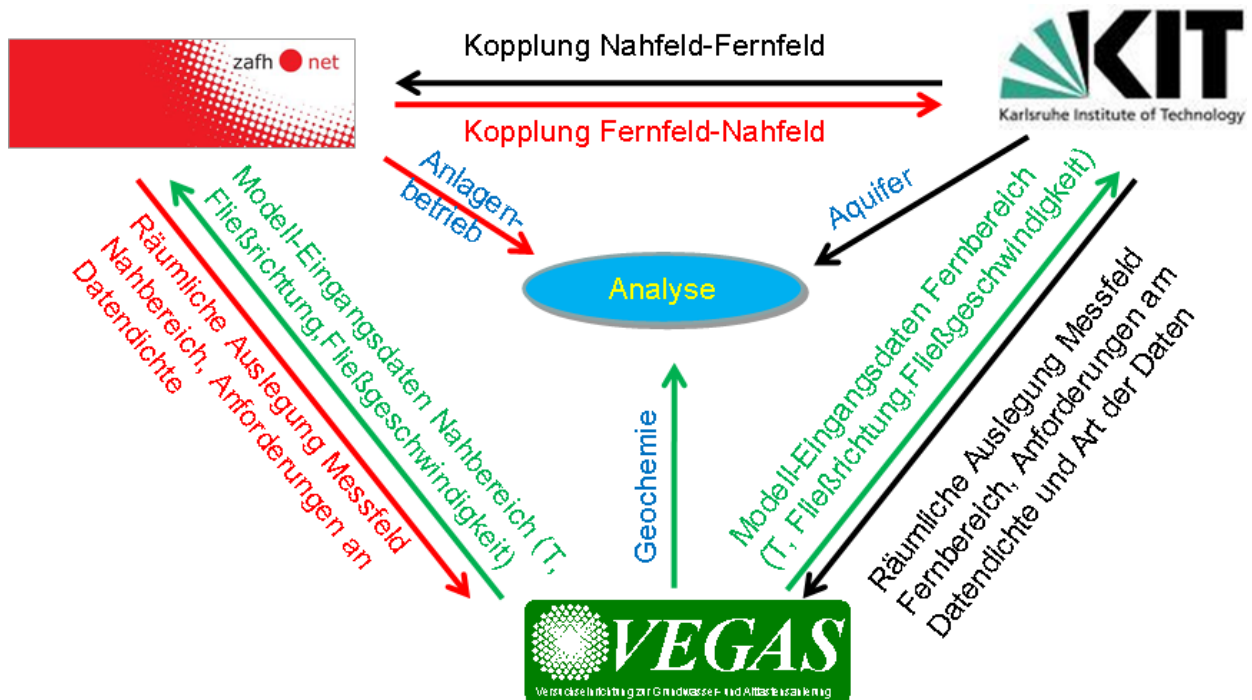


Abbildung 1: Struktur des Verbundvorhabens "geomatrix.bw"

7.2 Mess- und Probennahmetechniken

7.2.1 Temperatur

Zur Messung der Temperatur wurde eine spezielle Datenerfassung realisiert, die auf PT1000-Temperatursensoren basiert und eine zeitlich und räumlich hochaufgelöste Aufnahme der Temperaturprofile im Untergrund ermöglicht. Je nach Einsatzort können

die Daten direkt auf einem Computer aufgezeichnet werden oder sie werden intern in einem Datenlogger auf SD-Karten gespeichert (siehe Abbildung 2).

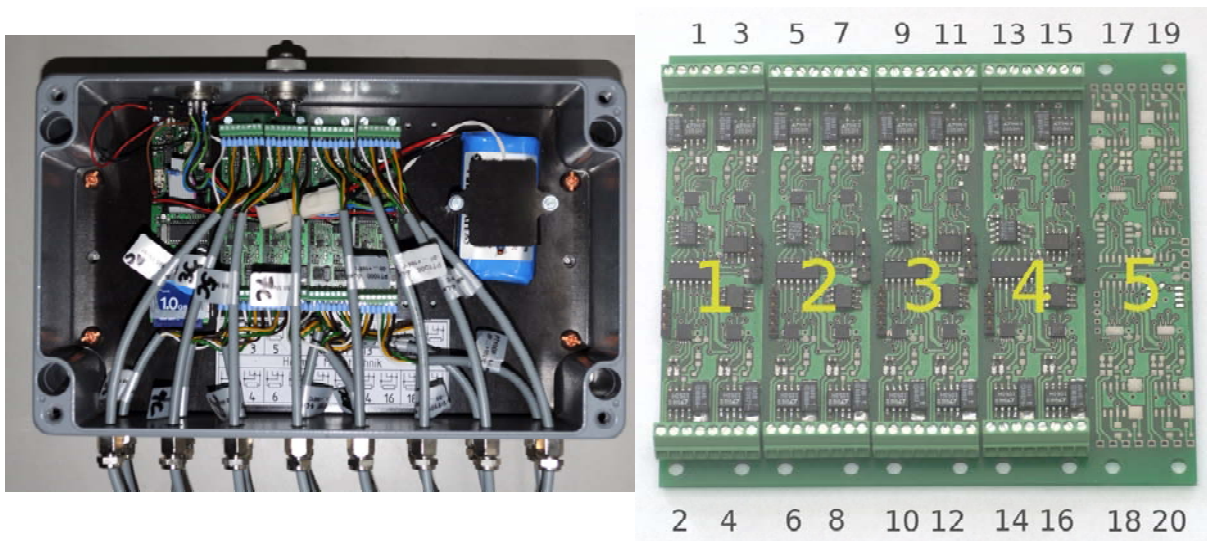


Abbildung 2: Datenlogger (Links) und Platinenlayout (rechts) für die Temperaturmessung

Zusätzlich zu den Temperaturdaten werden an den Feldstandorten auch Drucksensoren im Grundwasser eingebaut, um die Grundwasserfließrichtung zu erfassen. Diese ist für die Beurteilung der Wärmeausbreitung wesentlich. Eine komplette Datenerfassung inklusive der Überwachung der Erdwärmesonden zeigt Abbildung 3.



Abbildung 3: Datenerfassung eines Geothermiefeldes

7.2.2 Hydrochemie

Zur Ermittlung der Auswirkung von Geothermieranlagen auf die Hydrochemie des Grundwassers werden spezielle Probennahmesysteme eingesetzt, die eine schonende Entnahme von Proben aus dem Grundwasserkörper ermöglichen. Diese Probennahmesysteme basieren auf Minidruckpumpen, die mit Stickstoff betrieben werden (siehe Abbildung 4).

Diese Pumpen werden zusammen mit den Temperatursensoren an verschiedenen Stellen im Zu- und Abstrom von Geothermiesonden fest in den Aquifer eingebaut. Es können so Proben aus dem Grundwasserleiter entnommen werden und Veränderungen in Abhängigkeit vom Anlagenbetrieb (Heizen oder Kühlen) erfasst werden.

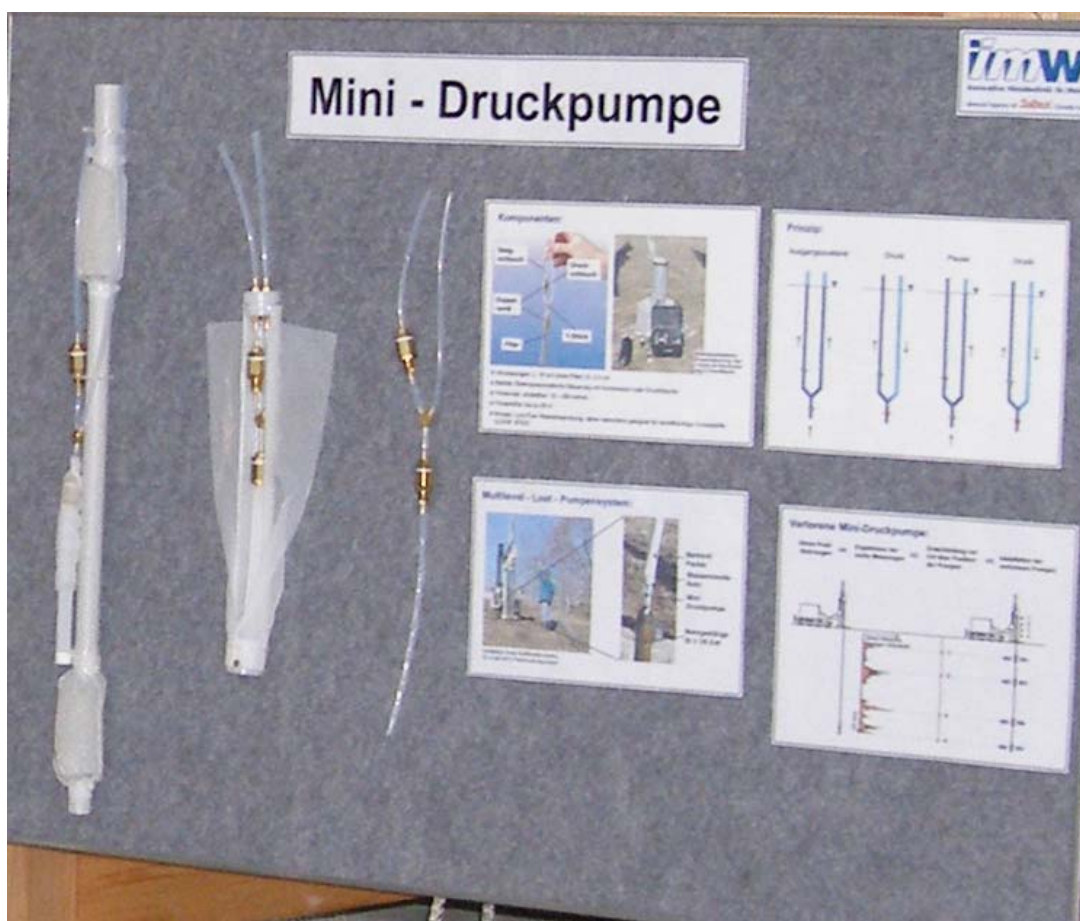


Abbildung 4: Prinzip Minidruckpumpe

7.3 Feldanwendungen

Obwohl es sich als recht schwierig erwies, geeignete Standorte zu finden, konnten die beschriebenen Mess- und Probennahmesysteme an verschiedenen Standorten installiert und ein entsprechendes Monitoring durchgeführt werden. Es gelang Messungen an offenen und geschlossenen Anlagen durchzuführen.

7.3.1 Standort Kilchberg

Beim Standort Kilchberg handelt es sich um eine offene Anlage, die in einem flachen, geringmächtigen Aquifer liegt (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Feldstandort Kilchberg

Wegen einer Stauhaltung in der Nähe kam es während des Betriebs des Messfelds zu einer Veränderung der Grundwasserfließrichtung gekommen, die jetzt eher in nordöstlicher Richtung verläuft. Dadurch muss das ursprüngliche Messfeld um weitere Bohrungen ergänzt werden. Leider stehen hier somit derzeit noch keine Messdaten zur Verfügung.

7.3.2 Standort Bad Wurzach

Der Standort Bad Wurzach ist das Gelände einer Bohrfirma, die eine geschlossene Geothermieanlage betreibt. Hier wurde ein Messfeld im Abstrom installiert, das seit Herbst 2010 in Betrieb ist. Beispielhaft ist in Abbildung 6 die Temperaturverteilung während der Heizphase im Winter 2010/2011 dargestellt. Trotz einer relativ hohen Abstandsgeschwindigkeit von ca. 1 m pro Tag ist nur eine geringe Ausbreitung der Wärmefront zu erkennen.

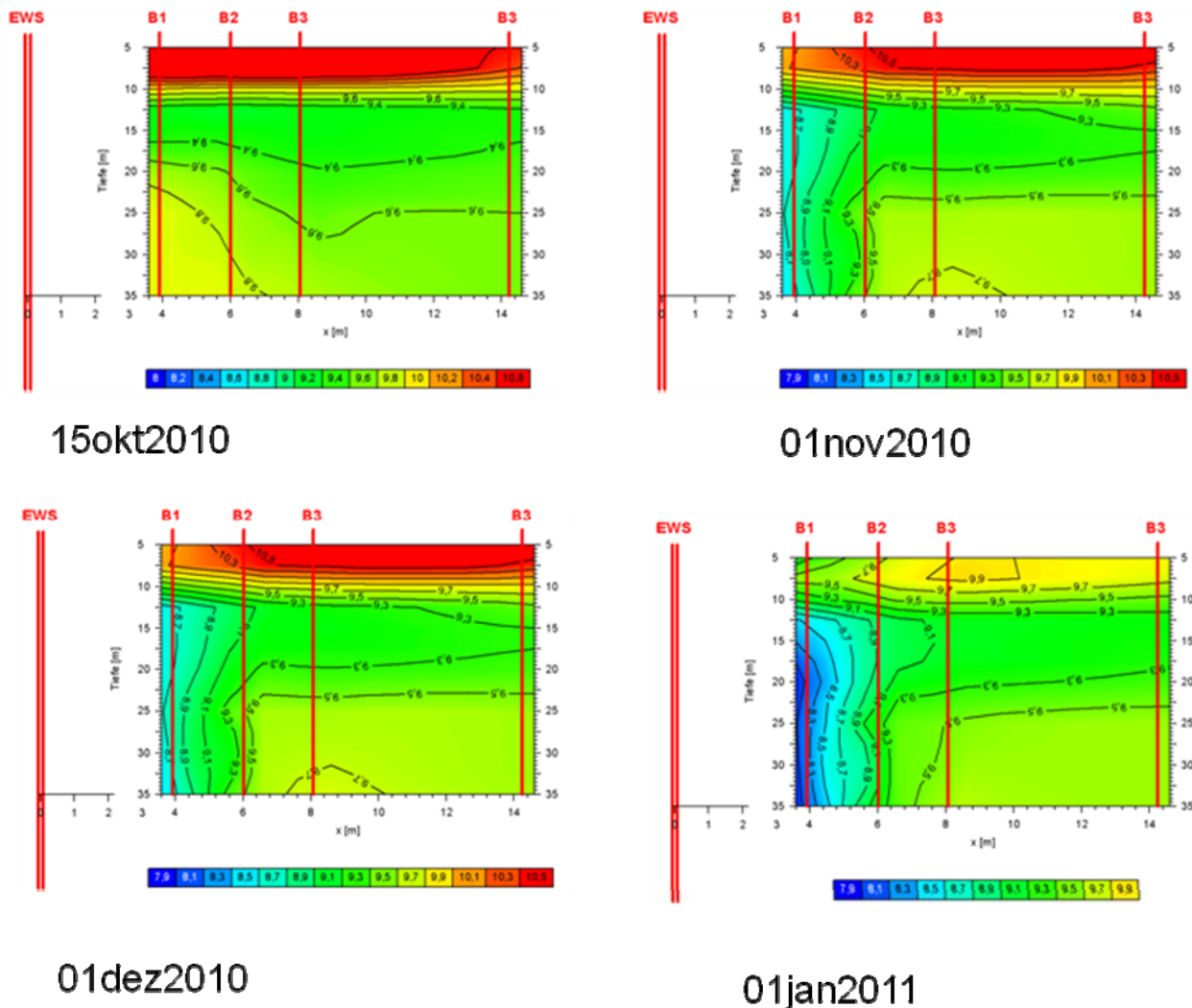


Abbildung 6: Temperaturentwicklung im Abstrom einer Erdwärmesonde beim Heizbetrieb

7.3.3 Standort VEGAS

Ursprünglich nicht geplant war die Einbeziehung des VEGAS-Großbehälters in die Untersuchungen. Es hat sich aber herausgestellt, dass für die numerischen Modelle eine höhere Flexibilität in Bezug auf den Heiz- und Kühlbetrieb, bzw. in Bezug auf Lastwechsel wünschenswert wäre. Dazu kamen die erheblichen Schwierigkeiten bei der Auswahl von geeigneten Testfeldern und zeitliche Verzögerungen bei der Installation der Testfelder. Diese Punkte führten zur Entscheidung, das Schichtmodell im VEGAS Großcontainer mit insgesamt 4 Geothermiesonden und entsprechender Messtechnik zu bestücken. Hier ist es nun möglich innerhalb von wenigen Tagen die Betriebsbedingungen zu variieren und Messzyklen durchzuführen. Es lassen sich auch Randbedingungen wie die Strömungsgeschwindigkeit in gewissen Grenzen beliebig verändern und so die Auswirkung auf die Temperaturverteilung untersuchen.

Abbildung 7 zeigt ein Experiment, das 22 Tage lief und bei dem eine Grundströmung von 0,4 m/d von links nach rechts angelegt wurde. Die schrägen Linien geben den Verlauf der schräg einfallenden Schichten groberen und feineren Sands wider. Auch hier ist ein starker Einfluss der Konduktion gegeben, erkennbar an der Temperatursausbreitung gegen die Strömung.

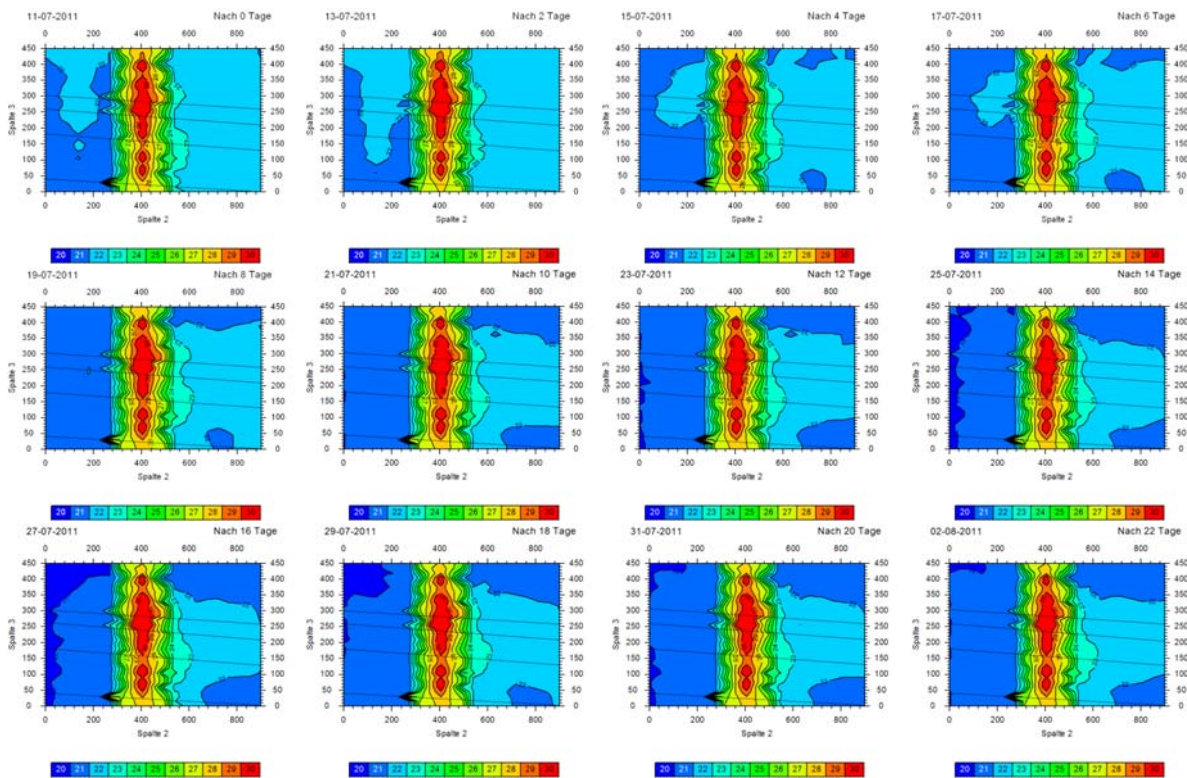


Abbildung 7: Temperatursausbreitung um eine Erdwärmesonde im VEGAS Großbehälter (Kühlbetrieb)

7.4 Numerische Modelle

Die Feldstandorte werden von der Universität Karlsruhe und der Fachhochschule Stuttgart numerisch begleitet. Dabei zielen die verwendeten Modelle des KIT auf den weiteren Abstrom ab, während die Modelle der FH Stuttgart das Nahfeld der Erdwärmesonden sowie den Anlagenbetrieb im Fokus haben. Erste Berechnungen des VEGAS Großbehälters durch das KIT zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gefundenen Temperaturverteilungen (siehe Abbildung 8).

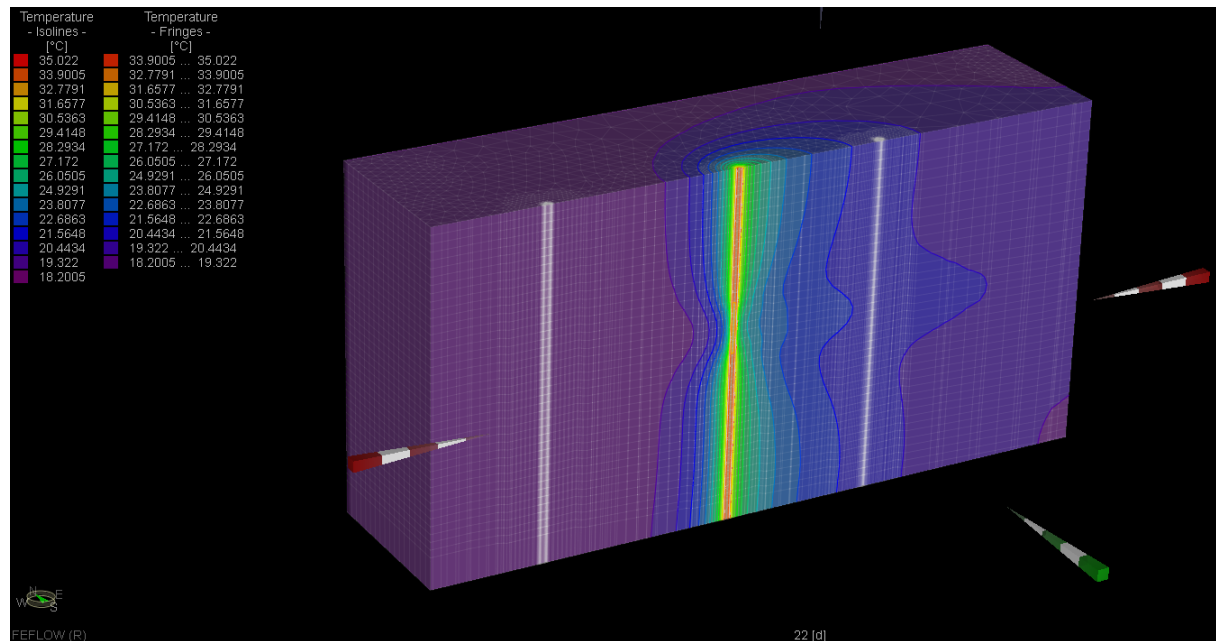


Abbildung 8: Modellrechnung der Temperaturverteilung im VEGAS Großbehälter

7.5 Ergebnisse und Ausblick

Die bisher vorliegenden Daten lassen vermuten, dass die (konvektive) Wärmeausbreitung wesentlich geringer ist als erwartet. Um wirklich verlässliche Aussagen über die Ausbreitung der Wärmefahnen sowie die Auswirkungen auf die betroffenen Grundwasserleiter machen zu können, ist allerdings eine wesentlich längere Beobachtungsdauer erforderlich. Nachdem die Projektlaufzeit des laufenden Forschungsvorhabens leider endet, bleibt zu hoffen, dass sich die Möglichkeit ergibt, Mittel für eine Fortführung der Untersuchungen zu bekommen.

Literatur

- [1] Umweltministerium Baden-Württemberg (2005): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden.
- [2] Umweltministerium Baden-Württemberg (2008): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmekollektoren.
- [3] Umweltministerium Baden-Württemberg (2011): Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden.
- [4] Hähnlein, Stefanie, Blum, Philipp, Bayer, Peter (2011): Oberflächennahe Geothermie – aktuelle rechtliche Situation in Deutschland. Grundwasser **16**, 69-75.

- [5] Hähnlein, Stefanie, Blum, Philipp, Bayer, Peter (2011): Oberflächennahe Geothermie und ihre potentiellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. Grundwasser **16**, 77-91.

Finanzierung

Das Forschungsprojekt ZO4E 28002 „geomatrix,bw, Teil 3: Kosteneffiziente Messsysteme und Konzepte zur Überwachung oberflächennaher Erdwärmennutzung“ wird vom Land Baden-Württemberg, vertreten durch das Umweltministerium, jetzt Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, finanziert.

8 Stand der Messtechnik bei der Qualitätsüberprüfung der EWS-Hinterfüllung

André Voutta

A. Voutta Grundwasserhydraulik, Herrenberg

avoutta@avoutta.de

Neue Messmethoden ermöglichen eine Überprüfung der Zementationsqualität von Erdwärmesonden sowie deren mögliche Auswirkung auf die Umgebung

8.1 Einführung

Nach dem Abteufen einer Bohrung für eine Erdwärmesonde und dem Einbringen der Doppel-U-Sonde muss der verbleibende Ringraum wieder verschlossen werden. Üblicherweise wird dazu eine speziell für diese Anforderungen angemischte Zementsuspension im sogenannten Kontraktorverfahren eingebracht. Im Idealfall wird dabei die Bohrung von unten nach oben mit dieser Zementsuspension verfüllt. Tritt diese Suspension an der Oberfläche aus der Bohrung aus, kann man davon ausgehen, dass der gesamte Ringraum der Bohrung verfüllt ist.

Nun können aber bestimmte geologische bzw. grundwasserhydraulische Rahmenbedingungen dazu führen, dass innerhalb der Bohrung Verhältnisse auftreten, welche die Verfüllung der Bohrung erschweren und sogar unmöglich machen.

Während Hohlräume in aller Regel schon beim Bohrfortschritt erkannt werden, sind Grundwasserzutritte etwas schwerer zu erkennen. So kann es dazu kommen, dass aufgrund solch widriger Bedingungen Teile der Hinterfüllung verlagert werden und nicht mehr zur Abdichtung der Bohrung zur Verfügung stehen.

