

**G E O F O R S C H U N G S Z E N T R U M P O T S D A M**  
STIFTUNG DES ÖFFENTLICHEN RECHTS

Ernst Huenges, Ali Saadat,  
Silke Köhler, Wilfried Rockel,  
Suzanne Hurter, Andrea Seibt,  
Dirk Naumann, Martin Zimmer,  
Jörg Erzinger, Thomas Wiersberg,  
Björn Legarth und Helmut Wolff

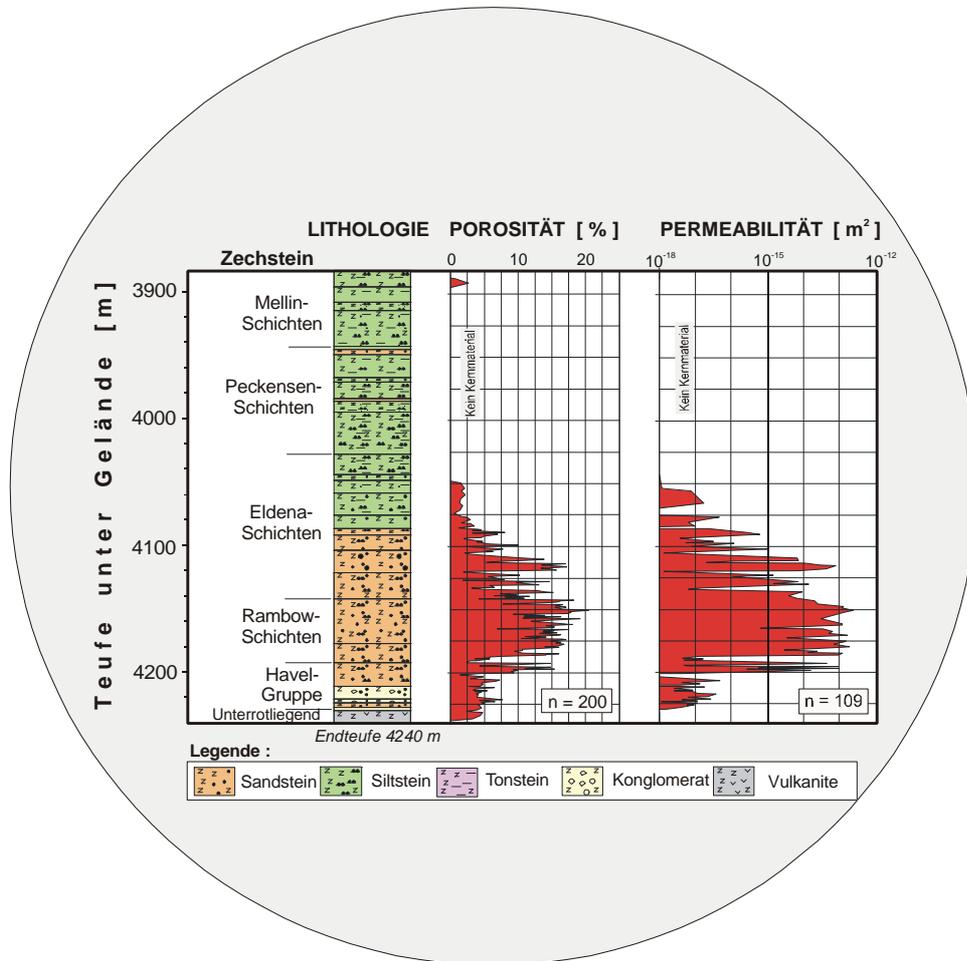
# **Geothermische Technologieentwicklung**

## **- geologische und energietechnische Ansatzpunkte -**

---

Scientific Technical Report STR00/23

# Geothermische Technologieentwicklung geologische und energietechnische Ansatzpunkte



Ernst Huenges, Ali Saadat, Silke Köhler, Wilfried Rockel,  
Suzanne Hurter, Andrea Seibt, Dirk Naumann, Martin Zimmer,  
Jörg Erzinger, Thomas Wiersberg, Björn Legarth und Helmut Wolff

Scientific Technical Report STR00/23



# Geothermische Technologieentwicklung– geologische und energietechnische Ansatzpunkte

## Inhaltsverzeichnis

Einleitung	4
<i>Ernst Huenges</i>	
Möglichkeiten und Perspektiven der geothermischen Stromerzeugung	7
<i>Silke Köhler und Ali Saadat</i>	
Tiefe Altbohrungen als Beitrag zur Nutzbarmachung klüftig – poröser Speichergesteine (geologische Grundlagen)	29
<i>Wilfried Rockel und Suzanne Hurter</i>	
Welche Faktoren können die Eisen(II)-Oxidation in Formationswässern beeinflussen?	51
<i>Andrea Seibt</i>	
Gas monitoring, fluid flux and fluid sampling at well GPK-2 (Soultz-sous-Forêts, France) – First results from the 5000m production test	71
<i>Dirk Naumann, Martin Zimmer, Jörg Erzinger and Thomas Wiersberg</i>	
Technische Machbarkeit von untertägig geschlossenen geothermischen Wärmetauschersystemen für die standortunabhängige Energiegewinnung	85
<i>Björn Legarth und Helmut Wolff</i>	

## Einleitung

*Ernst Huenges, GeoForschungsZentrum Potsdam*

Dieser Report fasst Ergebnisse aus der Startphase des Projekts ***Nutzbarmachung klüftig-poröser Speichergesteine zur abnehmernahen geothermischen Energiebereitstellung*** zusammen. Das Projekt wurde mit Förderung durch das BMBF (BEO 0327063B) in einer Vorphase 1998 und durch das BMWi (BEO 0327063) 1999 gestartet. Mit den Kooperationspartnern Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover, dem Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben Hannover, der Technischen Universität Berlin, der Universität Stuttgart, der Ruhruniversität Bochum und mit Unterstützung der Unternehmen MeSy GmbH Bochum und GTN GmbH Neubrandenburg werden folgende Ziele verfolgt:

Klüftig-poröse Speichergesteine sollen zur Wärmegewinnung nutzbar gemacht und eine entsprechende Technologie entwickelt werden. Dadurch wird das Angebotspotenzial geothermischer Energie wesentlich erweitert. Ziel des Projektes ist es, das Fündigkeitsrisiko geeigneter Horizonte, d. h. primär gering ergiebiger aber kontrolliert stimulierbarer Speichergesteine zu reduzieren. Aufbauend auf Kenntnissen des geomechanischen Stoffverhaltens (Bohrloch und Labor) werden wirtschaftliche Stimulationsverfahren entwickelt. Für die Betriebsphase wichtige Untersuchungen des Langzeitverhaltens dieses Speichertyps werden durch Erfassung der Kinetik der chemischen Reaktionen an den Poren- und Kluftoberflächen durchgeführt. Folgende Themenkomplexe sollen untersucht werden:

- Petrophysikalische Charakterisierung und Verbreitung der Zielhorizonte,
- ihre Nutzbarmachung mit Betrachtung bohrtechnischer und geomechanischer Aspekte sowie
- technischer Betrieb und energiewirtschaftliche Konsequenzen aus der Nutzung klüftig-poröser Speichergesteine.

Es werden die Grundlagen für eine standortvariable Erdwärmennutzung entwickelt.

In diesem Sinne und entsprechend der Vorgehensweise in dem vorgeschalteten Geothermie-Projekt am GeoForschungsZentrum Potsdam ***Evaluierung geowissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedingungen für die Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen*** (BEO 0326969) soll dieses Projekt mit einer Serie von sogenannten Geothermie-Reports begleitet werden, um eine schnelle Information über den Projektfortschritt, aber auch über interessante das Projekt berührende Aspekte zu berichten.

Dieser Report ist entsprechend dem Konzept zur Durchführung des Projekts interdisziplinär angelegt.

Geothermische Stromerzeugung ist durch geänderte politische Rahmenbedingungen in den Vordergrund der Projektbearbeitung gerückt. Aus diesem Grunde werden die für Deutschland zur Zeit möglichen Technologien der Energiewandlung aus Erdwärme aus Sicht der Energie- und Verfahrenstechnik zusammengestellt und alternativ diskutiert (*Köhler und Saadat*). Nach dem Erneuerbare-Energien Gesetz vom 25.02.2000 kommt dem Aspekt der erreichbaren Temperatur eine verstärkte Bedeutung zu, da mit der Umwandlung von Wärme in Strom am ehesten eine wirtschaftliche Nutzung erreicht werden kann. Dies setzt Temperaturen größer 100 °C und die Realisierbarkeit von Volumenströmen deutlich über 50 m<sup>3</sup>/h voraus.

Ein Projektziel ist die Überprüfung der Stimulierbarkeit hydrogeothermal bisher nicht nutzbarer Gesteinsschichten im Rahmen eines relevanten Fallbeispiels (Formation, Bohrlokation). Die geologischen Aspekte der Standortauswahl für dieses Fallbeispiel werden in dem Artikel von *Rockel und Hurter* dargestellt. Interessant ist dabei besonders, daß man für diesen anvisierten Erkenntnisgewinn auf tiefe Altbohrungen zurückgreifen kann. Der Vorgang der Stimulation wird von den lokal herrschenden Spannungsfeld kontrolliert. Daher bilden die Spannungsdaten an der Lokation eine notwendige Datenbasis, bevor dort Experimente geplant werden.

Die Übertragbarkeit der Daten aus dieser einen Lokation auf andere Standorte aber auch der sichere Aufschluß und Betrieb eines Thermalwasserkreislaufs an dieser Lokation erfordert ein Konzept für petrophysikalische und geochemische Laboruntersuchungen. Der Betrieb eines Thermalwasserkreislaufs wird insbesondere von Eisenoxid-Ausfällungen beeinflusst. Kinetikdaten zu solchen Reaktionen fehlen. Daher stellt *Seibt* in ihrem Beitrag die Frage nach den Einflussfaktoren der Eisenoxidation im Thermalwasserkreislauf.

Je tiefer die Reservoirs liegen, desto mehr muss der Einfluss der in der Tiefe gelösten Gase auf den Nutzungsprozess berücksichtigt werden. Systematische Messungen sind sehr selten bzw. liegen für Geothermienutzung nicht vor. Daher haben *Naumann et al.* solche Messungen an der Bohrung GPK2 in Soultz-sous-Forêts durchgeführt und hier dargestellt.

Das Projekt befaßt sich hauptsächlich mit untertage offenen Systemen wegen des günstigeren Wärmeübergangs vom Gebirge in eine Gewinnungsbohrung. Nichtsdestotrotz wurde als Alternativlösung von *Legarth und Wolff* die technische Machbarkeit von innovativen untertägig geschlossenen Wärmetauschersystemen untersucht. Moderne Zielbohrtechnik erlaubt die Machbarkeit von thermodynamisch günstigen Konfigurationen, die für eine Wärmegewinnung aus Erdwärme zunehmend interessanter werden.

Vorliegende aus den Geothermie-Projekten entstandene Reports:

Geothermie Report 96-1: Hydrogeothermale Anlagen: Systemvergleich und Emissionsbilanz. Herausgeber: Ernst Huenges, Kemal Erbas, Kuno Schallenberg GeoForschungsZentrum Potsdam, Scientific Technical Report STR96/08, 1996

Geothermie Report 97-1: Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen in Norddeutschland. Herausgeber: Peer Hoth, Andrea Seibt, Tors-ten Kellner, Ernst Huenges, GeoForschungsZentrum Potsdam, Scientific Technical Report STR97/15, 1997

Geothermie Report 98-1: Angebotspotential der Erdwärme sowie rechtliche und wirtschaftliche Aspekte der Nutzung hydrothermaler Nutzungsanlagen. Herausgeber: Heike Ehrlich, Kemal Erbas, Ernst Huenges GeoForschungsZentrum Potsdam, Scientific Technical Report STR98/09, 1998

Geothermie Report 99-1: Geothermisches Heizwerk Neustadt-Glewe: Zustands- und Stoffparameter, Prozeßmodellierungen, Betriebserfahrungen und Emissionsbilanzen. Herausgeber: Kuno Schallenberg, Kemal Erbas, Ernst Huenges, Heiner Menzel, GeoForschungsZentrum Potsdam, Scientific Technical Report STR99/04, 1999

Geothermie Report 99-2: Evaluierung geowissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedingungen für die Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen. Herausgeber: Kemal Erbas, Andrea Seibt, Peer Hoth und Ernst Huenges, GeoForschungsZentrum Potsdam, Abschlussbericht: BMBF (BEO0392626), Scientific Technical Report STR99/09, pp. 70

ERBAS K., DANNOWSKI, G. & SCHRÖTTER, J. (1999): Reproduzierbarkeit und Auflösungsvermögen faseroptischer Temperaturmessungen für Bohrlochanwendungen – Untersuchungen in der Klimakammer des GFZ. Scientific Technical Report, STR99/19, GeoForschungsZentrum Potsdam, pp. 54

NAUMANN, D. (2000): Salinare Tiefenwässer in Norddeutschland: Gas- und isotopengeochemische Untersuchungen zur Herkunft und geothermischen Nutzung. Dissertation, Universität Potsdam, pp. 115

WENDEROTH, F. (1998): Dreidimensionale Modellierung geohydrothermaler Prozesse zur Beurteilung von Aquiferen hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Nutzbarkeit. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften, Freie Universität Berlin, Scientific Technical Report STR98/15, GeoForschungsZentrum Potsdam, pp. 133

# Möglichkeiten und Perspektiven der geothermischen Stromerzeugung

*Silke Köhler und Ali Saadat, GeoForschungsZentrum Potsdam*

<b>1</b>	<b>Rahmenbedingungen .....</b>	<b>9</b>
1.1	Technische Aspekte – Planung und Betrieb der Anlagen .....	9
1.2	Betriebswirtschaftliche Aspekte .....	10
1.3	Thermodynamische Aspekte .....	11
<b>2</b>	<b>Prozesse zur Erzeugung elektrischer Energie aus Geothermie .....</b>	<b>13</b>
2.1	Klassische Kraftwerksprozesse / Vergleichsprozesse .....	14
	Dampfkraftprozess (Clausius-Rankine Prozess).....	14
	Gasturbinenprozess.....	15
2.2	Geothermische Kraftwerke mit direkter Nutzung des Fluides .....	17
	Direkte Nutzung des Dampfes.....	17
	Single Flash Systeme.....	19
	Double Flash Systeme .....	20
2.3	Binäranlagen.....	22
	Rankine-Prozess mit organischem Arbeitsmittel (Organic Rankine Cycle, ORC).....	22
	Kalina-Kreislauf .....	24
<b>3</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>28</b>

## Abstract

An overview of the available technologies to convert geothermal energy to electricity and their range of application is presented. Geothermal power plants and geothermal heating systems are compared from technical and economic points of view.

Reservoir temperature, steam content, fraction of non-condensable gases, corrosion and scaling potential as well as the productivity of a geothermal field determine the choice of the type of power station appropriate for a specific geothermal field. Direct steam and flash steam plants are used when geothermal fluid temperature is above 150°C. The plants benefit from fluids with small fractions of non-condensable gases and low corrosion and scaling potential. Binary power plants work with a secondary fluid and require geothermal fluid temperatures of at least 80°C. Higher temperatures improve their efficiency substantially. The working fluid is selected according to the temperature range in the geothermal reservoir. Since the impact of the geothermal fluid is limited to the brine supply system and the heat exchanger, binary systems can use geothermal fluids with high concentrations of dissolved gases and high scaling or corrosion potential.

Geothermal heating systems and geothermal power plants use the same primary energy, however, they differ in the products they supply to the energy market, in the management and in the basic economic data. While space heating is clearly tailored to the customer, the design of geothermal power plants is largely independent of specific users.

Three issues affect the decision for a certain energy conversion technology:

- geological conditions, i.e. flow rate, temperature and enthalpy content of the geothermal fluids determine which products can be offered,
- local demand, i.e. consumer needs at specific sites decide which products will find a ready market
- economy, i.e. production costs and local market conditions control the profitability of the investment.

The technical feasibility of the use of geothermal energy for space heating and electricity generation is demonstrated in many places of the world. In Germany, however, the level of development of the two systems differs strongly: geothermal heating systems have been operated successfully for several years, while geothermal power plant technology is still incipient. Further development of this technology is indispensable to assure its availability in the future.

## 1 Rahmenbedingungen

Die nachhaltige, am Bedarf an Energiedienstleistungen orientierte Versorgung mit Energie steht im Mittelpunkt einer umweltgerechten Wirtschaftsstruktur. Hier wird es darauf ankommen, durch umfassenden Einsatz verbrauchs- wie aufkommensseitiger Instrumente eine weitere deutliche Erhöhung der Energieeffizienz wie des Einsatzes erneuerbarer Energieträger zu erreichen. Langfristig ist eine weitreichende Umstellung auf erneuerbare Energieträger unumgänglich. Dazu kann Geothermie einen erheblichen Beitrag leisten.

Ziel des Projektes „Nutzbarmachung klüftig-poröser Speichergesteine zur abnehmernahen geothermischen Energiebereitstellung“ ist, Grundlagen zu schaffen, um die Nutzung der geothermischen Energie möglichst standortunabhängig zu machen. Während ein Schwerpunkt des Projektes bei den Gesteinseigenschaften und Prozessen untertage liegt, beschäftigt sich ein anderer - die Realisierungskonzepte - mit der energetischen Nutzung der Geothermie übertage. Die energetische Nutzung hydrothermalen Ressourcen geschieht in Deutschland bisher ausschließlich in geothermischen Heizzentralen. Anlagen zur Wandlung der Wärme aus der Erde in elektrische Energie erweitern die Nutzung in mehrfacher Hinsicht: Die andere Energieform (Strom) erschließt nicht nur ein neues Abnehmerpotential, sondern auch die Frage des Transportes vom Ort der Erzeugung zum Verbraucher ist gelöst.

Die folgenden Abschnitte beleuchten die verschiedenen Aspekte der geothermischen Stromerzeugung und stellen sie der Wärmebereitstellung aus Geothermie gegenüber.

### 1.1 Technische Aspekte – Planung und Betrieb der Anlagen

Eine geothermische Heizzentrale besteht in Deutschland in der Regel aus Förder- und Verpressbohrung sowie dem Thermalwasserkreislauf mit Förderpumpe und Wärmeübertrager übertage. Falls erforderlich wird die Temperatur mit Hilfe einer Wärmepumpe auf das gewünschte Niveau angehoben. Zur Deckung der Spitzenleistung dienen meist mit fossilen Brennstoffen beheizte Kessel. Die Wärme wird in ein Nah- bzw. Fernwärmenetz eingespeist und so zu den Verbrauchern transportiert. Damit stellen sich bei der Realisierung der Anlage zwei Aufgaben aus dem energietechnischen Bereich.

- Es müssen mindestens zwei Energieträger in dem System zusammengeführt, die Anlagen passend dimensioniert und technisch integriert werden.
- Es ist ein Verteilernetz erforderlich, das – so nicht vorhanden - installiert werden muss. Dies kann je nach Art der Bebauung des zu versorgenden Gebietes mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden sein.

Heizzentralen werden nachfragegebunden geplant und betrieben. Betriebserfahrung bestehender Anlagen und Optimierungsrechnungen zeigen, dass der geothermische Teil der Heizzentralen jährliche Vollaststunden zwischen 2000 bis 3000 Stunden erreicht (SCHALLENBERG ET AL., 1999). Dies resultiert aus der starken jahreszeitlichen Schwankung der Wärmenachfrage und der entsprechenden Dimensionierung der geothermischen Anlage auf die Grundlast. Diese Richtwerte gelten für übliche Heiznetze mit einer Mischnutzung private Haushalte /

Industrie. Stark davon abweichende Jahresgänge können zu höheren Vollaststundenzahlen führen.

Die möglichen Techniken zur geothermischen Stromerzeugung sind in Abschnitt 2 dargestellt. Unter den geologischen Voraussetzungen in Deutschland kommen voraussichtlich nur Systeme, die mit einem Sekundärfluid arbeiten, in Frage. Ein solches System setzt sich aus dem Hauptkomponenten Verdampfer, Turbine, Kondensator und Speisepumpe sowie den zugehörigen Steuer- und Regelungselementen zusammen. Im Gegensatz zu geothermischen Heizzentralen werden hier auch auf der Sekundärseite des Wärmeübertragers (Thermalwasser/Sekundärfluid) Sondermaschinen eingesetzt. Geothermische Kraftwerke arbeiten autark und nutzerunabhängig. Der erzeugte Strom kann direkt in das bestehende Netz eingespeist werden. Eine aufwendige Systemintegration oder gar die Errichtung eines eigenständigen Verteilernetzes sind nicht erforderlich.

Die Anlagen bedienen die elektrische Grundlast und erreichen damit Vollaststundenzahlen von 7000 und mehr Stunden im Jahr (LUND & BOYD, 1999). Genau so wie Fotovoltaik- oder Windkraftanlagen werden sie netzparallel betrieben. Die erzeugte Elektrizität kann zu jeder Zeit – saison- und nutzerunabhängig – in das Stromnetz eingespeist werden. Der Netzbetreiber sorgt für die Spannungs- und Frequenzhaltung und gegebenenfalls die Blindstromlieferung.

## **1.2 Betriebswirtschaftliche Aspekte**

Märkte für Energie sind in der Regel nicht ohne geordnete Rahmenbedingungen funktionsfähig. Die gegenwärtigen wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingung eröffnen neue Perspektiven für alle erneuerbaren Energien. Schlagworte wie „Verabschiedung des Erneuerbaren Energien Gesetzes (EEG)“ und „Öffnung des Gasmarktes“ kennzeichnen die Situation. Der zur Zeit (Herbst 2000) stattfindende Umbruch im Energieversorgungsmarkt hat erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit geothermischer Anlagen.