8.2 Prinzip der Identifikation von Fehlstellen

Bevor man sich auf die Suche nach einer geeigneten Messtechnik für die Identifikation von Fehlstellen macht, muss die Art der Anomalie, nach der man suchen möchte, festgelegt werden. Daraus ergibt sich die Frage, welche Arten von Fehlstellen auftreten können.

- **Verbindung von zwei Grundwasserleitern:** Dadurch Verlagerung der Zementsuspension durch vertikale Druckunterschiede und den dadurch ausgelösten vertikalen Grundwasserfluss

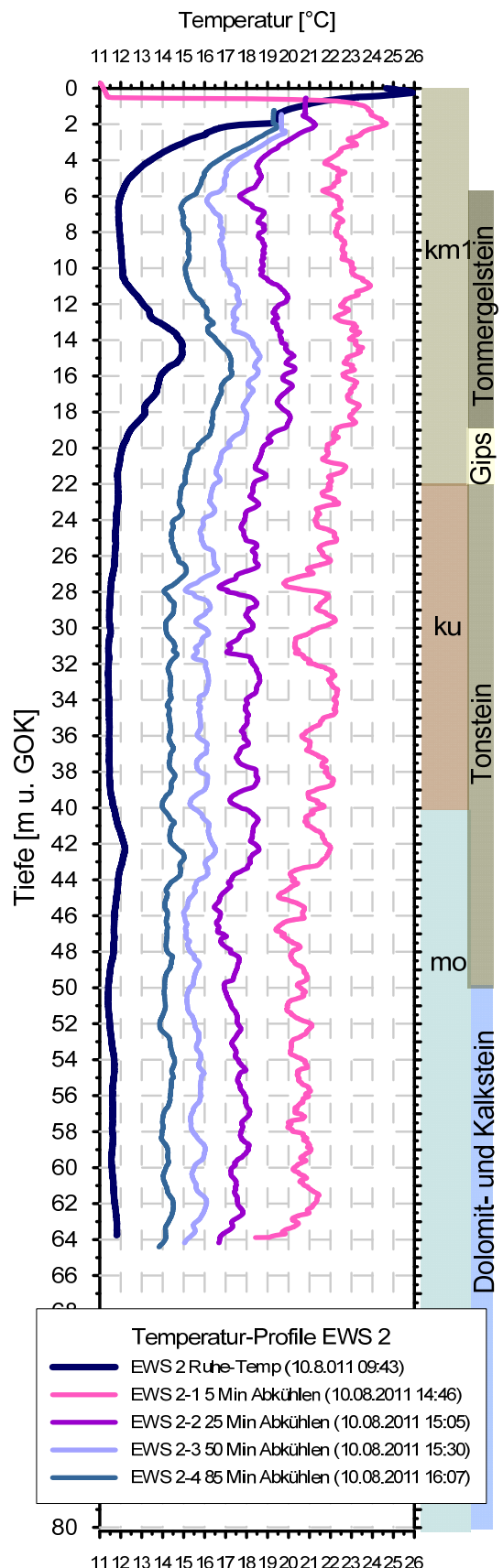
- **Erbohren einer Kluftzone:** Verlagerung der Zementsuspension durch den großen Hohlraumanteil
- **Erbohren einer Zone mit starker Grundwasserströmung:** Verdünnung der Zementsuspension durch eine horizontale Grundwasserströmung

Damit wird klar, dass sich Fehlstellen grundsätzlich durch ein völliges oder teilweises Fehlen von Zementation auszeichnen. Diese Defizite müssen mit geeigneten messtechnischen Methoden erkannt werden. Die Suche nach diesen Methoden über die physikalischen Effekte führte zur Messung der Temperatur sowie der Messung der Dichte. Beides sind eingeführte Methoden aus der geophysikalischen Bohrlochmesstechnik. Erschwerend kam hinzu, dass diese Messungen nur in den Wärmetauscherrohren der Erdwärmesonden durchgeführt werden können, was eine extreme Miniaturisierung der Sensorik bedeutete.

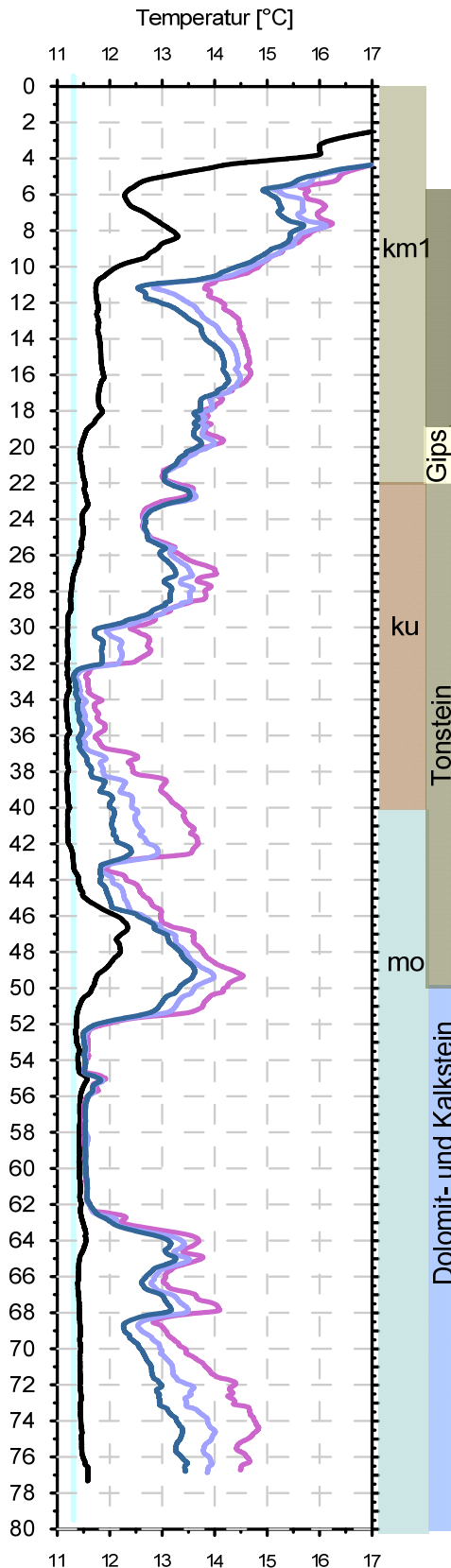
8.2.1 Messung des thermischen Verhaltens der Hinterfüllung einer Erdwärmesonde (Kurz-thermal Response Test)

Das teufenorientierte thermische Verhalten einer Erdwärmesonde kann gemessen werden, in dem man den thermischen Ruhezustand ermittelt, ihn dann aus dem Gleichgewicht bringt und dann beobachtet, wie er sich wieder erholt. Dies geschieht in der Praxis mit einer teufenorientierten Temperaturmesssonde, die mittels eines massearmen und schnell reagierenden Temperatursensors alle fünf Zentimeter einen Temperaturwert über die gesamte Länge der EWS misst. Damit erhält man den Ruhezustand, der als Ausgangspunkt für alle weiteren thermischen Betrachtungen dient.

Die Auslenkung aus diesem Ruhezustand erreicht man, in dem man in der EWS erwärmtes Wasser über einen kurzen Zeitraum zirkuliert.



Dabei soll möglichst nur die Zementation erwärmt werden. Nach dem Abschalten der Heizenergiezufuhr werden dann in rascher Folge weitere Temperaturprofile in der EWS gemessen. Daraus erhält man dann das zeitliche Abkühlverhalten der EWS und ihrer unmittelbaren Umgebung (...der Hinterfüllung) in Tiefenschritten von fünf Zentimetern.



Die Grafik auf der vorigen Seite zeigt die Messergebnisse einer solchen Prozedur. Die dargestellte Sonde zeigt im Ruheprofil zwei markante Temperaturspitzen bei 15 und 42 m. In der zweiten Messung, in der die maximale Sondentemperatur direkt nach der Aufheizphase gemessen wurde, sind diese Spitzen nicht mehr vorhanden. Die weiteren Abkühlprofile zeigen eine homogene Abkühlung des Sondenumfeldes. Sehr schnelle Abkühlvorgänge, wie sie bei fließendem Grundwasser entstehen, sind nicht zu erkennen.

In der nebenstehenden Grafik aus einem anderen Fall zeigt sich ein etwas anderes Bild. Während sich im Bereich zwischen der Geländeoberfläche und 32 m die Hinterfüllung erwärmt und anschließend wieder langsam abkühlt, trifft dies für einen Abschnitt zwischen 52 m und 62 m nicht zu. Hier wird keine relevante Erwärmung festgestellt. Unterhalb von 62 m reagiert die Sonde wieder wie erwartet.

Nun kann die Messmethode selber den Grund für diese Anomalie nicht liefern. Unter den gegebenen Umständen muss also nach einem Grund gesucht werden, der verhindert, dass sich das Sondenumfeld erwärmt. Dafür kommt entweder das völlige Fehlen von wärmeaufnahmefähiger Masse oder die unmittelbare Abfuhr der eingebrachten Energie in Frage.

Eine Fehlstelle, in der durch Druckunterschiede eine vertikale Grundwasserströmung entsteht, die in der Lage ist, die Hinterfüllung wegzuspülen, erfüllt beide Kriterien: Zum einen fehlt die Zementation und durch den entstan-

denen Hohlraum fließt Grundwasser.

Hohlräume oder größere Klüfte ohne Grundwasserbeteiligung reagieren anders, denn hier fehlt nur die Masse, welche die Wärmeenergie aufnehmen und nachher wieder langsam abgeben kann.

Horizontale Grundwasserströmungen wären auch in der Lage, eine solche Anomalie zu erzeugen, aber sie führen durch die sehr geringen Grundwasserströmungsgeschwindigkeiten nicht zu einer Verlagerung der Zementation, sondern nur zu einer Verdünnung der Suspension und sind in aller Regel nicht stark genug, um die Suspension zu verfrachten.

8.2.2 Die Messung der Dichte der Hinterfüllung

Als zweite Messmethode bietet sich die Messung der Dichte im unmittelbaren Umfeld der Erdwärmesonde an: Wenn aus einem Abschnitt der Erdwärmebohrung durch irgendwelche Umstände die Zementation verlagert oder ausgedünnt wurde und wenn die dadurch entstandenen Hohlräume mit Grundwasser oder Luft gefüllt sind, dann muss sich dieser Sachverhalt in einer messbaren Dichtereduktion nachweisen lassen. Diese Überlegung führte zur Konstruktion der Gamma-Gamma-Dichtesonde.

Zur Funktionsweise sei nur gesagt, dass in diesem Messgerät die von einer Gammastrahlenquelle ausgehende Strahlung in die die Erdwärmesonden umgebende Materie eindringen, dort umgelenkt werden und nach einer bestimmten Anzahl von Reflexionen im Detektor ankommen. In dem zu untersuchenden Dichtebereich zwischen 1 und 3 g/cm³ ist die Anzahl der in Detektor registrierten Ereignisse proportional zur Dichte der durchstrahlten Materie. In der Praxis hat die Sonde einen Messradius von ca. 7-8 cm und erfasst damit alle Bohrungen ab 140 mm Bohrdurchmesser.

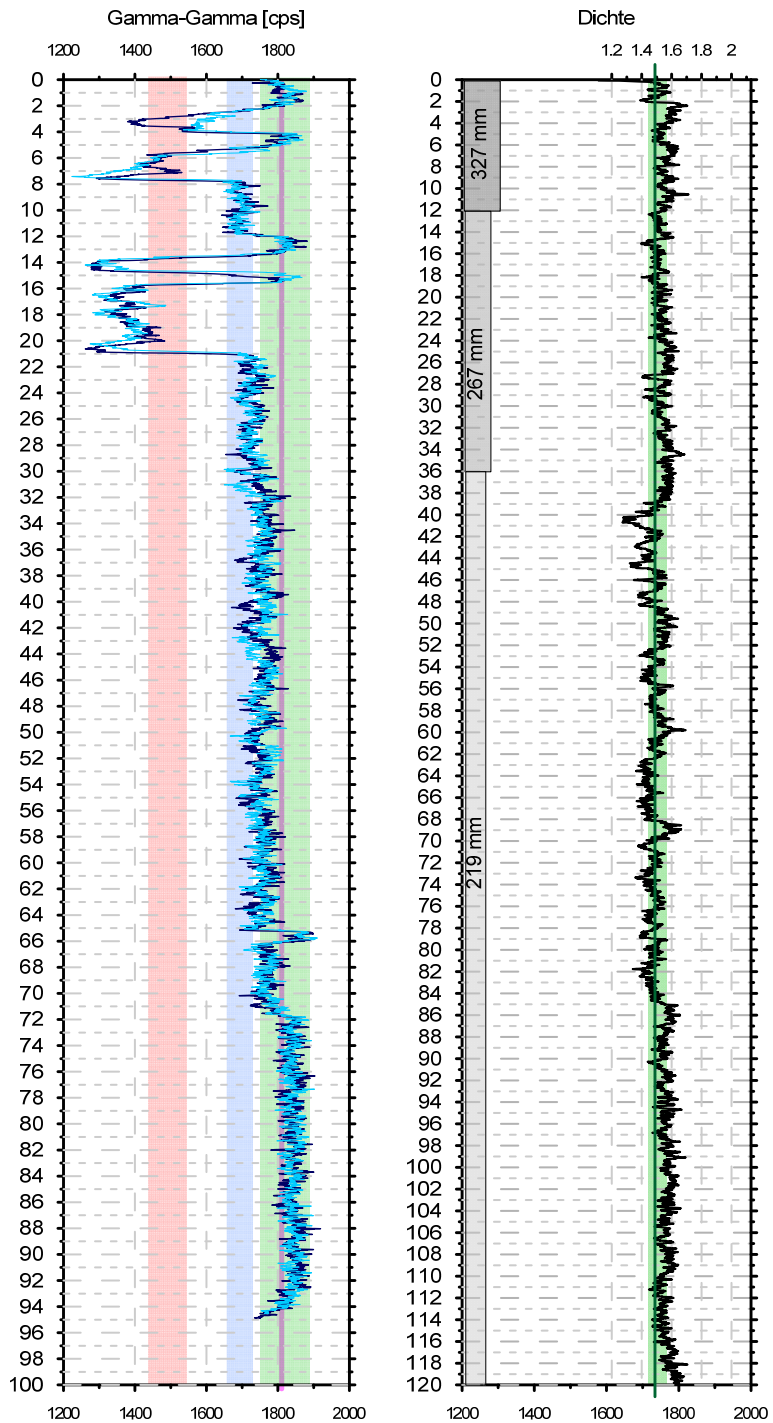
Mit Versuchsanordnungen, in denen versucht wurde, eine Erdwärmesonde möglichst realitätsgetreu nachzubilden, konnten erste Interpretationen der gewonnenen Messergebnisse erarbeitet werden.

Die nebenstehende rechte Grafik zeigt die Ergebnisse der Dichtemessung einer Erdwärmesonde im Tertiär des Frankfurter Raumes. Die Messung wurde als reine Überprüfung der Angaben der ausführenden Bohrfirma angeordnet. Zu sehen sind Dichtewerte, die zwischen 1.25 und 1.7 g/cm³ liegen. Der grün markierte Bereich zwischen 1.4 und 1.5 g/cm³ zeigt den Sollwert von 1.46 g/cm³ an.

Es wird im vorliegenden Fall deutlich, dass die Bohrung zwar mit einer inhomogen dichten Hinterfüllung ausgestattet ist, den Sollwert aber nur punktuell unterschreitet. In den Abschnitten zwischen Geländeoberkante und 38 m sowie zwischen 86 m und 120 m Tiefe liegt die Dichte sogar über dem Sollwert.

In der linken Grafik zeigt sich im Abschnitt zwischen der Enteufer und 72 m eine homogene Dichte, deren Betrag eine intakte Zementation anzeigt. Bei 72 m ereignet sich ein Dichtesprung und die Werte zeigen sich inhomogener. Bei 21 m wird ein weiterer Dichtesprung sichtbar.

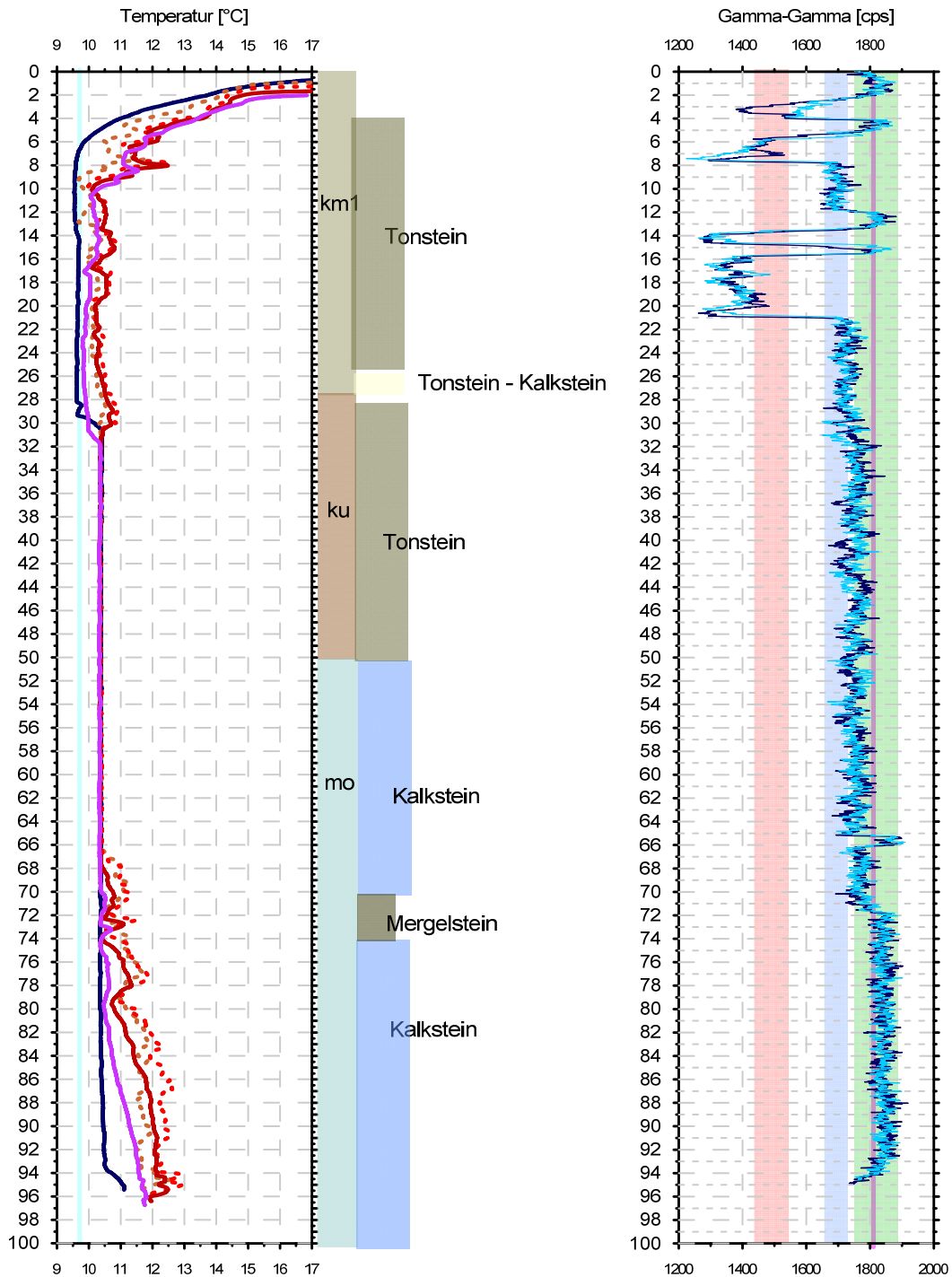
Die eingeblendeten Dichtebereiche zeigen einen grünen Bereich, in dem die Hinterfüllung intakt ist, einen blauen Bereich, in dem die Hinterfüllung fehlt, der Hohlraum aber wassererfüllt ist und einen roten Bereich, in dem die Hinterfüllung fehlt und der trocken ist.



Die dargestellte EWS zeigt damit gravierende Defizite in der Qualität der Hinterfüllung. Unklar bleibt jedoch, inwieweit diese Defizite auch wirksam im Sinne einer unerwünschten Untergrundveränderung sind. Es wäre denkbar, dass das ausführende Personal anstelle der Zementation nur Kies oder Split eingefüllt hat bzw. einfüllen musste. Ebenso könnte das Bohrloch verstürzt oder die Zementation durch Grundwassereinfluß verändert oder verlagert worden sein.

8.2.3 Die Kombination beider Methoden

Während die Temperaturmessungen die Auswirkungen einer fehlerhaften Hinterfüllung zeigen, wird mit der Dichtemessung der Grund offenbart. Das nachfolgende Beispiel soll die Erkenntnisse aus beiden Methoden für einen real existierenden Fall demonstrieren.



Das Ruhetemperaturprofil zeigt einen deutlichen positiven Temperatursprung bei ca. 29 m. Danach verläuft die Temperatur weitgehend konstant bis in eine Tiefe von 94 m. Der Kurz-Thermal-Response-Test kann die Hinterfüllung zwischen der Oberfläche und 30 m sowie zwischen 66 m und der Endteufe erwärmen. Zwischen 30 m und 66 m ist keinerlei Temperaturzunahme zu erkennen.

Bei der Dichtemessung korrespondiert der Abschnitt ohne Temperaturänderung mit dem Abschnitt, in dem eine verminderte Hinterfüllungsdichte vorliegt, und zwar bis zu genau dem Punkt bei 66 m, an dem die Dichtemessung einen nur einen Meter langen Abschnitt mit intakter Hinterfüllung anzeigt.

Damit ist gesichert, dass entlang der Erdwärmesonde zwischen 30 m und 66 m Grundwasser fließt und das in einer Menge, die geeignet ist, einen Energieeintrag von 50W/m vollständig abzuführen. Es stellt sich nur noch die Frage, ob es sich hier um eine Horizontale oder vertikale Grundwasserströmung handelt.

Zur Klärung dieses Sachverhaltes muss die lokale Geologie bemüht werden: Der betrachtete Abschnitt befindet sich zwischen dem Lettenkeuper und dem Oberen Muschelkalk. In der Region ist bekannt, dass sich zwischen diesen beiden Grundwasserleitern z.T. hohe Potentialdifferenzen ausbilden können. Eine Verbindung beider GW-Leiter würde zu einer sofortigen vertikalen Druckausgleichsströmung im Bohrloch führen, deren Betrag nur durch die Ergiebigkeit des geringer durchlässigen Leiters begrenzt wäre. Da in diesem Abschnitt zwischen Gips- und Lettenkeuper der Grenzdolomit als ergiebiger Grundwasserleiter bekannt ist und der Muschelkalk als Karstgrundwasserleiter ebenfalls eine hohe Ergiebigkeit besitzt, ist das Potenzial für eine starke Ausgleichsströmung, einen hydraulischen Kurzschluss, vorhanden. Gegen eine horizontale Grundwasserströmung spricht, dass beide Grundwasserleiter Kluftgrundwasserleiter sind, in denen das Wasser nur auf diskreten Wegsamkeiten fließt. Eine sich homogen über 36 m erstreckende horizontale Grundwasserströmung ist hier nicht vorstellbar.

Im Bereich oberhalb von 21 m finden sich dem Wert der Dichtemessung nach nicht wassererfüllte Hohlräume, getrennt durch Abschnitte mit intakter Zementation, aber auch mit Abschnitten, in denen sich in der Bohrung nur Wasser, aber keine Hinterfüllung befindet. Die Dichtesignale gehen soweit zurück, dass sogar von einem Überkaliber der Bohrung ausgegangen werden muss.

Von großer Bedeutung ist, dass sich diese „leeren“ Abschnitte nicht in der thermischen Betrachtung zeigen. Lägen nur die Ergebnisse eines Kurz-TRT vor, so wäre die Längsläufigkeit von Grundwasser entlang der Sonde unstrittig, die nicht verfüllten Bereiche würden aber unerkant bleiben.

8.3 Fazit

Bei der Überprüfung von Erdwärmesonden hinsichtlich der Qualität ihrer Hinterfüllung muss wie ganz allgemein in der Bohrlochgeophysik mit indirekten Messmethoden gemessen werden. Jede Messmethode erfasst einen physikalischen Effekt und erst die gemeinsame Betrachtung ermöglicht eine belastbare Analyse der Situation. Momentan kann eine solche Analyse durch die Anwendung der zwei vorgestellten Messmethoden mit einer zufriedenstellenden Sicherheit erstellt werden. Wir sind in der Lage, wasser- oder luftgefüllte Bohrlochabschnitte zu identifizieren, Grundwasserströmungen zu erkennen und die Dichte der eingesetzten Zementation zu überprüfen.

Es sind aber noch abschließende Untersuchungen nötig, um eine sehr gute Interpretationssicherheit zu erhalten. Wünschenswerte Aussagen wären z.B. die Fließrichtung und der Betrag einer vertikalen Ausgleichsströmung. Auch die zweifelsfreie Angabe von absoluten Dichtewerten oder eine grobe Vermessung von Hohlräumen mit Hilfe von großkalibrigen Eichkörpern wäre wünschenswert und steht auf unserer To-Do-Liste. Aus apparativer Sicht steht eine Modifikation der Dichtesonde zur Diskussion, mit der auch bestehende Erdwärmesonden über deren horizontale Anbindung befahren werden können.

9 Qualitätssicherung Erdwärmesonden in der Schweiz

Walter J. Eugster
Polydynamics Engineering, Zürich, Schweiz
wje@polydynamics.ch

9.1 Einleitung

Dieser Beitrag befasst sich mit der oberflächennahen Geothermie in der Schweiz. Schwerpunkt ist die Erdwärmenutzung mittels erdgekoppelter Wärmepumpen in Kombination mit Erdwärmesonden. Die Entwicklung dieser Technologie ist im deutschsprachigen Raum mehrheitlich gemeinsam verlaufen. Seit den 1980er Jahren fand ein enger technologischer Austausch zwischen Fachleuten aus Deutschland und der Schweiz und später auch aus Österreich statt. In der Schweiz hat sich früher als in den benachbarten Ländern ein kleiner, aber ernst zu nehmender Markt für diese Technologie entwickelt.