Für die Errichtung einer geothermischen Heizzentrale müssen betriebswirtschaftlich betrachtet zwei Voraussetzungen erfüllt sein. Zuerst muss eine ausreichende und geeignete Nachfrage in der Nähe einer günstigen geologischen Formation bestehen. Dann muss der Betreiber der Anlage diese Nachfrager als Kunden gewinnen.

Die Öffnung des Gasmarktes führt zu erhöhtem Wettbewerb und damit voraussichtlich, wenn auch kurzzeitig, zu erheblichen Wärmepreissenkungen. Dies verschlechtert die Wirtschaftlichkeit einer geothermischen Heizzentrale und erschwert damit erheblich die Vermarktung der geothermische Wärme.

Anders stellt sich die Situation bei geothermischen Kraftwerken dar: Das EEG garantiert sowohl die Abnahme der elektrischen Energie als auch einen festen Preis von 17,5 Pf/kWh. Aus der Sicht eines Betriebswirtschaftlers liegen damit geradezu ideale Bedingungen vor: Sowohl der Absatz als auch der Preis ist festgeschrieben, es ist 100% Planungssicherheit

gegeben, ein Argument, das insbesondere im sich gerade stetig wandelnden Energiemarkt von ausschlaggebender Bedeutung ist.

Neben der aktuell an einem Standort gegebenen Situation sollten auch die zukünftigen energetischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen während des Planungsganges in Betracht gezogen werden. Damit spielt der Grad der Anpassungsfähigkeit einer Technologie an zukünftige Bedingungen eine ausschlaggebende Rolle bei der Entscheidung für eine bestimmte Anlage. Da die Heizzentralen nachfrageorientiert geplant werden und ein hohes Maß an Systemintegration aufweisen, können sie nur in begrenztem Rahmen auf eine Änderung der Nachfrage reagieren. Anlagen für geothermische Stromerzeugung dagegen sind in der Regel modular aufgebaut und damit leicht erweiterbar. Ein ergiebiger Nutzhorizont kann z.B. in mehreren Ausbaustufen mit einer Anzahl von Bohrungen erschlossen werden. Der modulare Aufbau der Anlagen zur Energiewandlung ermöglicht eine optimale Anpassung der Gesamtleistung an die jeweilige Ausbaustufe.

### 1.3 Thermodynamische Aspekte

Zur Bewertung eines Prozesses oder einer Anlage werden in der Technik gerne Wirkungsgrade benutzt, um durch eine einzige Zahlenangabe die Güte einer Energieumwandlung zu kennzeichnen (BAEHR, 1989). Ein Wirkungsgrad ist allgemein definiert als Quotient zwischen Nutzen und Aufwand. Die Verbesserung des Wirkungsgrades bedeutet entweder Verminderung des Aufwandes bei gleichem Nutzen oder Erhöhung des Nutzens bei gleichem Aufwand. Bei der Nutzung fossiler Energieträger kommen beide Mechanismen zum Tragen: Die Verminderung des Aufwandes schont die begrenzten Ressourcen und verringert die Emissionen. Die Verbesserung einer Anlage erhöht den Nutzen und verringert den energetisch nicht nutzbaren Anteil – die Verluste. Für geothermische Anlagen spielt zunächst nur der zweite Mechanismus eine Rolle, da die Ressource nahezu unbegrenzt zur Verfügung steht. Die nicht genutzte thermische Energie wird zum größten Teil wieder in die Erde zurück geführt. Das Ziel, die Anlage zu optimieren, um einen möglichst großen Nutzen zu erreichen, bleibt davon unberührt.

Heizwerke und Kraftwerke, zwei Systeme, die so unterschiedliche Produkte wie Wärme und Strom erzeugen, können nur durch einen Quotient aus thermodynamisch gleichwertigen Energien, also aus Exergien<sup>1</sup>, bewertet werden. Elektrische Energie besteht zu 100% aus Exergie und kann damit uneingeschränkt in jede andere Energieform umgewandelt werden. Dies gilt nicht für thermische Energie (Wärme), die sich aus einem exergetischen und einem anergetischen Anteil zusammensetzt. Von ihr kann nur der Anteil der Exergie in andere Energieformen umgewandelt werden. Mit dem exergetischen Wirkungsgrad lässt sich direkt erkennen, wie gut eine Energiequelle zur Verrichtung einer Aufgabe eingesetzt wird und wie viel Verbesserung im thermodynamischen Sinne noch möglich ist.

---

<sup>1</sup> Exergie ist Energie, die sich unter Mitwirkung einer vorgegebenen Umgebung in jede andere Energieform umwandeln lässt, Anergie ist Energie, die sich nicht in Exergie umwandeln lässt. Es gilt für jede Energieform die allgemeine Gleichung: Energie = Exergie + Anergie (BAEHR, 1989).

FRICKE & BORST (1984) zeigen am Beispiel der Prozesswärmeerzeugung aus Geothermie, dass sich Exergiewirkungsgrade bis zu 80% erreichen lassen. „Dieser Wert ist wesentlich größer als bei anderen Methoden der Prozesswärmeerzeugung wie beispielsweise Verbrennung von fossilen Brennstoffen. Der Grund dafür ist offenbar, dass die Primärenergie (Geowärme) schon eine Energieform von verhältnismäßig geringer Qualität ist und nur eine geringe weitere Exergieverminderung bei der Prozesswärmeerzeugung auftritt. Auf ähnliche Weise kann man zeigen, dass auch der Exergiewirkungsgrad bei der Elektrizitätserzeugung günstig ist, während der Energiewirkungsgrad außerordentlich klein ist (FRICKE & BORST, 1984)“. Tabelle 1 zeigt exemplarisch die Eckwerte einiger geothermischer Kraftwerke mit den dazugehörigen exergetischen und - soweit verfügbar - energetischen Wirkungsgraden. Die in der Tabelle genannten Prozesse werden in Abschnitt 2 dargestellt.

Für eine thermodynamische Bewertung von Prozessen ist ein Vergleich zwischen Wärme und Strom durch Exergieanalyse möglich. Bei einem konkreten Projekt dagegen ist die Bewertung letztendlich immer abhängig von der benötigten Energieform. Eine allgemein gültige Aussage, welche Variante günstiger ist, kann ohne Berücksichtigung der Nachfrage nicht getroffen werden.

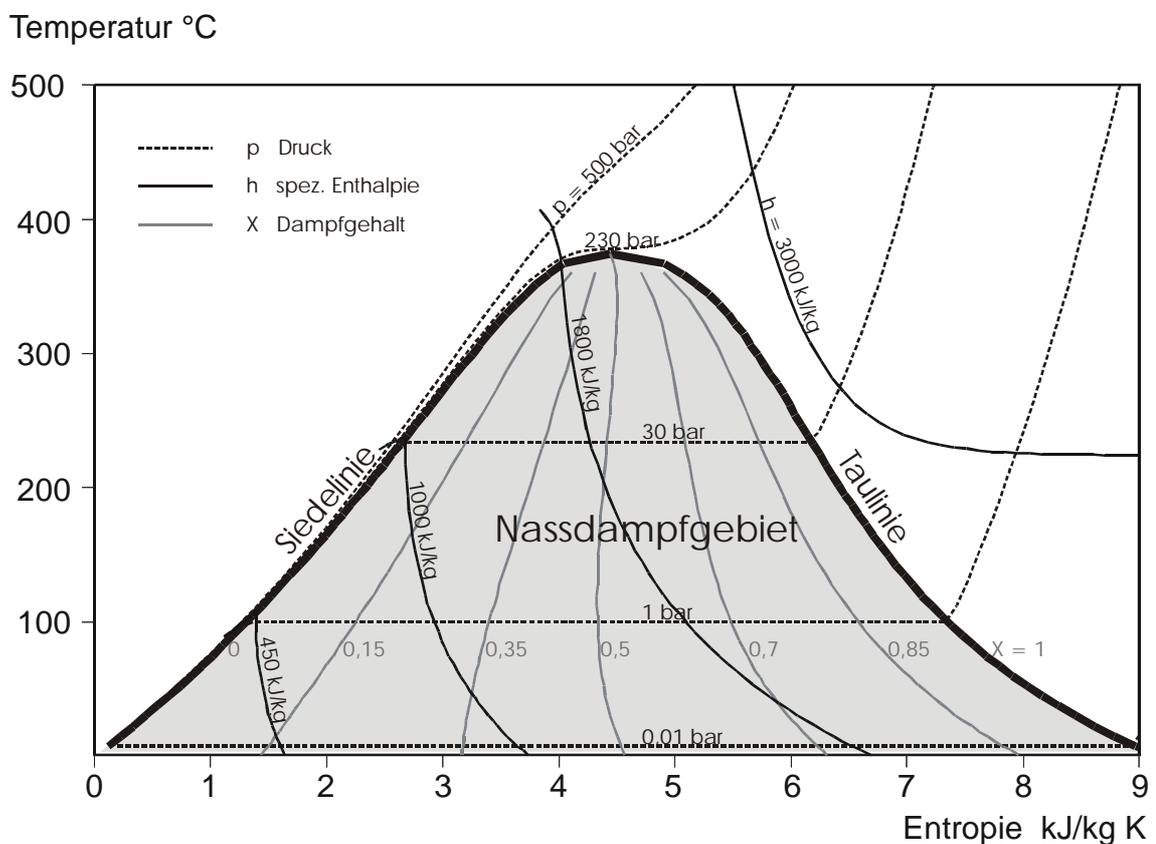
<b>Standort</b>	<b>Larderello Italien</b>	<b>Guanacaste Costa Rica</b>	<b>Beowave Nevada</b>	<b>Heber Kalifornien</b>	<b>Wendel Kalifornien</b>
Anlage	Valle Secolo	Miravalles	Beowave	Second Imperial	Amedee
Prozess	Direkte Dampfnutzung	Single Flash	Double Flash	ORC (Isopentan)	ORC (R-114)
Nennleistung	57 MW	55 MW	16,7 MW	40 MW	2 MW
Förderrate	400 t/h	2734 t/h	567 t/h	3596 t/h	738 t/h
Reservoir Temperatur	204°C	230°C	215°C	168°C	103°C
Fluid	Überhitzter Dampf	Heißwasser	Heißwasser	Heißwasser	Heißwasser
Spezifischer Fluidverbrauch	7,7 kg/MWh	53 kg/MWh	35 kg/MWh	85 kg/MWh	463 kg/MWh
Exergetischer Wirkungsgrad	57,6%	29,5%	46,7%	35,6%	13,9%
Energetischer Wirkungsgrad				13,2%	5,6%

**Tabelle 1:** Geothermische Kraftwerke, nach DIPPIO (1999)

## 2 Prozesse zur Erzeugung elektrischer Energie aus Geothermie

Um die Wärme aus der Erde in elektrische Energie zu wandeln, stehen verschiedene Prozesse und Anlagen zur Verfügung. Alle beinhalten eine Turbine, in der das Arbeitsmedium entspannt und dabei über eine Welle einen Generator antreibt. Der klassische Dampfkraftprozess (Clausius-Rankine Prozess) und der offene Gasturbinen Prozess standen Pate für diese Prozesse. Das aus der Bohrung geförderte Fluid dient entweder direkt als Arbeitsmedium oder es überträgt die Wärme in einem Wärmeübertrager an ein Sekundärfluid.

Alle im Folgenden genannten Angaben zu Prozessparametern entstammen einzelnen Veröffentlichungen. Sie sind als beispielhaft anzusehen und sollen dazu dienen, die Arbeitsbereiche der verschiedenen Prozesse zu veranschaulichen.



**Abbildung 1:** Temperatur-Entropie Diagramm von Wasser mit Nassdampfgebiet (grau unterlegt), Isobaren (schwarz gestrichelt), Isenthalpen (schwarz durchgezogen) und Linien gleichen Dampfgehaltes (grau durchgezogen)

Die Darstellung der Prozesse erfolgt sowohl als Schaltbild, das die einzelnen Komponenten und ihre Verschaltung in einem Schema zeigt, als auch in einem Temperatur-Entropie<sup>2</sup> Diagramm (T-s Diagramm). T-s Diagramme dienen zur Veranschaulichung von Kreisprozessen. Zustandsänderungen wie zum Beispiel isobare, isotherme Verdampfung oder isenthalpe Ent-

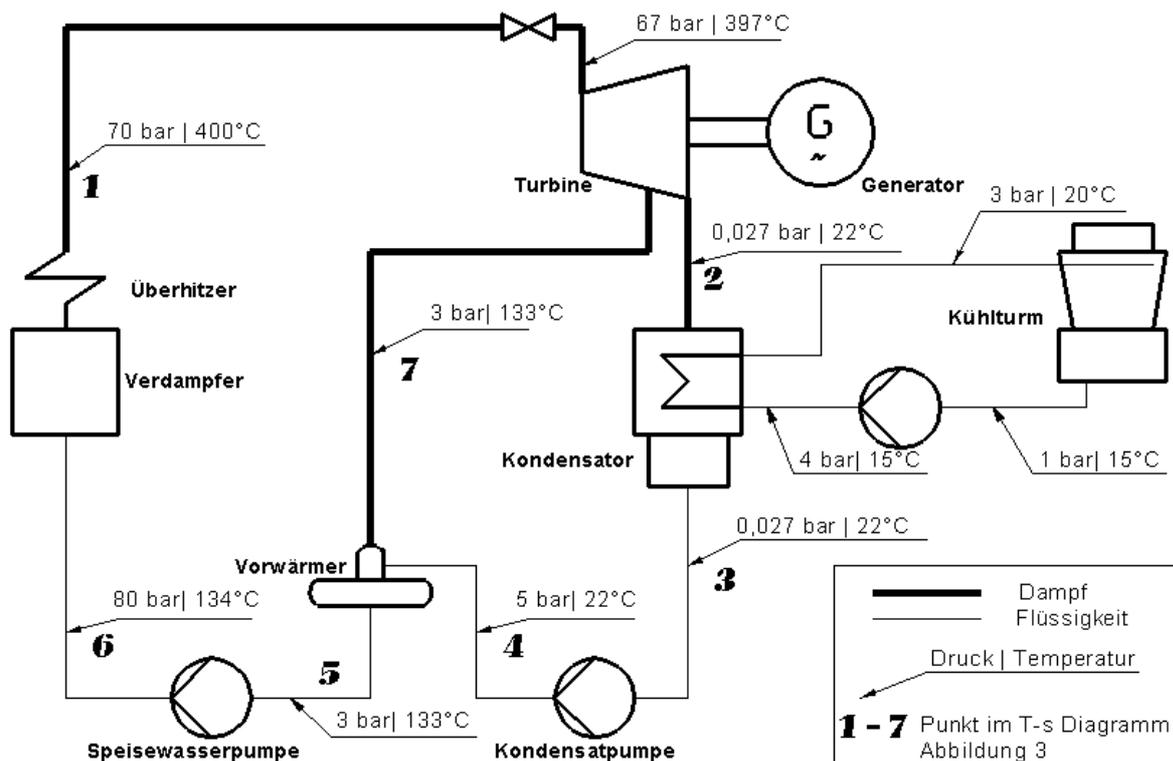
<sup>2</sup> Entropie ist ein Maß für die Freiwilligkeit bzw. die Richtung einer Zustandsänderung. Alle natürlichen Prozesse sind irreversibel. Reversible Prozesse sind nur idealisierte Grenzfälle irreversibler Prozesse.

spannung, können entlang der Isolinien leicht eingetragen und verfolgt werden (s. Abbildung 1). In idealen Prozessen erfolgen Kompression und Entspannung isentrop, d.h. ohne Zunahme der Entropie. Sie sind damit vollständig reversibel. In der Realität sind beide Zustandsänderung aufgrund von z.B. Reibungsverlusten nicht vollständig umkehrbar, die Entropie nimmt in beiden Fällen zu. Alle im Folgenden gezeigten Diagramme berücksichtigen diese Entropiezunahme.

## 2.1 Klassische Kraftwerksprozesse / Vergleichsprozesse

### Dampfkraftprozess (Clausius-Rankine Prozess)

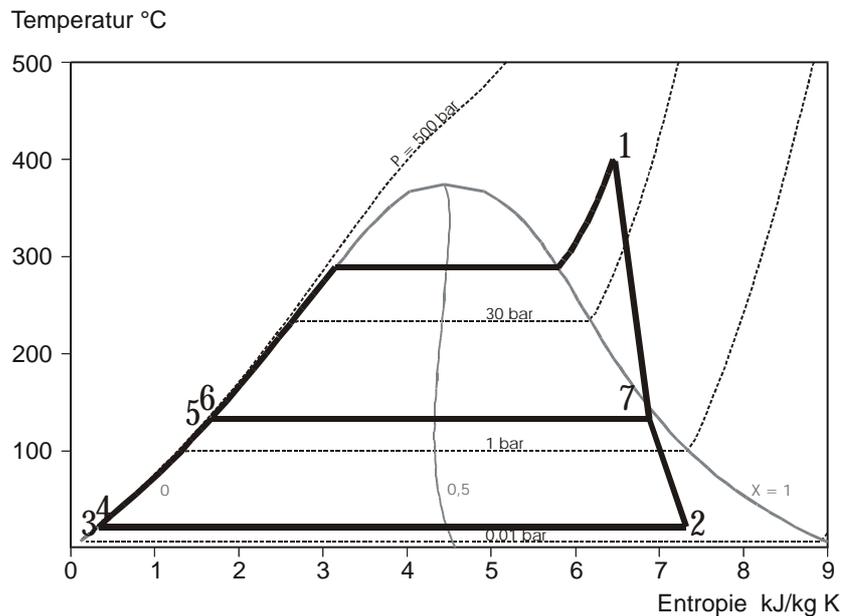
Der Clausius-Rankine Prozess besteht im Wesentlichen aus Verdampfer/Überhitzer, Turbosatz (Turbine + Generator), Kondensator mit angeschlossenen Kühlturm und Speisewasserpumpen. Der in Abbildung 2 dargestellte einfache Dampfkraftprozess wurde WOULDSTRA & VERSCHOOR (1998) entnommen. Er enthält neben den genannten Komponenten eine Dampfanzapfung zur Speisewasservorwärmung.



**Abbildung 2:** Einfacher Dampfkraftprozess mit Vorwärmung durch Anzapfdampf nach WOULDSTRA & VERSCHOOR (1998)

Das dampfförmige, überhitzte Arbeitsmedium aus dem Verdampfer / Überhitzer (1) entspannt in der Turbine und treibt so den Generator an. Der Druck nach der Turbine (2) liegt mit 0,027 bar deutlich unter dem Umgebungsdruck. Der Dampf kondensiert im Kondensator, wobei Wärme über den Kühlturm abgeführt wird (3). Anschließend erhöhen die Speisewasserpumpen den Druck, bevor das Arbeitsmedium im Verdampfer wieder isobar verdampft

und anschließend überhitzt wird (3-6, 1). Im Niederdruckteil der Turbine wird ein Teilstrom des Dampfes (7) angezapft und wärmt das Arbeitsmedium nach einer ersten Druckerhöhung in einem Mischvorwärmer vor. Dies verbessert den exergetischen Wirkungsgrad des Prozesses.



**Abbildung 3:** Clausius-Rankine Prozess mit Vorwärmung durch Anzapfdampf, dargestellt im T-s Diagramm

Das T-s Diagramm zeigt die Entspannung bis in das Nassdampfgebiet (1-2) mit der anschließenden Kondensation (2-3). Die Isobaren links des Nassdampfgebietes liegen vergleichsweise dicht beieinander, so dass die Druckerhöhung durch die Pumpen (3-4) und (5-6) nur schwer zu erkennen ist. Die Wärmezufuhr bei Vorwärmung (4-5), Erwärmung, Verdampfung und Überhitzung (6-1) erfolgt isobar, die Verdampfung ist zudem isotherm.

### Gasturbinenprozess

Abbildung 4 zeigt einen offenen Gasturbinenprozess. Komprimierte Luft (2) und das Brenngas reagieren in der Brennkammer. Das heiße Rauchgas (3) entspannt in der Turbine und treibt sowohl den Generator als auch den Luftverdichter an. Die Austrittstemperatur aus der Turbine (4) ist noch sehr hoch, so dass im Normalfall die im Rauchgas enthaltene Wärme in einem nachgeschalteten Dampfkraftprozess genutzt wird und erst anschließend das Rauchgas durch den Schornstein an die Umgebung abgegeben wird (Gas und Dampf, GUD-Kraftwerke). In Abbildung 4 ist dieser Teil nicht dargestellt.

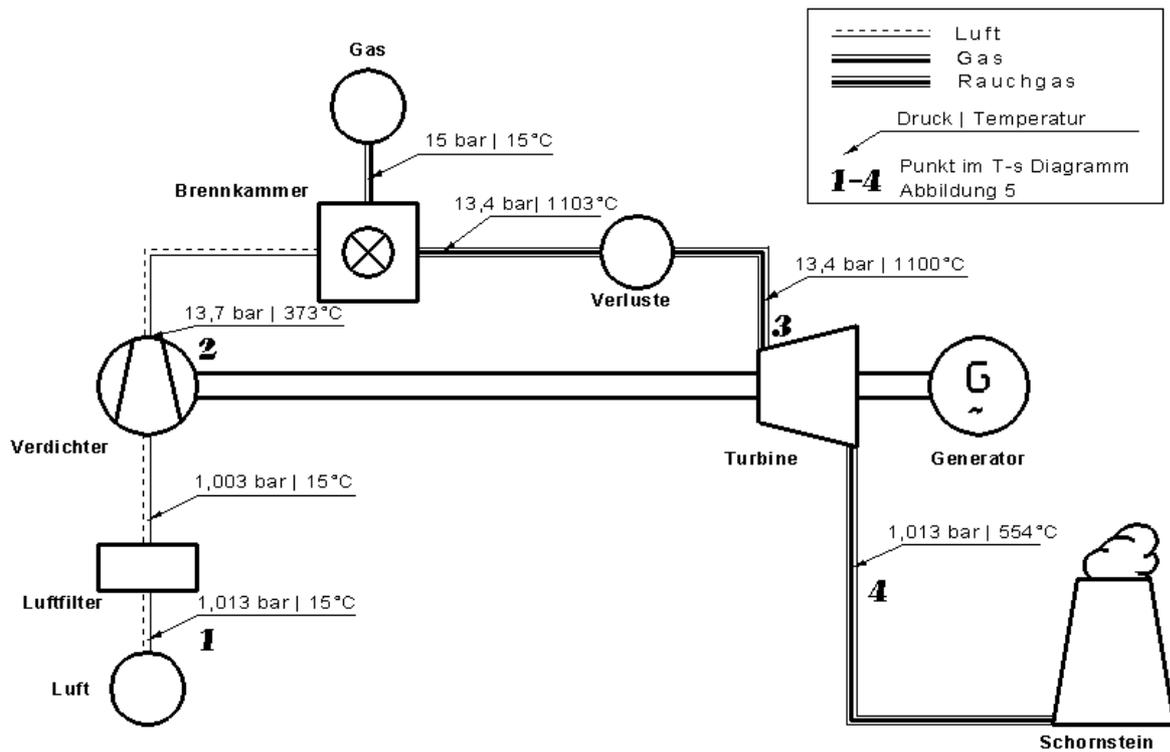


Abbildung 4: Gasturbinen Prozess nach Woudstra & Verschoor (1998)

Im T-s Diagramm (Abbildung 5) setzt sich der idealisierte Prozess aus den drei Schritten isentrope Verdichtung (1-2'), isobare Verbrennung (2'-3) und isentrope Entspannung (3-4') zusammen. Da sowohl Verdichtung als auch Entspannung in der Realität nicht isentrop ablaufen, d.h. nicht vollständig reversibel sind, wird auch im T-s Diagramm die Entropiezunahme berücksichtigt. Die Zustandsänderungen (1-2) und (3-4) beschreiben die nicht idealisierte Verdichtung und Entspannung.

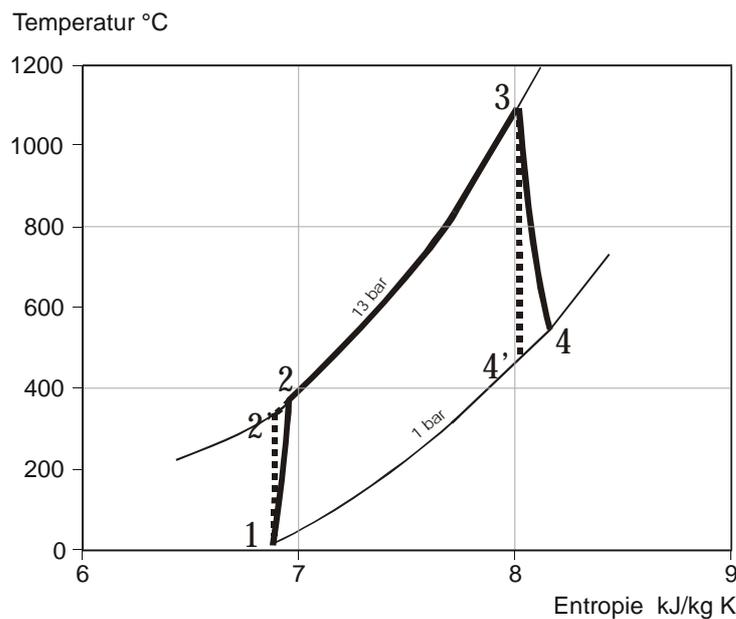


Abbildung 5: Gasturbinenprozess, dargestellt im T-s Diagramm

## 2.2 Geothermische Kraftwerke mit direkter Nutzung des Fluides

Bei hydrothermalen Heiß- und Trockendampfvorkommen mit Temperaturen über 150°C bietet sich die direkte Nutzung des Wasserdampfes zur Stromerzeugung an. Die ersten Anlagen dieser Art gingen bereits zu Beginn des vorigen Jahrhunderts in Italien in Betrieb. Erfahrungen im kommerziellen Betrieb bestehen weltweit seit rund 40 Jahren.

Neben den vorhandenen oberen und unteren Prozesstemperaturen, die sich von Reservoirtemperatur und Kühlwassertemperatur ableiten, wird die Effizienz der Anlage maßgeblich von dem Gehalt des Fluides an nicht kondensierbaren Gasen bestimmt. Je weiter das Fluid entspannt, d.h. je niedriger Druck und Temperatur nach der Turbine liegen, desto höher ist die an die Turbine abgegebene Leistung. Austrittsdruck und –temperatur nach der Turbine werden von dem im Kondensator herrschenden Zustand bestimmt. Während die verfügbare Kühlwassertemperatur und –menge die Kondensatortemperatur nach unten limitiert, bestimmt der Anteil der nicht kondensierbaren Gase den mit angemessenem Aufwand erreichbaren Kondensatordruck. Je größer der Anteil der nicht kondensierbaren Gase ist, desto mehr Aufwand muss betrieben werden, um sie aus dem Kondensator zu entfernen und den gewünschten niedrigen Druck einzustellen. Zur Zeit werden verschiedene Systeme zum Abtrennen der Gase eingesetzt:

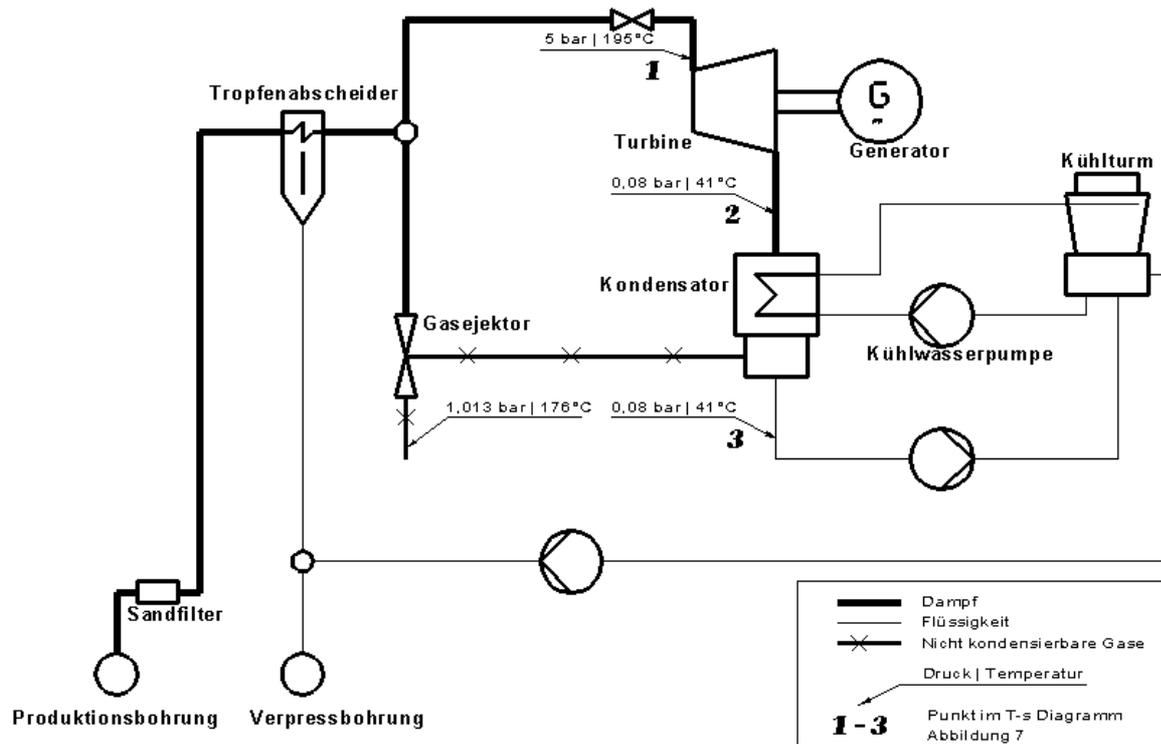
- Strahl Ejektoren nach dem Prinzip der Wasserstrahlpumpe, z.B. Gas Ejektoren, deren Einsatzbereich bis zu einem Gasgehalt von 3% geht.
- Rotor-dynamische, z.B. Ventilatoren und Turbo-Kompressoren, die bei hohen Anteilen und Volumenströmen von nicht kondensierbaren Gasen verwendet werden (Anteil > 3%).
- Flüssigkeitsring Vakuum Pumpen, die als zweite Kompressionsstufe nach einem Strahl Ejektor dienen.

Sollte der Gehalt an nicht kondensierbaren Gasen so hoch sein, dass die zusätzlichen Aufwendungen die erzielbaren Gewinne übersteigen, wird eine Gegendruckturbine eingesetzt. In Gegendruckturbinen wird der Dampf nur auf Umgebungsdruck entspannt, eine Kondensation findet nicht statt.

Die eingesetzten Turbinen müssen gegen die teilweise aggressiven Medien (z.B. Schwefelwasserstoff) geschützt werden. Dies geschieht durch Auswahl korrosionsfester Materialien wie Edelstahl, oder durch das Aufbringen geeigneter Schutzschichten auf den Oberflächen. Die Probleme der Kalzitausfällung und Silikatablagerungen sind jeweils stark abhängig vom Wasserchemismus und individuell in geeigneter Weise zu lösen.

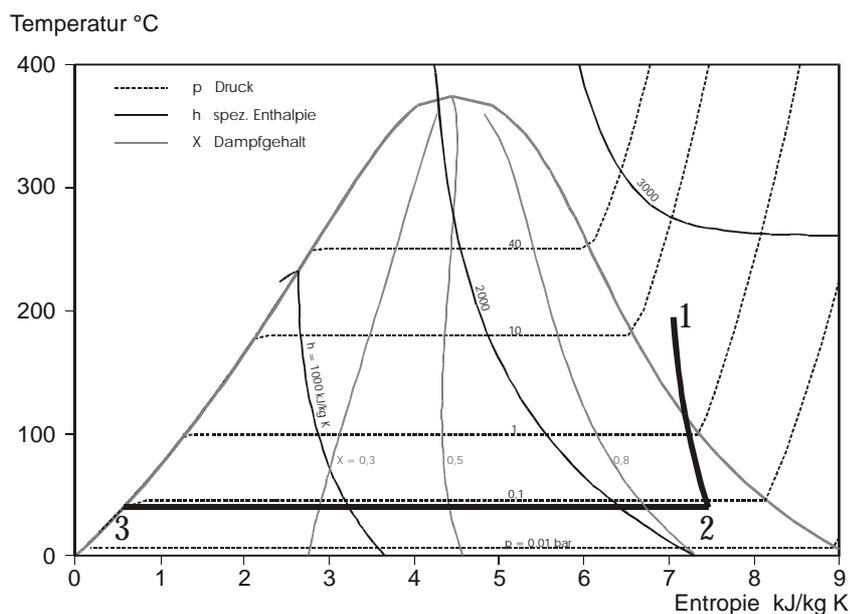
### Direkte Nutzung des Dampfes

Steht Dampf bei ausreichender Temperatur und Druck in genügender Menge zur Verfügung, kann er direkt in einer Turbine entspannt werden. Abbildung 6 zeigt das Schema einer Kondensationsturbinenanlage. Die Prozessparameter beschreiben den Auslegungspunkt einer typischen Anlage in Larderello, Italien (BETTAGLI & BIDINI, 1996).



**Abbildung 6:** Direkte Nutzung des Dampfes in einer Kondensationsturbine, Prozessparameter nach BETTAGLI & BIDINI (1996)

Nach Abtrennung der mitgeförderten Feststoffe und der Wassertropfen gelangt der Dampf direkt in den Turbosatz (1). Er wird in der Turbine bis weit unter den Umgebungsdruck entspannt (2). Ein Ejektor fördert die nicht kondensierbaren Gase aus dem Kondensator. Es liegt kein geschlossener Kreislauf vor. Das kondensierte Wasser (3) kann im Kühlturm und im Kühlkreislauf eingesetzt werden. Verpressung des restlichen Wassers ist möglich und zur Erhaltung des Drucks im Reservoir auch zu empfehlen, aber nicht zwingend erforderlich.



**Abbildung 7:** Direkte Nutzung überhitzten Dampfes im T-s Diagramm

Die direkte Nutzung des überhitzten Dampfes lässt sich im T-s Diagramm durch die beiden Zustandsänderungen der Entspannung (1-2) mit anschließender isothermer Kondensation (2-3) beschreiben. Der vor der Turbine zum Gasejektor abgeleitete Teilstrom ist in Abbildung 7 nicht berücksichtigt.

### Single Flash Systeme

Bei Vorkommen, die nicht genügend Wasserdampf liefern, kann ein sogenanntes Flash System eingesetzt werden (Abbildung 8). Das Fluid (1) wird in einem Entspannungstank teilentspannt (2). Dadurch verdampft ein Teil des Wassers. Flüssige (6) und dampfförmige Phase (3) werden im Entspannungstank getrennt und die Flüssigkeit direkt zur Verpressbohrung geleitet. Ein Schwimmerventil zwischen Entspannungstank und Tropfenabscheider verhindert, dass Flüssigkeit in den Turbinenteil gelangt. Der übrige Teil der Anlage mit Turbosatz und Kondensator entspricht der direkten Nutzung wie in Abbildung 6 dargestellt.

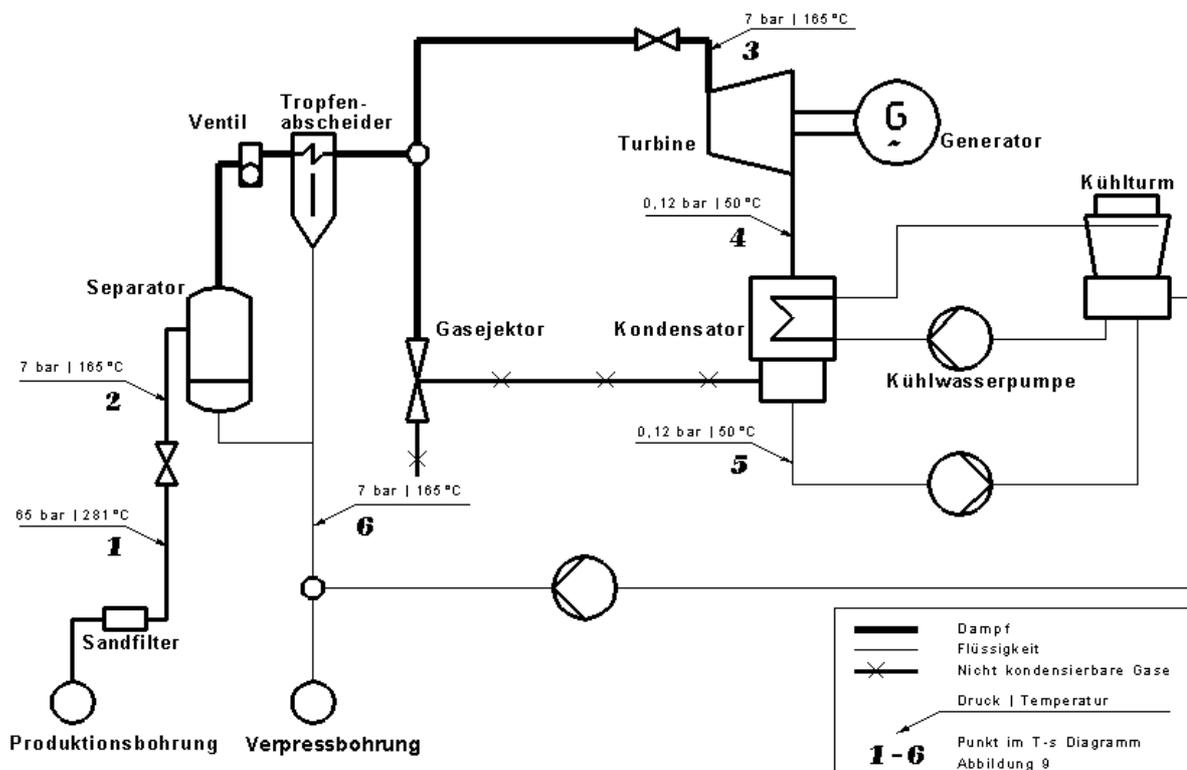
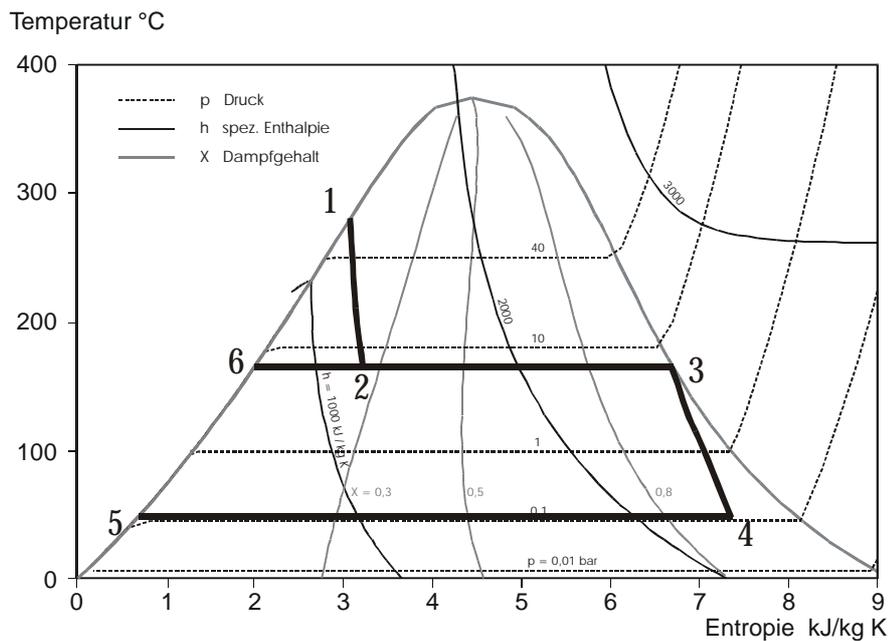


Abbildung 8: Single Flash System, Prozessparameter nach HUDSON (1995)

Im T-s Diagramm gleichen die Schritte der Entspannung in der Turbine (3-4) und der anschließenden Kondensation (4-5) der zuvor gezeigten direkten Nutzung des überhitzten Dampfes. Dem vorgeschaltet ist eine isenthalpe Entspannung in einer Drossel (1-2), nach der das Fluid in dampfförmige und flüssige Phase in Zustand 3 bzw. 6 getrennt wird (Abbildung 9).



**Abbildung 9:** Single Flash System nach HUDSON (1995)

Ein Vergleich bestehender Anlagen zeigt, dass der Verbrauch von geothermischen Fluid je erzeugter kWh in einer Flash Anlage ca. viermal so hoch wie bei Systemen zur direkten Nutzung liegt. Eine Begründung ist leicht aus den T-s Diagrammen abzulesen:

- Die spezifische Enthalpie des überhitzten Dampfes ist um ein Vielfaches höher als die des flüssigkeitsdominierten Vorkommens.
- Zudem wird im Flash Prozess die Enthalpie des Teilstrom 6 energetisch nicht genutzt.

### Double Flash Systeme

Bei den sogenannten Double Flash Anlagen verbessert eine zweite Entspannungsstufe den Wirkungsgrad des Prozesses. Dafür wird der in Abbildung 8 gezeigte Prozess um eine zweite Drossel mit anschließendem Separator erweitert. Der zuvor ungenutzte Teilstrom 6 wird weiter gedrosselt (isenthalpe Entspannung 6-7) und wiederum in dampfförmige und flüssige Phase getrennt (Teilströme 8 und 9). Der Dampf aus dieser Stufe wird in den Niederdruckteil der Turbine geleitet.

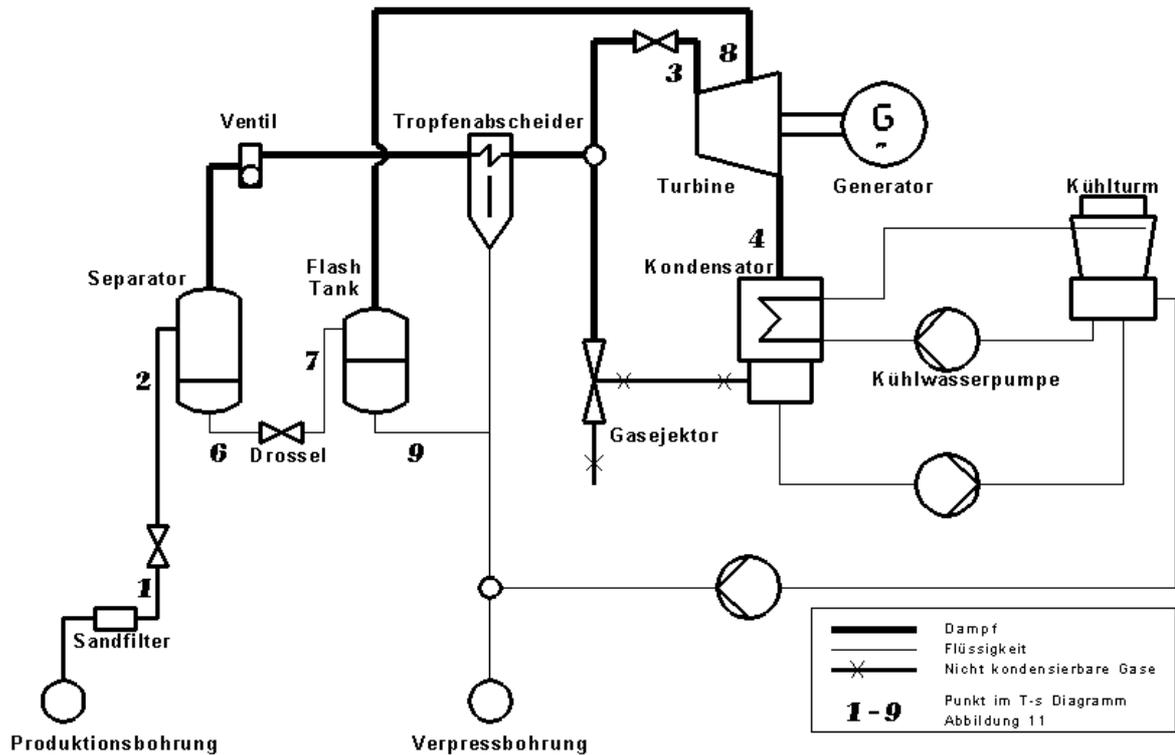


Abbildung 10: Double Flash System (Schema)

Ein typisches Beispiel für eine Double Flash Anlage ist die französische Anlage in La Bouillante auf Guadeloupe (LUND & BOYD, 1999), die 1986 ans Netz ging. Nähere Angaben zu Prozessparametern von Double Flash Anlagen liegen nicht vor. Die in Abbildung 11 gezeigten Daten basieren ebenfalls auf der Darstellung in HUDSON (1995), die um die zweite Entspannungsstufe ergänzt wurde.