9.2 Markt

In den 1990er Jahren ein kleiner, aber stetig wachsender Markt im Bereich der erdgekoppelten Wärmepumpen etabliert. Nach der Jahrtausendwende hat sich dieser Markt mit jährlichen Zuwachsraten von 15-30% zu einer regelrecht boomenden Branche entwickelt (siehe Tabelle 1). Mehrmonatige Wartezeiten bei den Bohrfirmen haben goldene Zeiten vorgegaukelt und viele neue, auch branchenfremde Marktteilnehmer auf den Plan gerufen. Dies hat von der Branche selbst, aber auch von Kunden- und Behörden-seite den Ruf nach einer Qualitätskontrolle laut werden lassen. Der Markt hat sich in den letzten 2-3 Jahren auf hohem Niveau konsolidiert. Es werden rund 20'000 Wärmepumpen pro Jahr installiert. 40% davon sind Sole-Wasser-Wärmepumpen. Mit rund 150 Bohrgeräten werden jährlich rund 2 Mio. Bohrmeter abgeteuft.

Der Anteil der Sole-Wasser-Wärmepumpen liegt bei etwa 40% der verkauften Wärmepumpen, also deutlich niedriger als z.B. in Deutschland. Demgegenüber betrug im letzten Jahr die total installierte Leistung der Sole-Wasser-Wärmepumpen knapp 60% der Gesamtleistung, d.h. Sole-Wasser-Wärmepumpen werden v.a bei grösseren Anlagen eingesetzt.

Tabelle 1: Verkaufszahlen Wärmepumpen (WP) und verteilte Bohrmeter in der Schweiz (Quelle: www.fws.ch); *): Zahlen nicht veröffentlicht

Jahr	Total verkaufte WP	Sole-Wasser-WP (Erdwärmesonden)	Verteilte Bohrmeter
2000	6'943	*)	301'500
2005	11'936	4'834	796'400
2008	20'670	8'061	1'921'300
2009	20'595	8'507	2'068'700
2010	20'044	7'595	2'330'800

9.3 Qualitätssicherung

Zuerst ist festzuhalten, dass der weitaus grösste Teil der erdgekoppelten Wärmepumpen klaglos funktioniert. Die Endkunden sind zufrieden. Doch es passieren halt auch immer wieder vermeidbare Fehler. Rückblickend haben je nach Entwicklungsstand der Technologie jeweils unterschiedliche Ursachen zu Qualitätseinbussen beigetragen:

In den 1980er und frühen 1990er Jahren war dies vor allem das eingesetzte Rohrmaterial, welches teilweise von schlechter Qualität war oder welches auf der Baustelle schlecht verarbeitet worden ist (Schweissungen). Dies führte zu Leckagen. Daneben gab es ungenügend dimensionierte Anlagen; einige haben den Untergrund regelrecht eingefroren. In den späten 1990er Jahren haben sich die SKZ-geprüften Doppel-U-Sonden durchgesetzt. Es gab kaum mehr Leckage-Probleme. Eine breite und sichere Erfahrung bei der Dimensionierung fehlte nach wie vor. Es kam immer wieder zu Betriebsproblemen bei Anlagen in erhöhten Lagen. Nach der Jahrtausend-Wende ist der Markt explodiert. Viele unerfahrene Planer, Installateure und Bohrfirmen haben sich auf den Markt gedrängt. Dies resultierte wieder in mehr schlecht ausgelegten oder schlecht gebauten Anlagen. Erste Qualitätsrichtlinien kamen in dieser Zeit auf den Markt (z.B. VDI-Richtlinie 4640 [1], Gütesiegelreglement [2]) und konnten Gegensteuer geben. In der Schweiz zeichnete sich eine Entwicklung hin zu sehr tiefen Erdwärmesonden (bis 400 m) ab. Dies hat in neuester wieder zu einer Zunahme von undichten Sonden geführt. Wobei die genaue Ursache nicht in jedem Fall klar bezeichnet werden kann.

In der gleichen Zeitspanne sind die Wärmepumpen massiv effizienter geworden. Die mittlere Effizienz der Anlagen hat sich dabei ebenfalls erhöht. Doch nach wie vor gibt es eine zu grosse Anzahl von Anlagen, welche nicht mit der möglichen Effizienz betrieben wird (z.B. zu grosse Zirkulationspumpen, fehlende Betriebsoptimierung, ungenügende Inbetriebnahme). Die Fachverbände versuchen, diese Defizite mit einem speziell auf diese Problematik ausgerichteten Aus- und Weiterbildungsprogramm aufzufangen.

Die ersten Qualitätsförderungs- und Qualitätssicherungsmassnahmen setzten denn auch bereits in den 1990er Jahren ein. Zu nennen sind insbesondere:

- 1993: Inbetriebnahme des Wärmepumpen-Testzentrums,
- 1994: Das Bundesamt für Umwelt veröffentlicht erste Wegleitung für Erdwärmesonden,
- 1997: Der Wärmepumpen-Doktor nimmt seine Arbeit auf,
- 1999: Das D-A-CH-Gütesiegel für Wärmepumpen wird geschaffen,
- 2001: Das Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen [2] wird geschaffen,
- 2001: Das Programm *EnergieSchweiz* des Bundesamtes für Energie fördert unter anderem Qualitätssicherungs- und Weiterbildungsprogramme. Planer, Installateure und auch Bohrleute erhalten neue Aus- und Weiterbildungsangebote,
- 2009: Die Praxishilfe „*Wärmenutzung aus Boden und Untergrund*“ des Bundesamtes für Umwelt [3] stellt strenge Anforderungen aus Sicht des Gewässerschutzes an die Planung, den Bau und den Betrieb solcher Anlagen,
- 2010: Die Schweizer Norm SN 546 384/6 (SIA 384/6) „*Erdwärmesonden*“ [4] tritt in Kraft. Die Norm stellt hohe Anforderungen aus rein technischer Sicht an die Planung, den Bau und den Betrieb von Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfelder.

Das von der Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz (FWS; früher: Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz) lancierte Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen stellte in der Schweiz ein wichtiger Meilenstein dar. Erstmals wurden Anforderungen an Maschinen, Material und Personal gestellt. Im Reglement wurden einzelne Arbeitsschritte vorgegeben. Schwerpunkt bei der Ausbildung war eine fachgerechte Erstintervention durch den Geräteführer bei unvorhersehbaren technischen Notsituationen zur Wiederherstellung eines sicheren und kontrollierten Zustandes auf der Bohrstelle. Später kamen ausführlichere End- und Abnahmeprüfungen als Beweissicherung für ein korrekt nach den Regeln der Kunst erstelltes Gewerk hinzu. Das Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen hat bewusst keine hohe Eintrittshürde für die interessierten Bohrfirmen angesetzt, sondern hat dem Coaching von neuen Bohrfirmen einen höheren Stellenwert als der mitgebrachten Erfahrung beigemessen. Dieses Verfahren war anfangs sehr erfolgreich. Es hat sich aber später gezeigt, als die Zahl der Bohrfirmen stark zugenommen hat, dass die für das wirkliche Hochhalten der Qualität erforderliche Dichte von Feldkontrollen aus organisatorischen und finanziellen Gründen nicht erbracht werden konnte.

Für den späteren Betrieb der Erdwärmesonden-Anlage wurde das Einbringen der Sonde ins Bohrloch und die korrekte, sofortige Hinterfüllung der Sonde als äusserst wichtig

erkannt. Die diesbezüglichen Vorschriften des Gütesiegels gehen teilweise recht weit. Kritiker monieren, sie schränken die Unternehmerfreiheit ein. So wird im Gütesiegelreglement z.B. verlangt, dass:

1. mindestens eine Injektionsanlage während der Bohrarbeiten auf Platz zu sein hat
2. die Hinterfüllung sofort nach dem Einbringen der Erdwärmesonde zu erfolgen hat
3. die Hinterfüllung immer bei gesetzter Hilfsverrohrung über einen Injektionsschlauch im Kontraktorverfahren einzubringen ist.

Aus Sicht der Qualitätssicherung stellte in den letzten Jahren insbesondere die korrekte standortbezogene Dimensionierung der Erdwärmesonden und die hydraulische Systemoptimierung ein grosses Problem dar. Es hat sich herausgestellt, dass es für einen späteren problemfreien Betrieb der Anlage wichtig ist, dass diejenigen Arbeitsschritte, welche zwischen dem Einbringen der Sonden und den Abnahmeprüfungen liegen, korrekt und nach allen Regeln der Kunst ausgeführt werden. Die relevanten Punkte sind nun in der Praxishilfe und der SIA-Norm umfassend geregelt.

Die Abbildungen 1 – 6 zeigen die Umsetzung von einigen Vorschriften nach Gütesiegel bzw. nach der gültigen SIA-Norm.



Abb. 1: Dichtheitsprüfung vor Einbau



Abb. 2: Vorbereitung für Einbau



Abb. 3: Haspel für Sonde



Abb. 4: Injektionsanlage



Abb. 5: Minimalausrüstung

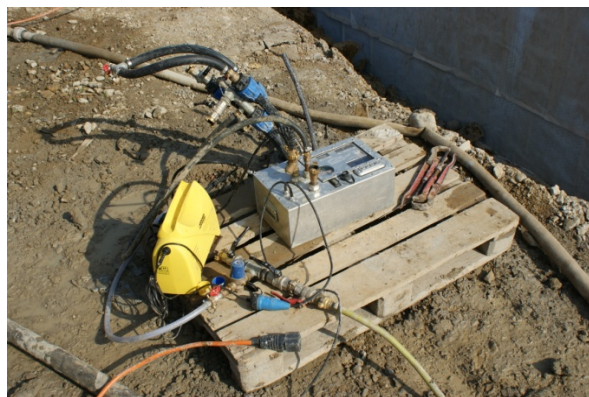


Abb. 6: Automatisierte Dichtheitsprüfung

Die Erfahrungen nach einem Jahr SIA-Norm 384/6 [4] sind trotzdem etwas zwiespältig: In erster Linie ist die Branche froh, dass endlich klare Regelungen existieren. Die Norm genießt denn auch eine erfreulich hohe Akzeptanz in der Branche. Die Marktteilnehmer haben sich sehr schnell an die neuen Gegebenheiten angepasst. Aus Rückmeldungen von der Praxisfront haben sich dennoch erste Punkte abgezeichnet, wie wohl etwas optimiert werden müssen. Auf der anderen Seite trifft man aber auch heute noch auf erschreckende Beispiele, die wohl auf einen eklatanten Mangel an Fachwissen oder auf eine eindrückliche Beratungsresistenz der beteiligten Personen zurückgeführt werden müssen. Zudem herrscht ein erbarmungsloser Preisdruck, der die Bohrfirmen manchmal zu einem eher sorglosen Umgang mit Regeln, Vorschriften und auch Gesetzen verleitet.

9.4 Schlussbemerkungen

Planung, Bau und Betrieb von erdgekoppelten Wärmepumpen steht in der Schweiz auf einem recht hohen Niveau. Die Endkunden sind sehr zufrieden. Trotzdem gibt auch Kunden, die berechtigterweise auf Mängel hinweisen. Und es bestehen auch einige klar lokalisierte Baustellen bei der Qualitätssicherung. Leider trifft man auch immer wieder Fehler, welche heute eigentlich niemandem mehr passieren dürften.

Der Markt hat sich in den letzten zwei Jahren etwas konsolidiert.

Für Fachleute, die sich der Qualitätssicherung und der Qualitätsverbesserung widmen, geht die Arbeit auch in Zukunft nicht so schnell aus.

Bibliographie

- [1] VDI-Richtlinie 4640, Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 1 (2010), Blätter 2+3 (2001), Blatt 4 (2004). Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf. Beuth Verlag GmbH, Berlin, www.beuth.de
- [2] Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen, Gütesiegelreglement, 2011. Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz, Bern, www.fws.ch
- [3] Wärmenutzung aus Boden und Untergrund, 2009. Bundesamt für Umwelt, Bern, www.umwelt-schweiz.ch/uv-0910-d
- [4] SIA 384/6 Erdwärmesonden, SN 546 384/6, 2010. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, www.sia.ch

10 Zeitliche Entwicklung von Vorgängen des Anhydritschwellens

Thomas Mutschler, Institut für Boden- und Felsmechanik, KIT, Karlsruhe

Thomas.Mutschler@kit.edu

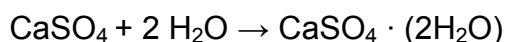
Bernhard Fröhlich, gbm Gesellschaft für Baugeologie und -messtechnik,
Baugrundinstitut, Limburg

b.froehlich@gbm-baugrundinstitut.de

10.1 Einleitung

Das Schwellen von anhydritischen Gesteinen und das Quellen von diagenetisch verfestigten Tonsteinen, die quellfähige Tonminerale wie z. B. Montmorillonit, Corrensit oder Smektit enthalten sind Vorgänge bei denen die Aufnahme von Wasser in der Struktur zu Volumenänderungen führt. Bei Gesteinen, die sowohl quellfähige Tonminerale als auch Anhydrit enthalten, können beide Prozesse parallel ablaufen. Unbehinderte Schwell- und Quellprozesse führen zu maximalen Hebungen, die völlige Behinderung der Volumenzunahme führt - abhängig vom Ausgangsspannungszustand - zu maximalen Quell- und Schwelldrücken. Bei teilweiser Behinderung stellt sich ein Gleichgewichtszustand zwischen Quell- bzw. Schwellhebung und -druck ein.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung stehen Schwellprozesse im Vordergrund, bei denen sich Anhydrit (CaSO_4) durch Anlagerung von zwei Wasser-Molekülen zu Gips $\text{CaSO}_4 \cdot x(2\text{H}_2\text{O})$ wandelt.



Die mit dieser Hydratation verbundene Volumenzunahme beträgt theoretisch bis zu 61 %. FLÜCKIGER ET AL. (1994) leiten aus stöchiometrischen Überlegungen zum Kristallisationsdruck ab, dass bei vollständiger Behinderung der Volumenzunahme ein Schwelldruck $3,7 \text{ MN/m}^2$ entstehen kann. In eigenen Versuchen wurden Schwelldrücke über 8 MN/m^2 ermittelt.

Mit dem Anhydritschwellen verbundene Schadensfälle sind seit langer Zeit bekannt. Sie betreffen sowohl untertägige als auch übertägige Bauwerke. Allen Schadensfällen ist gemeinsam, dass sie über sehr lange Zeiträume ablaufen und in der Regel nicht mit einmaligen Sanierungsarbeiten bewältigt werden können. Ein übertägiges Beispiel ist die BAB A81 vor und hinter der Anschlussstelle Oberndorf a. N., wo es seit der Streckenfreigabe im Jahr 1978 immer wieder zu derart großen Lageänderungen der Fahrbahn kommt, dass eine völlige Erneuerung der Autobahn erforderlich wird. In der Schweiz ist der Belchentunnel ein prominentes Beispiel für eine untertägige An-

hydritproblematik, die sich bereits kurze Zeit nach der Inbetriebnahme bemerkbar machte und ihren bisherigen „Höhepunkt“ mit aufwändigen Sanierungen unter Vollsperrung jeweils einer Röhre in den Jahren 2001 bis 2003 hat. LEMPP UND FECKER (2011) zeigen in einer Übersicht, dass sich bei Tunneln mit geringer Überlagerung (50 bis 80 m) Schwellvorgänge in Hohlraumnähe bis an die Oberfläche durchpausen können und dort zu Hebungen in der Größenordnung von Zentimetern führen.

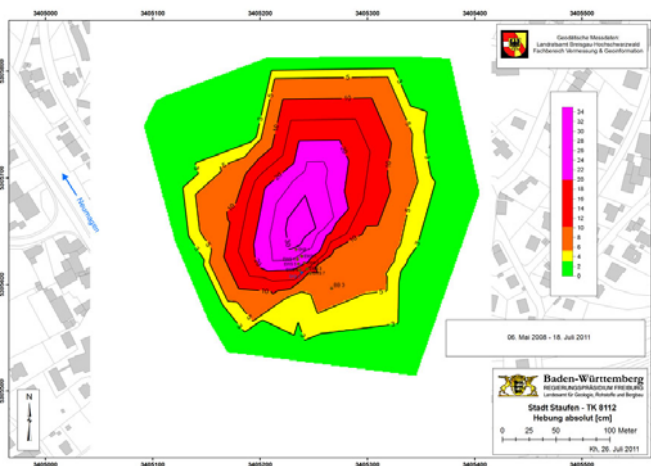
Die genannten Beispiele zeigen, dass neben der Quantifizierung von Drücken und Verformungen, die auch richtungsabhängig sein können, die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs von Schwellprozessen grundlegend ist.



Wagenburgtunnel Stuttgart
(Foto: E. Fecker)



Probestollen U1 des Freudensteintunnels
(Foto: E. Fecker)



Hebungen der Altstadt von Staufen i. Br.
Quelle: LGBR



Altstadt von Staufen i. Br.

Bild 1: Beispiele von Schwellprozessen unter und über Tage

Die vorliegende Veröffentlichung stellt die Methoden zur geomechanischen Untersuchung von Schwellvorgängen in natürlichen Gesteinen dar. Die gezeigten Ergebnisse schließen Versuche ein, die z. T. Laufzeiten von über 25 Jahren haben und immer noch keinen Endzustand erreicht haben.

Der Weinsberger Tunnel hat seit der Bauzeit in den Jahren 1859 bis 1862 in verschiedenen Abschnitten Schäden infolge Tonquellen und Anhydritschwellen erlitten. Nachdem im Nahbereich des Tunnels unter der Sohle der Anhydrit in Gips umgewandelt und dieser wiederum ausgelaugt ist, waren die Umwandlungsprozesse von Anhydrit nach über 140 Jahren seit der Bauzeit in den Ulmen wirksam, so dass die Ulmenkonvergenzen in Bereichen mit einer Sohlaussteifung ca. 0,6 mm p.a. und ohne Sohlaussteifung ca. 4 mm p. a. betrug (DAUWE UND FRÖHLICH, 2005). Die Beobachtungen zeigen, dass die Quell- und Schwellprozesse richtungsabhängig sind (FRÖHLICH, 1986). Die dicke Innenschale aus Beton war gerissen. Die auf Basis von Spannungsmessungen in dem Ausbau rechnerisch ermittelten Gebirgsdrücke auf den Ausbau waren deutlich größer als 1 MN/m². Der Tunnel wurde deshalb mit armiertem Gewölbe inkl. Sohle und einer Quetschlage in den Ulmen erneuert.

10.2 Versuchstechnik

10.2.1 Versuchsapparatur

Quell- und Schwellversuche werden in Ödometer-Versuchsständen an Probekörpern durchgeführt, die die Form von Kreiszyinderscheiben mit einem Durchmesser von 60 bis 80 mm bei einer Dicke von 20 bis 40 mm haben. Bild 2 zeigt eine Versuchsapparatur, wie sie am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik des KIT in mehr als 50-facher Ausführung eingesetzt wird. Sie besteht aus einem steifen 4-Säulen-Belastungsrahmen (1) mit einem Druckstempel (2), der über einen Spindeltrieb (3) manuell verfahren werden kann. Die Messung des Verfahrweges erfolgt durch eine mechanische Präzisions-Messuhr oder elektronische Wegmesseinrichtung mit Digitalanzeige (4) mit einer Ableser-Auflösung von 0,001 mm, die Messung der Druckstempelkraft mit einer auf der Bodenplatte zentrisch fixierten, elektronischen Kraftmessdose (5) mit angeschlossener Messverstärker und Ableseeinheit. Zwischen dem Druckstempel und der Kraftmessdose wird die Probekörper-Bewässerungseinheit eingebaut. Diese besteht aus einem massiven Oedometerring aus Messing (6) von 60 bis 80 mm Innendurchmesser, 20 bis 40 mm Höhe und ca. 10 mm Wandstärke.

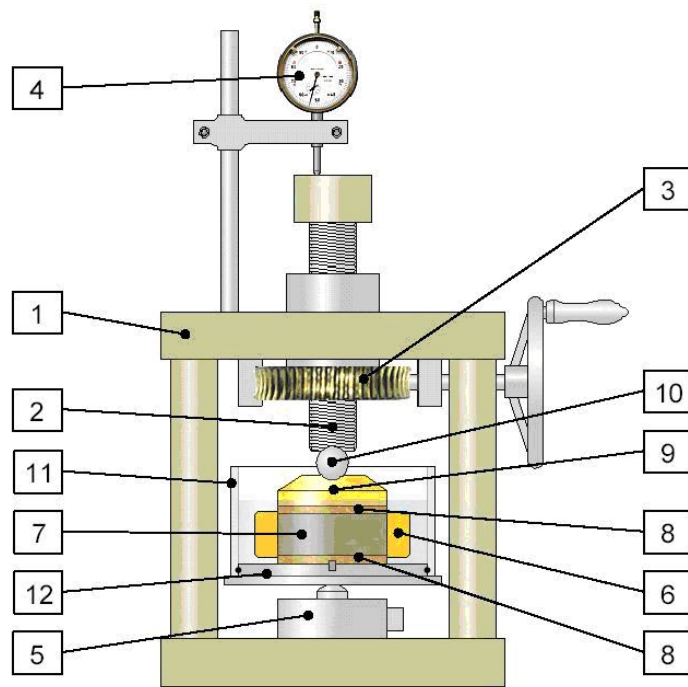


Bild 2: Apparatur für Quelldruckversuche

Der Probekörper (7) wird, nachdem seine Mantelfläche auf einer Gesteinsdrehbank trocken bearbeitet wurde, exakt passend, d.h. formschlüssig in diesen Oedometerring eingesetzt, um eine Querdehnung weitgehend zu verhindern. Die Endflächen des Prüfkörpers werden ebenfalls durch Drehen eben und planparallel bearbeitet, wobei die Prüfkörperhöhe um etwa 1 bis 2 mm geringer als die des Ringes sein sollte, so dass dieser beidseitig um etwa 0,5 bis 1 mm übersteht. In die beiden so entstandenen Vertiefungen werden 5 mm starke Filterplatten (8) aus Sintermetall eingesetzt (Filterfeinheit ca. 100 bis 200 μm). Um ein Festklemmen der Filterplatten zu vermeiden, ist deren Durchmesser um ca. 0,2 - 0,4 mm geringer als der Innendurchmesser des Ringes. Auf die obere Filterplatte wird schließlich eine Druckplatte (9) gleichen Durchmessers aufgesetzt. Darauf liegt in einer Vertiefung noch eine Stahlkugel (10), die ein Verkippen der Druckplatte ermöglicht, um Abweichungen von der Planparallelität der Prüfkörper-Endflächen ausgleichen zu können.

Die vorbeschriebene Teileinheit wird in das Bewässerungsgefäß eingesetzt, das aus einem Acrylglas-Mantelrohr (11) von 150 mm Durchmesser und einer 20 mm starken Bodenplatte (12) aus Edelstahl besteht. Die Einleitung des Quellprozesses erfolgt je nach Fragestellung durch Zufuhr von demineralisiertem Wasser, vor Ort entnommenem Bergwasser oder gezielt zusammengestellten Ionenlösungen. Um Temperatureinflüsse zu minimieren, werden die Versuche in einem klimatisierten Raum bei einer konstanten Temperatur von 20°C durchgeführt.

10.2.2 Versuchsablauf

Die Quell- und Schwellversuche in Ödometerzellen sind in nationalen und internationalen Empfehlungen als Quell-/Schwell-Druckversuche und –Hebungsversuche standardisiert (DGEG (1986), ISRM (1999), die jedoch überarbeitungsbedürftig sind. PIMENTEL (1996) hat eine neue Versuchstechnik eingesetzt, die eine Kombination von Druck- und Hebungsphasen vorsieht.

10.3 Versuchsergebnisse

Die Bilder 3 und 4 zeigen Ergebnisse von Schwellversuchen an Proben aus dem Gipskeuper. Die verwendeten Proben haben einen Durchmesser von ca. 80 mm und eine Dicke von ca. 40 mm. Die verwendeten Ödometerversuchsstände gestatten Axialkräfte von maximal 40 kN. Die Benetzung der Proben erfolgte mit entmineralisiertem Wasser.

Die Versuche zeichnen sich dadurch aus, dass sie Laufzeiten von annähernd 10.000 Tagen d. h. mehr als 25 Jahre haben. Es werden jeweils die Spannungsverläufe und die Dehnungsverläufe über der Zeit dargestellt. Die Versuche weisen sowohl Schwelldruckphasen, in denen die Dehnung konstant gehalten wird als auch Schwellhebungsphasen, in denen die Axialspannung konstant gehalten wird, auf.

Zu Beginn des Versuchs wurden die Proben trocken bis zu einer Axialspannung von ca. 4 MN/m² vorbelastet. Damit sollten vom Entnahmevergange resultierende Entspannungsdeformationen kompensiert werden. Vor der Wässerung wurden die Proben wieder bis auf eine Anliegespannung von ca. 0,1 MN/m² entlastet, die dazu dient, dass ein Kraftschluss zwischen Probe und Versuchsstand sichergestellt ist. Beide Versuche beginnen mit einer Schwelldruckphase, in der ein Spannungsanstieg bis zu einem Wert von ca. 4 MN/m² abgewartet wurde. Bei diesem Spannungsniveau wurde eine Schwellhebungsphase eingeschaltet, bei der die Spannung etwa 300 Tage im Bereich 3,7 MN/m² < σ < 4,3 MN/m² variierte. Über diesen Zeitraum kam es zu Hebungen von ca. 1%. Am Ende dieser ersten Schwellhebungsphase wurden die Proben fast vollständig entlastet und wieder auf $\sigma = 1,95$ MN/m² belastet

Der Versuch in Bild 3 wurde danach über einen Zeitraum von 5600 Tagen als Schwellhebungsversuch bei einer Axialspannung von $\sigma = 1,95$ MN/m² gefahren. Dabei traten Hebungen von 14% auf, die eine stark abnehmende Rate aufwiesen. Zur Überprüfung des noch vorhandenen Quellpotential wurde ab dem Tag 6300 die Axialdehnung wieder konstant gehalten und in der Folge ein Spannungsanstieg auf ca. $\sigma = 2,3$ MN/m² verzeichnet. Dies ist ein eindeutiger Hinweis, dass die Schwellhebungsphase noch nicht abgeschlossen war. Derzeit befindet sich der Versuch in einer erneuten Schwellhebungsphase bei einer Axialspannung von $\sigma = 1,0$ MN/m².