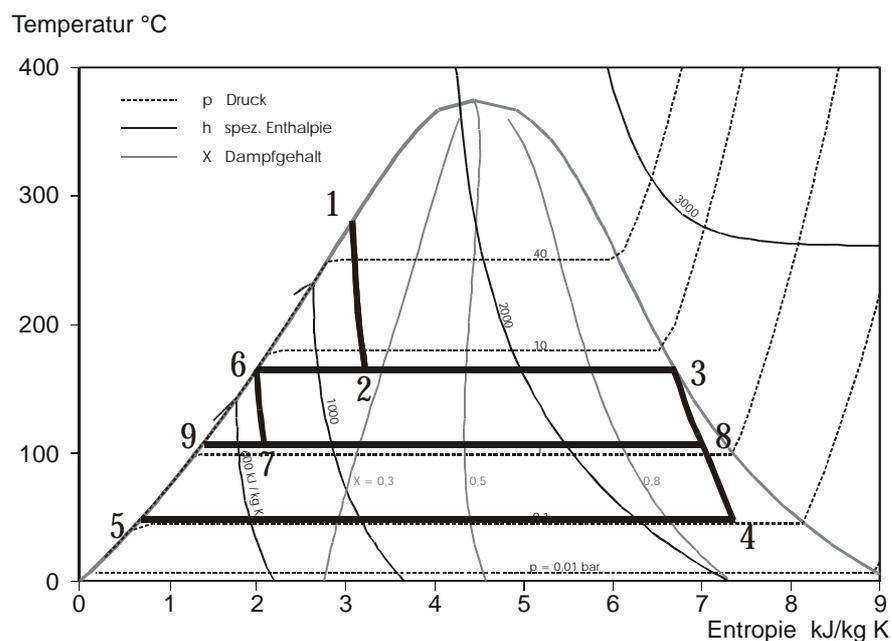


Abbildung 11: Double Flash Prozess im T-s Diagramm

## 2.3 Binäranlagen

Unter Binäranlagen werden Systeme zur Stromerzeugung verstanden, die nicht direkt den Wasserdampf aus dem Reservoir zum Antreiben der Turbine nutzen, sondern ein Sekundärfluid. Die Wärme aus der Erde wird über einen oder mehrere Wärmeübertrager an dieses Fluid übertragen. Als Arbeitsmittel werden bei geringen Temperaturen siedende Stoffe oder Gemische eingesetzt, die je nach der vorhandenen Temperatur ausgewählt werden.

Solche Systeme kommen dann zum Einsatz, wenn

- durch das Geothermievorkommen keine ausreichende Temperatur und/oder ausreichender Druck zur Verfügung steht, um aus dem Fluid Dampf zu erzeugen,
- das Thermalfluid so hohe Mengen an nicht kondensierbaren Gasen enthält, dass Auslegung und Betrieb der Turbine komplexe technische Lösungen erfordern, die aufwendiger als die Nutzung eines Sekundärfluides sind,
- das Thermalfluid sehr aggressiv ist, d.h. starke Mineralisation oder hoher Gehalt an Schwefelwasserstoff vorliegen,
- nach einer Gegendruckturbine, die zunächst direkt den Dampf nutzt, noch ein ausreichend hohes Enthalpiegefälle vorhanden ist.

Zur Zeit stehen mit dem klassischen Rankine Prozess mit organischen Arbeitsmittel und dem Kalina Kreislauf zwei Prozesse zur Verfügung, die thermodynamisch sinnvoll ab Reservoirtemperaturen von 80°C eingesetzt werden können.

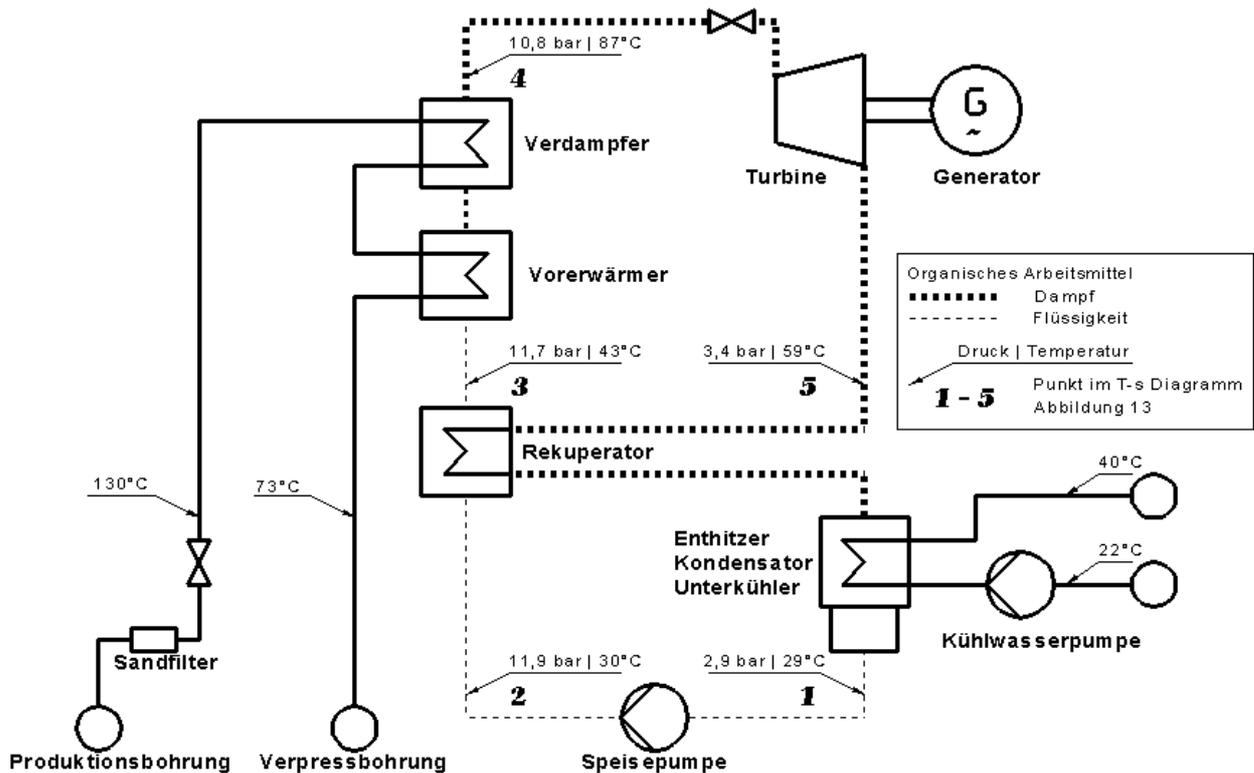
### **Rankine-Prozess mit organischem Arbeitsmittel (Organic Rankine Cycle, ORC)**

Der Rankine-Kreislauf mit organischem Arbeitsmittel gleicht – gesehen die einzelnen Komponenten – dem klassischen Rankine-Kreislauf. Das Arbeitsmedium wird vorerwärmt, verdampft, überhitzt und dann in der Turbine entspannt. Anschließend kondensiert es und die Speisepumpe erhöht wieder den Druck. Der wesentliche Unterschied liegt in den Prozessparametern Druck und Temperatur. Beide liegen weit unter den Werten, wie sie in Dampfkraftwerken herrschen.

Die Bedingungen für die verwendeten Arbeitsstoffe sind durch die Temperatur der zur Verfügung stehenden Wärmequelle bestimmt. Das Arbeitsmittel soll bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen verdampfen, ungiftig sein und keine klimaschädigende Wirkung haben. Zur Zeit werden unter anderem kurzkettige Kohlenwasserstoffe (z.B. Pentan) und azeotrope Gemische (Ammoniak/Wasser in entsprechender Zusammensetzung) eingesetzt. Das Arbeitsmittel kann so gewählt werden, dass seine thermodynamischen Eigenschaften optimal zur vorhandenen Wärmequelle passen. Durch die Verwendung organischer Arbeitsmittel treten verschiedene technische Fragestellungen auf:

- Turbinen sind meist Sonderturbinen, da sich das Arbeitsmittel stark von Wasser unterscheidet (Molekulargewicht, geringere spezifische Wärmekapazität),
- die Arbeitsmittel sind oftmals aggressiv, so dass die Oberflächen der Turbinen und der Wärmeübertrager beschichtet oder anders gegen Korrosion geschützt werden müssen,
- die Dichtung der Kreisläufe ist aufwendiger als bei Wasser, in manchen Fällen nur schwer realisierbar.

Das Schaltbild der ORC-Anlage in Abbildung 12 bezieht sich auf eine 1981 projektierte Anlage, deren Arbeitsmittel das inzwischen nicht mehr zugelassene R114 sein sollte. Da der prinzipielle Aufbau einer ORC-Anlage unabhängig vom jeweiligen Arbeitsmittel ist, gilt das Schaltbild auch für neuere Projekte. Dem Vorerwärmer und Verdampfer ist ein Rekuperator vorgeschaltet, in dem ein Teil der in dem entspannten Fluid enthaltenen Wärme zurückgewonnen wird.

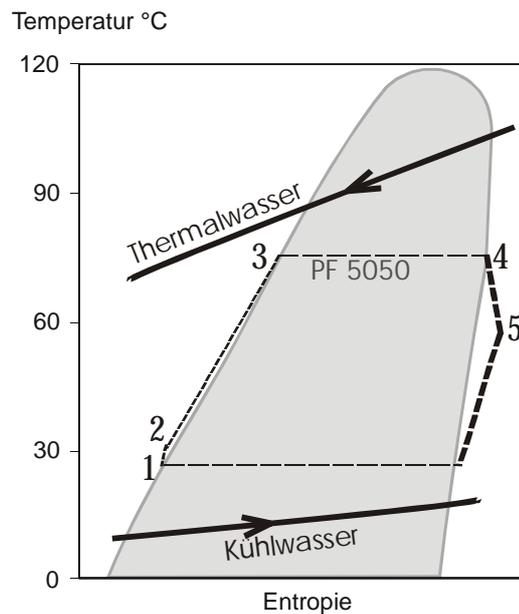


**Abbildung 12:** Schematisches Schaltbild einer ORC-Anlage nach HAMMER & RÖMHELD (1981)

Das Nassdampfgebiet organischer Arbeitsmittel weist im T-s Diagramm eine andere Form als das von Wasser auf. Abbildung 13 zeigt das vereinfachte T-s Diagramm einer ORC-Anlage, die zur Zeit gerade in Altheim, Österreich, aufgebaut wird (TURBODEN, 2000). Der Aufbau entspricht im Wesentlichen dem Schema in Abbildung 12. Als Heizmedium dient Thermalwasser, das mit  $106^{\circ}\text{C}$  aus einer Tiefe von rund 2300 m gefördert wird. Arbeitsmittel ist ein Fluorkohlenstoff ( $\text{C}_5\text{F}_{12}$ , PF 5050). Nach der Druckerhöhung durch die Speisepumpe (1-2) durchläuft das Arbeitsmittel Vorerwärmer (2-3) – in diesem Fall ein Plattenwärmeübertrager – und Verdampfer (3-4). Der Dampf entspannt in der Turbine (4-5). Im Unterschied zu Wasser verläuft die Entspannung nicht über die Taulinie, sondern bleibt stets außerhalb des Nassdampfgebietes. Das entspannte Fluid ist also immer noch überhitzt und diese Wärme muss zunächst entlang der Isobaren abgeführt werden, bevor das Arbeitsmittel kondensiert (5-1).

Die Inbetriebnahme der Anlage ist für Oktober 2000 vorgesehen. Alle gezeigten Prozessparameter gelten für den Auslegungspunkt, Angaben zu den in der Anlage herrschenden

Drücken sind bisher nicht verfügbar. Die im Betrieb tatsächlich auftretenden Zustände können im Anschluss an eine ausreichend lange Betriebsdauer benannt werden.



**Abbildung 13:** ORC, Auslegungsdaten der Anlage in Altheim, Österreich nach TURBODEN (2000), dargestellt im T-s Diagramm

ORC Anlagen mit typisch 0,5 bis 1,5 MW Leistung werden weltweit seit über 15 Jahren sicher und zuverlässig betrieben.

### Kalina-Kreislauf

Beim Kalina-Kreislauf wird genauso wie bei den ORC-Prozessen das warme Fluid nicht direkt genutzt, sondern gibt die Wärme in einem Wärmeübertrager an ein Arbeitsmedium ab. Als Arbeitsmedien werden Zweistoffgemische, z.B. Ammoniak-Wasser, verwendet.

Abbildung 14 zeigt einen einfachen Kalina-Kreislauf mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser, wobei das Wasser als Lösungsmittel dient. Die Erdwärme wird im Verdampfer auf die in der Hochtemperatur Wärmerückgewinnung (High Temperature HT Rekuperator) vorerwärmte Grundlösung übertragen. In einem Austreiber werden ammoniakreicher Dampf und ammoniakarme Lösung getrennt. Die ammoniakarme Lösung geht direkt in den HT Rekuperator und wärmt dort die Grundlösung vor. Der Dampf entspannt in der Turbine und treibt dabei den Generator an. Anschließend werden beide Stoffströme wieder zusammengeführt und ein Teil der Wärme wird direkt im Niedertemperatur Rekuperator (Low Temperature LT) zurückgewonnen. Die vollständige Kondensation, d.h. Lösung des Ammoniaks im Wasser, erfolgt unter Wärmeabfuhr im Absorber/Kondensator. Am Kondensatoraustritt liegt wieder die Grundlösung vor, die von der Speisepumpe auf das höhere Druckniveau gebracht und im LT Rekuperator erwärmt wird.

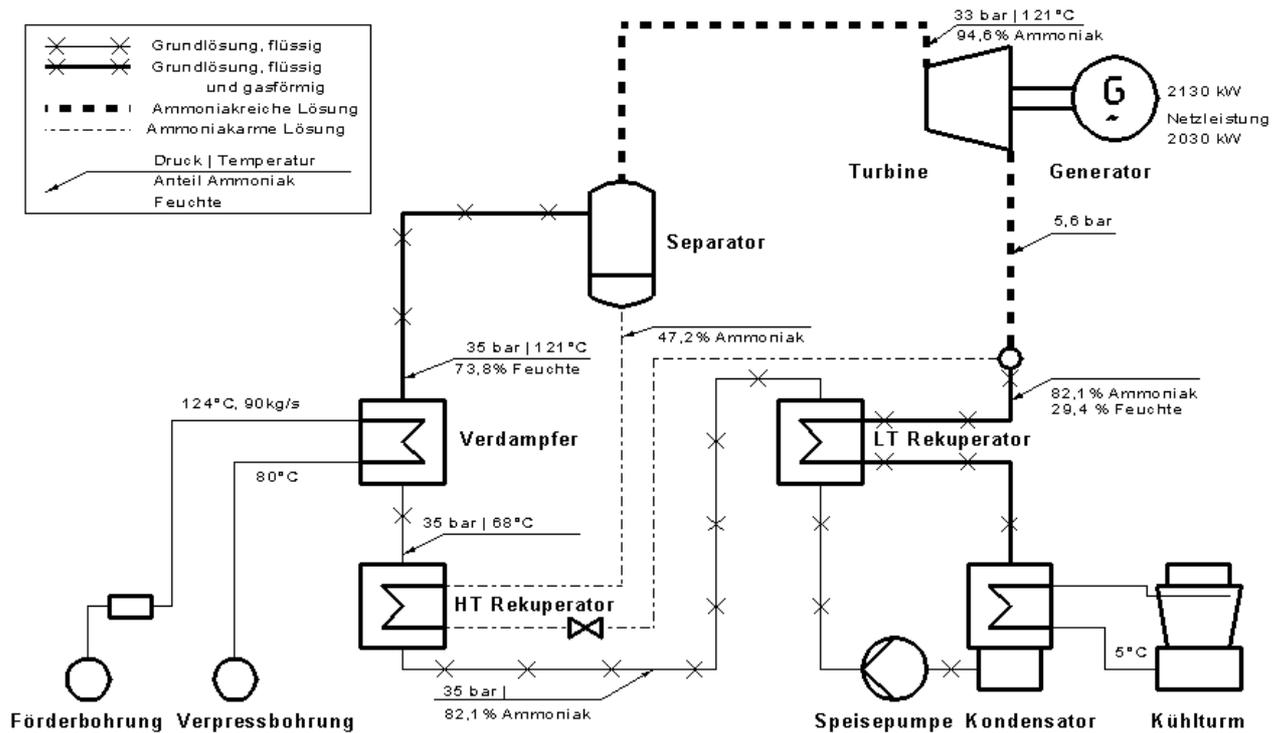
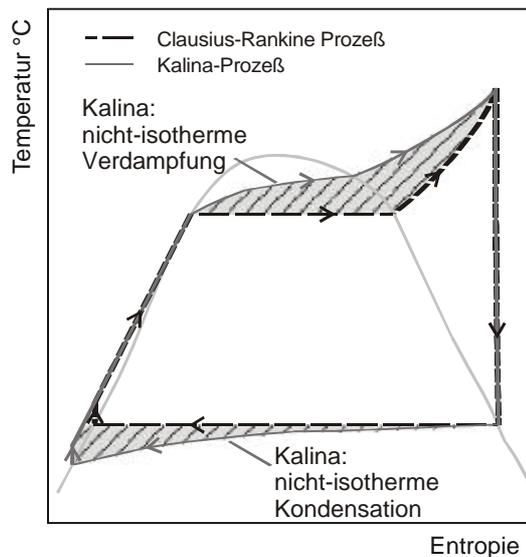


Abbildung 14: Kalina-Kreislauf KCS 34 nach LEIBOWITZ & MICAK (1999)

In Abbildung 15 sind beide Prozesse, Rankine-Kreislauf und Kalina-Kreislauf, in einem schematischen T-s Diagramm dargestellt. Der besondere Vorteil des Kalina-Prozesses liegt in den günstigeren Wärmeübertragungsverhältnissen bei Verdampfung und Kondensation (GAJEWSKI ET AL., 1989). Beide Zustandsänderungen erfolgen im Gegensatz zum Rankine-Prozess nicht isotherm. Vielmehr wird jeweils die Eigenschaft der Gemische genutzt, durch Konzentrationsänderungen Temperaturänderungen zu bewirken. Dies geschieht durch Änderung der Konzentration der Einzelphasen von Wasser und Ammoniak bei konstanter Gesamtkonzentration und konstantem Druck. Dabei verdampft das Gemisch unter stetig ansteigenden Temperaturen bzw. kondensiert unter stetig sinkenden Temperaturen. Im Wesentlichen führen zwei Effekte zur Verbesserung des Prozesses gegenüber dem Rankine-Kreislauf:

- Durch die nicht isotherme Verdampfung bzw. Kondensation werden die Temperaturdifferenzen in den Wärmeübertragen und damit die Verluste bei der Wärmeübertragung geringer.
- Die mittlere Temperatur der Wärmeübertragung (obere Prozesstemperatur) wird angehoben und die mittlere Temperatur der Kondensation (untere Prozesstemperatur) abgesenkt. Beides bewirkt eine Verbesserung des Carnot-Wirkungsgrades, also des bestmöglich zu erzielenden Prozesswirkungsgrades.



**Abbildung 15:** Vergleich von Rankine- und Kalina-Kreislauf im T-s Diagramm nach GAJEWSKI ET AL. (1989)

Der thermodynamische Vorteil kleiner Temperaturdifferenzen bei der Wärmeübertragung wird jedoch mit großen Heizflächen der Wärmeübertrager erkauft, die zusätzlich noch durch schlechteren Wärmeübergang infolge von Diffusions- und Absorptionsvorgängen belastet werden. Die größten technischen Schwierigkeiten wurden bisher in der Zersetzung des Ammoniaks und den damit erforderlichen erheblichen Aufwendungen zum Ausschleusen der Zersetzungsprodukte gesehen (GAJEWSKI ET AL., 1989).

1999 gingen in USA drei Anlagen mit einer Leistung zwischen 3,5 – 6 MW ans Netz, die nach dem Kalina Prinzip aus Abwärme elektrische Energie erzeugen. Für 2000 ist die Inbetriebnahme von zwei weiteren Anlagen, in denen Geothermie als Wärmequelle dient, geplant. Eine dieser beiden Anlagen entsteht zur Zeit in Husavik, Island, die andere ist an das Feld Steamboat Springs in Nevada, USA, angeschlossen. Die in Abbildung 14 enthaltenen Angaben zu Prozessparametern sind LEIBOWITZ & MICK (1999) entnommen und beziehen sich auf die Anlage in Husavik. Das Bauvorhaben profitiert unter anderem davon, dass sich Ammoniakdampf in der spezifischen Wärmekapazität und dem Molekulargewicht kaum von Wasser unterscheidet und so eine konventionelle Wasserdampfturbine eingesetzt werden kann.