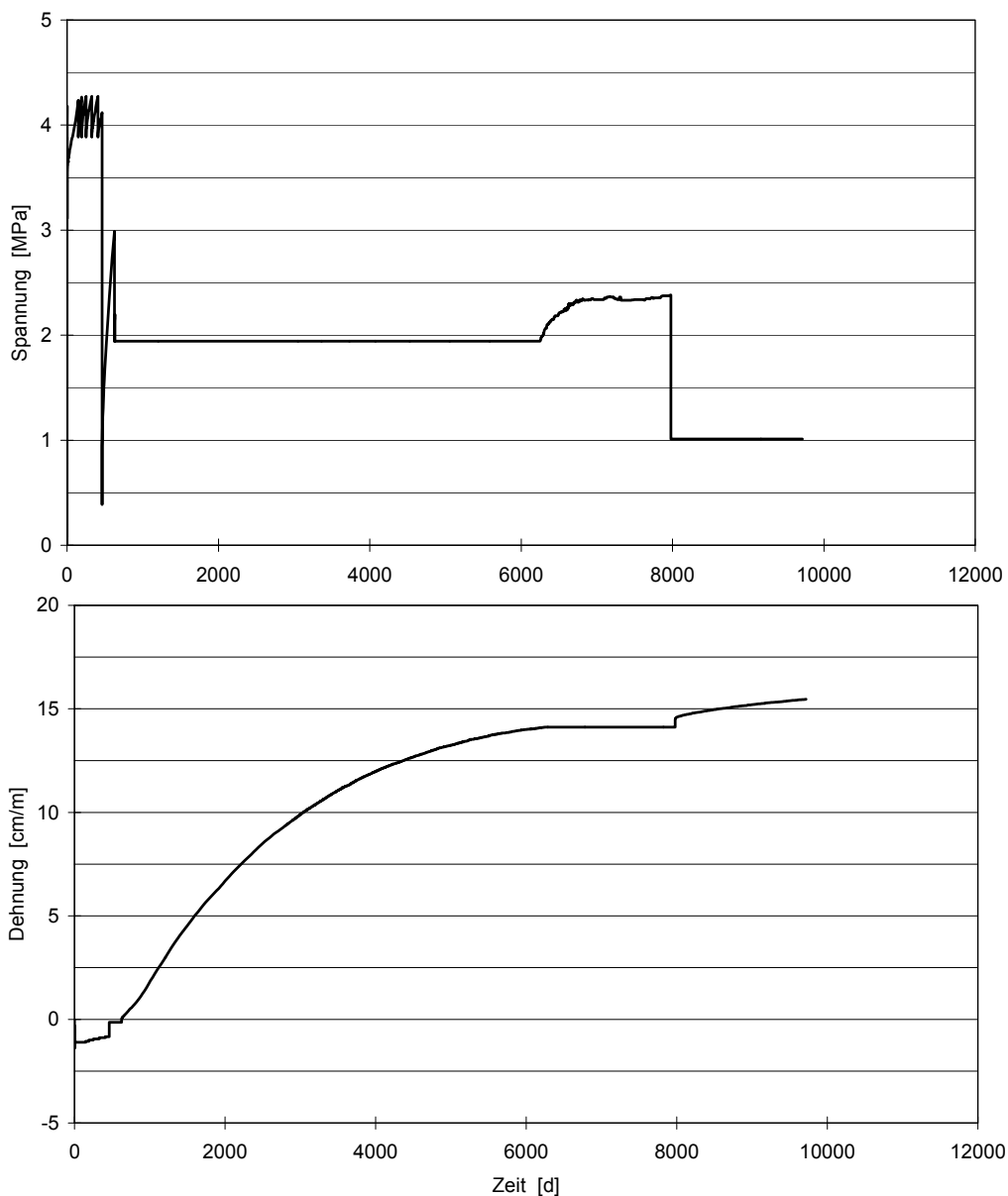


Bild 3: Schwellversuch an Gipskeuperprobe, Bestimmung der Schwellhebung

Der Versuch in Bild 4 wurde nach der anfänglichen Schwellhebungsphase zunächst als Schwelldruckversuch fortgeführt. Bei einem festgehaltenen Deformationszustand wurden Schwelldrücke von ca. 8 MN/m² gemessen. Stufenweise wurden geringfügige Hebungen zugelassen und im Anschluss wieder konstant gehalten. Dabei kommt es stets nach einem Abfall der Axialspannung in Folge der zugelassenen Hebung zu einem Wiederanstieg der Spannung auf Werte bis 7 MN/m². Derzeit befindet sich der Versuch in Bild 4 in einer Quellhebungsphase bei einer Axialspannung von $\sigma = 5,6$ MN/m². Trotz des mehr als 2,9-fachen Wertes der Axialspannung des Versuchs in Bild 3 sind Hebungen von 1,7% eingetreten, die noch mit einer signifikanten Hebungsrate andauern.

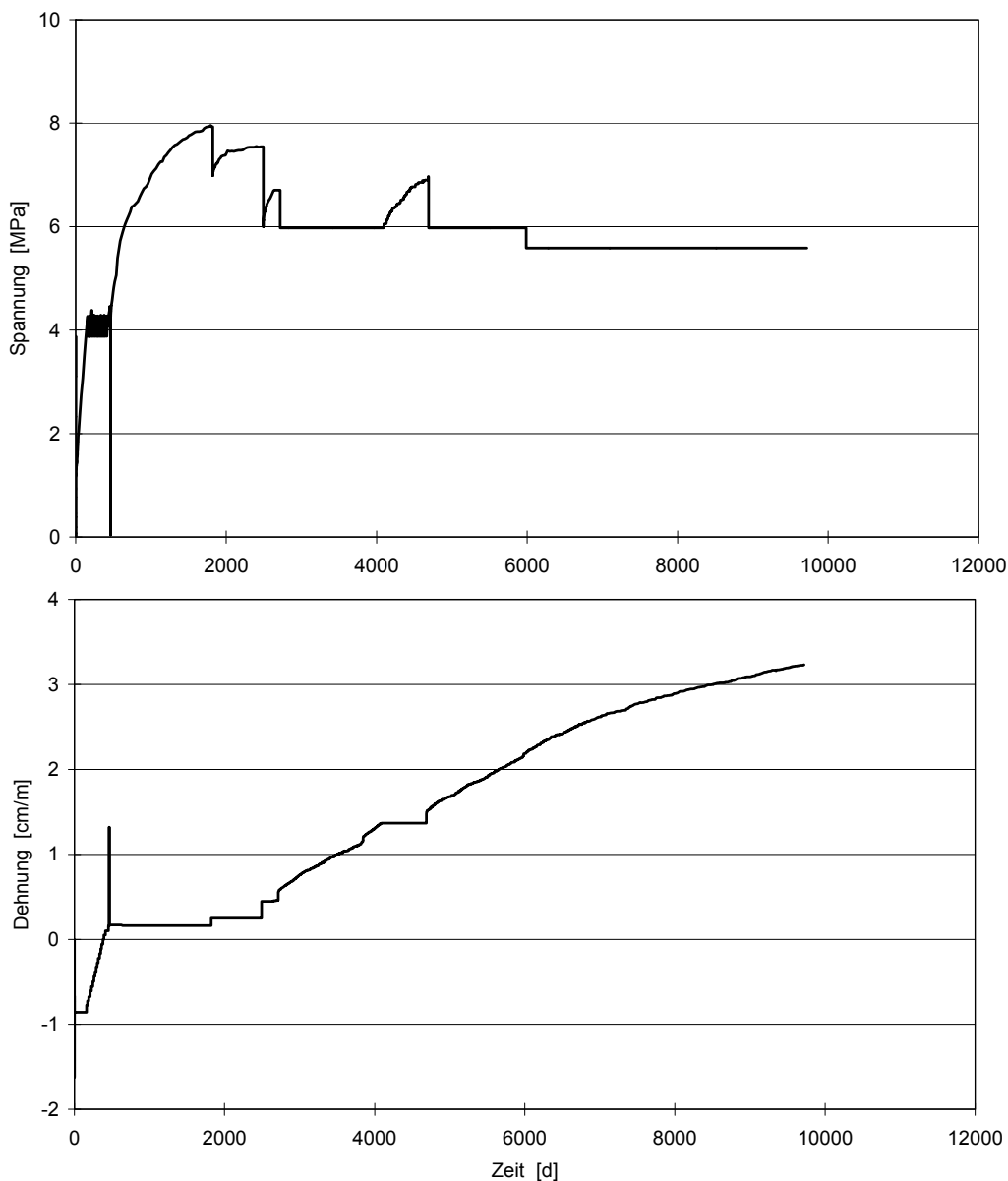


Bild 4: Schwellversuch an Gipskeuperprobe, Bestimmung des Schwelldrucks

10.4 Zusammenfassung und Ausblick

Schwellprozesse in anhydrithaltigen Gesteinen dauern jahrzehntelang an. Die Anhydrit-Gips-Wandlung ist besonders aktiv, wenn Anhydrit feinverteilt auftritt und in Tonstein eingelagert ist. Extrapolationen der zeitlichen Entwicklung von Schwelldrücken und -hebungen sind nur mit großen Unsicherheiten möglich. Spannungsmessungen im Tunnelausbau und zugehörige Rückrechnungen geben zwar den IST-Zustand realistisch wieder; in der Prognose sind aber die Fragen zu beantworten:

- Welcher Bereich ist quell- / schwellfähig?

- Welcher Bereich um ein Bauwerk wird bautechnisch beeinflusst?
- Welche der Quell- und Schwellvorgänge sind bereits vor Baubeginn abgelaufen?

Quell- und Schwelldruckberechnungen sind daher als ein Analysewerkzeug für mögliche Einwirkungen und Grenzwertbetrachtungen anzusehen. Als Stoffgesetz wird meist die halblogarithmische Beziehung zwischen Spannungen und Quelldehnungen nach HUDER-AMBERG (1970) verwendet. Die Praxis zeigt immer wieder, dass bei Vorhandensein von Anhydrit die Anzahl der Versuche sowie deren Laufzeit zu gering sind, um belastbare Parameter ableiten zu können. Die Prognose leidet weiterhin an der Begrenztheit der Erkundung. Auf der bautechnischen Seite werden Vorgaben zur gebirgsschonenden Ausführung des Bauwerks oftmals nur unzureichend umgesetzt. Daher muss bei allen Projekten eine geologisch-geotechnische und ingenieurmäßige Beurteilung unter Berücksichtigung ungünstiger Szenarien erfolgen.

Ob Tunnel nach dem Widerstandsprinzip oder dem Ausweichprinzip dimensioniert werden, ist im Einzelfall nach geotechnischen und ingenieurmäßigen Kriterien zu entscheiden. Prinzipiell sollten sie aber minimal mögliche Querschnitte haben und als Doppelröhren ausgeführt werden, um bei erforderlichen Sanierungen Vollsperrungen zu vermeiden.

Im allgemeinen geotechnischen Bereich wie auch im Tunnelbau ist also die geotechnische und hydrogeologische Situation von entscheidender Bedeutung, um den beeinflussten Bereich in der Prognose abzuschätzen. In vielen Dingen gilt: Die Einwirkungsmöglichkeiten sind im Einzelnen bekannt, inwieweit sie im konkreten Fall zutreffen, kann bislang aber nur sehr unzureichend abgeschätzt werden.

Literatur

DAUWE, L. UND FRÖHLICH, B. (2005): *Weinsberger Tunnel - Teilerneuerung eines alten Eisenbahntunnels in quellendem Gebirge*. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Universität Darmstadt, Vorträge zum 12. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, Heft Nr. 11, S. 71-81

DGEG (1986): *Quellversuche an Gesteinsproben*. Empfehlung Nr. 11 des AK 3.3 der DGGT, Bautechnik 63 (1986), Heft 3, S. 100 – 104

FLÜCKIGER, A., NÜESCH, R. UND MADSEN, F.T. (1994): *Anhydritquellung*. In: Beiträge zur Jahrestagung DTTG 1994 in Regensburg, Berichte der DTTG, Band 3.

FRÖHLICH, B. (1986): *Anisotropes Quellverhalten diagenetisch verfestigter Tonsteine*. Veröffentlichungen des Inst. f. Bodenmech. u. Felsmech, H. 99, Univ. Karlsruhe, 1986.

- HUDER, J. UND AMBERG, G. (1970): *Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit*. Schweizerische Bauzeitung, Jg. 88, H. 43, S. 975 - 980
- ISRM (1999): *Suggested Method for Laboratory Testing of Swelling Rocks*. Part 1–4, Int. J. of. Rock. Mech. & Min. Sci, Vol. 36, pp. 291-306.
- LEMPP, CH. UND FECKER, E. (2011): *Angewandt-geologische, insbesondere ingenieur-geologische Aspekte der Germanischen Trias* in: N. HAUSCHKE & V. WILDE [Hrsg.]: *Trias - Eine ganz andere Welt*, 2. Auflage in Vorbereitung, München, 2011
- LGRB (2009): *Informationen zum Vorgehen beim Abteufen von Erdwärmesondenbohrungen in sulfatführende Gesteine*. Ergänzend zu Auflagenempfehlungen und Hinweise im neuen Erdwärmesondenformblatt: „Auftrag für eine hydrogeologisch-geotechnische Beurteilung von Bohrvorhaben für Erdwärmesonden (Stand 23.01.2008)“ Az.: 4721/119
- PIMENTEL, E. (1996): *Quellverhalten von diagenetisch verfestigtem Tonstein*. Veröffentlichungen des Inst. f. Bodenmech. u. Felsmech, H. 137, Univ. Karlsruhe, 1996.
- PIMENTEL, E. (2007): *Quellverhalten von Gesteinen - Erkenntnisse aus Laborversuchen*. In: *Quellprobleme in der Geotechnik*, Mitteilungen der Schw. Ges. f. Boden- und Felsmechanik, Heft 154
- SPAUN, G. (1974): *Über die Ursachen von Sohlhebungen in Tunneln des Gipskeupers*, In: *Festschrift Leopold Müller zum 65 Geburtstag*, Karlsruhe, 1974

11 Planung und Ausführung von Erdwärmesonden-Anlagen, Qualitätssicherung mit Fokus auf geothermischer Vorerkundung und fachtechnischer Begleitung der EWS-Bohrung

Claus Heske
CDM Consult GmbH, Bochum
claus.heske@cdm.com

11.1 Einleitung

Für die Planung, Auslegung und Ausführung von Erdwärmesonden-Anlagen sind eine umfassende Grundlagenermittlung und, zumindest bei größeren Anlagen, eine geothermische Standorterkundung erforderlich. Scheinbar triviale Aspekte wie z.B. die Beauftragung erfahrener, in der Geologie und Hydrogeologie ortskundiger Planer und Bohrfirmen werden aus Kostengründen jedoch häufig nicht beachtet. Die Folgen davon können vielfältig sein, z.B.:

- zu hohe Investitionskosten (Überdimensionierung) oder Betriebskosten (Unterdimensionierung) durch eine falsche Auslegung der Anlage,
- Erhöhung der Bohrkosten durch z.B. ein der Geologie nicht angepasstes Bohrverfahren und einer damit einhergehenden Verlängerung der Bauzeit,
- Schäden an der Erdwärmesonden-Anlage oder Gebäuden im Umfeld der Bohrungen durch Unkenntnis von geotechnischen Gefährdungspotenzialen.

Nachfolgend sind einige der grundlegenden Planungsschritte aufgelistet, die zu einer Vermeidung der dargestellten Probleme beitragen können. Die Aufzählungen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Der Planungs- und Untersuchungsumfang ist dem jeweiligen Bauvorhaben entsprechend anzupassen. Zusätzliche Informationen sind u.a. den VDI-Richtlinien 4640 Teil 1 [13] und Teil 2 [14], der Schweizer Norm für Erdwärmesonden [10], dem VBI-Leitfaden Oberflächennahe Geothermie [12], den Leitfäden der Länder und Kommunen, z.B. [11] und [1] oder Fachliteratur wie z.B. [8] zu entnehmen.

Der Personenkreis Geothermie hat ganz aktuell im Februar 2011 einen „Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern“ [9] veröffentlicht. In diesem sind u.a. verschiedene Gefährdungspotenziale und die in Deutschland bekannten Schadensfälle beschrieben. Die hierin zusammengefassten Erfahrungen sind bei der Planung neuer Erdwärmesonden-Anlagen zu berücksichtigen, damit die Fehler der Vergangenheit nicht wiederholt werden.

11.2 Planungsgrundlagen

Beim Projektstart können zur Grundlagenerhebung zunächst folgende Karten und Informationsgrundlagen ausgewertet werden:

- Literaturrecherche zum Projektstandort (Historie)
- topographische Karte
- geologische Karten
- hydrogeologische Karten
- Wasserschutzgebietskarten
- Altlastenkatasterkarten
- Ver- und Entsorgungsleitungen (Telefon, Gas, Wasser, Abwasser)
- Informationsdienste der staatlichen Geologischen Dienste

Auf Grundlage der Kartenlage und den regionalen Kenntnissen ist ein zu erwartendes geologisches Schichtenprofil zu erstellen. Hierin sind die zu erwartenden Besonderheiten und Gefahrenpotenziale [9] wie Verkarstung, Gips, Anhydrit, Grundwasserstockwerksgliederung, Altbergbau, gespanntes Grundwasser, Arteser, Salzlagerstätten, Bohrhindernisse, ggf. auch Altlasten etc. zu vermerken. Entsprechend den Angaben in der VDI-Richtlinie 4640 [13] kann dem geologischen Profil eine mittlere zu erwartende Wärmeleitfähigkeit für eine Vordimensionierung der Erdwärmesonden-Anlage zugeordnet werden. Von der Verwendung von „spezifischen Entzugsleistungen“ für Erdwärmesonden, wie diese in der VDI-Richtlinie 4640 [14] angegeben sind, ist selbst für eine Vordimensionierung abzuraten.

Mit den Behörden sind die prinzipielle Genehmigungsfähigkeit und die am Projektstandort zu erwartenden Auflagen abzustimmen. Die bisher erhobenen Daten sind mit den den Behörden vorliegenden Daten abzugleichen. Für die Fläche sind die Nutzungshistorie, Altlastensituation, Kampfmittelfreiheit und ggf. konkurrierende geothermische Projekte im direkten Umfeld zu klären.

Vom Bauherr und den beteiligten Fachplanern sind die aktuellen Planungsstände anzufordern:

- Katasterplan, Lageplan mit Grundstücksgrenzen und Gebäuden
- Bauzeitenplan
- Baugrundgutachten / geotechnischer Bericht zur Baugrubenwasserhaltung und Gründungskonzept
- Erforderliche Heiz- und oder Kühlleistung und -arbeit nach Angaben des TGA-Planers / Architekten / Heizungsbauer
- Konzept der Wärme- und Kälteversorgung

Mit den bisher erhobenen Daten kann, der aktuellen Detaillierung des Planungsstandes entsprechend, eine Vordimensionierung der Erdwärmesonden-Anlage mit fachspezifischer Software wie z.B. Programm-EWS [16] oder Earth Energy Designer (EED) [15] durchgeführt und für das berechnete Erdwärmesonden-Feld eine Kostenschätzung erstellt werden.

Mit dem Bericht zur Grundlagenermittlung erhält der Bauherr somit eine Machbarkeitsstudie als Entscheidungsgrundlage für die Fortsetzung des Projekts. Die wesentlichen Eckpunkte hierfür sind:

- Genehmigungsfähigkeit mit den standortspezifischen Auflagen
- Machbarkeit, Wärme-Kälte-Konzept geothermisch auf der Fläche umsetzbar
- Bewertung der Gefahrenpotenziale
- Investitionskosten, Wirtschaftlichkeit

11.3 Vorerkundung

Für die Auslegung und den wirtschaftlichen Betrieb von Erdwärmesonden-Anlagen ist die Kenntnis der geothermischen Untergrundparameter die entscheidende Größe. Bei kleineren Anlagen können diese bei Kenntnis des geologischen Schichtenprofils aus Tabellen [13] übernommen werden. Aufgrund der Ungenauigkeit und Schwankungsbreite dieser Parameter sind bei der Auslegung entsprechende Sicherheiten einzuplanen. Bei größeren Anlagen ist deren möglichst genaue Kenntnis unerlässlich, da die Schwankungsbreiten der Parameter bei Unterdimensionierung zu erhöhten Betriebskosten, Schäden an der Anlage und den Gebäuden z.B. durch Frosthebung und zu einem temporären oder Totalausfall der Anlage führen können. Andererseits führt eine Überdimensionierung durch die relativ hohen Gestehungskosten von Erdwärmesonden zu einer falschen Wirtschaftlichkeitsberechnung und damit u.U. zu einem völlig unberechtigten Ausscheiden der Planungsvariante „Erdwärmesonden-Anlage“ bereits in einer frühen Planungsphase.

Im Rahmen der Vor- oder Entwurfsplanung ist daher eine geothermische Standorterkundung mit Pilotbohrung und einem Enhanced Geothermal Response Test (EGRT) zur Erkundung der geologischen, hydrogeologischen und geothermischen Standortgegebenheiten erforderlich. Die Pilotbohrung wird als Erdwärmesonde ausgebaut und später in das zu planende Erdwärmesonden-Feld integriert. Die wesentlichen systemrelevanten mit der Bohrung und dem EGRT zu bestimmenden Parameter sind:

- das geologische Schichtenprofil
- das Tiefenprofil der ungestörten Untergrundtemperatur
- das Tiefenprofil der Wärmeleitfähigkeit

11.3.1 Pilotbohrung

Für die Pilotbohrung ist ein erfahrenes, leistungsfähiges, mit der örtlichen Geologie vertrautes Bohrunternehmen zu beauftragen. Entsprechend der zu erwartenden Geologie ist ein geeignetes Bohrgerät und Bohrverfahren auszuwählen. Die in der Grundlagenermittlung erhobenen standortspezifischen Daten, insbesondere zur Geologie und Hydrogeologie und den damit verbundenen Gefahrenpotenzialen, sind mit den Erfahrungen des Bohrunternehmers abzugleichen. Um sicher zu stellen, dass sich der Bohrunternehmer mit dem Projekt, der bisherigen Planung und insbesondere den Gefahrenpotenzialen und den Auflagen der wasserrechtlichen Erlaubnis auseinandergesetzt hat, kann vom Bohrunternehmer eine Durchführungsplanung [14] gefordert werden. Hierin hat er darzulegen, welches Material, Gerätschaften, Messeinrichtungen etc. er während der Bohrung vorhalten wird und wie er z.B. beim Antreffen eines Artesers, bei Gasaustritten oder bei größeren Klüften während der Ringraumverfüllung reagieren will.

Die Bohrung, der Einbau der Erdwärmesonden-Rohre, die Ringraumverfüllung sowie die Dichtigkeits- und Durchflussprüfungen (nach [10] und [6]) sind vollumfänglich entsprechend den Anforderungen von [2], [3], [4], [5] und den Vorgaben der wasserrechtlichen Erlaubnis zu dokumentieren. Die Dokumentation der Bohrung hat vor Ort zu erfolgen und wird anschließend im Büro digital nachbearbeitet. Die nachträgliche Erstellung der Dokumentation im Büro „aus dem Gedächtnis heraus“ ist nicht zulässig. Die handschriftlichen Feldaufzeichnungen sind mit den Projektunterlagen aufzubewahren.

11.3.2 Der EGRT als Planungs- und Optimierungstool

Der EGRT bietet gegenüber dem klassischen GRT einen entscheidenden Zugewinn an standortspezifischen Daten, die bei der Auslegung des Erdwärmesonden-Feldes mehr Planungssicherheit bieten und für die Optimierung der Anlage hinsichtlich Gesamtbohrmeter, Bohrtiefe und Anordnung der Erdwärmesonden erforderlich sind.

Unter Berücksichtigung geologischer, technischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte ist eine Optimierung der Bohrtiefe des Erdwärmesonden-Feldes möglich, ohne dass hierfür ein zweiter Geländeversuch erforderlich wird, da die Tiefenprofile des EGRT bereits alle erforderlichen Daten beinhalten.

Die Temperatur- und Wärmeleitfähigkeits-Tiefenprofile des EGRT ermöglichen eine qualitativ bessere Bewertung des Untergrunds und bewahren den Planer vor gravierenden Fehlentscheidungen. In Abb. 11.1 sind die Messergebnisse eines EGRT in Norddeutschland dargestellt. Die mittlere Wärmeleitfähigkeit, wie sie auch mit einem klassischen GRT bestimmt worden wäre, beträgt über die 130 m Bohrtiefe ca. 2,1 W/m/K. Eine Reduzierung der Bohrtiefe gegenüber der Pilotbohrung im Rahmen der Ausführungsplanung hätte an diesem Standort gravierende negative Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Erdwärmesonden-Feldes gehabt, da die Wärmeleitfähigkeit erst bei ca. 80 m uGOF von nur ca. 1,7 W/m/K sprunghaft auf ca. 2,7 W/m/K an-

steigt. Desweiteren zeigt das Temperatur-Tiefenprofil der ungestörten Untergrundtemperatur bis in 130 m Tiefe annähernd konstant eine Temperatur von $< 10^{\circ}\text{C}$ an. Die Annahme eines durchschnittlichen geothermischen Gradienten von $3\text{ K}/100\text{ m}$ bei der Dimensionierung des Erdwärmesonden-Feldes mit dem Programm-EWS [16] oder EED [15] würde an diesem Standort für den Heizfall zu einer gravierenden Unterdimensionierung der Anlage führen.

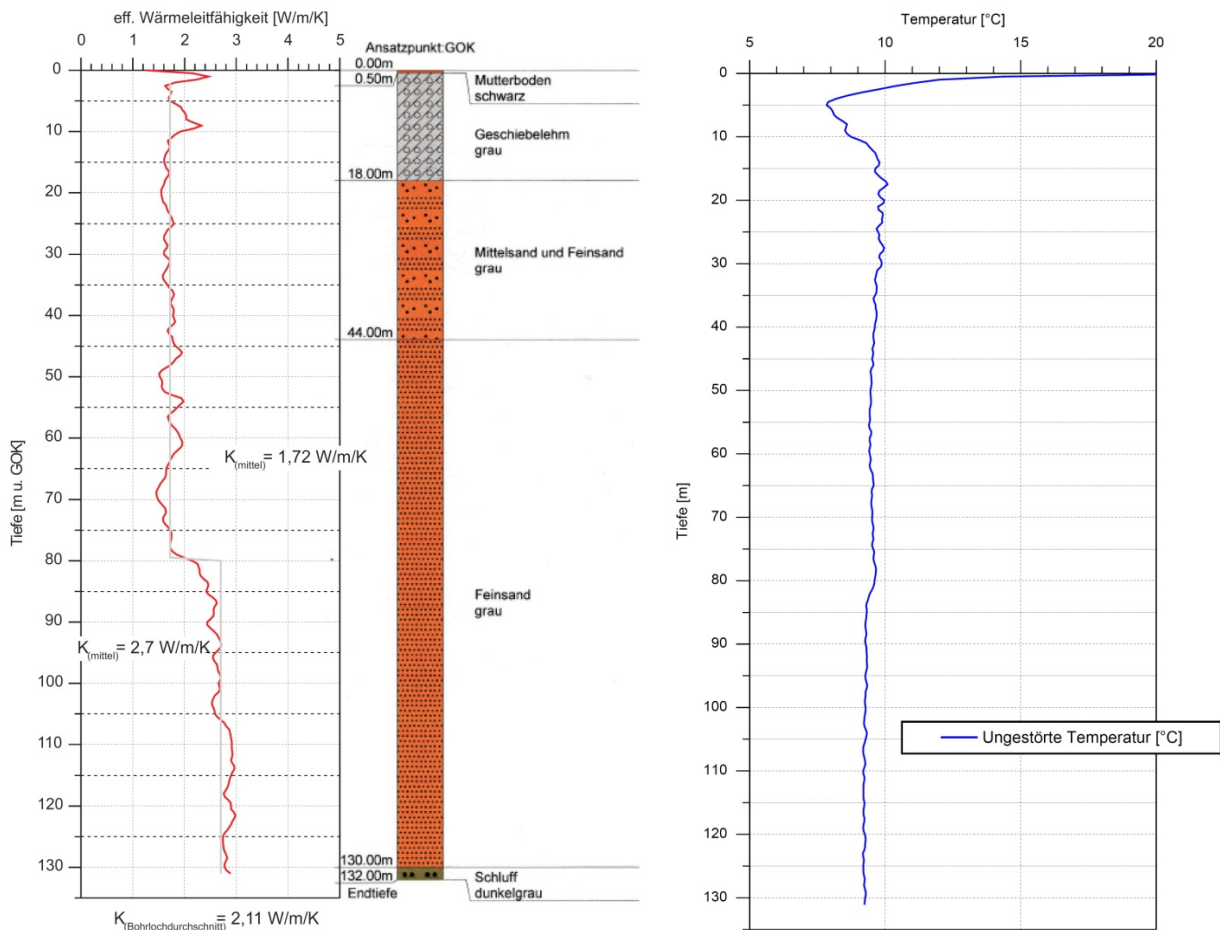


Abb. 11.1: Messergebnisse eines EGRT in Norddeutschland.

- Links: Tiefenprofil der Wärmeleitfähigkeit.
- Mitte: Geologisches Schichtenprofil.
- Rechts: Tiefenprofil der ungestörten Untergrundtemperatur.

Andere Messungen zeigen aber auch unerwartet hohe geothermische Gradienten mit ca. $6\text{ K}/100\text{ m}$ wie z.B. eine Messung in Süddeutschland am Fuß der Schwäbischen Alb, westlich des Uracher Vulkangebiets (Abb. 11.2) belegt. Dies muss im Rahmen einer Variantenstudie bei der Ermittlung der optimalen Bohrtiefe berücksichtigt werden, da in fast allen Neubauten der Kühlanteil eine erhebliche Rolle spielt und bei freier Kühlung über das Erdwärmesonden-Feld bestimmte Vorlauftemperaturen nicht überschritten werden dürfen.

Anhand der Messergebnisse können auch grundwasserführende Klüfte erkannt und Grundwasserleiter von Grundwassernicht- oder –geringleitern unterschieden werden.

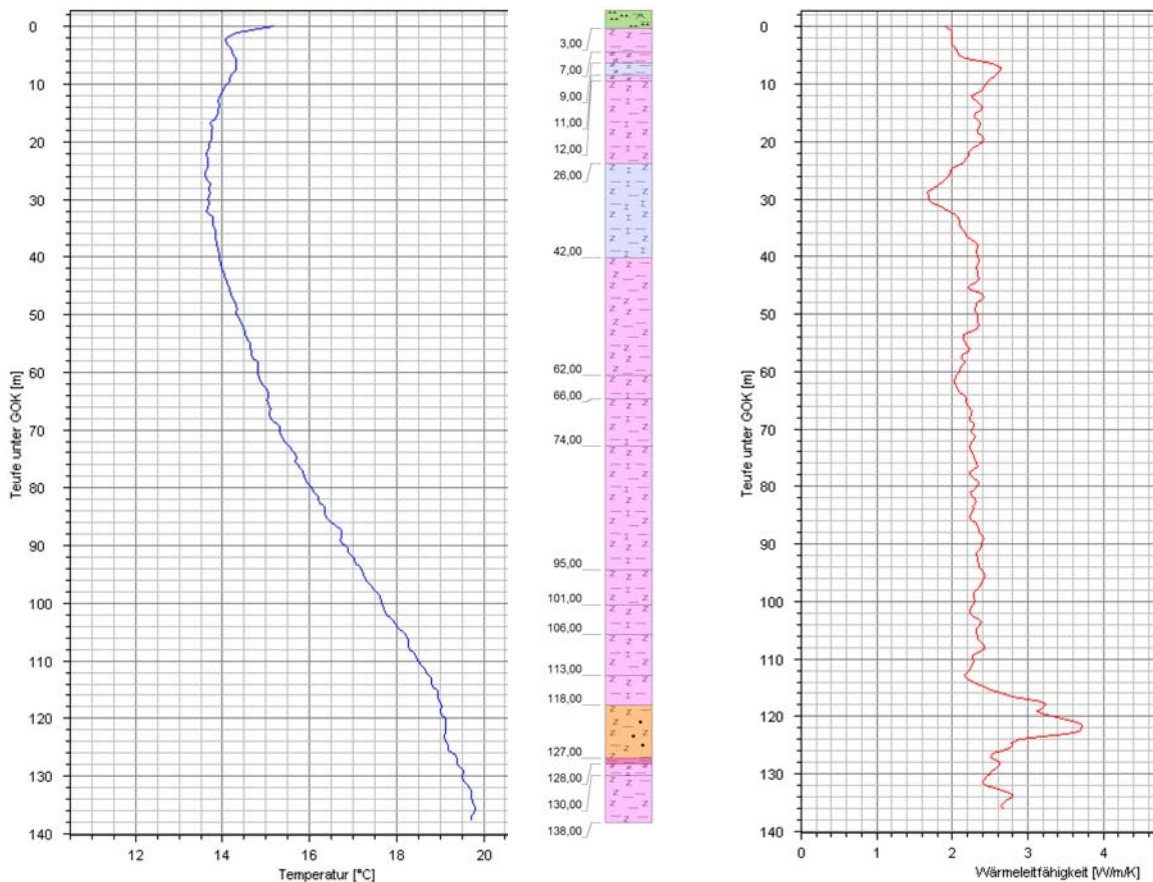


Abb. 11.2: Messergebnisse eines EGRT in Süddeutschland.
 Links: Tiefenprofil der ungestörten Untergrundtemperatur.
 Mitte: Geologisches Schichtenprofil
 Rechts: Tiefenprofil der Wärmeleitfähigkeit.

Eine detaillierte Beschreibung des EGRT, von den theoretischen Grundlagen, dem Versuchsaufbau, über die Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisses, hin zu einer Bewertung der Messergebnisse und deren Auswirkungen auf die Planung, Dimensionierung und Optimierung von Erdwärmesonden-Anlagen ist im bbr-Sonderheft Geothermie 2011 [7] nachzulesen.

11.4 Fachtechnische Begleitung der Bohrungen

Die fachtechnische Begleitung der Erdwärmesonden-Bohrungen hat von einem mit der örtlichen Geologie vertrauten und den für die Erstellung von Erdwärmesonden erforderlichen Arbeitsschritten kundigen Geowissenschaftler zu erfolgen. Der Bauüberwacher muss vom Bohrunternehmer unabhängig sein und damit nicht in einem von ihm ab-

hängigen Arbeits- oder Auftragsverhältnis stehen. Die häufig gängige Praxis, dass ein Bohrunternehmen entsprechend einer Auflage in der wasserrechtlichen Erlaubnis einen Geologen damit beauftragt, die fachtechnisch korrekte Ringraumverfüllung zu begleiten und diese für die Behörde in einem Bericht zu dokumentieren, erfüllt nach Meinung des Autors nicht den Zweck, die Qualitätssicherung der Maßnahme zu gewährleisten. Der Geologe war nicht in die Planung und Vorbereitung der Bohrung involviert. Er hatte weder Einfluss auf die Auswahl des Bohrgeräts, die Bohrtechnik, die Mischapparatur, die Verpresspumpe oder das Verpressmaterial. Um die Kosten gering zu halten wird dieser i.d.R. ausschließlich für die Zeit der Ringraumverfüllung auf die Baustelle bestellt. D.h. Besonderheiten während der Bohrung die Einfluss auf die Ringraumverfüllung haben, entziehen sich seiner Kenntnis, sofern der Bohrgeräteführer ihn darüber nicht in Kenntnis setzt. Eine Baumaßnahme dann bis zur Beseitigung etwaiger Mängel, z.B. das Fehlen einer Spülungswaage oder der Nachlieferung von ausreichendem und qualitativ hochwertigem Verpressmaterial, stillzulegen, bedarf einer mutigen Entscheidung.

Der Geowissenschaftler hat vor Beginn der Baumaßnahme die Baustelleneinrichtung zu überprüfen und sicher zu stellen, dass alle erforderlichen Gerätschaften, Material, Messinstrumente etc. entsprechend der Ausführungs- und Durchführungsplanung in entsprechender Qualität und Menge vorhanden sind. Während der Bauüberwachung hat er alle wichtigen Arbeitsschritte (Bohrung, Einbau der EWS-Sondenrohre, Ringraumverfüllung, Dichtigkeits- und Durchflussprüfung etc.) mindestens einmal zu begleiten und unabhängig von den Aufzeichnungen des Bohrgeräteführers zu dokumentieren.

11.5 Zusammenfassung

Die Planung und Ausführung von Erdwärmesonden-Anlagen erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen TGA-Planern (Heizungsbauer), Geowissenschaftlern und Bohrfirmen. Hierin steckt die Herausforderung für das gute Gelingen der Geothermie-Projekte. Dem Geowissenschaftler als Planer für das Erdwärmesonden-Feld fällt hierbei eine Schlüsselrolle als Schnittstellenkoordinator zu. Es ist seine Aufgabe durch eine fundierte Planung den reibungslosen Verlauf des Projektes vorzubereiten, die Erdwärmesonden-Anlage auszulegen und im Spannungsfeld zwischen gebäudetechnischen Anforderungen und geothermischen Standortbedingungen zu optimieren. Die fachtechnische Begleitung der Baumaßnahmen stellt die qualitativ hochwertige Umsetzung der Ausführungsplanung und die Einhaltung der behördlichen Auflagen sicher. Die Erfolgsgeschichte der oberflächennahe Geothermie darf nicht durch Sparmaßnahmen am Geowissenschaftler, dem entscheidenden Bindeglied zwischen Gebäudetechnik und der ausführender Bohrfirma gefährdet werden.

Literatur

- [1] Amt für Umweltschutz, Landeshauptstadt Stuttgart (03.2006): Nutzung der Geothermie in Stuttgart. - Schriftenreihe des Amt für Umweltschutz - Heft 1/2005, 89 S., 29 Abb., 7 Tab.; Stuttgart.
- [2] DIN 4023 (2006-02): Geotechnische Erkundung und Untersuchung; Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse von Bohrungen und sonstigen direkten Aufschlüssen. - Berlin; Beuth Verlag.
- [3] DIN EN ISO 14688-1 (2011-06): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2002); Deutsche Fassung EN ISO 14688-1:2002. Berlin; Beuth Verlag.
- [4] DIN EN ISO 14688-2 (2011-06): Geotechnische Erkundung und Untersuchung; Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden; Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen (ISO 14688-2:2004); Deutsche Fassung EN ISO 14688-2:2004. Berlin; Beuth Verlag.
- [5] DIN EN ISO 14689-1 (2004-04): Geotechnische Erkundung und Untersuchung; Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels; Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14689-1: 2003); Deutsche Fassung EN ISO 14689-1:2003. Berlin; Beuth Verlag.
- [6] DVGW W Arbeitsblatt 400-2 (2004-09): Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) - Teil 2: Bau und Prüfung. - WVGW; Bonn.
- [7] Heske, C.; Kohlsch, O., Dornstädter, J. & Heidinger, P. (2011): Der Enhanced-Geothermal-Response-Test als Auslegungsgrundlage und Optimierungstool. - in: Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau (bbr), bbr-Sonderheft 2011 Oberflächennahe Geothermie; WVGW; Bonn.
- [8] Koenigsdorff, R. (2011): Oberflächennahe Geothermie für Gebäude. Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung. - 332 .S, 132 Abb., 39 Tab.; Fraunhofer IRB Verlag; Stuttgart.
- [9] Personenkreis Geothermie, der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie (02.2011): Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern. - Informationen a. d. Bund/Länder-Arbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste. Wiesbaden
- [10] Schweizer Norm (01.2010): SIA 546 384/6:2010 Bauwesen: Erdwärmesonden. - 75 S., SIA Eigenverlag; Zürich.
- [11] Umweltministerium Baden-Württemberg (05.2005): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdsonden. - 4. überarb. Aufl.; Stuttgart.

- [12] Verband Beratender Ingenieure VBI (10.2008): VBI-Leitfaden Oberflächennahe Geothermie. - Bd. 18 der VBI-Schriftenreihe, 59 S; VBI Eigenverlag; Berlin.
- [13] Verein Deutscher Ingenieure (06.2010): VDI-Richtlinie 4640 Teil1: Thermische Nutzung des Untergrundes. Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. Beuth Verlag; Berlin.
- [14] Verein Deutscher Ingenieure (09.2001): VDI-Richtlinie 4640 Teil 2: Thermische Nutzung des Untergrundes. Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Beuth Verlag; Berlin.
- [15] Earth Energy Designer - EED
URL: <http://www.buildingphysics.com/index-filer/Page1099.htm>
- [16] Programm-EWS
URL: <http://www.hetag.ch/ews.html>

12 Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS)

Eva de Haas

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (UM) Baden-Württemberg

Eva.deHaas@um.bwl.de

12.1 Aktuelle Situation

Durch die aktuellen Ereignisse in Baden-Württemberg im Vorfeld des Kolloquiums und die damit verbundenen veränderten genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen für die Ausführung von Bohrungen für Erdwärmesonden, konnte der ursprünglich geplanten Beitrag über den Leitfaden des UM Baden-Württemberg zur Qualitätssicherung bei der Ausführung von Erdwärmesonden nicht mehr abgedruckt werden.

Das UM kündigten am 18.08.2011 an, oberflächennahe Geothermie ab sofort nur noch bei einer generellen Tiefenbegrenzung der Bohrung bis zum ersten Grundwasserstockwerk zuzulassen. Die Tiefenbeschränkung der oberflächennahen Geothermie kann wieder zurückgenommen werden, sofern von der Geothermie-Branche praxistauglichen Vorschlägen vorgelegt werden, wie Qualitätsstandards bei Bohrungen künftig eingehalten und überwacht und wie Geschädigte bei Verstößen schnell entschädigt werden können. Mit Pressemitteilung vom 08.09.2011 konkretisierte das UM die Erwartungen an die Geothermiebranche.

Zum Zeitpunkt des Drucks der Unterlagen für das VEGAS-Kolloquium 2011 befand sich die Lösungsfindung noch in der Diskussion. Die Vortragsfolien, die den aktuellen Stand zum Zeitpunkt des Kolloquiums darstellen werden, sollen im Nachgang des Kolloquiums auf der Internetseite von VEGAS eingestellt werden:

www.vegas.uni-stuttgart.de

In den nachfolgend abgedruckten Pressemitteilung des UM Baden-Württemberg vom 18.08.2011 und 08.09.2011 sind die genannten äußeren Umstände kurz dargestellt.

12.2 Pressemitteilung UM Baden-Württemberg vom 18.08.2011



Baden-Württemberg

Sie sind hier: [UM](#) > [Das Ministerium](#) > [Presse](#) > [Pressemitteilungen](#) > [PM_20110818_2](#)

Oberflächennahe Geothermiebohrungen nur noch innerhalb des obersten Grundwasserstockwerks

Untersteller: „Wir müssen dafür sorgen, dass die Qualitätsanforderungen an Geothermiebohrungen eingehalten werden“

18.08.2011 Franz Untersteller zeigte sich alarmiert durch die in Leonberg und Renningen sichtbar gewordenen Mängel bei Geothermiebohrungen. „Nicht allein, dass vielen Hausbesitzern und Familien durch die Risse in ihren Gebäuden ein sehr hoher Schaden entstanden ist“, sagte Untersteller, es sehe überdies so aus, als sei der Schaden vermeidbar gewesen.

Sollte sich herausstellen, dass die Bohrfirmen vor Ort tatsächlich Fehler gemacht und Auflagen schlicht missachtet hätten, dann wären das genau die Fälle, die nicht passieren dürfen, betonte der Umweltminister.

„Wir brauchen die Geothermie als Baustein der Energiewende. Aber wir werden sie nur nutzen können, wenn wir sie technologisch beherrschen und Risiken minimieren“, so Untersteller.

Als erste Konsequenz aus den jüngsten Vorkommnissen kündigte Untersteller deshalb an, oberflächennahe Geothermie ab sofort nur noch bei einer generellen Tiefenbegrenzung der Bohrung bis zum ersten Grundwasserstockwerk zuzulassen. Damit werde die problematische sogenannte stockwerksübergreifende Bohrung, bei der zwei Grundwasserschichten miteinander verbunden werden, ausgeschlossen. Es stelle sich dann zwar mehr als bisher die Frage nach der Wirtschaftlichkeit mancher Bohrvorhaben. In Bayern, wo diese Regelung bereits angewendet werde, sei aber zu beobachten, dass sich dennoch ein Markt für erdgekoppelte Wärmepumpen entwickelt habe.

Die Beschränkung der oberflächennahen Geothermie auf geringere Tiefen könne im Übrigen auch wieder zurückgenommen werden, sagte der Umweltminister. Die Genehmigung von tieferen Bohrungen, als nur bis zur ersten Grundwasserschicht, machte er aber von praxistauglichen Vorschlägen der Geothermie-Branche abhängig, wie Qualitätsstandards bei Bohrungen künftig eingehalten und überwacht und wie Geschädigte bei Verstößen schnell entschädigt werden können. „Da kann ich mir die Einrichtung eines Solidarfonds vorstellen“, sagte Untersteller.

Speziell in Leonberg, wo mehr als 20 Häuser starke Schäden aufweisen, hoffe er jetzt darauf, dass alle Beteiligten verantwortungsvoll mit der Situation umgehen.

Unterstützung durch das Land könne es aber nicht geben, bekräftigte Untersteller. Der Leonberger Fall liege anders als der Fall Staufen, wo das Land sich zur finanziellen Hilfe bereit erklärt hat. Zuerst sei in Leonberg der Verursacher der Schäden in die Pflicht zu nehmen, nicht die Allgemeinheit.

Quelle: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

12.3 Pressemitteilung UM Baden-Württemberg vom 08.09.2011



Sie sind hier: [UM](#) > [Das Ministerium](#) > [Presse](#) > [Pressemitteilungen](#) > [PM_20110908_1](#)

Umweltministerium konkretisiert Erwartungen an die Geothermie-Branche

Franz Untersteller: Der Schutz der Gebäude- und Wohnungseigentümer vor Bohrungs-Schäden hat für uns oberste Priorität

08.09.2011 Nachdem in Leonberg nach oberflächennaher Geothermiebohrung an rund 25 Häusern zum Teil erhebliche Schäden aufgetreten sind, hat das Umweltministerium am 18. August die zulässige Tiefe von Geothermiebohrungen deutlich begrenzt. Seither sind nur noch Bohrungen innerhalb des ersten Grundwasserstockwerks erlaubt. Damit soll verhindert werden, dass zwei Grundwasserleiter verbunden werden; eine solche Verbindung ist mutmaßlich ursächlich unter anderem für die Schäden an den Häusern in Leonberg.

„Wir wollen die Tiefenbegrenzung gerne wieder aufheben“, erklärte Umweltminister Franz Untersteller heute (8. September 2011), „weil wir die Geothermie als Energieform und die Geothermie-Branche als Wirtschaftszweig nicht unnötig lange einschränken wollen.“ Davor allerdings müsse die Branche sicher stellen, dass künftige Geothermie-Bohrungen kein unkalkulierbares Risiko für Bauherren und anliegende Dritte seien.

Die Geothermie sei eine wichtige Technologie, um die geplante Energiewende zu schaffen. „Ich habe aber den Eindruck, dass es in Leonberg an Sorgfalt bei der Anwendung technologischen Know-hows gemangelt hat“, so Untersteller. Dass die gesamte Geothermie durch solche Schadensfälle in Verruf gerate, sei inakzeptabel. Da sei die Branche jetzt in der Pflicht.

Das Umweltministerium werde in Kürze Leitlinien zur Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden veröffentlichen. Diese Leitlinien würden von den Behörden bei den Zulassungsbescheiden zugrundegelegt. Von der Branche werde erwartet, dass die Vorgaben „auf Punkt und Komma“ eingehalten werden, betonte der Umweltminister. Die Leitlinien, die den Unternehmen im Übrigen seit längerem im Grundsatz bekannt seien, enthielten unter anderem Mindestkriterien für die Qualifikation des Bohreräteführers sowie der zu verwendenden Baustoffe beim Erdwärmesondenbau. Auch Vorgaben zur Überwachung der Bohrungen würden gemacht.

Unverzichtbar sei insbesondere, dass bei oberflächennahen Bohrungen über mehrere Grundwasserstockwerke künftig eine externe unabhängige Kontrolle stattfinde. „Die Bohrarbeiten müssen von einem unabhängigen Sachverständigen begleitet und abschließend begutachtet werden“, so der Umweltminister. Die zu erwartenden Mehrkosten seien durch den Gewinn an Sicherheit gerechtfertigt.

Dazu müsse der so genannte Abdichtungsvorgang, der nötig ist, um bei stockwerksübergreifenden Arbeiten die Grundwasserleiter getrennt zu halten, lückenlos automatisch überwacht und dokumentiert werden. „Ich erwarte, dass die Unternehmen die dafür erforderliche Ausrüstung beschaffen.“

Das Vorhaben der Branche, eine Telefonhotline einzurichten, bei der Gebäudeeigentümer aber auch Unternehmen bei bohrtechnischen Problemen vor Ort schnelle Beratung bekommen, bezeichnete Franz Untersteller als richtigen Schritt, um verlorenes Vertrauen wieder zurückzugewinnen. Auch die Ankündigung, Schulungskonzepte für Bohreräteführer und Kontrolleure zu entwickeln, sei eine wichtige Maßnahme, um das Qualitätsniveau der Geothermie-Unternehmen insgesamt zu steigern.

Wenn es trotz aller Maßnahmen doch zu Schäden komme, betonte der Umweltminister, seien in erster Linie die ausführenden Bohr-Unternehmen in der Pflicht. „Diese Verantwortung müssen sie endlich annehmen und danach handeln!“ Das schließe notwendig ein, dass sich die Unternehmen um einen ausreichenden Versicherungsschutz kümmern, mit dem gewährleistet ist, dass Bohrungsschäden bei Dritten umfassend und schnell beglichen werden. „Es darf kein monatelanges Tauziehen um Verantwortlichkeiten geben, wenn bei einer Erdwärmebohrung völlig unbeteiligte Dritte geschädigt werden.“

Untersteller zeigte sich nach Gesprächen zuversichtlich, dass Versicherungswirtschaft und Geothermie-Branche in der Frage von Versicherung und Schadenregulierung die Forderung des Landes aufgreifen. Es sei gerechtfertigt, die vor kurzem ausgesprochene Tiefenbegrenzung bei oberflächennaher Geothermie wieder aufzuheben, wenn das jetzt konzipierte Qualitäts-Paket umgesetzt werde.