### 3 Fazit

Neben Reservoirtemperatur, Dampfgehalt und Druck legen der Gehalt an nicht kondensierbaren Gasen, die Mineralisation und nicht zuletzt die Ergiebigkeit eines Geothermievorkommens fest, welche Arten von Kraftwerken zur Stromerzeugung im jeweiligen Fall in Frage kommen.

Anlagen zur direkten Nutzung des Fluides werden ab Reservoirtemperaturen von 150°C eingesetzt. Alle diese Prozesse, sei es mit oder ohne vorhergehenden Flashprozess, profitieren von möglichst geringen Anteilen an nicht kondensierbaren Gasen und geringer Mineralisation. Die direkte Nutzung des Fluides kann zu Ablagerungen in der Turbine führen, die erhebliche Leistungsverringerung und im schlimmsten Fall den Totalausfall der Anlage bewirken.

ORC Anlagen zur Erzeugung von Strom aus Geothermie werden derzeit ab Reservoirtemperaturen von 80°C verwendet, höhere Temperaturen sind möglich und verbessern den Wirkungsgrad erheblich. Durch Wahl eines geeigneten Arbeitsmittels kann das jeweilige Temperaturniveau bestmöglich genutzt werden. Da sich die für Geothermieanlagen typischen verfahrenstechnischen Fragestellungen auf den Thermalwasserkreis beschränken, werden ORC Anlagen auch gerne bei Hochenthalpielagerstätten eingesetzt, die hohe Mineralisationen oder hohe Anteile an nicht kondensierbaren Gasen aufweisen. Dabei nutzen sie entweder das gesamte Enthalpiegefälle oder arbeiten als zweite Stufe hinter einer Gegendruckturbine.

Anlagen nach dem Prinzip des Kalina-Kreislaufes decken den gleichen Bereich wie ORC Anlagen ab. Während Anlagen zur direkten Nutzung des Fluides und Binäranlagen seit mehreren Jahrzehnten sicher und zuverlässig in Betrieb sind, befindet sich die Technik des Kalina-Kreislaufes zur Zeit noch im Stadium der Pilotanlagen.

Geothermische Heizzentralen und geothermische Kraftwerke nutzen die gleiche Primärenergie, unterscheiden sich aber sowohl in den Produkten als auch in der technischen Ausführung, der Betriebsführung und den betriebswirtschaftlichen Eckdaten. Während die Heizzentralen deutlich auf einen Nutzer mit dem zugehörigen Verbrauchsverhalten zugeschnitten sind, sind die geothermischen Kraftwerke weitgehend verbraucherunabhängig. Zudem sichert das EEG den Stromabsatz und ermöglicht nicht zuletzt dadurch einen saisonunabhängigen Betrieb mit hohen Vollaststundenzahlen. Theoretische thermodynamische Betrachtungen zeigen, dass die beiden Systeme als nahezu gleichwertig anzusehen sind, wobei die Heizzentralen einen kleinen Vorsprung erreichen. Dieser Vorsprung kann allerdings nur dann zur Geltung kommen, wenn auch tatsächlich Wärme das gewünschte Produkt ist.

Letztendlich bestimmen drei Kriterien die Entscheidung:

- Geologische Gegebenheiten, d.h. Enthalpiegehalt und mögliche Förderrate des Thermalwassers legen fest, welche Produkte erzeugt werden können.
- Aufgabenstellung, d.h. die Nachfrage entscheidet darüber, welche Produkte an dem betreffenden Ort absetzbar sind.
- Wirtschaftlichkeit, d.h. Gestehungskosten und Marktgegebenheiten vor Ort bestimmen die Rentabilität der Investition.

Die technische Machbarkeit beider Nutzungsprinzipien wird an vielen Orten der Welt demonstriert. In Deutschland allerdings differiert der Entwicklungsstand der beiden Systeme stark: Geothermische Heizzentralen werden seit mehreren Jahren erfolgreich betrieben, wäh-

rend die Technik der geothermischen Kraftwerke noch in den Kinderschuhen steckt. Diese Technologie muss weiter entwickelt werden, damit sie im konkreten Fall zu Verfügung steht.

#### 4 Literatur

BAEHR, H.D. (1989): Thermodynamik. Springer-Verlag, Berlin

BETTAGLI, N. & BIDINI, G. (1996): Larderello-Farinello-Valle Secolo Geothermal Area: Exergy Analysis of the Transportation Network and of the Electric Power Plants. *Geothermics*, **25**, 1: 3-16

DIPIPPO, R. (1999): Small Geothermal Power Plants: Design, Performance and Economics. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, **20**: 1-8

FRICKE, J. & BORST, W.L. (1984): Energie - Ein Lehrbuch der physikalischen Grundlagen. R. Oldenbourg Verlag, München; Wien ; Oldenbourg

GAJEWSKI, W., LEZUO, A., NÜRNBERG, R., RUKES, B. & VESPER, H. (1989): Der Kalina-Prozess. *VGB Kraftwerkstechnik*, **96**, 5: 477-483

HAMMER, H. & RÖMHELD, M. (1981): Abwärmenutzung zur Krafterzeugung mittels neuer Kreislaufmedien. In: VDI (Hrsg.), VDI-Bericht Nr. **415**: 81 - 87

HUDSON, R.B. (1995): Electricity Generation. In: M.H. Dickinson und M. Fanelli (Hrsg.), *Geothermal Energy*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester

LEIBOWITZ, H.M. & MICAÏ, H.A. (1999): Design of a 2 MW Kalina Cycle Binary Module for Installation in Husavik, Iceland. In: G.R. Council (Hrsg.), *Geothermal Resources Council 1999 Annual Meeting*. Geothermal Resources Council, Reno, Nevada USA: 75-80

LUND, J.W. & BOYD, T. (1999): Small Geothermal Power Project Examples. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, **20**: 9-26

SCHALLENBERG, K., ERBAS, K., HUENGES, E. & MENZEL, H. (1999): Geothermisches Heizwerk Neustadt-Glewe: Zustands- und Stoffparameter, Prozessmodellierungen, Betriebserfahrungen und Emissionsbilanzen. STR99/04, GeoForschungsZentrum Potsdam, Potsdam, 1999

TURBODEN (2000): Geothermische Anlage Altheim. AGAA0500, Turboden S.r.l., Brescia, Italien

WOUDSTRA, N. & VERSCHOOR, M.J.E. (1998). Cycle-Tempo 4.0 (a) TU Delft. TNO, Apeldoorn.

# **Tiefe Altbohrungen als Beitrag zur Nutzbarmachung klüftig – poröser Speichergesteine (geologische Grundlagen): Groß Schönebeck**

*Wilfried Rockel und Suzanne Hurter, GeoForschungsZentrum Potsdam*

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>31</b>
<b>2</b>	<b>Auswahl einer Altbohrung für ein Pilotprojekt.....</b>	<b>33</b>
<b>3</b>	<b>Geologische Vorstellung des Standorts Groß Schönebeck 3/90 .....</b>	<b>37</b>
3.1	Regionale Aspekte und Strukturbau .....	37
3.2	Hauptspannungen .....	38
3.3	Das Rotliegend in Groß Schönebeck.....	40
	Datenlage: Kerne, Laboruntersuchungen, Bohrlochmessungen und Gestängetest.....	40
	Teufenlage und Temperatur.....	41
	Lithologien .....	41
	Formationsfluide.....	44
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>46</b>

## Abstract

In spite of high temperatures ( $> 100\text{ °C}$ ) some hydrothermal reservoirs cannot be exploited because low permeability prevents sufficient production rates for certain geothermal applications to be attained. Hydraulic stimulation of such aquifers holds promise to increase geothermal energy supply for heat and electrical power plants. An appropriate location for a down-hole laboratory was sought to investigate this possibility with a case study. A survey of potential aquifers of low permeability in Germany formed the basis for selecting the Rotliegend of the North German Basin as the formation of interest for this project. The existence of low-permeability rocks at temperatures above  $120\text{ °C}$ , large regional extent and variety of lithologies to be investigated were criteria used in this survey. Geological and technical drilling information on more than 100 former oil and gas exploration wells in northeastern Germany were scrutinized to select a candidate well to be re-opened. As a result, the drillhole Groß Schönebeck 3/90 to the northeast of Berlin was selected for an In-Situ Laboratory and an application for re-opening and deepening of the well was submitted to the pertinent authorities. This gas-exploration borehole cuts 4240 m of Quaternary to Permian sediments bottoming in extrusive (Autunian) andesites. The top of the formation of the Rotliegend that underlies directly the Zechstein Formation is at 3880 m depth, where a temperature of  $140\text{ °C}$  was measured during a drill-stem test. The well is cased to this depth. Here the Rotliegend ( $\sim 360\text{ m}$  thick) can be divided lithologically into 3 major sections from the top down: siltstones (203 m thick), sandstones (209 m thick including 19 m of basal conglomerates) and two thin andesitic flows (9.5 m with volcanic rock expected to extend for another few hundred meters below). Besides standard geophysical logs (caliper, gamma, resistivity) as well as a few special logs (spectral gamma, dipmeter), abundant porosity and permeability measurements on cores are available. An overview of this data is given here.

## 1 Einleitung

Klüftig-poröse Speicher sind Gesteine, deren Eigenschaften – speziell das Förder- und Injektionsverhalten – außer durch den Porenraum zusätzlich durch Klüfte und Risse bestimmt werden. Prinzipiell sind alle denkbaren Kombinationen zwischen reinem Porenspeicher und Kluftspeicher möglich. Während zur Auswertung der Hydrodynamik in Porenspeichern entsprechend dem Darcy-Gesetz Methoden Anwendung finden, die für homogene, poröse Gesteine gelten, sind zur Beschreibung hydrodynamischer Vorgänge in klüftig-porösen Gesteinen Modelle üblich, die vom gleichzeitigen Auftreten statistisch zufällig verteilter Kluft- und Matrixpermeabilitäten ausgehen.

Gesteinsklüftung als Folge tektonischer Beanspruchung ist im Bereich der Mitteleuropäischen Senke weit verbreitet. Sowohl in Obertageaufschlüssen als auch in Tiefbohrprofilen kann sie in allen Strukturstockwerken und Gesteinstypen beobachtet werden. Je nach Intensität der (bruch)tektonischen Einwirkung treten (Groß)klüfte, Mikroklüfte oder Haarrisse auf. Durch Druckentlastung können außerdem Entspannungsklüfte sichtbar werden. Die einzeln oder gehäuft (Kluftzonen) auftretenden Klüfte sind in Abhängigkeit von Alter, regionaltektonischer Stellung und struktureller Situation offen oder teilweise bis vollständig mit Mineralausfällungen verheilt.

Ziel dieses Projekts ist es poröse Gesteine zu finden, deren Wegsamkeit (potentielle Förder- und Injektionsleistungen) durch Kluftsysteme entscheidend geprägt oder zumindest verbessert wird (Abbildung 1). Offene Kluftsysteme von teilweise beträchtlicher Reservoirgröße sind vorrangig an große, bis in die Gegenwart wirksame regionale Bruchsysteme gebunden (z.B. Oberrheingraben). Älter angelegte Klüfte sind häufig verheilt, in einigen Fällen (z.B. Kohlenwasserstoff-Lagerstätten der Lausitzer Lagune) verhinderten Erdgas- oder Erdölfüllungen den Zementationsprozess (ZIEGENHARDT, 1976). Eine besondere Stellung nehmen der Süddeutsche Malm oder vergleichbare verkarstete Kalkgesteine ein, in denen übergroße Poren (Lösungshohlräume) quasi wie Klüfte wirken. Dabei können begleitende dichte Gesteine durch zusätzliche Klüftung in ein teilweise auch die Erdoberfläche erreichendes Gesamtsystem einbezogen sein (STOBER, 1986).

Neben natürlich geklüfteten Speichergesteinen sind auch Gesteinsschichten interessant, die bei Anwendung konventioneller Erschließungsmethoden durch zu geringe Ergiebigkeiten eine wirtschaftliche Nutzung bisher ausschließen. Dies können sowohl Porenspeicher mit geringer Permeabilität oder Mächtigkeit als auch Kluftspeicher mit ungenügender hydrodynamischer Verbindung zum Bohraufschluss sein. In beiden Fällen kann durch geeignete Stimulationsmaßnahmen versucht werden, die erforderlichen Volumenströme über die Schaffung künstlicher Rißsysteme zu erreichen.

Neben den bekannten und als hydrothermale Ressourcen bereits erfassten gut porösen, teilweise hoch permeablen mesozoischen Aquiferen (KATZUNG, 1984; HÄNEL & STAROSTE, 1988; DIENER et al., 1988/92; HURTIG et al., 1992; SCHULZ et al., 1994) wurden durch eine

Vielzahl von Tiefbohrungen fast immer weitere thermalwasserführende Formationen erschlossen, deren Nutzung wegen zu geringer Ergiebigkeiten bisher ausgeschlossen wurde.

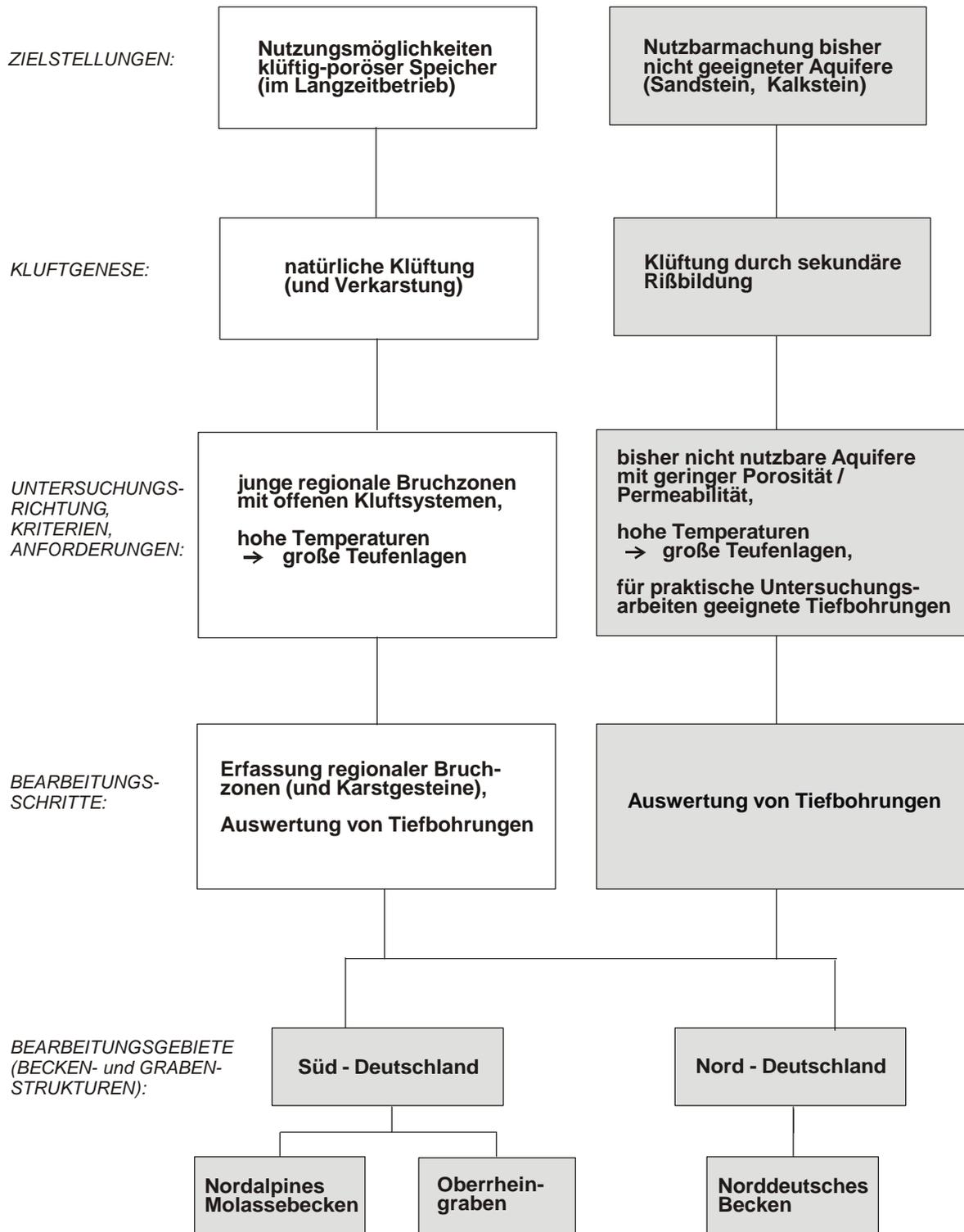


Abbildung 1: Konzept zur geologischen Erkundung klüftig-poröser Speicher in Deutschland

Die ungünstigen Speichereigenschaften ergeben sich sowohl aus der Sedimentanlage als auch durch diagenetische Prozesse im Gestein. Gegenüber den jüngeren mesozoischen Schichten besitzen die Formationen aufgrund der erreichten deutlich tieferen strukturellen Position erheblich bessere Temperaturpotenziale.

Nach dem Erneuerbare-Energien Gesetz vom 25.02.2000 kommt dem Aspekt der erreichbaren Temperatur insofern noch eine verstärkte Bedeutung zu, als mit der Umwandlung von Wärme in Strom am ehesten eine wirtschaftliche Nutzung erreicht werden kann (KÖHLER & SAADAT, dieser Report). Dies setzt bei Temperaturen von mehr als 100 °C allerdings die Realisierbarkeit von Volumenströmen über 50 m<sup>3</sup>/h voraus.

Ein Projektziel ist die Überprüfung der Stimulierbarkeit hydrothermal bisher nicht nutzbarer Gesteinsschichten im Rahmen eines relevanten Fallbeispiels (Formation, Bohrlokation). Bei Übereinstimmung der erforderlichen geologischen Voraussetzungen mit den technologischen Gegebenheiten einer bereits vorhandenen Bohrung könnte der finanzielle und zeitliche Aufwand zum Erreichen grundlegender Untersuchungsergebnisse deutlich gesenkt werden. Gleichzeitig werden die Untersuchungsrisiken minimiert.

Die in Abbildung 2 zusammengefassten Bearbeitungsschritte wurden zur Auswahl einer geeigneten Testlokation sowie zur weiteren Planung des Projektes eingesetzt. Weiter wurden in diesem Aufsatz die geologischen Daten der gewählten Projektlokation zusammengefasst.

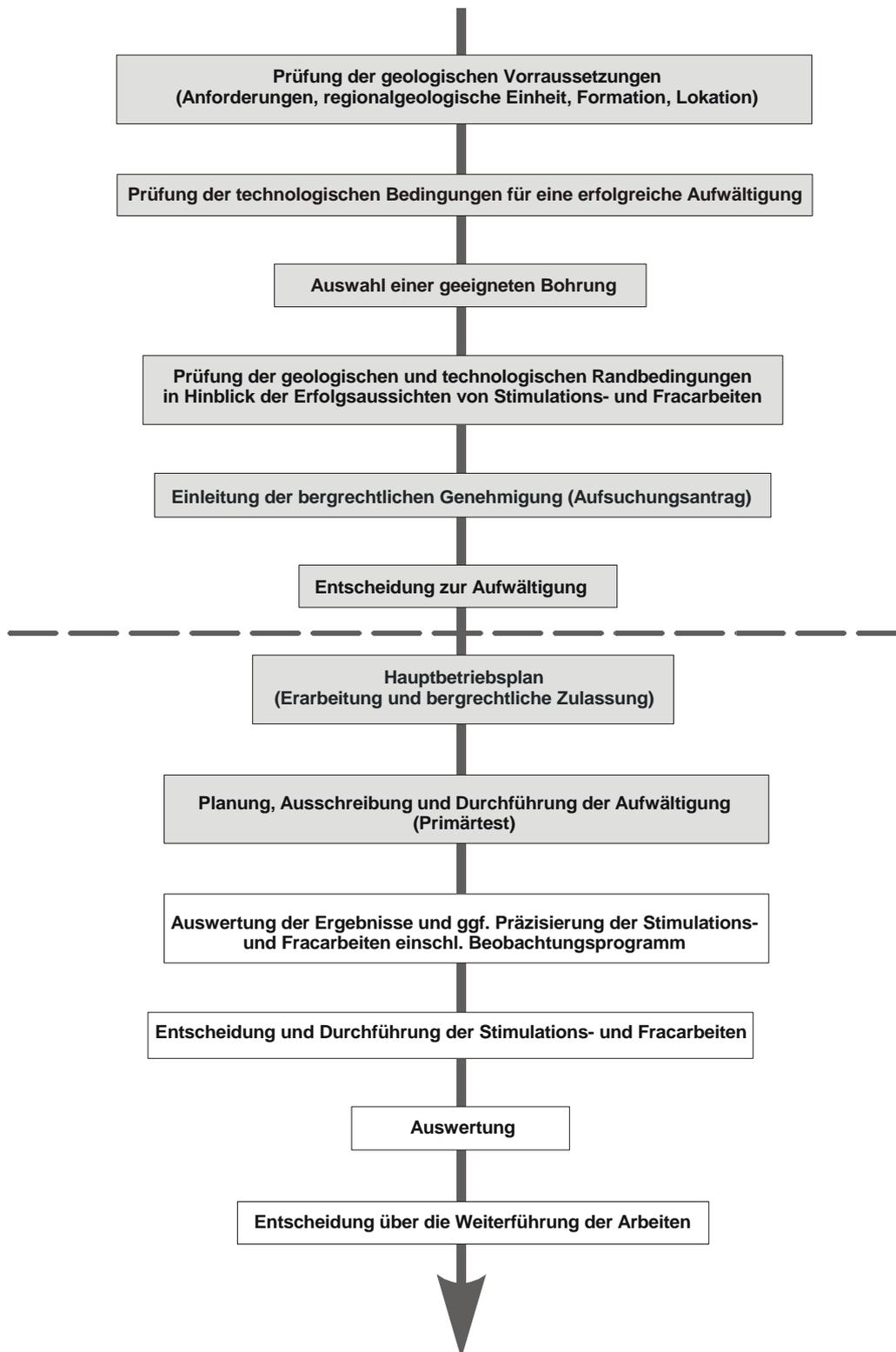
## **2 Auswahl einer Altbohrung für ein Pilotprojekt**

Im folgenden werden geologische Vorarbeiten zur Auswahl einer Testlokation bzw. einer Altbohrung, die sich für die Erforschung und Entwicklung von Technologien zur Nutzbarmachung klüftig-poröser Aquifere eignet, beschrieben. Die Anforderungen für die Untersuchungsformation wurden formuliert, um damit regionale geologische Einheiten zu bewerten. Eine detaillierte Datengrundlage ermöglichte die Auswahl der regionalen Einheit und Formation von Interesse für dieses Vorhaben.