Quelle: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

13 Bohrverfahren, Bohrtechnik und Umgang mit schwieriger Geologie

Frank Burkhardt
Burkhardt GmbH & Co. KG, Neuweiler
frank@burkhardt-bohrungen.de

13.1 Einführung

Die Wirtschaftlichkeit von Geothermieprojekten hängt unmittelbar mit den anfallenden Bohrkosten zusammen. Außerdem sind die Bohrlochqualität sowie die Umweltverträglichkeit bei der Erstellung von Erdwärmebohrungen maßgeblich von dem gewählten Bohrverfahren abhängig. Unter Bohrlochqualität sind Eigenschaften wie Maßhaltigkeit bis zur Endteufe, Abweichung aus der Lotrechten und der Einfluss auf die Standfestigkeit zu verstehen. Weiter sollte auf die Reaktionsmöglichkeit bei auftretenden Problemen geachtet werden.

Die Auswirkungen auf die Umwelt hängen bei der Bohrlöcherstellung sowohl direkt vom Dieserverbrauch des Antriebsaggregats und des Bohrgerätes, als auch vom Eintrag von Schadstoffen der je nach Bohrverfahren verwendeten Arbeits- und Spülmedien ab.

Des Weiteren zeigen Schäden aus jüngster Vergangenheit, das Bohrverfahren auch nach der Erkennbarkeit von Wasserleitern und möglichst genauer Probenansprache ausgewählt werden sollten.

13.2 Einteilung der Bohrverfahren

Für Bohrungen in der oberflächennahen Geothermie werden hauptsächlich Bohrverfahren eingesetzt, welche aus dem Brunnen- und Spezialtiefbau stammen. Diese wurden von den erforderlichen Durchmesser bei Brunnenbohrungen, von größer 250 mm und von relativ kleinen Bohrtiefen im Spezialtiefbau auf die Erfordernisse der Erdwärmebohrungen angepasst. Hier sind große Bohrtiefen (bis 400 m) gefordert und kleine Durchmesser thermisch sinnvoll. Es kommen in erster Linie direkte Spülbohrverfahren zur Anwendung. Bei diesem Verfahren wird das aus dem anstehenden Boden gelöste Bohrgut kontinuierlich in einem Spülstrom an die Oberfläche gefördert. Durch die oft wechselnden und zum Teil nicht standfesten Untergrundverhältnisse in Deutschland, ist das Doppelkopfb Bohrverfahren mittlerweile sehr verbreitet. In Ausnahmefällen und bei Wasser-Wasser-Wärmepumpenanlagen werden auch Trockenbohrungen sowie indirekte Spülbohrverfahren eingesetzt. Durch mehrere Schadensfälle bei Erdwärme-

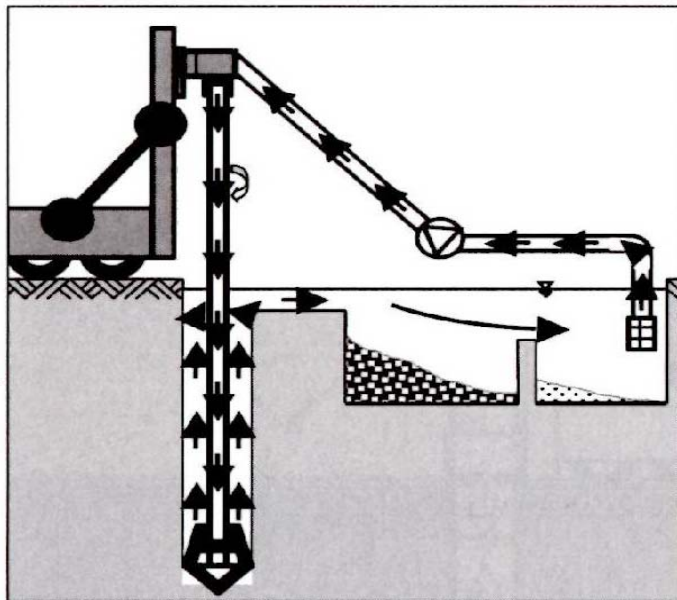
sondenbohrungen legen mittlerweile auch einige Genehmigungsbehörden ein Augenmerk auf die eingesetzten Bohrverfahren und die daraus resultierenden Gefahren und die Möglichkeiten zur schnellen Reaktion bei vereinzelt auftretenden Problemen. Aus diesem Grund sind bei den Bohrverfahren künftig einige Änderungen zu erwarten und manche derzeit eingesetzte Verfahren können so nicht mehr verwendet werden. So werden z.B. Bohrungen mit dem Rollenmeißel im Festgestein für Erdwärmesonden in Zukunft nicht mehr eingesetzt werden können.

13.3 Spülbohrverfahren

Spülbohrungen zeichnen sich durch einen kontinuierlichen Spülstrom, durch welchen das Bohrgut gefördert wird aus. Die Probenentnahme findet im Spülstrom statt. Als Spülung kommen entweder Luft oder Wasser mit speziellen Zusätzen zum Einsatz. Bei Spülbohrungen wird zwischen direkten und indirekten Bohrungen unterschieden, wobei die Fließrichtung der Spülung entscheidend ist. Da das indirekte Spülbohrverfahren, zu welchem zum Beispiel das Luft- Hebe- Bohrverfahren gezählt wird, findet in der oberflächennahen Geothermie wenig Bedeutung. Aus diesem Grund wird dieses nicht näher beschrieben.

13.3.1 Drehendes direktes Spülbohren

Beim drehenden direkten Spülbohren wird kontinuierlich Spülflüssigkeit von einer Spülpumpe durch das Bohrgestänge zur Bohrlochsohle gepumpt. Die Spülung tritt unter Druck aus dem Bohrwerkzeug aus.



Druck aus dem Bohrwerkzeug aus. Das Lösen des Untergrundes erfolgt über eine drehende Bewegung des Bohrwerkzeuges auf der Bohrlochsohle. Das Bohrgut wird durch den austretenden Spülstrom aufgewirbelt und durch den Ringraum außerhalb des Bohrgestänges im Spülstrom an die Oberfläche gefördert.

Abbildung 1
Schema direkte Spülbohrung [1]

An der Oberfläche wird die Spülflüssigkeit in Spülwannen oder Spülteiche geleitet. Dort sedimentiert das Bohrgut und die unbeladene Spülflüssigkeit wird erneut in das Bohrgestänge gepumpt. So stellt sich ein geschlossener Spülkreislauf ein.

Die Spülflüssigkeit hat jedoch nicht nur die Aufgabe der Bohrgutförderung, sondern dient auch der Stabilisierung der Bohrlochwand, der Verzögerung des Absinkens von Bohrklein bei Unterbrechungen des Spülvorgangs durch spezielle Zusätze in der Spülflüssigkeit, sowie der Kühlung und Schmierung des Bohrwerkzeuges.

Als Bohrwerkzeug bei direkten Spülbohrverfahren dienen im Lockergestein Flügel- oder Stufenmeißel und im Festgestein Rollen- oder PCDmeißel.

13.3.2 Drehschlagendes direktes Spülbohren (Imlochhammerbohren)

Bei Bohrungen im Festgestein, in harten, bindigen Böden, sowie in sehr grobkörnigen Böden¹, haben sich drehschlagend arbeitende Spülbohrverfahren mit direkter Luftspülung bewährt. Das Lösen des Gesteins erfolgt durch eine sich sehr schnell wiederholende Schlagbewegung auf den Bohrmeißel. Um zu verhindern, dass der Bohrmeißel und die sich darauf befindlichen Disken in den schon gelösten Boden schlagen, muss dieser durch das Bohrgestänge gedreht werden. Können bei geringen Bohrtiefen bis maximal 30 m noch Außenhämmer verwendet werden, so ist bei größeren Teufen ein Imlochhammer (auch: Versenkhammer, Senkbohrhammer, Down The Hole Hammer(DTH)- oder Tieflochhammer) vorzuziehen.

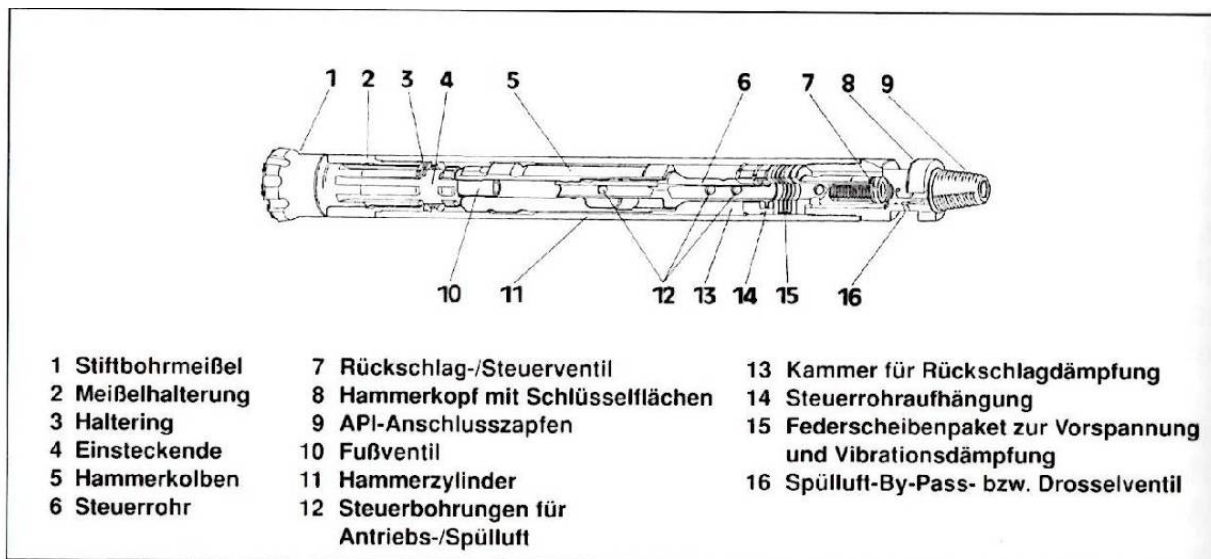


Abbildung 2 Schnitt durch einen Imlochhammer [2]

¹ In nicht standfesten Böden nur verrohrt möglich.

Die Drehbewegung erfolgt über einen überträgigen Kraftdrehkopf. Die eingesetzte Luftspülung übernimmt sowohl die Funktion des Bohrgutaustrages als auch die Übertragung der Antriebsenergie auf den Imlochhammer(ILH). Die durch das Bohrgestänge und anschließend durch den ILH strömende Luft betätigt in diesem, durch ein Wege- und Ventilsystem, einen Schlagkolben, der auf den unten am ILH angebrachten Stiftbohrmeißel oder auch Bit wirkt. Die Frequenz liegt hier bei bis zu 3000 Schlägen pro Minute. Die dann aus dem Hammer ausströmende Luft dient außerdem der Kühlung des Bohrwerkzeuges und der Reinigung der Bohrlochsohle.

Die Vorteile dieses Bohrsystems werden im Folgenden aufgezählt:

- Bohrtiefen von bis zu 400 m möglich,² in Ausnahmefällen wurden sogar schon Bohrtiefen von 4.000 m erreicht³
- Sehr hoher Bohrfortschritt
- Teufengerechte Zuordnung von Wasseranschnitten möglich
- Durch geringe Anforderungen an Zugkräfte und Drehmoment sind große Bohrleistungen mit vergleichsweise kleinen Geräten möglich
- Einsparung von aufwändigen Maßnahmen zur Wasserversorgung
- Durch sehr hohe Aufstiegsgeschwindigkeiten werden die Proben wenig entmischt, haben daher eine wesentlich bessere Aussagekraft als bei anderen Spülbohrungen
- Durch den Einsatz von Preventern und Ableitschläuchen kann sehr sauber gearbeitet werden
- Der Eintrag von Stoffen in den anstehenden Boden und dessen Wasserleiter wird auf ein Minimum reduziert

Da Luft als Spülmedium über eine deutlich geringere Tragfähigkeit als eine auf Wasser basierende Spülung verfügt, muss dieses durch eine wesentlich höhere Aufstiegs- geschwindigkeit kompensiert werden. So sollte die für einen effektiven Austrag des Bohrkleins erforderliche Geschwindigkeit mindestens 20 m/s oder besser 40 m/s betragen.

Durch diese sehr hohen Geschwindigkeiten treten in den Schläuchen und Armaturen, sowie im Spülkopf und im Bohrgestänge sehr große Reibungsverluste auf. Diese können auf keinen Fall vernachlässigt werden und sind der Grund dafür, dass ein einge-

² Fa. Burkhardt Bohrteufe 404 M mit Imlochhammer Durchmesser 220mm

³ Vgl.: Drillco Imlochhämmer Puma Diamond Deep Drilling in Texas und Oklahoma USA

setzter Kompressor ca. 20 % größer, als für den Imlochhammer erforderlich, ausgelegt sein sollte.

Die größten Verluste und somit auch den größten Einfluss auf die Geschwindigkeit haben jedoch Wasserzutritte in der Bohrung. Ab ca. 180 m Teufe kann so weit gehen, dass ein Imlochhammer durch den Gegendruck „abgewürgt“ wird und kein Bohrfortschritt mehr möglich ist.

In Anbetracht der Tatsache, dass die Schlagfrequenz proportional zum Arbeitsdruck ist, wird hier der Einfluss des Gegendruckes auf die Bohrgeschwindigkeit deutlich.

Der maximal anstehende Gegendruck ist jeweils beim Bohrbeginn nach Unterbrechung des Bohrvorgangs, z.B. nach Pausen oder dem Nachsetzen eines Gestänges, zu überwinden. Ein Rückschlagventil im Hammer sorgt dafür, dass kein Wasser oder Bohrgut in den Hammer eindringen kann und wird bei großen Tiefen oft von einem zweiten Ventil im Gestängestrag ergänzt.

Ein aufmerksamer und geschulter Geräteführer kann hier über die Veränderung von Drücken am Manometer genaue Aussagen über die Wasserzutritte in der Bohrung treffen⁴. Die Aussagekraft dieser Daten wird oft unterschätzt oder nicht beachtet.

Um einer Staubentwicklung entgegen zu wirken, kann der eingesetzten Luft Wasser in einer Menge von ca. 5 bis 50 Litern pro Minute zugesetzt werden. Dies unterbindet nicht nur die Staubbildung, sondern führt zu einem saubereren Bohrloch und schmiert den Imlochhammer.

13.4 Kombinationsbohrverfahren

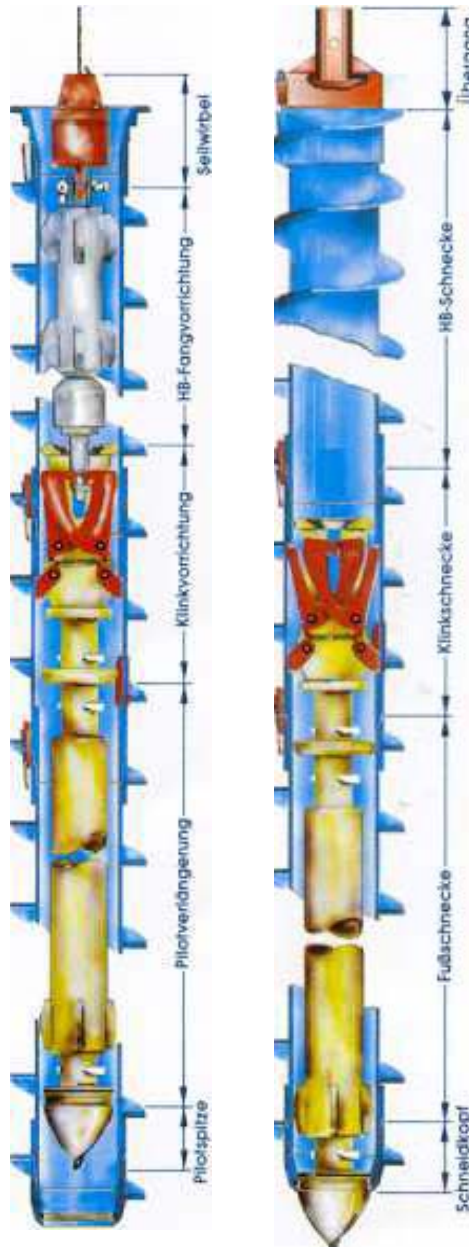
Die Kombination von zwei oder mehreren verschiedenen Bohrverfahren kann bei bestimmten geologischen Gegebenheiten oder bei besonderen Anforderungen Vorteile mit sich bringen. So kann zum Beispiel das Verrohren aus der Trockenbohrtechnik mit einer Spülbohrung kombiniert werden und so ein simultanes Bohren und Verrohren ermöglichen. In der Kombinationsbohrtechnik wird zwischen dem Hohlbohrschneckenverfahren und den Überlagerungsbohrverfahren unterschieden. Die Kombinationsbohrverfahren zeichnen sich in der Regel durch einen sehr hohen Bohrfortschritt aus und sind somit sehr gut zur Erstellung von Erdwärmesondenbohrungen geeignet. Nach eigener Erfahrung werden immer mehr Bohrungen in diesen Verfahren niedergebracht.

⁴ Vgl.: Vortrag Arbeitskreis Geothermie im Umweltministerium von Frank Burkhardt „Ansprache Grundwasserverhältnisse während den Bohrarbeiten“

So gibt es Bohrfirmen, die Geothermiebohrungen ausschließlich in den folgenden Bohrverfahren abteufen.

13.4.1 Hohlbohrschneckenbohrverfahren

Das Hohlbohrschneckenverfahren gehört zu den Kombinationsverfahren, weil es ohne Spülmedium arbeitet aber trotzdem eine kontinuierliche Bohrgutförderung aufweist.



Hohlbohrschnecken (auch HBS, Endloshohlschnecke) weisen ein zum Wendeldurchmesser vergleichsweise großes Seelenrohr auf. Das Verhältnis von Innendurchmesser des Rohres zu Außendurchmesser der Schneckenwendel ist in der Regel kleiner 2,5. Durch die durchgehende Wendel wird das Bohrgut kontinuierlich gefördert. Durch den großen Durchmesser des Seelenrohres und die geschlossene Spitze findet jedoch auch eine Teilverdrängung des Bodens statt. Betrachtet man eine für Geothermiebohrungen üblich eingesetzte Hohlbohrschnecke liegt man schnell bei einem Außendurchmesser von 200 bis 250 mm. Daraus ergibt sich ein sehr hoher Drehmomentbedarf, welcher von vielen Geothermiegeräten nicht aufgebracht werden kann. Die maximale Einsatztiefe liegt bei ca. 50 m, da bei diesen Tiefen das maximale Drehmoment für die jeweiligen Schnecken erreicht wird. Ein Einsatz von Hohlbohrschnecken ist jedoch nur im Lockergestein, am besten in Kiesen und Sanden, möglich. Aufgrund immer öfter vorgeschriebener Bohrtiefenbegrenzungen durch den Grundwasserschutz erfreut sich dieses Bohrsystem wieder wachsender Beliebtheit.

Abbildung 3

Schnitt Hohlbohrschnecke, Fa. Nordmeyer [3]

Die Besonderheit bei den Hohlbohrschnecken sind sowohl die Verbinder der einzelnen Schnecken als auch die Spitze. So müssen die Verbinder alle Kräfte übertragen, dicht sein und ein Linksdrehen ermöglichen. Dies ist zum Beispiel erforderlich, wenn die Schnecke festgefahren wurde und geschieht, wenn die Vorschubgeschwindigkeit im Verhältnis zur Drehzahl zu hoch ist. Hier kann die Schnecke das Bohrgut nicht mehr

nach oben fördern, sondern dreht sich in den Boden wie ein Korkenzieher. Für die Verbinder können folgende Ausführungen zum Einsatz kommen:

- selbstdichtende, rechtsdrehende Gewindeverbinder
- glatte Verbinder mit Passfedern und Nuten evtl. mit Dichtungen
- achteckige Verbinder mit Dichtung
- Zahnsteckverbinder mit und ohne Dichtung

Die Verbindungen sind mit Bolzen, Keilen oder Klappmanschetten gegen Lösen gesichert. Bei Gewindeverbindern wird das Linksdrehen durch Sicherungskeile ermöglicht.

13.4.2 Überlagerungsbohrverfahren

Das mit Abstand am meisten verwendete Bohrverfahren in der oberflächennahen Geothermie ist das Überlagerungsbohren. Gerade für Geothermiebohrungen in nicht standfestem Untergrund oder bei wechselnden Bodenverhältnissen, wird häufig auf die Überlagerungsbohrtechnik zurückgegriffen. Sie ermöglicht das simultane Mitführen der Verrohrung während der Bohrarbeiten mit dem am Innengestänge angebrachten Bohrwerkzeug.

Um dieses zu ermöglichen können verschiedene Systeme zum Einsatz kommen. Beim Doppelkopfbohren wird ein konventioneller Spülbohr-Kraftdrehkopf mit einem Doppelrotorkopf versehen. Dieser ermöglicht die Aufnahme von zwei Bohrsträngen, Gestänge und Außenverrohrung, gleichzeitig, welche dann in gleicher Drehrichtung vom Kraftdrehkopf angetrieben werden. Über den Außenstrang können so glatte Gewindebohrrohre, gleichzeitig mitgeführt werden. Diese lassen sich mit verschiedenen Spülbohrwerkzeugen und Imlochhämmern kombinieren, die über den Innenstrang angetrieben werden.

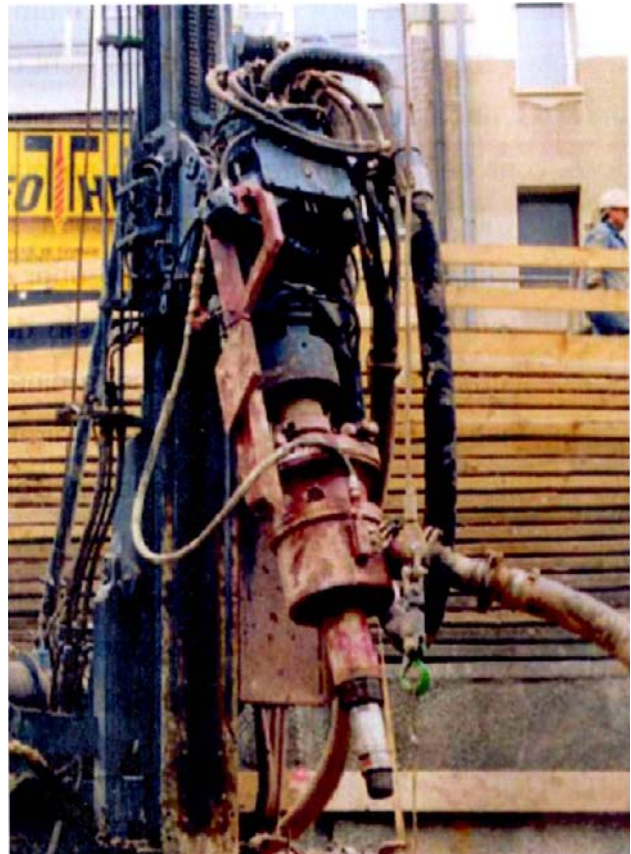


Abbildung 4 Doppelrotorkopf an Kraftdrehkopf angebaut, Fa. Nordmeyer [4]

Bei dem Einsatz von Doppelrotorköpfen an herkömmlichen Kraftdrehköpfen wird das Drehmoment über ein Gewindeschonstück an das Gestänge und über den Spannkopf an die Außenverrohrung übertragen. Dies ermöglicht nicht nur das Drehen der beiden in eine Richtung, sondern lässt auch ein kurzzeitiges entkoppeln zu. So können eventuelle Verstopfungen oder Brücken gelöst werden. Die Abführung des Bohrkleins erfolgt über den Ringspalt zwischen Gestänge und Verrohrung. Der Doppelrotorkopf besitzt mehrere Dichtungspakete, welche es dann ermöglichen das in den drehenden Rohren ankommende Bohrgut in einen stehenden Schlauch und danach weiter in Container abzuleiten.



Abbildung 5 Ringbohrkrone und Imlochhammerbit

Beim Doppelkopfborehen erfolgt der Antrieb über zwei getrennte Drehantriebe, welche übereinander an dem Bohrmast oder der Bohrlafette angebracht sind. Der untere Drehantrieb ist mit einer Hohlwelle ausgestattet und nimmt in der Regel einen Preventer⁵ zur Bohrgutabfuhr auf. Der untere Kraftdrehkopf ist für die Rotation der Verrohrung zuständig und hat meist ein sehr viel größeres Drehmoment als der obere Kopf. Der obere Drehantrieb übernimmt den Antrieb des Innengestänges und nimmt den Spülkopf auf. Dieser Gestänge-Kraftdrehkopf hat eine wesentlich höhere Drehzahl als der untere. Der Antrieb erfolgt über eine Ausgleichsstange, durch die Hohlwelle des unteren Kopfes. Die Antriebe können völlig unabhängig voneinander arbeiten und drehen bei den meisten Einsätzen gegenläufig.

Ein weiterer Vorteil ist, dass die Köpfe gegeneinander verschoben werden können und so vor- oder nacheilend gebohrt werden kann. Damit kann das Bohren einerseits an den Bohrwiderstand (Vorbohren bei hohem Widerstand) und andererseits die Bohrlochsicherung (Vorausseilen der Verrohrung bei hydraulischem Grundbruch im Bohrloch

⁵ Ein Preventer ist eine Einrichtung welche es ermöglicht das Bohrgut vom Drehenden Bohrstrang in einen stehenden Schlauch überzuleiten und Verrohrung und Gestänge gegeneinander abzudichten.

oder sehr locker gelagerten, nicht-bindigen Böden) angepasst werden. Sind die zu verrohrenden Bohrlochbereiche durchteuft, wird die Verrohrung abgesetzt. Wurde ein Doppelrotorkopf verwendet, wird dieser abgelegt, beim Doppelkopfbohren fährt der untere Kopf einfach unbenutzt weiter mit.

Als Bohrwerkzeug kommen in Festgesteinen Imlochhämmer und in Lockergesteinen Spülbohrwerkzeuge zum Einsatz. Als Spülmedium wird in der Regel Luft mit Wasserzugabe verwendet. An der Verrohrung wird mit einer Ringbohrkrone, welche meist mit Widia-Stiften besetzt ist, gearbeitet. Das Bohrwerkzeug hat den gleichen Durchmesser wie die Verrohrung innen. Die Differenz zwischen Innen- und Außendurchmesser muss dann durch diese Krone nachgeschnitten werden.

13.5 Schwierige Geologie/ bohrtechnische Herausforderungen

Als besondere Herausforderung beim Bohren sind sowohl bohrtechnische Schwierigkeiten als auch Problemstellungen welche die Abdichtung einer Bohrung erschweren zu sehen.

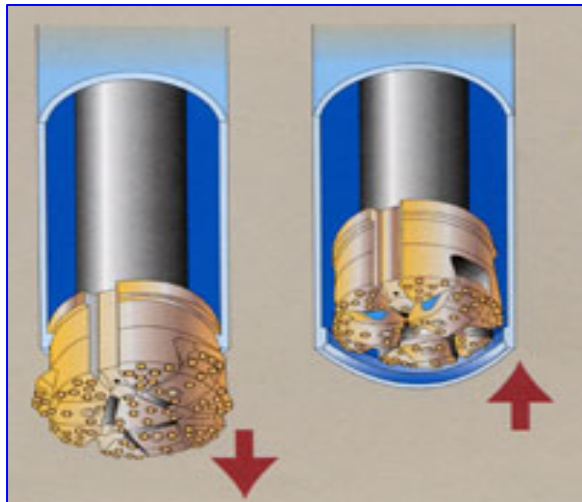
Um eine Bohrung ordnungsgemäß bis zur gewünschten Teufe bohren zu können ist es zwingen erforderlich, dass der Spülstrom das gelöste Bohrgut im Ringraum zu Tage trägt. Probleme können hier im Lockergestein mit sehr hoher Durchlässigkeit oder im Festgestein mit starker Klüftung oder durch Hohlräume entstehen. Solche Probleme machen es dann meist unmöglich die Bohrung weiter abzuteufen.

Bei Wasserbasierenden Spülungen besteht in solchen Fällen die Möglichkeit die Viskosität zu erhöhen und die Hohlräume und Wegsamkeiten somit zu verschließen.

Bei Luftspülungen kann durch die Zugabe von Schaummitteln die Tragfähigkeit erhöht werden. Der Umgang mit Schaum ist jedoch in bebauten Bereichen kaum möglich und scheidet so für die meisten Geothermiebohrungen aus.

Die sinnvollste Möglichkeit besteht dann darin, die Bohrung durch eine Hilfsverrohrung zu stützen. Diese Hilfsverrohrung lässt sich durch die Verwendung von Doppelkopfanlagen vergleichsweise leicht einbauen. Liegt jedoch über den Problemzonen eine massive Felssicht stößt die Ringbohrkrone der Verrohrung jedoch schnell an Ihre Grenzen.

Durch die Verwendung von speziellen Aufweitmeißeln, welche unter der Verrohrung ausklappen lässt sich jedoch auch dieses Problem lösen. Die linken Bilder sollen die Arbeitsweise der Spezialkronen verdeutlichen. Die Krone hat im zusammengefahrenen Zustand den selben Außendurchmesser wie die Verrohrung innen. Setzt die Krone dann auf der Bohrlochsohle auf, schieben sich die Flügel auseinander und der Bohrdurchmesser ist ca. 10mm größer als der Außendurchmesser der Verrohrung. Mit diesem Bohrsystem wurden im Festgestein schon Bohrtiefen von 150m, ohne zu telekopieren, erreicht.



Der Nachteil dieses Systems liegt im Verschleiß und den Beschaffungskosten der Bits, man kann mit dem sieben- bis achtfachen des Kaufpreises sowie eine Lebensdauer von nur ca. 25 % einer normalen Krone rechnen.

Abbildung 6 Prinzip Aufweitmeißel

Eine weitere Problemstellung kann das Anbohren von Grundwasserleitern mit sehr stark unterschiedlichen Potentialen mit sich bringen. Einer der bekanntesten Fälle ist hier der über Gelände auslaufende Arteser. Hierbei hat der Wasserleiter ein so hohes Druckpotential, dass dieses über Gelände liegt. Austreten kann ein solch artesisch gespanntes Grundwasser nur wenn die darüberliegende Deckschicht durchbohrt wird. Der Herausforderung hierin liegt weniger im Abteufen sondern mehr in der Rückverfüllung und Abdichtung der Bohrung. Hierbei gibt es dann verschiedene Möglichkeiten und Hilfsmittel um auch dieses in den Griff zu bekommen. Entscheidend für die Auswahl der Abdichtung sind sowohl die Schüttung und die Druckhöhe des Artesers als auch eventuelle weitere Wasserleiter in der Bohrung.



Abbildung 7 Gewebesackpacker

Eine Möglichkeit ist der Einbau einer beschwerten Spülung oder Suspension. Mit dieser wird durch die Höhe der Suspensionssäule im Grundwasserleiter ein Gegendruck erzeugt und die Strömung so gestoppt. Ist dies durch das alleinige Beschweren nicht mehr möglich, stellt ein Gewebesackpacker eine sinnvolle Alternative dar. Hierbei handelt es sich um einen offenporigen Gewebesack welcher mit Dichtungsscheiben an der Sonde befestigt wird. Ist der Packer in den gewünschten Horizont eingebaut wird er

durch eine Suspension gefüllt und stoppt so etwaige Strömungen in der Bohrung. Mit diesem Prinzip können auch Hohlräume in Bohrungen überbrückt werden.

13.6 Zusammenfassung

Als Zusammenfassung kann festgehalten werden, dass eine stetige Weiterentwicklung der bereits existierenden Bohrverfahren neben Neuentwicklungen erforderlich ist, um den Anteil der oberflächennahen Geothermie zur Wärmebereitstellung langfristig weiter auszubauen und somit einen steigenden Beitrag zum Umweltschutz leisten zu können. Es gibt jedoch auch heute schon Verfahren und Techniken mit welchen, bei richtiger Anwendung, alle anzutreffenden Problemstellungen bewältigt werden können. Der Geothermie kann hier eine Schlüsselrolle zugeordnet werden. Ist sie doch die einzige regenerative Energie welche zu jeder Zeit, allen Menschen und in, nach menschlichem Ermessen, unbegrenzter Menge zur Verfügung steht.

Quellenangaben

- [1] Tholen, M.: Arbeitshilfen für den Brunnenbauer WVGW Verlag, Bonn 2006
- [2] Urban, D.: Arbeitshilfen für den Brunnenbauer WVGW Verlag, Bonn 2002
- [3] Fa. Nordmeyer, Peine

Podiumsdiskussion

Perspektiven und Risiken der Flachen Geothermie

Impulsstatements

Dr. Walter J. Eugster
Polydynamics Engineering, Zürich, Schweiz

Dipl.-Ing. Eva de Haas
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (UM) Ba-Wü

Prof. Dr. Thomas Kohl
Lehrstuhl Geothermie, KIT, Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Christian Moormann
Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart

Autorenverzeichnis

Dr. Peter **Bayer**
ETH Zürich, Geologisches Institut
Sonneggstrasse 5
CH-8092 Zürich
Schweiz
E-Mail: bayer@erdw.ethz.ch

Dipl. Phys. Gerhard **Bisch**
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)
Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 61
70569 Stuttgart
E-Mail: gerhard.bisch@iws.uni-stuttgart.de

Jun.-Prof. Dr. habil. Philipp **Blum**
Karlsruhe Institut für Technologie (KIT),
Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe
E-Mail: philipp.blum@kit.edu

Jürgen **Braun**, PhD
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)
Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 61
70569 Stuttgart
E-Mail: juergen.braun@iws.uni-stuttgart.de,

Frank **Burkhardt** (B. Eng.)
Heinz Burkhardt GmbH & Co. KG, Geologische und hydrologische Bohrungen
Tulpenstraße 15
75389 Neuweiler
E-Mail: frank@burkhardt-bohrungen.de

Dr. Walter J. **Eugster**
Polydynamics Engineering Zürich
Malojaweg 19
CH-8048 Zürich
E-Mail: wje@polydynamics.ch

Dr. rer. nat. Bernd **Flemisch**

Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 61

70569 Stuttgart

E-Mail: bernd.flemisch@iws.uni-stuttgart.de

Prof. Dr.-Ing. Bernhard **Fröhlich**

gbm Gesellschaft für Baugeologie und -messtechnik mbH, Baugrundinstitut

Robert-Bosch-Str. 7

65549 Limburg

E-Mail: b.froehlich@gbm-baugrundinstitut.de

Dipl.-Ing. Eva de **Haas**

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (UM)

Baden-Württemberg, Wasserversorgung und Grundwasserschutz

Kernerplatz 9

70182 Stuttgart

E-Mail: eva.dehaas@um.bwl.de

Jozsef **Hecht-Méndez**, MSc

Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (ZAG)

Sigwartstr. 10

72076 Tübingen

E-Mail: jozsef.hecht-mendez@uni-tuebingen.de

Dr. Claus **Heske**

CDM Consult GmbH

Am Umweltpark 3-5

44793 Bochum

E-Mail: claus.heske@cdm.com

Dr. Thomas **Köbel**

EnBW Baden Württemberg AG, Karlsruhe

Durlacher Allee 93

76131 Karlsruhe

E-Mail: t.koelbel@enbw.com

Dr.-Ing. Norbert **Klaas**

Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)

Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 61

70569 Stuttgart

E-Mail: norbert.klaas@iws.uni-stuttgart.de,

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian **Moormann**
IGS Institut für Geotechnik Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 35
70569 Stuttgart
E-Mail: christian.moormann@igs.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. Thomas **Mutschler**
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Boden- und Felsmechanik
Engler-Bunte-Ring 14
76131 Karlsruhe
E-Mail: Thomas.Mutschler@kit.edu

Dipl.-Geol. Pia **Orywall**
EnBW Baden Württemberg AG, Karlsruhe
Durlacher Allee 93
76131 Karlsruhe
E-Mail: p.orywall@enbw.com

C.G.J.M. (Charles) **Pijls**
Tauw Soil Consultants & Engineers
Handelskade 11, P.O. Box 133
NL-7400 AC Deventer
Niederlande
E-Mail: charles.pijls@tauw.nl

Dr. Kathrin R. **Schmidt**
DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Umweltbiotechnologie und Altlasten
Karlsruher Straße 84
76139 Karlsruhe
E-Mail: kathrin.schmidt@tzw.de

Dipl.-Geol. Marcus **Schneider**
IGS Institut für Geotechnik Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 35
70569 Stuttgart
E-Mail: marcus.schneider@igs.uni-stuttgart.de

Dr. Hagen **Steger**
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe
E-Mail: hagen.steger@kit.edu

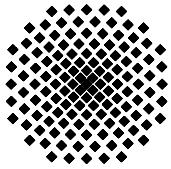
Dr. Andreas **Tiehm**
DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Umweltbiotechnologie und Altlasten
Karlsruher Straße 84
76139 Karlsruhe
E-Mail: andreas.tiehm@tzw.de

Dipl.-Geol. André **Voutta**
Andre Voutta Grundwasserhydraulik
Sudetenstraße 5
71083 Herrenberg
E-Mail: avoutta@avoutta.de

Dipl.-Min. Valentin **Wagner**
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe
E-Mail: valentin.wagner@kit.edu

Dr. Roman **Zorn**
Geothermisches Labor, European Institute of Energy Research
Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)
Emmy-Noether Straße 11
76131 Karlsruhe
E-Mail: roman.zorn@eifer.org

Verzeichnis der Mitteilungshefte des Instituts



Institut für Wasserbau Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 61
70569 Stuttgart (Vaihingen)
Telefon (0711) 685 - 64717/64749/64752/64679
Telefax (0711) 685 - 67020 o. 64746 o. 64681
E-Mail: iws@iws.uni-stuttgart.de
<http://www.iws.uni-stuttgart.de>

Direktoren

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy
Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig
Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht

Vorstand (Stand 01.04.2009)

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. A. Bárdossy
Prof. Dr.-Ing. R. Helmig
Prof. Dr.-Ing. S. Wieprecht
Jürgen Braun, PhD
Dr.-Ing. H. Class
Dr.-Ing. S. Hartmann
Dr.-Ing. H.-P. Koschitzky
PD Dr.-Ing. W. Marx
Dr. rer. nat. J. Seidel

Emeriti

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Jürgen Giesecke
Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. E.h. Helmut Kobus, PhD

Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht
Stellv.: PD Dr.-Ing. Walter Marx, AOR

Versuchsanstalt für Wasserbau

Leiter: Dr.-Ing. Sven Hartmann, AOR

Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig
Stellv.: Dr.-Ing. Holger Class, AOR

Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie

Leiter: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy
Stellv.: Dr. rer. nat. Jochen Seidel, AR

VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung

Leitung: Jürgen Braun, PhD, AD
Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky, AD

Verzeichnis der Mitteilungshefte

- 1 Röhnisch, Arthur: *Die Bemühungen um eine Wasserbauliche Versuchsanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart*, und Fattah Abouleid, Abdel: *Beitrag zur Berechnung einer in lockeren Sand gerammten, zweifach verankerten Spundwand*, 1963
- 2 Marotz, Günter: *Beitrag zur Frage der Standfestigkeit von dichten Asphaltbelägen im Großwasserbau*, 1964
- 3 Gurr, Siegfried: *Beitrag zur Berechnung zusammengesetzter ebener Flächen-tragwerke unter besonderer Berücksichtigung ebener Stauwände, mit Hilfe von Randwert- und Lastwertmatrizen*, 1965
- 4 Plica, Peter: *Ein Beitrag zur Anwendung von Schalenkonstruktionen im Stahlwasserbau*, und Petrikat, Kurt: *Möglichkeiten und Grenzen des wasserbaulichen Versuchswesens*, 1966

- 5 Plate, Erich: *Beitrag zur Bestimmung der Windgeschwindigkeitsverteilung in der durch eine Wand gestörten bodennahen Luftschicht, und*
Röhnisch, Arthur; Marotz, Günter: *Neue Baustoffe und Bauausführungen für den Schutz der Böschungen und der Sohle von Kanälen, Flüssen und Häfen; Gesteungskosten und jeweilige Vorteile, sowie Unny, T.E.: Schwingungsuntersuchungen am Kegelstrahlschieber, 1967*
- 6 Seiler, Erich: *Die Ermittlung des Anlagenwertes der bundeseigenen Binnenschiffahrtsstraßen und Talsperren und des Anteils der Binnenschifffahrt an diesem Wert, 1967*
- 7 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Arthur Röhnisch mit Beiträgen von* Benk, Dieter; Breitling, J.; Gurr, Siegfried; Haberhauer, Robert; Honekamp, Hermann; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg; Miller, Rudolf; Plate, Erich J.; Radomski, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1967
- 8 Jumikis, Alfred: *Beitrag zur experimentellen Untersuchung des Wassernachschubs in einem gefrierenden Boden und die Beurteilung der Ergebnisse, 1968*
- 9 Marotz, Günter: *Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund, 1968*
- 10 Radomski, Helge: *Untersuchungen über den Einfluß der Querschnittsform wellenförmiger Spundwände auf die statischen und rammtechnischen Eigenschaften, 1968*
- 11 Schwarz, Helmut: *Die Grenztragfähigkeit des Baugrundes bei Einwirkung vertikal gezogener Ankerplatten als zweidimensionales Bruchproblem, 1969*
- 12 Erbel, Klaus: *Ein Beitrag zur Untersuchung der Metamorphose von Mittelgebirgsschneedecken unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Bestimmung der thermischen Schneequalität, 1969*
- 13 Westhaus, Karl-Heinz: *Der Strukturwandel in der Binnenschifffahrt und sein Einfluß auf den Ausbau der Binnenschiffskanäle, 1969*
- 14 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Ein Beitrag zur Berechnung des Erdwiderstandes unter Ansatz der logarithmischen Spirale als Gleitflächenfunktion, 1970*
- 15 Schulz, Manfred: *Berechnung des räumlichen Erddruckes auf die Wandung kreiszylindrischer Körper, 1970*
- 16 Mobasseri, Manoutschehr: *Die Rippenstützmauer. Konstruktion und Grenzen ihrer Standsicherheit, 1970*
- 17 Benk, Dieter: *Ein Beitrag zum Betrieb und zur Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken, 1970*

- 18 Gál, Attila: *Bestimmung der mitschwingenden Wassermasse bei überströmten Fischbauchklappen mit kreiszylindrischem Staublech*, 1971, vergriffen
- 19 Kuz, Klaus Dieter: *Ein Beitrag zur Frage des Einsetzens von Kavitationserscheinungen in einer Düsenströmung bei Berücksichtigung der im Wasser gelösten Gase*, 1971, vergriffen
- 20 Schaak, Hartmut: *Verteilleitungen von Wasserkraftanlagen*, 1971
- 21 *Sonderheft zur Eröffnung der neuen Versuchsanstalt des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart mit Beiträgen von* Brombach, Hansjörg; Dirksen, Wolfram; Gál, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Holthoff, Franz-Josef; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Minor, Hans-Erwin; Petrikat, Kurt; Röhnisch, Arthur; Rueff, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1972
- 22 Wang, Chung-su: *Ein Beitrag zur Berechnung der Schwingungen an Kegelstrahlschiebern*, 1972
- 23 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Erdwiderstandsbeiwerte nach dem Ohde-Variationsverfahren*, 1972
- 24 Minor, Hans-Erwin: *Beitrag zur Bestimmung der Schwingungsanfachungsfunktionen überströmter Stauklappen*, 1972, vergriffen
- 25 Brombach, Hansjörg: *Untersuchung strömungsmechanischer Elemente (Fluidik) und die Möglichkeit der Anwendung von Wirbelkammerelementen im Wasserbau*, 1972, vergriffen
- 26 Wildenhahn, Eberhard: *Beitrag zur Berechnung von Horizontalfilterbrunnen*, 1972
- 27 Steinlein, Helmut: *Die Eliminierung der Schwebstoffe aus Flußwasser zum Zweck der unterirdischen Wasserspeicherung, gezeigt am Beispiel der Iller*, 1972
- 28 Holthoff, Franz Josef: *Die Überwindung großer Hubhöhen in der Binnenschifffahrt durch Schwimmerhebwerke*, 1973
- 29 Röder, Karl: *Einwirkungen aus Baugrundbewegungen auf trog- und kastenförmige Konstruktionen des Wasser- und Tunnelbaues*, 1973
- 30 Kretschmer, Heinz: *Die Bemessung von Bogenstaumauern in Abhängigkeit von der Talform*, 1973
- 31 Honekamp, Hermann: *Beitrag zur Berechnung der Montage von Unterwasserpipelines*, 1973
- 32 Giesecke, Jürgen: *Die Wirbelkammertriode als neuartiges Steuerorgan im Wasserbau*, und Brombach, Hansjörg: *Entwicklung, Bauformen, Wirkungsweise und Steuereigenschaften von Wirbelkammerverstärkern*, 1974

- 33 Rueff, Helge: *Untersuchung der schwingungserregenden Kräfte an zwei hintereinander angeordneten Tiefschützen unter besonderer Berücksichtigung von Kavitation*, 1974
- 34 Röhnisch, Arthur: *Einpreßversuche mit Zementmörtel für Spannbeton - Vergleich der Ergebnisse von Modellversuchen mit Ausführungen in Hüllwellrohren*, 1975
- 35 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Kurt Petrikat mit Beiträgen von:* Brombach, Hansjörg; Erbel, Klaus; Flinspach, Dieter; Fischer jr., Richard; Gál, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Haberhauer, Robert; Hafner Edzard; Hausenblas, Bernhard; Horlacher, Hans-Burkhard; Hutarew, Andreas; Knoll, Manfred; Krummet, Ralph; Marotz, Günter; Merkle, Theodor; Miller, Christoph; Minor, Hans-Erwin; Neumayer, Hans; Rao, Syamala; Rath, Paul; Rueff, Helge; Ruppert, Jürgen; Schwarz, Wolfgang; Topal-Gökceli, Mehmet; Vollmer, Ernst; Wang, Chung-su; Weber, Hans-Georg; 1975
- 36 Berger, Jochum: *Beitrag zur Berechnung des Spannungszustandes in rotations-symmetrisch belasteten Kugelschalen veränderlicher Wandstärke unter Gas- und Flüssigkeitsdruck durch Integration schwach singulärer Differentialgleichungen*, 1975
- 37 Dirksen, Wolfram: *Berechnung instationärer Abflußvorgänge in gestauten Gerinnen mittels Differenzenverfahren und die Anwendung auf Hochwasserrückhaltebecken*, 1976
- 38 Horlacher, Hans-Burkhard: *Berechnung instationärer Temperatur- und Wärmespannungsfelder in langen mehrschichtigen Hohlzylindern*, 1976
- 39 Hafner, Edzard: *Untersuchung der hydrodynamischen Kräfte auf Baukörper im Tiefwasserbereich des Meeres*, 1977, ISBN 3-921694-39-6
- 40 Ruppert, Jürgen: *Über den Axialwirbelkammerverstärker für den Einsatz im Wasserbau*, 1977, ISBN 3-921694-40-X
- 41 Hutarew, Andreas: *Beitrag zur Beeinflussbarkeit des Sauerstoffgehalts in Fließgewässern an Abstürzen und Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-41-8, vergriffen
- 42 Miller, Christoph: *Ein Beitrag zur Bestimmung der schwingungserregenden Kräfte an unterströmten Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-42-6
- 43 Schwarz, Wolfgang: *Druckstoßberechnung unter Berücksichtigung der Radial- und Längsverschiebungen der Rohrwandung*, 1978, ISBN 3-921694-43-4
- 44 Kinzelbach, Wolfgang: *Numerische Untersuchungen über den optimalen Einsatz variabler Kühlsysteme einer Kraftwerkskette am Beispiel Oberrhein*, 1978, ISBN 3-921694-44-2
- 45 Barczewski, Baldur: *Neue Meßmethoden für Wasser-Luftgemische und deren Anwendung auf zweiphasige Auftriebsstrahlen*, 1979, ISBN 3-921694-45-0

- 46 Neumayer, Hans: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in radialen Wirbelkammerverstärkern*, 1979, ISBN 3-921694-46-9
- 47 Elalfy, Youssef-Elhassan: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in Wirbelkammerdioden und -drosseln*, 1979, ISBN 3-921694-47-7
- 48 Brombach, Hansjörg: *Automatisierung der Bewirtschaftung von Wasserspeichern*, 1981, ISBN 3-921694-48-5
- 49 Geldner, Peter: *Deterministische und stochastische Methoden zur Bestimmung der Selbstdichtung von Gewässern*, 1981, ISBN 3-921694-49-3, vergriffen
- 50 Mehlhorn, Hans: *Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwassereinleitungen*, 1982, ISBN 3-921694-50-7, vergriffen
- 51 Hafner, Edzard: *Rohrleitungen und Behälter im Meer*, 1983, ISBN 3-921694-51-5
- 52 Rinnert, Bernd: *Hydrodynamische Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Dichteunterschieden auf die Vertikalvermischung in horizontaler Strömung*, 1983, ISBN 3-921694-52-3, vergriffen
- 53 Lindner, Wulf: *Steuerung von Grundwasserentnahmen unter Einhaltung ökologischer Kriterien*, 1983, ISBN 3-921694-53-1, vergriffen
- 54 Herr, Michael; Herzer, Jörg; Kinzelbach, Wolfgang; Kobus, Helmut; Rinnert, Bernd: *Methoden zur rechnerischen Erfassung und hydraulischen Sanierung von Grundwasserkontaminationen*, 1983, ISBN 3-921694-54-X
- 55 Schmitt, Paul: *Wege zur Automatisierung der Niederschlagsermittlung*, 1984, ISBN 3-921694-55-8, vergriffen
- 56 Müller, Peter: *Transport und selektive Sedimentation von Schwebstoffen bei gestautem Abfluß*, 1985, ISBN 3-921694-56-6
- 57 El-Qawasmeh, Fuad: *Möglichkeiten und Grenzen der Tropfbewässerung unter besonderer Berücksichtigung der Verstopfungsanfälligkeit der Tropfelemente*, 1985, ISBN 3-921694-57-4, vergriffen
- 58 Kirchenbaur, Klaus: *Mikroprozessorgesteuerte Erfassung instationärer Druckfelder am Beispiel seegangbelasteter Baukörper*, 1985, ISBN 3-921694-58-2
- 59 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1984/85 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart), 1985, ISBN 3-921694-59-0, vergriffen
- 60 Spitz, Karlheinz: *Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Inhomogenitäten und Dichteunterschieden*, 1985, ISBN 3-921694-60-4, vergriffen
- 61 Kobus, Helmut: *An Introduction to Air-Water Flows in Hydraulics*, 1985, ISBN 3-921694-61-2