Es werden gering poröse und gering permeable Gesteine gefordert, die

- Temperaturen von mehr als 120 °C aufweisen, bzw. tiefer als 3000 m liegen,
- weitflächig verbreitet sind, um eine Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu begünstigen,
- eine gewisse Vielfalt an lithologischen Einheiten zur Untersuchung bietet,

Aus der Forderung möglichst hoher Schicht- und Thermalwassertemperaturen beschränkt sich das Interesse auf die bekannten regionalen Beckenstrukturen, in denen mehrere bisher nicht nutzbare Aquifere verbreitet sind (Tabelle 1).



**Abbildung 2:** Bearbeitungsablauf des Projekts. Die graue Schattierung zeigt den Fortschritt zwischen Januar und Oktober 2000 an

Norddeutschland:	Norddeutsches Becken	Mittlerer Buntsandstein Rotliegend
Süddeutschland:	Nordalpines Molassebecken	Keuper Permokarbon
	Oberheingraben	Buntsandstein

**Tabelle 1:** Übersicht der geothermisch bisher nicht nutzbaren Aquifere in Deutschland

Besonders das im gesamten Norddeutschen Becken verbreitete und im Rahmen der Erdgassuche intensiv untersuchte *Rotliegend* bietet im Vergleich mit anderen Formationen mehrere Vorteile:

- Das Rotliegend ist im gesamten mitteleuropäischen Permbecken verbreitet und erreicht als stratigraphisch älteste Formation am ehesten große Teufenbereiche.
- Als wichtiger erdgashöffiger Horizont ist es insbesondere in Norddeutschland gut untersucht.
- Mit dem Auftreten von porös-permeablen Sandsteinen, weitgehend dichten Siltsteinen und Vulkaniten sind mehrere Gesteinstypen im Profil vertreten, die unter sehr unterschiedlichen Aspekten für eine Nutzbarmachung von Interesse sind.
- Bergrechtliche Restriktionen sind insbesondere für den Bereich Nordost-Deutschlands weitgehend abgebaut. Die Erdgassuche im Rotliegend ist nahezu abgeschlossen, so dass eine ganze Reihe großflächiger Konzessionsgebiete freigegeben werden konnte (KARNIN et al., 1998).
- Wesentliche Untersuchungsergebnisse und Erkundungsdaten stehen seitens der Explorationsfirma Erdgas Erdöl GmbH (EEG, Berlin) zur Verfügung.
- Von den zahlreichen verfüllten Tiefbohrungen sind ausgewählte Lokationen möglicherweise für technische Untersuchungsarbeiten geeignet.

Unter Ausschluß des weiterhin vergebenen Konzessionsgebietes Erdgaslagerstätte Salzwedel-Peckensen wurden im Gebiet zwischen Berlin und Vorpommern die relevanten Erkundungsdaten von etwa 100 Präzessionsbohrungen ausgewertet. Dabei erwies sich das Rotliegend als regional lithologisch differenziert entwickelte Formation (GAST et al., 1998). Das Hauptaugenmerk richtete sich – auch aufgrund der verfügbaren Porenwassermengen – auf die in ihren Eigenschaften (Mächtigkeit, Korngröße, Diagenese, Petrophysik) stark veränderlichen Sandsteine.

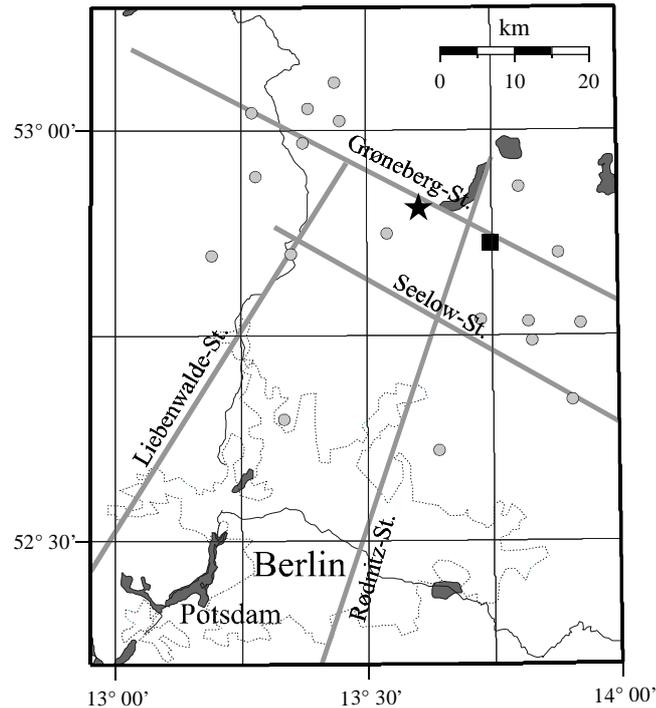
Hinsichtlich der stratigraphischen Einordnung der erbohrten Rotliegendprofile wurde vorerst die in allen Unterlagen der Erdgas-Erdöl GmbH verwendete ostdeutsche Gliederung beibehalten. Ein Übersichtsvergleich mit der neuen, an einem konkreten zeitstratigraphischen Gerüst sich orientierenden Gliederung erfolgt in Tabelle 2.

Neugliederung nach SCHRÖDER et al. (1995)			Gliederung Ostdeutschland
Gruppe	Subgruppe	Formation	Schichten
Rotliegend	Elbe	Hannover	Mellin
			Peckensen
		Dethlingen	Eldena
			Rambow
	Havel	Mirow	Mirow
		Parchim	Parchim
	Müritz		
	Unterrotliegend		

**Tabelle 2:** Stratigraphische Gliederung des Rotliegend im Norddeutschen Becken (vereinfacht)

Bevorzugt in der Dethlingen-Formation der Elbe-Subgruppe (Eldena- und Rambow-Schichten nach der in Ostdeutschland angewendeten Gliederung), untergeordnet auch in der Havel-Gruppe auftretende Sandsteine besitzen im allgemeinen sehr schlechte Speichereigenschaften (Porosität 2-5 %, Permeabilität < 1 mD). Im Bereich der Barnim-Senke (unmittelbar nördlich Berlins) wurden aber auch mehrere etwa 50 m mächtige Sandsteinabschnitte mit erhöhter Porosität und Permeabilität angetroffen. Danach konzentrierten sich die geologischen Detailuntersuchungen auf dieses Gebiet, um eine der verfüllten Tiefbohrungen, die sich zur Durchführung hydraulischer Experimente eignet, zu finden.

Aus der Übereinstimmung der geologischen Bedingungen, der bohrtechnischen Möglichkeiten und der aktuellen Standortsituation wurde die Bohrung *E Groß Schönebeck 3/90* als Lokation für ein In-Situ Tiefenlabor gewählt, in dem Stimulationsexperimente durchgeführt werden sollen. Bergrechtliche Anträge zur Aufwältigung dieser Altbohrung sind bewilligt worden (Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Die Lokation Groß Schönebeck 3/90 wird mit einem Stern markiert und die Bohrung Eberswalde 2/67 mit einem Quadrat. Kreise stellen umgebende Erdöl-Erdgas Bohrungen und graue Linien die nächstgelegenen Störungen (SCHIMANSKI & LINDERT, 1990) dar

### 3 Geologische Vorstellung des Standorts Groß Schönebeck 3/90

#### 3.1 Regionale Aspekte und Strukturbau

In dem sich von Mittel-England bis nach Polen erstreckenden Permbecken liegt das Gebiet der Lokation *E Groß Schönebeck 3/90* innerhalb des ostdeutschen Teilbeckens. Dominierendes Element ist die Havel-Müritz-Senke mit mehr als 2000 m mächtigem Rotliegend (LINDERT et al., 1990). Die regionale Position und die Einflussnahme sowohl älterer herzynischer (WNE – ESE) Wellungen des variskischen Vorlandes als auch N – S orientierte rotliegendzeitliche Grabenbildungen ist von erheblicher Bedeutung für die Profilentwicklung (GAST et al., 1998).

In Ostbrandenburg äußert sich die komplizierte Situation in den teilweise erheblichen Schichtlücken bei der Auflagerung des sedimentären Rotliegend auf permosilesische Vulkanite. Dieser Vulkanismus war im Becken weit verbreitet und wird als Endphase der Varizischen Orogenese um 307 – 277 Ma (Pb/U Alter, BREITKREUZ et al., 1999) gedeutet. Die Vulkanite bestehen aus Rhyoliten, Ignimbriten, basischen und sauren Andesiten sowie, in kleinerem Maße, alkalischen bis tholeitischen Basalten. In fünf eruptiven Phasen konnten bis zu 2000 m Vulkanite deponiert werden (BENEK, et al., 1996). Es sind herzynisch streichende Tröge wie die Barnim-Senke und rheinisch ausgerichtete Grabenstrukturen (z. B. Zehdenick–Gransee)

nachweisbar. Die Bohrlotation E Groß Schönebeck 3/90 (Bundesland Brandenburg, Landkreis Barnim) liegt im zentralen Teil des Norddeutschen Beckens. Abbildung 4 (Seite 49) zeigt das Gesamtprofil der 4240 m tiefen Bohrung. Die Zechsteinbasis ist fast bis auf 4000 m abgesenkt. Im Übergangsstockwerk des Präzechsteins ist die Lokation einer herzynisch streichenden Senkungsstruktur (Barnim-Senke) zuzuordnen, die sich durch mächtige Sedimentfolgen im Rotliegend (E Eberswalde 2/67: 698 m – E Groß Schönebeck 3/90: 349 m) auszeichnet.

Im Tafeldeckgebirge wird der Einfluss des Zechsteinsalinars im Bereich der Salzkissenstruktur Groß Schönebeck deutlich. Der Zechstein wurde in einer Mächtigkeit von 1511,8 m angetroffen. Im Bohrprofil E Groß Schönebeck 3/90 transgrediert Alb über fast vollständigem Lias. Die Mächtigkeiten der Kreide (165 m) und des Känozoikums (168 m) sind im Scheitelbereich der Salinarstruktur stark reduziert.

Im subsalinaren Strukturstockwerk wurden für die Bohrlotation Groß Schönebeck 3/90 und Umgebung durch reflexionsseismische Vermessungen sehr ruhige Lagerungsverhältnisse nachgewiesen. Allerdings reichen die Messprofile nur bis etwa 2000 m nördlich der Bohrung.

Die Rotliegend-Oberfläche fällt mit weniger als 1 Grad nach SW ein. Erst 10 km weiter östlich im Bereich der Bohrung E Eberswalde 2/76 ist ein Schichteinfallen von etwa 2 Grad nach S zu erwarten (PISKE et al., 1992). Im Rotliegend sind in der Umgebung der E Groß Schönebeck 3/90 intraformationelle lithologische Veränderungen von größerer Bedeutung als tektonisch verursachte Schichtverstellungen (KLAUB 1991).

Bruchstörungen sind aus den seismischen Messungen in der Umgebung der E Groß Schönebeck 3/90 nicht erkennbar. Die für den Zeitraum Präperm - Perm postulierte Grüneberg-Störung verläuft unmittelbar nördlich der E Groß Schönebeck 3/90 (SCHIMANSKI & LINDERT, 1990).

### **3.2 Hauptspannungen**

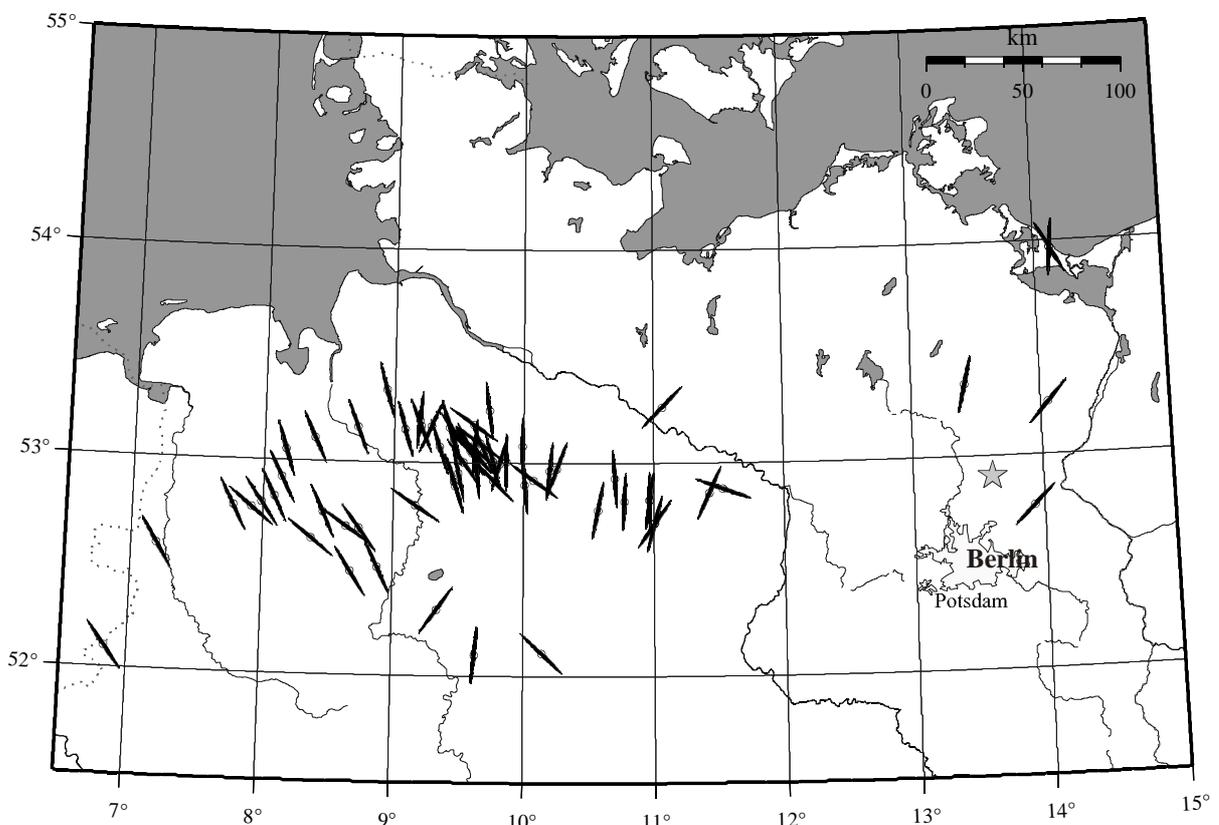
Die Kenntnis der Hauptspannungsrichtungen ist für die Planung von hydraulischen Stimulationsmaßnahmen und die Lokation von Bohrungen für den Aufschluss geothermischer Systeme von großer Bedeutung, da bei hydraulischer Stimulierung die Risse sich bevorzugt in der Richtung der maximalen horizontalen Spannung öffnen. Die Ausbreitung von künstlichen Rissen in Sedimentgesteinen, d.h. die Verteilung der Intensität der Spannung in den verschiedenen Gesteinstypen in einer Bohrung kann in einigen Fällen mit dem Tongehalt als Spannungsträger korreliert werden (PLUMB et al., 1991).

Auf der einen Seite, scheinen Spannungsrichtungen über Entfernungen von einigen hundert bis zu wenigen tausend Kilometern konstant zu sein (ZOBACK & ZOBACK, 1997). Auf der anderen Seite, sind Richtungsänderungen des Spannungsfeldes über geringe Entfernungen beobachtet worden, die wahrscheinlich von lokalen Strukturen wie Störungszonen und Salztektonik (Stöcke und Kissen) beeinflusst sind (ROTH et al., 1998). Im westlichen Norddeutschen Becken dreht sich die Hauptspannung in einer Richtung parallel zu nahegelegenen

(< 2.5 km) Störungszonen (GROTE, 1998). Auch innerhalb einer Bohrung können sich Spannungsrichtungen, die in verschiedenen Tiefen ermittelt wurden, voneinander erheblich abweichen. Dies ist im Norddeutschen Becken in einigen Messungen der Fall. Spannungsrichtungen in Formationen, die über den salinaren Schichten des Zechsteins liegen, scheinen von den Spannungsrichtungen im darunterliegenden Rotliegend und Karbon abgekoppelt zu sein (ROTH et al., 1998). Im Rotliegend und darunterliegenden Oberkarbon hat GROTE (1998) keine lithologie-abhängigen Spannungsrichtungsänderungen festgestellt.

Die maximale horizontale Spannungsrichtung in Westeuropa ist  $N145^\circ \pm 26^\circ$  (MÜLLER et al, 1992), wobei die Daten für Zentral Europa (GRÜNTAL & STROMEYER, 1992) auf eine Veränderung der Spannungsrichtung im Norddeutschen Becken von NE-SW in Westeuropa gegen Osten zu NNE-SSW oder NE-SW hinweisen. In Polen ist die Hauptspannungsrichtung NE-SW.

GROTE (1998) hat Randausbrüche in Gasexplorationsbohrungen im westlichen Teil des Norddeutschen Beckens interpretiert. Im Westen sind die Hauptspannungsrichtungen NW-SE. Gegen Osten dreht die Hauptspannung nach N-S in Übereinstimmung mit dem Spannungsmuster von GRÜNTAL & STROMEYER (1992). Aufgrund der Analyse von Dipmeter-Daten und Ergebnissen hydraulischer Stimulationsmaßnahmen aus Bohrungen, die von Erdöl-Erdgas Gommern abgeteuft wurden, haben ROTH et al. (1998) im östlichen Teil des Beckens eine kontinuierlichen Drehung des Spannungsfeldes nach NE-SW festgestellt (Abbildung 5).



**Abbildung 5:** Maximale horizontale Spannungsrichtungen im Norddeutschen Becken (GROTE, 1998; ROTH et al, 1998). Der Stern markiert die Lokation Groß Schönebeck 3/90

Unmittelbar in Nähe der ausgewählten Projektlokation Groß Schönebeck, liegen die nächsten gemessenen Spannungsrichtungen 30-40 km im N, NE und E der Bohrung. Es wurden jeweils Richtungen von N31E, N41E und N45E bestimmt, wobei letzterer Wert am nächsten zu Groß Schönebeck liegt.

### **3.3 Das Rotliegend in Groß Schönebeck**

Lithologische Profile, Gesteinsparameter (Porosität, Permeabilität) und die am Kern auftretende Klüftung sowie Hinweise zum Schichtwasserchemismus, zur Gasführung und zur erwarteten Temperatur wurden aus den Bohrakten der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 entnommen. Ergänzend standen aktuelle Vorstellungen zum regionalen Strukturbaue aus seismischen Daten zur Verfügung.

#### **Datenlage: Kerne, Laboruntersuchungen, Bohrlochmessungen und Gestängetest**

Die Untersuchung des im Bereich der Barnim Senke lithologisch dreigeteilten Rotliegendeprofiles erfolgte unter dem Aspekt der Kohlenwasserstoff-Exploration. Dies spiegelt sich in der Auswahl der Kernstrecken, Bohrlochmessungen und Tiefenintervall des Gestängetestes wider.

Kaliber-(2-Arm) und Widerstandsmessungen (OK/UK-2.5) sowie Gammalogs (G) von der Rasensohle bis Endteufe liegen im Maßstab 1:500 vor. Im Rotliegend wurden speziell zusätzliche Messungen im Maßstab 1:200 durchgeführt:

- CAL, 2-Arm Kaliber
- G, Gammalog
- NG, Neutrongammalog
- SGR, Spektralgamma
- AL, Akustiklog (BCS Borehole Compensated Sonic)
- FED, Stratalog (4-Arm Dipmeter)
- DIL, Induktionslog

Kerne wurden aus den Bereichen 3886,5-3895,2 m und 4049,2-4240,0 m gezogen. Die auf die Erfassung der Sandsteine der Eldena- und Rambow-Schichten ausgerichtete Kernstrecke wurde mit einem sehr umfangreichen Beprobungsprogramm belegt, wobei keine Untersuchungen zur Porenradienverteilung erfolgte (Tabelle 3).

Orientierende Aussagen zur Korngrößenverteilung geben die ausführlichen Dünnschliffauswertungen. Die zahlreichen Siebanalysen sind problematisch, da nach der Zerstörung des natürlichen Gesteinsverbandes die Siebung häufig Ergebnis von mechanisch erzeugten Gesteinsbruchstücken ist, die nicht zwingend die natürliche Korngröße widerspiegeln.

Bereich	Untersuchungen (Probenanzahl)				
	Porosität		Permeabilität	Dünnschliffe	Chemische Analyse
Labor	Feld*				
Rotliegend 3881,8 - 4240,0 m (ET)	203	87	109	102	174
Siltsteinkomplex 3881,8 - 4084,9 m	18	8	10	15	18
Sandsteinkomplex 4084,9 - 4230,5 m	182	79	99	87	156
davon Konglomerate in 4211,0 - 4230,5 m	(21)	(8)	(20)	(15)	(13)
Vulkanitkomplex 4230,5 - 4240,0 m (ET)	3	0	0	9	0

**Tabelle 3:** Kernuntersuchungen Rotliegend E Groß Schönebeck 3/90 (\*Porositätsbestimmungen im Feldlabor)

### Teufenlage und Temperatur

Rotliegend-Sedimente wurden in Übereinstimmung mit reflexionsseismischen Messergebnissen im Teufenbereich 3881,8 – 4230,5 m unter Gelände angetroffen (Abbildung 4, Seite 49). Unter einer 203,1 m mächtigen Siltsteinfolge (3881,8 – 4084,9 m) folgt ein 145,6 m mächtiger Sandsteinkomplex (4084,9 – 4230,5 m), in dessen Basisbereich 19,5 m Konglomerate auftreten. Die Vulkanite des Unterrotliegend wurden nach 9,5 m nicht durchteuft (Endteufe der Bohrung: 4240 m). Vermutlich erreichen die permosilesischen Vulkanite hier eine Mächtigkeit von 450 m (STACKEBRANDT et al., 1997).

Bei einem Gestängetest wurde eine Temperatur von 140 °C in 4100,3 m Teufe gemessen. Der Wert entspricht der in der Bohrung gemessenen Maximaltemperatur in 4240 m (KLAUB, 1991). Höhere Temperaturen sind nach Abklingen der durch den Bohrvorgang verursachten Abkühlung möglich. Außerdem könnten die umgebenden Salzstrukturen bzw. laterale Mächtigkeitsschwankungen der Salzsichten des Zechsteins das Temperaturfeld beeinflussen (MELLO et al., 1994; MELLO et al., 1995).

### Lithologien

Es treten im Rotliegend von Groß Schönebeck mit zunehmender Tiefe eine Folge von Siltsteinen, Sandsteinen, Konglomeraten und Vulkaniten auf.

Der insgesamt 203,1 m mächtige *Siltsteinkomplex* (3881,8-4084,9) besteht aus unregelmäßig wechselnden hell- bis dunkelrotbraun gefärbten Siltstein-Tonstein-Folgen, in die zum Liegenden zunehmend < 1 m mächtige Feinsandsteinbänke eingelagert sind. Bei söhlicher Lagerung überwiegt der eben-horizontale bis linsig-flaserige Schichtungstyp. In Feinsandsteinabschnit-

ten treten auch Schrägschichtungen auf. Mit Zunahme des Sandsteinanteils sind unterhalb 4057 m verstärkt auch synsedimentär angelegte, anhydritverheilte Klüfte zu beobachten. Die starken lithologischen Wechsel sind auch in den Dünnschliffen zu erkennen. Die Matrix besteht aus überwiegend tonig-ferritischem Material (5 – 60 % Gesamtvolumen des Gesteins). Als Zementminerale treten Karbonat und Anhydrit in gegenläufigen Verhältnissen mit Gesamtanteilen von 10 – 35 % auf. Matrix und Zement können gemeinsam bis zu > 70 % am Gesteinsaufbau beteiligt sein. Bei den Klasten überwiegt der Quarz während der Feldspatanteil bei nur 1,2 - 6,7 % liegt. Gesteinsbruchstücke können vereinzelt fast 25 % des Gesteinsvolumens erreichen. Die am Kern bestimmten Porositäten betragen 0,6 – 3,5 %. Diese Ergebnisse stimmen mit den Einschätzungen der Bohrlochmessung (0 – 5,5 %) überein, wobei die Spitzenwerte für eingelagerte dezimeter-mächtige Sandsteinbänke stehen sollen (KLAUB, 1991). Die am Kern bestimmten Permeabilitäten belegen mit 0,0001 – 0,045 mD sehr schlechte Fließigenschaften.

Der 145,6 m mächtige *Sandsteinkomplex* (4084,9-4230,5) ist überwiegend als rotbrauner Feinsandstein, untergeordnet auch als Mittelsandstein entwickelt. Die gesamte Folge wird unregelmäßig von einigen zentimeter- bis dezimeterstarken Siltstein-Tonsteinlagen und -bänken durchsetzt. Unterhalb 4211 m treten mehrere < 2 m mächtige Feinkonglomeratbänke auf. Die Lagerung der gesamten Folge ist söhlig. Die Schichtungstypen wechseln sehr stark, wobei insgesamt eine klein- bis mitteldimensionale Schrägschichtung überwiegt. Gelegentlich treten Klüfte auf. Obwohl gut verfestigt wird der Kern in den Bereichen 4113–4170 m und 4177–4186 m als absandend beschrieben. Die Klasten bestehen überwiegend aus Quarz (40 – 70 %), untergeordnet aus Feldspat (5-10 %) und einem hohen Anteil aus Gesteinsrelikten (15- >30 %). Die tonig-ferritische bis tonige Matrix beteiligt sich mit 3- 9 % am Gesteinsaufbau. Der Zementanteil variiert sehr stark (1,5-30 %). Eine erhebliche Quarz-Feldspat dominierte Porenraumzementation wird durch den hohen Anteil an authigenem Quarz-Feldspat (1,2-26,9 %) belegt (GAST et al., 1998). Als weitere Zementminerale treten Karbonat mit 0,1-7,9 % und Sulfat mit überwiegend < 1 % (0-2,6 %) auf. Die Kornsortierung ist gut bis mäßig (1,2-1,6 nach TRASK), bereichsweise sogar schlecht (> 1,7). Die Kornrundungen sind mäßig bis schlecht. Die im Sandstein gemessenen Porositäten liegen im Bereich 1,2–20,4 % (Mittelwert ist 9,5 % bei 182 Werten). Die Analyse der Bohrlochlogs ergab Porositäten von 3–21,5 %, die somit geringfügig von den Labormessungen abweichen. Die Permeabilitäten erreichen 0,0001 – 236 mD (99 Werte).

Für Sandsteinabschnitte mit Porositäten > 8 % (Tabelle 4) ergeben sich insgesamt eine mittlere Porosität von 14,2 % (74 Werte) und eine mittlere Permeabilität von 34 mD. Die Porositäts- und Permeabilitätswerte charakterisieren Sandsteine mit schlechten Speichereigenschaften und dementsprechend zu erwartenden sehr geringen Fließraten.

Diese Einschätzung wird durch einen im obersten Abschnitt des Rotliegendesandsteins realisierten Gestängetest bestätigt. Das Testintervall 4104,6 – 4121,0 m erfasst allerdings nur etwa 1/5 der oben aufgeführten Sandsteine mit Porositäten > 8 %. Aus technischen Gründen wurde eine Vorlage verwendet (3,71 MPa; Umlaufspülung mit Dichte 1150 kg/m<sup>3</sup>). Die Ergebnisse des technisch einwandfrei verlaufenen Tests sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Teufe von		bis	Mächtigkeit
4108,1	-	4111,6 m	(3,5 m)
4113,2	-	4119,5 m	(6,3 m)
4145,2	-	4164,9 m	(19,7 m)
4165,5	-	4187,1 m	(21,6 m)
4195,2	-	4199,4 m	(4,2 m)

**Tabelle 4:** Teufenbereiche erhöhter (> 8 %) Porosität in Sandsteinabschnitten des Rotliegend der Groß Schönebeck 3/90

Messteufe	4109,7 m,
Schichtdruck	43,65 MPa,
Druckgradient	1,06 MPa / 100 m,
Temperatur	140 °C,
Zuflussrate	7,23 m <sup>3</sup> / 204,2 min Schichtwasser,
Depression	37,83 ... 20,93 MPa (Fließperiode).

**Tabelle 5:** Ergebnisse des Gestängetestes im Sandsteinbereich 4104,6-4121,0 m

Die im Bereich 4211 – 4230,5 m auftretenden *Konglomerate* bestehen aus eckigen bis gut gerundeten Geröllen, die regellos bis lagig von einer dominant mittelsandigen Matrix eingeschlossen werden. Die wechselnd locker bis dicht gepackten Gerölle bestehen neben Porphyriten aus Quarz, Sandstein, Siltstein und Tonstein. Die Geröllgröße variiert zwischen wenigen Millimetern bis 6 cm. Die Konglomerate sind durchweg schwach kalkhaltig. Nach Dünnschliffauswertungen liegt der Zementanteil zwischen 5 und 20 %, wobei wiederum der authigene Quarz-Feldspat überwiegt.

Die am Kern bestimmten Porositäten betragen 2,4–7,7 %, die Permeabilitäten 0,0001–0,378 mD. Das Auftreten von Klüften beschränkt sich auf Sandsteine in den Teufenbereichen 4085,5–4106,45 m und 4189,35–4229,3 m (Abbildung 6, Seite 50). Sie sind an tektonisch kompetente Bereiche geringer Porosität und Permeabilität gebunden. Die im oberen Teil bis 4 mm breiten, im unteren Abschnitt überwiegend nur 0,1 mm breiten Klüfte fallen saiger ein und sind ausnahmslos mit Karbonat oder Quarz verheilt.

Der ab 4230,5 m mit 9,5 m aufgeschlossene *Vulkanitkomplex* erreicht am Standort der E Groß Schönebeck 3/90 eine Gesamtmächtigkeit von etwa 450 m (STACKEBRANDT et al., 1997). Unter einem 0,17 m mächtigen brekziösen Aufarbeitungshorizont, der sich aus feinem tonig – brekziösen Material mit Vulkanitbruchstücken zusammensetzt, folgt ein basischer Andesit, der aus mindestens 2 Ergüssen besteht. Die Abgrenzung ist sowohl am Kern als auch in der Bohrlochmessung (4232,9 m / 4233 m) erkennbar (KORICH, 1991). Der sehr feinkörnige Vulkanit, in dem makroskopisch nur sehr wenige Einsprenglinge erkennbar sind, erscheint dicht. An den Ergussgrenzen treten teilweise autoklastische brekziöse Mandelsteine auf. Das kompakte, feste Gestein ist partiell geklüftet. Die 40-90° einfallenden, bis 15 mm breiten, sich teilweise kreuzenden Klüfte sind durch Quarz oder teilweise hämatitisierten Kalzit verheilt. Die an 3 Proben ermittelten Gesteinsporositäten liegen im Bereich 3,2–4,7 %.

### Formationsfluide

Durch den Gestängetest wurde für die oberen Bereiche des Rotliegendesandsteins eine Schichtwasserführung nachgewiesen. Laboruntersuchungen erbrachten hinsichtlich der physikochemischen Eigenschaften und der Anteile untersuchter Hauptkomponenten (Kurzanalysen) folgende Resultate (Tabelle 6):

<b>Zusammensetzung in mg/l:</b>			
K <sup>+</sup>	2 990	Cl <sup>-</sup>	159 400
Na <sup>+</sup>	37 700	Br <sup>-</sup>	340
Ca <sup>++</sup>	54 900	J <sup>-</sup>	16
Mg <sup>++</sup>	550	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	130
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	12		
Dichte:		1184 kg/m <sup>3</sup>	
Mineralisation:		256 g/l	
pH-Wert:		6,1	

**Tabelle 6:** Ergebnisse zur Schichtwasseruntersuchung Rotliegend E Groß Schönebeck 3/90

Inwieweit im Rahmen des auf die Suche von Erdgas ausgerichteten Tests tatsächlich die Mineralisationskonstanz erreicht wurde, lässt sich anhand der noch vorhandenen Unterlagen nicht mit Sicherheit sagen. Bis auf den sehr geringen Gehalt an Magnesium entspricht das Ca-Na-Cl-Typ Fluid chemisch den bisher bekannten Rotliegendwässern (MÜLLER & PAPENDIECK, 1976).

Das in der Tiefenprobe enthaltene Gas wurde auf mögliche Kohlenwasserstoffe hin analysiert. Ohne Luft und Wasserstoff über Argon berechnet ergab sich für den Head-space-Anteil (frei entlösbarer Anteil) ein CH<sub>4</sub>-Gehalt von 12,75 %. Zur Charakterisierung der offenbar nicht geringen Gasmenge als freies oder gelöstes Gas sind dem geologischen Abschlußbericht der Bohrung widersprüchliche Angaben zu entnehmen (HAMANN & KUHLEE, 1991). Die Lage des Gas-Wasser-Kontaktes ist für oberhalb 4095,7 m angegeben.

Unabhängig des dazu noch notwendigen Klärungsbedarfs ist die zu öffnende Bohrung im bergrechtlichen Sinne als gasgefährdet einzustufen.

#### **4 Zusammenfassung**

Im Rahmen des Projektes *Nutzbarmachung Klüftig-poröser Speicher zur abnehmernahen geothermischen Energiebereitstellung* wurden zunächst Untersuchungen zur Nutzbarmachung bisher nicht geeigneter Gesteinsformationen begonnen. Unter dem Primat möglichst hoher Schichttemperaturen (Option der Stromerzeugung) und dementsprechender Teufenlagen wurden Beckenstrukturen hinsichtlich des Auftretens interessanter Sandsteinformationen überprüft. Die Auswahl einer geeigneten Zielformation ergab aus geologischer Sicht (Verbreitung, Mächtigkeit, Teufenlage) eine Favorisierung des Rotliegend im Norddeutschen Becken. Es wurden etwa 100 tiefe Altbohrungen in Nordostdeutschland übersichtsmäßig recherchiert, wobei sich schließlich der Bearbeitungsschwerpunkt auf den Bereich der Barnim-Senke orientierte.

Nach Prüfung sowohl geologischer wie auch bohrtechnischer Gegebenheiten wurde die 30 km nördlich von Berlin gelegene, verfüllte Erdgasbohrung E Groß Schönebeck 3/90 für die Einrichtung eines In-Situ Tiefenlabors zur Aufwältigung vorgeschlagen. Durch zeit- und kostensparende Untersuchungen in einer bereits vorhandenen Bohrung werden grundlegende Erkenntnisse zur Stimulierbarkeit und Nutzbarmachung bisher nicht geeigneter Gesteinschichten erwartet. Mit den im klassischen hydrothermalen Sinne interessierenden Rotliegendesandsteinen, dem Siltsteinkomplex und den Vulkaniten ist ein Spektrum lithologisch unterschiedlicher Gesteine abgedeckt, die in den erforderlichen Teufenlagen für das gesamte Norddeutsche Becken von Bedeutung sind.

## 5 Literatur

- BENEK, R., KRAMER, W., MCCANN, T., SCHECK, M., NEGENDANK, J.F.W., KORICH, D., HUEBSCHER, H.-D. & BAYER, U., (1996): Permo-Carboniferous magmatism of the Northeast German Basin, *Tectonophysics*, **266**, 379-404
- BREITKREUZ, C. & KENNEDY, A., (1999): Magmatic flare up at the Carboniferous/Permian boundary in the NE German Basin revealed by SHRIMP zircon ages. *Tectonophysics*, **302**, 307-326
- DIENER, I. et al., (1988/92): Geothermische Ressourcen Nordteil der DDR / Nordostdeutschland, 1 : 200 000. – Zentrales Geologisches Institut / UWG Gesellschaft für Umwelt- und Wirtschaftsgeologie mbH, Berlin (unveröff. Ber.)
- GAST, R., PASTERNAK, M., PISKE, J. & RASCH, H.-J. (1998): Das Rotliegend im norddeutschen Raum: Regionale Übersicht, Stratigraphie, Fazies und Diagenese. - *Geol. Jb. A* **149**, 59 - 79, Hannover
- GROTE, R. (1998): Die rezente horizontale Hauptspannung im Rotliegenden und Oberkarbon in Norddeutschland, *Erdöl, Erdgas, Kohle*, **114** (H. 10), 478-483
- GRÜNTAL, G & STROMEYER, D. (1992): The recent crustal stress field in Central Europe: trajectories and finite element modelling. *J. Geophys. Res.*, **97** (B8), 11805-11820
- HAMANN, M. & KUHLEE, R. (1991): Geologisch – technisch – ökonomischer Abschlussbericht der Bohrung E Groß Schönebeck 3/90. - *Erdöl – Erdgas Grimmen GmbH* (unveröff. Ber.)
- HÄNEL, R. & STAROSTE, E. (Hrsg.) (1988): Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland. – Verl. Th. Schäfer, Hannover
- HURTIG, E., CERMAK, V., HÄNEL, R. & ZUI, V. (Eds.) (1992): Geothermal Atlas of Europe. – Hermann Haack Verlagsgesellschaft, Gotha
- KARNIN, W.-D., MERKEL, J., PISKE, J. & SCHRETZENMAYR, S.: Historie und gemeinsames Explorationskonzept EEG / BEB nach 1990. - *Geol. Jb. A* **149**, 7 - 23, Hannover
- KATZUNG, G. (Hrsg.) (1984): Geothermie-Atlas der Deutschen Demokratischen Republik. – Zentrales Geologisches Institut, Berlin
- KLAUB, K. (1991): Bericht zu den in der Bohrung E Gross Schönebeck 3/90 durchgeführten geophysikalischen Messungen. - Bohrlochmessung GmbH Gommern (unveröff. Ber.)
- KORICH, D. (1991): Zur Petrographie des Autun-Vulkanits der Bohrung E Groß Schönebeck 3/90. – Ernst-Moritz-Arndt Universität, Greifswald (unveröff. Ber.)

- LINDERT, W., WARNCKE, D. & STUMM, M. (1990): Probleme der lithostratigraphischen Gliederung des Oberrotliegenden (Saxon) im Norden der DDR. –Z. angew. Geol., **36**, 10: 368 – 375, Berlin
- MELLO, U.T., ANDERSON, R.N. & KARNER, G.D. (1994): Salt restrains maturation in subsalt plays. – Oil and Gas Journal, **92**, 101-107
- MELLO, U.T., KARNER, G.D & ANDERSON, R.N.(1995): Role of salt in restraining the maturation of subsalt source rocks. – Marine and Petroleum Geology, **12**, 697-716
- MÜLLER, B., ZOBACK, M.L., FUCHS, K., MASTIN, L., GREGGERSEN, S., PAVONI, N., & STEPHANSON, O. (1992): Regional pattern of tectonic stress in Europe, J.Geophys. Res., **97** (B8), 11783-11803
- MÜLLER, E. P. & PAPENDIECK, G. (1975): Zur Verteilung, Genese und Dynamik von Tiefenwässern unter besonderer Berücksichtigung des Zechsteins. – Z. geol. Wiss., **3**, 2, 167 – 196, Berlin
- PISKE, J. et al., (1992): Explorationsatlas Rotliegendes Brandenburg. - Erdöl-Erdgas Gommern GmbH / BEB Hannover, Gommern (unveröff. Bericht)
- PLUMB, R.A., EVANS, K.F. & ENGELDER, T. (1991): Geophysical log responses and their correlation with bed-to-bed stress contrasts in Palaeozoic rocks, Appalachian Plateau, New York, J. Geophys. Res., **96** (B9), 14509-14528
- ROTH, F., BÄBLER, H., WEIGOLD, G., FUCHS, K., PALMER, J. & FLECKENSTEIN, P., (1998): Spannungsmessungen in Osteuropa – Orientierungsdaten aus Nordost-Deutschland, Weißrußland und der Westukraine. ICDP-KTB Kolloquium, Wissenschaftliches Programm und Abstracts, Ruhr-Universität Bochum, 4.-5. Juni, 1998, p. 8
- SCHIMANSKI, W. & LINDERT. W., (1990): Abschlußbericht zum Staatsplanthema Regionale Vorlaufsforschung Erdöl-Erdgas mit Aussagen zur Charakterisierung der Höffigkeitskriterien für das tiefere sedimentäre Rotliegende und Präperm im Nordteil der DDR. – Erdöl-Erdgas Geotechnologie Gommern GmbH / Zentrales Geologisches Institut Berlin
- SCHULZ, R., BEUTLER, G., RÖHLING, H.-G., WERNER, K.-H., ROCKEL, W., BECKER, U., KABUS, F., KELLNER, T., LENZ, G. & SCHNEIDER, H. (1994): Regionale Untersuchungen von geothermischen Reserven und Ressourcen in Nordwestdeutschland. – ArchivNr. 111 758, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover
- STACKEBRANDT, W., EHMKE, G. & MANHENKE, V. (1997): Atlas zur Geologie von Brandenburg im Maßstab 1:1 000 000. – Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg, Kleinmachnow
- STOBER, I. (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. - Geol. Jb. C **42**, 3-204, Hannover

ZIEGENHARDT, W. (1976): Bau und Genese salinartektonisch angelegter Strukturen des Staßfurtkarbonats im Zechstein der Lausitz – Teil II. – Z. angew. Geol., **22** (3), 106 – 113, Berlin

ZOBACK, M.L. & ZOBACK, M.D. (1997): Crustal stress and intraplate deformation- - Geowissenschaften, Vol. **15** (3-4), pp. 116-123 (Spec. iss. „Structure and Processes in the Earth“ for the 75th anniversary of the German Geophys. Society)