- 62 Kaleris, Vassilios: *Erfassung des Austausches von Oberflächen- und Grundwasser in horizontalebene Grundwassermodellen*, 1986, ISBN 3-921694-62-0
- 63 Herr, Michael: *Grundlagen der hydraulischen Sanierung verunreinigter Porengrundwasserleiter*, 1987, ISBN 3-921694-63-9
- 64 Marx, Walter: *Berechnung von Temperatur und Spannung in Massenbeton infolge Hydratation*, 1987, ISBN 3-921694-64-7
- 65 Koschitzky, Hans-Peter: *Dimensionierungskonzept für Sohlbelüfter in Schußbrinnen zur Vermeidung von Kavitationsschäden*, 1987, ISBN 3-921694-65-5
- 66 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1986/87 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart) 1987, ISBN 3-921694-66-3
- 67 Söll, Thomas: *Berechnungsverfahren zur Abschätzung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser*, 1988, ISBN 3-921694-67-1
- 68 Dittrich, Andreas; Westrich, Bernd: *Bodenseeufererosion, Bestandsaufnahme und Bewertung*, 1988, ISBN 3-921694-68-X, vergriffen
- 69 Huwe, Bernd; van der Ploeg, Rienk R.: *Modelle zur Simulation des Stickstoffhaushaltes von Standorten mit unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung*, 1988, ISBN 3-921694-69-8, vergriffen
- 70 Stephan, Karl: *Integration elliptischer Funktionen*, 1988, ISBN 3-921694-70-1
- 71 Kobus, Helmut; Zilliox, Lothaire (Hrsg.): *Nitratbelastung des Grundwassers, Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Grundwasser- und Rohwasserbeschaffenheit und Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers*. Vorträge des deutsch-französischen Kolloquiums am 6. Oktober 1988, Universitäten Stuttgart und Louis Pasteur Strasbourg (Vorträge in deutsch oder französisch, Kurzfassungen zweisprachig), 1988, ISBN 3-921694-71-X
- 72 Soyeaux, Renald: *Unterströmung von Stauanlagen auf klüftigem Untergrund unter Berücksichtigung laminarer und turbulenter Fließzustände*, 1991, ISBN 3-921694-72-8
- 73 Kohane, Roberto: *Berechnungsmethoden für Hochwasserabfluß in Fließgewässern mit überströmten Vorländern*, 1991, ISBN 3-921694-73-6
- 74 Hassinger, Reinhard: *Beitrag zur Hydraulik und Bemessung von Blocksteinrampen in flexibler Bauweise*, 1991, ISBN 3-921694-74-4, vergriffen
- 75 Schäfer, Gerhard: *Einfluß von Schichtenstrukturen und lokalen Einlagerungen auf die Längsdispersion in Porengrundwasserleitern*, 1991, ISBN 3-921694-75-2
- 76 Giesecke, Jürgen: *Vorträge, Wasserwirtschaft in stark besiedelten Regionen; Umweltforschung mit Schwerpunkt Wasserwirtschaft*, 1991, ISBN 3-921694-76-0

- 77 Huwe, Bernd: *Deterministische und stochastische Ansätze zur Modellierung des Stickstoffhaushalts landwirtschaftlich genutzter Flächen auf unterschiedlichem Skalenniveau*, 1992, ISBN 3-921694-77-9, vergriffen
- 78 Rommel, Michael: *Verwendung von Klufdaten zur realitätsnahen Generierung von Klufnetzen mit anschließender laminar-turbulenter Strömungsberechnung*, 1993, ISBN 3-92 1694-78-7
- 79 Marschall, Paul: *Die Ermittlung lokaler Stofffrachten im Grundwasser mit Hilfe von Einbohrloch-Meßverfahren*, 1993, ISBN 3-921694-79-5, vergriffen
- 80 Ptak, Thomas: *Stofftransport in heterogenen Porenaquiferen: Felduntersuchungen und stochastische Modellierung*, 1993, ISBN 3-921694-80-9, vergriffen
- 81 Haakh, Frieder: *Transientes Strömungsverhalten in Wirbelkammern*, 1993, ISBN 3-921694-81-7
- 82 Kobus, Helmut; Cirpka, Olaf; Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter: *Versucheinrichtung zur Grundwasser und Altlastensanierung VEGAS, Konzeption und Programmrahmen*, 1993, ISBN 3-921694-82-5
- 83 Zang, Weidong: *Optimaler Echtzeit-Betrieb eines Speichers mit aktueller Abflußregenerierung*, 1994, ISBN 3-921694-83-3, vergriffen
- 84 Franke, Hans-Jörg: *Stochastische Modellierung eines flächenhaften Stoffeintrages und Transports in Grundwasser am Beispiel der Pflanzenschutzmittelproblematik*, 1995, ISBN 3-921694-84-1
- 85 Lang, Ulrich: *Simulation regionaler Strömungs- und Transportvorgänge in Karst-aquiferen mit Hilfe des Doppelkontinuum-Ansatzes: Methodenentwicklung und Parameteridentifikation*, 1995, ISBN 3-921694-85-X, vergriffen
- 86 Helmig, Rainer: *Einführung in die Numerischen Methoden der Hydromechanik*, 1996, ISBN 3-921694-86-8, vergriffen
- 87 Cirpka, Olaf: *CONTRACT: A Numerical Tool for Contaminant Transport and Chemical Transformations - Theory and Program Documentation -*, 1996, ISBN 3-921694-87-6
- 88 Haberlandt, Uwe: *Stochastische Synthese und Regionalisierung des Niederschlages für Schmutzfrachtberechnungen*, 1996, ISBN 3-921694-88-4
- 89 Croisé, Jean: *Extraktion von flüchtigen Chemikalien aus natürlichen Lockergesteinen mittels erzwungener Luftströmung*, 1996, ISBN 3-921694-89-2, vergriffen
- 90 Jorde, Klaus: *Ökologisch begründete, dynamische Mindestwasserregelungen bei Ausleitungskraftwerken*, 1997, ISBN 3-921694-90-6, vergriffen
- 91 Helmig, Rainer: *Gekoppelte Strömungs- und Transportprozesse im Untergrund - Ein Beitrag zur Hydrosystemmodellierung-*, 1998, ISBN 3-921694-91-4, vergriffen

-
- 92 Emmert, Martin: *Numerische Modellierung nichtisothermer Gas-Wasser Systeme in porösen Medien*, 1997, ISBN 3-921694-92-2
- 93 Kern, Ulrich: *Transport von Schweb- und Schadstoffen in staugeregelten Fließgewässern am Beispiel des Neckars*, 1997, ISBN 3-921694-93-0, vergriffen
- 94 Förster, Georg: *Druckstoßdämpfung durch große Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen* 1997, ISBN 3-921694-94-9
- 95 Cirpka, Olaf: *Numerische Methoden zur Simulation des reaktiven Mehrkomponententransports im Grundwasser*, 1997, ISBN 3-921694-95-7, vergriffen
- 96 Färber, Arne: *Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1997, ISBN 3-921694-96-5
- 97 Betz, Christoph: *Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1998, ISBN 3-921694-97-3
- 98 Xu, Yichun: *Numerical Modeling of Suspended Sediment Transport in Rivers*, 1998, ISBN 3-921694-98-1, vergriffen
- 99 Wüst, Wolfgang: *Geochemische Untersuchungen zur Sanierung CKW-kontaminierter Aquifere mit Fe(0)-Reaktionswänden*, 2000, ISBN 3-933761-02-2
- 100 Sheta, Hussam: *Simulation von Mehrphasenvorgängen in porösen Medien unter Einbeziehung von Hysterese-Effekten*, 2000, ISBN 3-933761-03-4
- 101 Ayros, Edwin: *Regionalisierung extremer Abflüsse auf der Grundlage statistischer Verfahren*, 2000, ISBN 3-933761-04-2, vergriffen
- 102 Huber, Ralf: *Compositional Multiphase Flow and Transport in Heterogeneous Porous Media*, 2000, ISBN 3-933761-05-0
- 103 Braun, Christopherus: *Ein Upscaling-Verfahren für Mehrphasenströmungen in porösen Medien*, 2000, ISBN 3-933761-06-9
- 104 Hofmann, Bernd: *Entwicklung eines rechnergestützten Managementsystems zur Beurteilung von Grundwasserschadensfällen*, 2000, ISBN 3-933761-07-7
- 105 Class, Holger: *Theorie und numerische Modellierung nichtisothermer Mehrphasenprozesse in NAPL-kontaminierten porösen Medien*, 2001, ISBN 3-933761-08-5
- 106 Schmidt, Reinhard: *Wasserdampf- und Heißluftinjektion zur thermischen Sanierung kontaminierter Standorte*, 2001, ISBN 3-933761-09-3
- 107 Josef, Reinhold: *Schadstoffextraktion mit hydraulischen Sanierungsverfahren unter Anwendung von grenzflächenaktiven Stoffen*, 2001, ISBN 3-933761-10-7

- 108 Schneider, Matthias: *Habitat- und Abflussmodellierung für Fließgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen*, 2001, ISBN 3-933761-11-5
- 109 Rathgeb, Andreas: *Hydrodynamische Bemessungsgrundlagen für Lockerdeckwerke an überströmbaren Erddämmen*, 2001, ISBN 3-933761-12-3
- 110 Lang, Stefan: *Parallele numerische Simulation instationärer Probleme mit adaptiven Methoden auf unstrukturierten Gittern*, 2001, ISBN 3-933761-13-1
- 111 Appt, Jochen; Stumpp Simone: *Die Bodensee-Messkampagne 2001, IWS/CWR Lake Constance Measurement Program 2001*, 2002, ISBN 3-933761-14-X
- 112 Heimerl, Stephan: *Systematische Beurteilung von Wasserkraftprojekten*, 2002, ISBN 3-933761-15-8
- 113 Iqbal, Amin: *On the Management and Salinity Control of Drip Irrigation*, 2002, ISBN 3-933761-16-6
- 114 Silberhorn-Hemminger, Annette: *Modellierung von Kluftaquifersystemen: Geostatistische Analyse und deterministisch-stochastische Kluftgenerierung*, 2002, ISBN 3-933761-17-4
- 115 Winkler, Angela: *Prozesse des Wärme- und Stofftransports bei der In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen*, 2003, ISBN 3-933761-18-2
- 116 Marx, Walter: *Wasserkraft, Bewässerung, Umwelt - Planungs- und Bewertungsschwerpunkte der Wasserbewirtschaftung*, 2003, ISBN 3-933761-19-0
- 117 Hinkelmann, Reinhard: *Efficient Numerical Methods and Information-Processing Techniques in Environment Water*, 2003, ISBN 3-933761-20-4
- 118 Samaniego-Eguiguren, Luis Eduardo: *Hydrological Consequences of Land Use / Land Cover and Climatic Changes in Mesoscale Catchments*, 2003, ISBN 3-933761-21-2
- 119 Neunhäuserer, Lina: *Diskretisierungsansätze zur Modellierung von Strömungs- und Transportprozessen in geklüftet-porösen Medien*, 2003, ISBN 3-933761-22-0
- 120 Paul, Maren: *Simulation of Two-Phase Flow in Heterogeneous Porous Media with Adaptive Methods*, 2003, ISBN 3-933761-23-9
- 121 Ehret, Uwe: *Rainfall and Flood Nowcasting in Small Catchments using Weather Radar*, 2003, ISBN 3-933761-24-7
- 122 Haag, Ingo: *Der Sauerstoffhaushalt staugeregelter Flüsse am Beispiel des Neckars - Analysen, Experimente, Simulationen -*, 2003, ISBN 3-933761-25-5
- 123 Appt, Jochen: *Analysis of Basin-Scale Internal Waves in Upper Lake Constance*, 2003, ISBN 3-933761-26-3

- 124 Hrsg.: Schrenk, Volker; Batereau, Katrin; Barczewski, Baldur; Weber, Karolin und Koschitzky, Hans-Peter: *Symposium Ressource Fläche und VEGAS - Statuskolloquium 2003, 30. September und 1. Oktober 2003*, 2003, ISBN 3-933761-27-1
- 125 Omar Khalil Ouda: *Optimisation of Agricultural Water Use: A Decision Support System for the Gaza Strip*, 2003, ISBN 3-933761-28-0
- 126 Batereau, Katrin: *Sensorbasierte Bodenluftmessung zur Vor-Ort-Erkundung von Schadensherden im Untergrund*, 2004, ISBN 3-933761-29-8
- 127 Witt, Oliver: *Erosionsstabilität von Gewässersedimenten mit Auswirkung auf den Stofftransport bei Hochwasser am Beispiel ausgewählter Stauhaltungen des Oberrheins*, 2004, ISBN 3-933761-30-1
- 128 Jakobs, Hartmut: *Simulation nicht-isothermer Gas-Wasser-Prozesse in komplexen Kluft-Matrix-Systemen*, 2004, ISBN 3-933761-31-X
- 129 Li, Chen-Chien: *Deterministisch-stochastisches Berechnungskonzept zur Beurteilung der Auswirkungen erosiver Hochwasserereignisse in Flusstauhaltungen*, 2004, ISBN 3-933761-32-8
- 130 Reichenberger, Volker; Helmig, Rainer; Jakobs, Hartmut; Bastian, Peter; Niessner, Jennifer: *Complex Gas-Water Processes in Discrete Fracture-Matrix Systems: Upscaling, Mass-Conservative Discretization and Efficient Multilevel Solution*, 2004, ISBN 3-933761-33-6
- 131 Hrsg.: Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter; Weber, Karolin; Wege, Ralf: *VEGAS - Statuskolloquium 2004*, Tagungsband zur Veranstaltung am 05. Oktober 2004 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2004, ISBN 3-933761-34-4
- 132 Asie, Kemal Jabir: *Finite Volume Models for Multiphase Multicomponent Flow through Porous Media*. 2005, ISBN 3-933761-35-2
- 133 Jacoub, George: *Development of a 2-D Numerical Module for Particulate Contaminant Transport in Flood Retention Reservoirs and Impounded Rivers*, 2004, ISBN 3-933761-36-0
- 134 Nowak, Wolfgang: *Geostatistical Methods for the Identification of Flow and Transport Parameters in the Subsurface*, 2005, ISBN 3-933761-37-9
- 135 Süß, Mia: *Analysis of the influence of structures and boundaries on flow and transport processes in fractured porous media*, 2005, ISBN 3-933761-38-7
- 136 Jose, Surabhin Chackiath: *Experimental Investigations on Longitudinal Dispersive Mixing in Heterogeneous Aquifers*, 2005, ISBN: 3-933761-39-5
- 137 Filiz, Fulya: *Linking Large-Scale Meteorological Conditions to Floods in Mesoscale Catchments*, 2005, ISBN 3-933761-40-9

- 138 Qin, Minghao: *Wirklichkeitsnahe und recheneffiziente Ermittlung von Temperatur und Spannungen bei großen RCC-Staumauern*, 2005, ISBN 3-933761-41-7
- 139 Kobayashi, Kenichiro: *Optimization Methods for Multiphase Systems in the Sub-surface - Application to Methane Migration in Coal Mining Areas*, 2005, ISBN 3-933761-42-5
- 140 Rahman, Md. Arifur: *Experimental Investigations on Transverse Dispersive Mixing in Heterogeneous Porous Media*, 2005, ISBN 3-933761-43-3
- 141 Schrenk, Volker: *Ökobilanzen zur Bewertung von Altlastensanierungsmaßnahmen*, 2005, ISBN 3-933761-44-1
- 142 Hundecha, Hirpa Yesheatesfa: *Regionalization of Parameters of a Conceptual Rainfall-Runoff Model*, 2005, ISBN: 3-933761-45-X
- 143 Wege, Ralf: *Untersuchungs- und Überwachungsmethoden für die Beurteilung natürlicher Selbstreinigungsprozesse im Grundwasser*, 2005, ISBN 3-933761-46-8
- 144 Breiting, Thomas: *Techniken und Methoden der Hydroinformatik - Modellierung von komplexen Hydrosystemen im Untergrund*, 2006, 3-933761-47-6
- 145 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Müller, Martin: *Ressource Untergrund: 10 Jahre VEGAS: Forschung und Technologieentwicklung zum Schutz von Grundwasser und Boden*, Tagungsband zur Veranstaltung am 28. und 29. September 2005 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2005, ISBN 3-933761-48-4
- 146 Rojanschi, Vlad: *Abflusskonzentration in mesoskaligen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung des Sickerraumes*, 2006, ISBN 3-933761-49-2
- 147 Winkler, Nina Simone: *Optimierung der Steuerung von Hochwasserrückhaltebecken-systemen*, 2006, ISBN 3-933761-50-6
- 148 Wolf, Jens: *Räumlich differenzierte Modellierung der Grundwasserströmung alluvialer Aquifere für mesoskalige Einzugsgebiete*, 2006, ISBN: 3-933761-51-4
- 149 Kohler, Beate: *Externe Effekte der Laufwasserkraftnutzung*, 2006, ISBN 3-933761-52-2
- 150 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias: *VEGAS-Statuskolloquium 2006*, Tagungsband zur Veranstaltung am 28. September 2006 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2006, ISBN 3-933761-53-0
- 151 Niessner, Jennifer: *Multi-Scale Modeling of Multi-Phase - Multi-Component Processes in Heterogeneous Porous Media*, 2006, ISBN 3-933761-54-9
- 152 Fischer, Markus: *Beanspruchung eingeeerdeter Rohrleitungen infolge Austrocknung bindiger Böden*, 2006, ISBN 3-933761-55-7

- 153 Schneck, Alexander: *Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung unter Berücksichtigung der Belange der Wasserversorgung, der Landwirtschaft und des Naturschutzes*, 2006, ISBN 3-933761-56-5
- 154 Das, Tapash: *The Impact of Spatial Variability of Precipitation on the Predictive Uncertainty of Hydrological Models*, 2006, ISBN 3-933761-57-3
- 155 Bielinski, Andreas: *Numerical Simulation of CO₂ sequestration in geological formations*, 2007, ISBN 3-933761-58-1
- 156 Mödinger, Jens: *Entwicklung eines Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungssystems für eine nachhaltige regionale Grundwasserbewirtschaftung*, 2006, ISBN 3-933761-60-3
- 157 Manthey, Sabine: *Two-phase flow processes with dynamic effects in porous media - parameter estimation and simulation*, 2007, ISBN 3-933761-61-1
- 158 Pozos Estrada, Oscar: *Investigation on the Effects of Entrained Air in Pipelines*, 2007, ISBN 3-933761-62-X
- 159 Ochs, Steffen Oliver: *Steam injection into saturated porous media – process analysis including experimental and numerical investigations*, 2007, ISBN 3-933761-63-8
- 160 Marx, Andreas: *Einsatz gekoppelter Modelle und Wetterradar zur Abschätzung von Niederschlagsintensitäten und zur Abflussvorhersage*, 2007, ISBN 3-933761-64-6
- 161 Hartmann, Gabriele Maria: *Investigation of Evapotranspiration Concepts in Hydrological Modelling for Climate Change Impact Assessment*, 2007, ISBN 3-933761-65-4
- 162 Kebede Gurmessa, Tesfaye: *Numerical Investigation on Flow and Transport Characteristics to Improve Long-Term Simulation of Reservoir Sedimentation*, 2007, ISBN 3-933761-66-2
- 163 Trifković, Aleksandar: *Multi-objective and Risk-based Modelling Methodology for Planning, Design and Operation of Water Supply Systems*, 2007, ISBN 3-933761-67-0
- 164 Götzinger, Jens: *Distributed Conceptual Hydrological Modelling - Simulation of Climate, Land Use Change Impact and Uncertainty Analysis*, 2007, ISBN 3-933761-68-9
- 165 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias: *VEGAS – Kolloquium 2007*, Tagungsband zur Veranstaltung am 26. September 2007 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2007, ISBN 3-933761-69-7
- 166 Freeman, Beau: *Modernization Criteria Assessment for Water Resources Planning; Klamath Irrigation Project, U.S.*, 2008, ISBN 3-933761-70-0

- 167 Dreher, Thomas: *Selektive Sedimentation von Feinstschwebstoffen in Wechselwirkung mit wandnahen turbulenten Strömungsbedingungen*, 2008, ISBN 3-933761-71-9
- 168 Yang, Wei: *Discrete-Continuous Downscaling Model for Generating Daily Precipitation Time Series*, 2008, ISBN 3-933761-72-7
- 169 Kopecki, Ianina: *Calculational Approach to FST-Hemispheres for Multiparametrical Benthos Habitat Modelling*, 2008, ISBN 3-933761-73-5
- 170 Brommundt, Jürgen: *Stochastische Generierung räumlich zusammenhängender Niederschlagszeitreihen*, 2008, ISBN 3-933761-74-3
- 171 Papafotiou, Alexandros: *Numerical Investigations of the Role of Hysteresis in Heterogeneous Two-Phase Flow Systems*, 2008, ISBN 3-933761-75-1
- 172 He, Yi: *Application of a Non-Parametric Classification Scheme to Catchment Hydrology*, 2008, ISBN 978-3-933761-76-7
- 173 Wagner, Sven: *Water Balance in a Poorly Gauged Basin in West Africa Using Atmospheric Modelling and Remote Sensing Information*, 2008, ISBN 978-3-933761-77-4
- 174 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias; Schrenk, Volker: *VEGAS-Kolloquium 2008 Ressource Fläche III*, Tagungsband zur Veranstaltung am 01. Oktober 2008 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2008, ISBN 978-3-933761-78-1
- 175 Patil, Sachin: *Regionalization of an Event Based Nash Cascade Model for Flood Predictions in Ungauged Basins*, 2008, ISBN 978-3-933761-79-8
- 176 Assteerawatt, Anongnart: *Flow and Transport Modelling of Fractured Aquifers based on a Geostatistical Approach*, 2008, ISBN 978-3-933761-80-4
- 177 Karnahl, Joachim Alexander: *2D numerische Modellierung von multifraktionalem Schwebstoff- und Schadstofftransport in Flüssen*, 2008, ISBN 978-3-933761-81-1
- 178 Hiester, Uwe: *Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen*, 2009, ISBN 978-3-933761-82-8
- 179 Laux, Patrick: *Statistical Modeling of Precipitation for Agricultural Planning in the Volta Basin of West Africa*, 2009, ISBN 978-3-933761-83-5
- 180 Ehsan, Saqib: *Evaluation of Life Safety Risks Related to Severe Flooding*, 2009, ISBN 978-3-933761-84-2
- 181 Prohaska, Sandra: *Development and Application of a 1D Multi-Strip Fine Sediment Transport Model for Regulated Rivers*, 2009, ISBN 978-3-933761-85-9

- 182 Kopp, Andreas: *Evaluation of CO₂ Injection Processes in Geological Formations for Site Screening*, 2009, ISBN 978-3-933761-86-6
- 183 Ebigo, Anozie: *Modelling of biofilm growth and its influence on CO₂ and water (two-phase) flow in porous media*, 2009, ISBN 978-3-933761-87-3
- 184 Freiboth, Sandra: *A phenomenological model for the numerical simulation of multiphase multicomponent processes considering structural alterations of porous media*, 2009, ISBN 978-3-933761-88-0
- 185 Zöllner, Frank: *Implementierung und Anwendung netzfreier Methoden im Konstruktiven Wasserbau und in der Hydromechanik*, 2009, ISBN 978-3-933761-89-7
- 186 Vasin, Milos: *Influence of the soil structure and property contrast on flow and transport in the unsaturated zone*, 2010, ISBN 978-3-933761-90-3
- 187 Li, Jing: *Application of Copulas as a New Geostatistical Tool*, 2010, ISBN 978-3-933761-91-0
- 188 AghaKouchak, Amir: *Simulation of Remotely Sensed Rainfall Fields Using Copulas*, 2010, ISBN 978-3-933761-92-7
- 189 Thapa, Pawan Kumar: *Physically-based spatially distributed rainfall runoff modeling for soil erosion estimation*, 2010, ISBN 978-3-933761-93-4
- 190 Wurms, Sven: *Numerische Modellierung der Sedimentationsprozesse in Retentionsanlagen zur Steuerung von Stoffströmen bei extremen Hochwasserabflussergebnissen*, 2010, ISBN 978-3-933761-94-1
- 191 Merkel, Uwe: *Unsicherheitsanalyse hydraulischer Einwirkungen auf Hochwasserschutzdeiche und Steigerung der Leistungsfähigkeit durch adaptive Strömungsmodellierung*, 2010, ISBN 978-3-933761-95-8
- 192 Fritz, Jochen: *A Decoupled Model for Compositional Non-Isothermal Multiphase Flow in Porous Media and Multiphysics Approaches for Two-Phase Flow*, 2010, ISBN 978-3-933761-96-5
- 193 Weber, Karolin (Hrsg.): *12. Treffen junger WissenschaftlerInnen an Wasserbauinstituten*, 2010, ISBN 978-3-933761-97-2
- 194 Bliedernicht, Jan-Geert: *Probability Forecasts of Daily Areal Precipitation for Small River Basins*, 2010, ISBN 978-3-933761-98-9
- 195 Hrsg.: Koschitzky, Hans-Peter; Braun, Jürgen: *VEGAS-Kolloquium 2010 In-situ-Sanierung - Stand und Entwicklung Nano und ISCO -*, Tagungsband zur Veranstaltung am 07. Oktober 2010 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2010, ISBN 978-3-933761-99-6

- 196 Gafurov, Abror: *Water Balance Modeling Using Remote Sensing Information - Focus on Central Asia*, 2010, ISBN 978-3-942036-00-9
- 197 Mackenberg, Sylvia: *Sickerwasserprognose: Möglichkeiten und Grenzen von Labor- und Freilanduntersuchungen*, 2010, ISBN 978-3-942036-01-6
- 198 Singh, Shailesh Kumar: *Robuste Parameterschätzung in beobachteten und unbeobachteten Einzugsgebieten*, 4/2011, ISBN: 978-3-942036-02-3
- 199 Dogan, Mehmet Onur: *Kopplung von Strömung im porösen Medium mit Rohrströmung*, 1/2011, ISBN: 978-3-942036-03-0
- 200 Liu, Min: *Untersuchung der topographischen Effekte auf hydrologische Muster und deren Anwendungen für hydrologische Modellierung und räumliche Interpolation*, 11/2010, ISBN: 978-3-942036-04-7
- 201 Itefa Geleta, Habtamu: *Sedimentertragsmodells für Gebiete mit geringer Datengrundlage*, 12/2010, ISBN: 978-3-942036-05-4
- 202 Franke, Jörg: *Einfluss der Überwachung auf die Versagenswahrscheinlichkeit von Staustufen*, 03/2011, ISBN: 978-3-942036-06-1
- 203 Oinam, Bakimchandra: *Integrated fuzzy-GIS approach for assessing regional soil erosion risks*, 06/2011, ISBN: 978-3-942036-07-8
- 205 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter: *VEGAS-Kolloquium 2011: Flache Geothermie - Perspektiven und Risiken*, Tagungsband zur Veranstaltung am 06. Oktober 2011 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen in Kooperation mit dem Landesforschungszentrum Geothermie LFZG, Karlsruher Institut für Technologie, KIT, 10/2011, ISBN 978-3-942036-09-2

Die Mitteilungshefte ab der Nr. 134 (Jg. 2005) stehen als pdf-Datei über die Homepage des Instituts: www.iws.uni-stuttgart.de zur Verfügung.