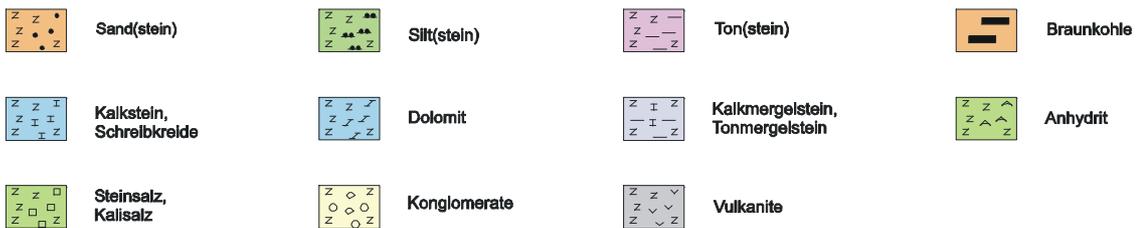
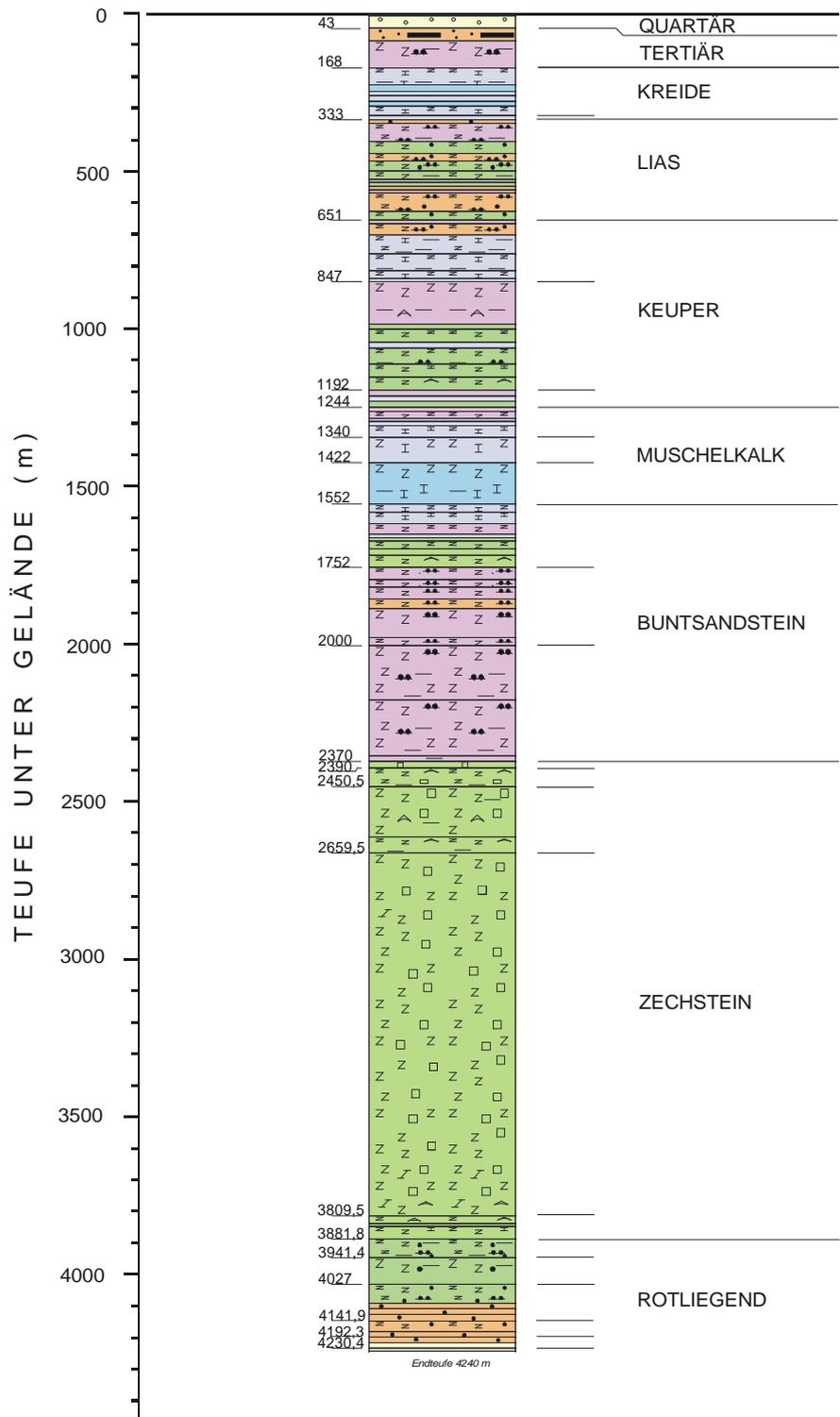


Abbildung 4: Geologisches Profil der Bohrung Groß Schönebeck 3/90

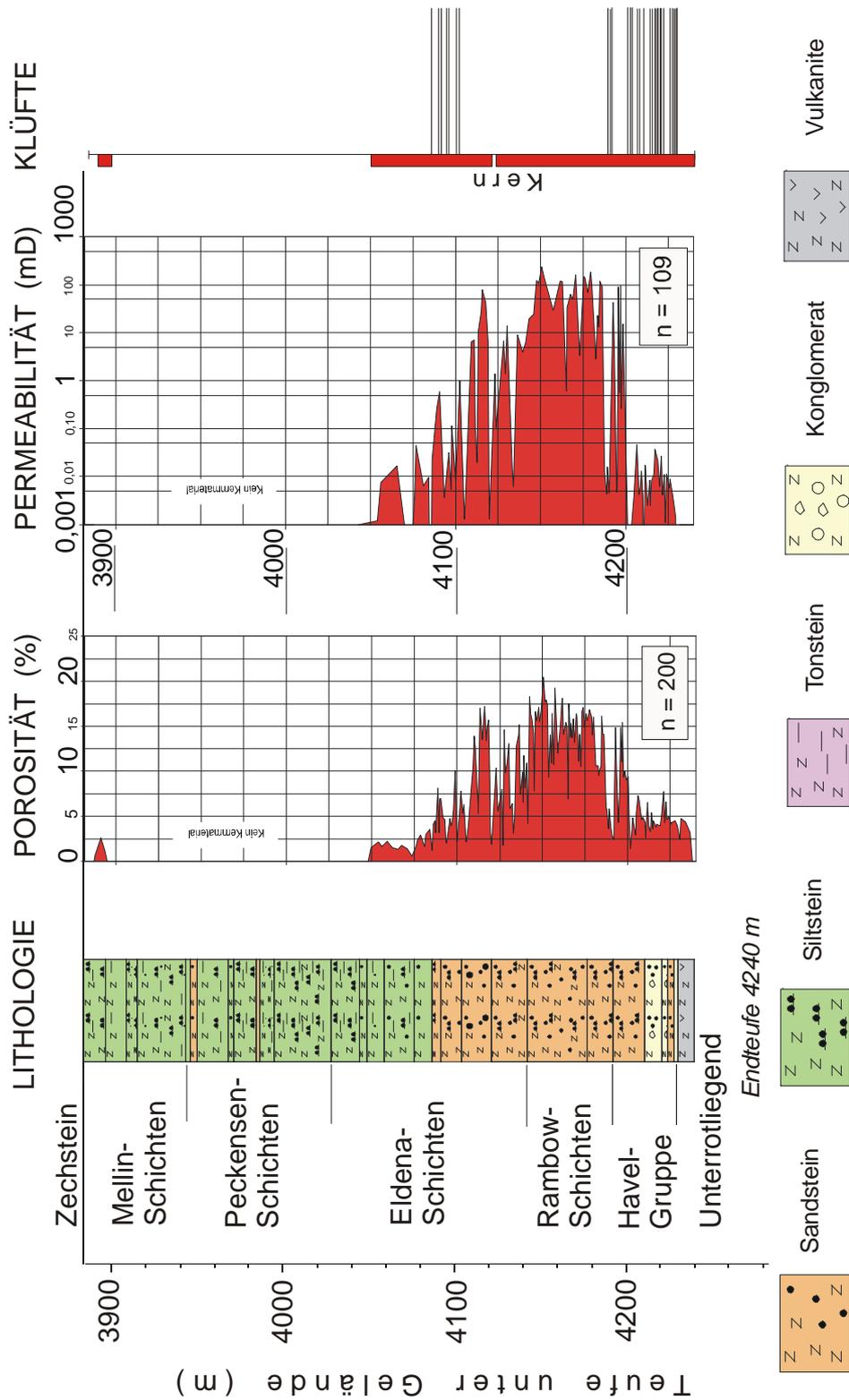


Abbildung 6: Profil des Rotliegendes in Groß Schönebeck 3/90: Stratigraphie, Lithologie, Porosität, Permeabilität und Klüftung

# Welche Faktoren können die Eisen(II)-Oxidation in Formationswässern beeinflussen?

Andrea Seibt, BWG GbR

<b>1</b>	<b>Einführung.....</b>	<b>53</b>
<b>2</b>	<b>Oxidations- Reduktionszustand von Schichtwässern .....</b>	<b>53</b>
2.1	Eisenquellen in Altbohrungen .....	53
2.2	Verhältnis von Eisen(II) und Eisen(III).....	55
<b>3</b>	<b>Kinetik der Eisenoxidation.....</b>	<b>57</b>
3.1	Einführung .....	57
3.2	Oxidation von Eisen(II) zu Eisen(III).....	57
3.3	Fällungsreaktion .....	58
3.4	Einflussgrößen auf die Geschwindigkeitskonstante .....	60
<b>4</b>	<b>Fällungsprodukte.....</b>	<b>65</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>67</b>

## Abstract

Many hydrogeothermal reservoirs exist in anaerobic, reducing environments. These conditions favor the existence of dissolved ferrous iron Fe(II) in the formation fluids. When these fluids are brought into contact with the atmosphere, i.e. with oxygen or encounter other oxidizing agents, ferrous iron oxidizes to ferric iron Fe(III). Several studies of the kinetics of Fe(II)-oxidation in near-neutral, aerobic waters show that this reaction is slow and can be described as first order reaction with respect to Fe(II). The oxidation rate of ferrous iron is a function of the activity of ferrous iron and hydroxyl as well as oxygen partial pressure. Once ferric iron is formed it readily undergoes hydrolysis and precipitates as solid ferric hydroxide.

In natural environments Fe(II)-oxidation is far more complex. High salinity causes lower oxidation rates, i.e. reactions are slower than in highly diluted aqueous solutions. Additionally, the presence of organic material seems to stabilize Fe(II) ions diminishing reaction speed. Bacterial activity increases oxidation rates. The oxidation of Fe-ions adsorbed to solid surfaces occurs at a greater rate than in solution. This must be considered when extrapolating laboratory data to the sedimentary environment. The operational safety of thermal water production depends on the knowledge of the influence of high salinity, bacterial content and the presence of organic compounds on the Fe(II)-oxidation process. These issues need to be investigated in aquifers of the North German Basin, of interest for geothermal exploration purposes. In the formation water system of the gas-exploration well Groß Schönebeck, highly saline formation waters of the Rotliegend reservoirs exhibit a concentration range of 150-200 g/L Fe(II).

## 1 Einführung

In den meisten anaeroben (anoxischen – sauerstofffreien) natürlichen Wässern ist Eisen als Spurenelement zu finden. Der Gehalt an gelöstem Eisen ist durch das thermodynamische Gleichgewicht der Fluid-Gesteins-Wechselwirkungen bestimmt. Durch Veränderung der Milieubedingungen kann es zur Bildung von festen Eisenhydroxiden kommen, deren Zusammensetzung von den pH-Wert abhängigen Oxidations-/Reduktionsprozessen bestimmt wird.

Die Untersuchungen in Thermalwasserkreisläufen verschiedener geothermischer Heizwerke haben ergeben, dass die in den Wässern gelösten Eisen(II)-Ionen auf eine Änderung des pH- und Eh-Wertes sensibel reagieren. Bereits eine pH-Wert-Zunahme um 1,5 Einheiten führte in dem Thermalwasser von Neustadt-Glewe zur Übersättigung voluminöser Hydroxide und Magnetit. Die Bildung von Eisenhydroxiden wird noch durch einen Eintrag von Luftsauerstoff (Eh-Wert-Erhöhung) verstärkt (SEIBT ET AL., 1999; SEIBT & HOTH, 1997). Obwohl diese Ergebnisse aus geochemischen Modellierungen mit dem untersuchten Mineralbestand der Filter in den Anlagen korrelierten, können bislang keine Aussagen hinsichtlich der Quantität der Reaktionen, d. h. wann und wo der vollständige Umsatz erfolgt, gemacht werden. Die Reaktionskinetik der Eisenoxidation für hochsalinare Fluide ist unbekannt. Die Kenntnis dieser ist jedoch wichtig, um auf Veränderungen bezüglich einer Gefährdung des Speicherhorizontes durch Reinjektion von in ihren Eigenschaften veränderten Wässern reagieren zu können. Auch bei der Aufwältigung von Altbohrungen wie im Fall der Bohrung in Groß Schönebeck ist die Kenntnis des Reaktionsablaufes wichtig, da hier es bei den Tests zur Mischung der Schichtwässer mit sauerstoffhaltigen Fremdwässern kommt.

Deshalb sind kinetische Experimente zur Eisenoxidation unter praxisrelevanten Bedingungen mit Sedimentkontakt geplant. Grundlage hierfür ist die Auswertung von Literaturdaten zur Kinetik aus Versuchen mit wässrigen Lösungen sowie die Betrachtung der Einflussfaktoren auf die Reaktion.

## 2 Oxidations- Reduktionszustand von Schichtwässern

### 2.1 Eisenquellen in Altbohrungen

In allen Bohrungen sind normalerweise eisenhaltige Minerale und somit in den Schichtwässern gelöstes Eisen anzutreffen (SMITH ET AL., 1969). Deren Lokation bzw. dessen Gehalt hängt einmal vom casing-Ausbau und zum anderen von den Reservoireigenschaften ab.

Die chemischen Analysen, die im Rahmen einer Gaserkundungsbohrung in Groß Schönebeck von dem Schichtwasser nach einem Gestängetest am 23.12.1990 angefertigt wurden, geben keinen Hinweis auf gelöste Eisen-Ionen im Schichtwasser. Da die Bohrung 1990 mit dem Ziel des Nachweises einer Gasführung abgeteuft wurde, waren offensichtlich nur die Hauptionen und deren Gehalt von Interesse. Insgesamt waren die Zuflüsse von Schichtwasser und Gas während des Tests so gering (54,6 m<sup>3</sup>/d), dass generell nur Trendaussagen zum Speicherinhalt der Bohrung E GrSk 3/90 möglich sind. Zu rechnen ist mit einem Schichtwasser vom Ca-Na-

Cl-Typ mit einem Gehalt an gelösten Ionen von mindestens 250 g/l (Tabelle 1). Für eine möglicherweise hohe Eisen(II)-Konzentration sprechen die Schichtwasseranalysenwerte vergleichbarer Bohrungen in Grüneberg [TB E Gür 3/76 - ~ 180 g/l Fe<sub>gelöst</sub> (RIEDEL, 1977) und TB E Gür 2/74 - ~ 190 g/l Fe<sub>gelöst</sub>) (EGGERT, 1976)].

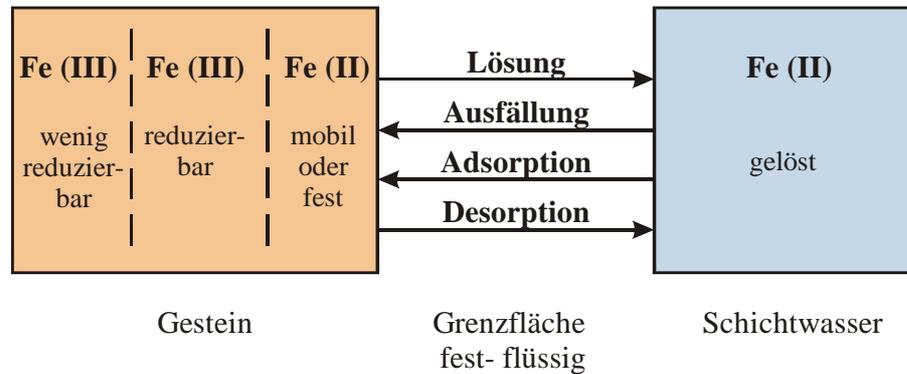
<b>Kation</b>	<b>Konzentration mg/l</b>	<b>Konzentration mmoleq%</b>
Kalium (K <sup>+</sup> )	2990	0,9
Natrium (Na <sup>+</sup> )	37700	18,2
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	54900	30,4
Magnesium (Mg <sup>2+</sup> )	550	0,5
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	12	0,0
<b>Anion</b>	<b>Konzentration mg/l</b>	<b>Konzentration mmoleq%</b>
Chlorid (Cl <sup>-</sup> )	159400	49,9
Bromid (Br <sup>-</sup> )	340	0,1
Iodid (I <sup>-</sup> )	16	0,0
Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	130	0,0

**Tabelle 1:** Analysendaten GT 23.12.90, Teufe: 4095,2-4111,6 m; pH = 6,1; r = 1,184g/cm<sup>3</sup> (HAMANN & KUHLEE, 1991)

Ein Hinweis für eine Quelle von Eisen in der Bohrung Groß Schönebeck E GrSk 3/90 kann die hellrotbraune Färbung des erbohrten Kernmaterials aus den potenziellen Speicherhorizonten (4084,9 m – 4230,5 m) und die tonig-ferritisch Matrix in diesen Teufenbereichen (HAMANN & KUHLEE, 1991) sein. Alle rötlich gefärbten Sandsteine aus dem Rotliegenden enthalten Hämatit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) in unterschiedlichen Konzentrationen, wobei der Gehalt gewöhnlich zwischen 0,1 – 1 % liegt. Allerdings reichen für die Rotfärbung schon Spuren aus. In den Bereichen, die mit Kohlenwasserstoffen im Kontakt standen, sind die Sandsteine gebleicht, d. h. Hämatit wurde zu Magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) reduziert. Dass dies nur unter stark reduzierenden Bedingungen erfolgt, zeigten die Ergebnisse der Untersuchungen an eisenhaltigen Bodenproben von BRENNAN & LINDSAY (1998).

Eisen wird unter reduzierenden Bedingungen, wie die Versuche zum Magnetit-Hämatit-Löslichkeitsgleichgewicht in Natriumchloridlösungen unter hydrothermalen Reservoirbedingungen (T = 573 - 698 K und p = 400 – 500 bar) von JANECKY ET AL. (1986) zeigten, bis zum Erreichen des Gleichgewichtes gelöst. Sind in den Schichtwässern organische Verbindungen enthalten, so bilden diese mit Eisen(II)-Ionen Komplexe (s. a. Abschnitt 3.4). Diese Komplexe sind wiederum in der Lage, Eisen(III) aus eisenhaltigen Mineralen herauszulösen. Diese vorhandenen organischen Eisen(II)- und/oder neu gebildeten Eisen(III)-Komplexe, so Ergebnisse der Untersuchungen von LUTHER ET AL. (1995), können somit auch am Kreislauf der Eisenmineralauflösung beteiligt sein. Abbildung 1 zeigt Wechselwirkungen an der Grenzfläche einer eisenmineralhaltigen Matrix und Schichtwasser mit gelöstem Eisen.

Besonders bei einer langen Standzeit der Altbohrungen muss anfangs mit höheren Eisenkonzentration als tatsächlich im Schichtwasser vorliegen gerechnet werden. Der Bohrungsausbau in Groß Schönebeck besteht aus Stahl, so dass sich durch Korrosion Magnetit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) an den Rohrgestängen ablagern kann. Besonders durch Förder- und Injektionstest muss dann mit einem Abplatzen gerechnet werden. Tabelle 2 enthält verschiedene eisenhaltige Minerale, den vorliegenden Oxidationszustand des Eisens sowie ihren möglichen Herkunftsort.



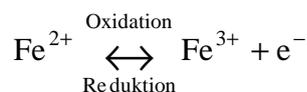
**Abbildung 1:** Wechselwirkungen zwischen Gestein (eisenhaltiges Sediment) und Schichtwasser mit gelösten Eisen(II)-Ionen

Mineral	Oxidationsstatus	Sandsteinform
Magnetit (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>	Bohrungsausbau, Sandsteinformation
Hämatit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Fe <sup>3+</sup>	Sandsteinformation

**Tabelle 2:** Quellen von Eisen in Schichtwässern

## 2.2 Verhältnis von Eisen(II) und Eisen(III)

Eisen kann die Oxidationsstufe +2, +3 oder +6 einnehmen, wobei die Oxidationsstufe +6 relativ wenig und dann nur in Chelatkomplexen mit einer Koordinierungszahl von 6 auftritt. Für die weiteren Betrachtungen ist sie nicht relevant. In welchem Oxidationsstatus das Eisenion in einem Schichtwasser vorliegt, hängt von den Reservoirbedingungen ab. In einem oxidierendem Medium ist Eisen(III) stabiler, unter reduzierenden Bedingungen ist es Eisen(II). Eisen(II) ist durch Luft und/oder Oxidationsmittel zu Eisen(III) oxidierbar. Bei der Oxidation gibt das Eisen(II)-Ion ein Elektron ab, bei der Reduktion nimmt es ein Elektron auf. Die Redoxpartner stehen dabei in einem Gleichgewicht.



Das Verhältnis zwischen Eisen(II)- und Eisen(III)-Ionen zeigt dabei das Reduktions-Oxidationspotenzial (Redoxpotenzial) des Mediums an. Alle Redoxreaktionen, die Wasserstoffionen verbrauchen oder freisetzen, sind vom pH-Wert abhängig. Mittels der NERNST'schen Gleichung (2-1) kann das Redoxpotenzial berechnet werden:

$$E_h = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(ox)}{(red)} \quad (2-1)$$

$E_0$	Standardpotenzial
$R$	Gaskonstante
$T$	absolute Temperatur
$n$	Zahl der beteiligten Elektronen
$F$	Faradaysche Konstante
$(ox), (red)$	Aktivität der oxidierten bzw. reduzierten Spezi

Durch Einsetzen der NERNST-Spannung  $E_N$

$$E_N = \frac{\ln 10 \cdot R \cdot T}{F} \quad (2-2)$$

ergibt sich (2-3):

$$E_h = E_0 + E_N \cdot \frac{1}{n} \cdot \log \frac{(ox)}{(red)} \quad (2-3)$$

Das Redoxpotenzial ( $E_h$ ) stellt den in Volt ausgedrückten Zahlenwert des Redoxsystems in Bezug zur Standardwasserstoffelektrode dar. Das Redoxpotenzial ist von großem Interesse, da mit dessen Hilfe Aussagen über das Verhalten von an dem System beteiligten Stoffen getroffen werden können. Bei geochemischen Modellierungen ist es die Grundlage für Berechnungen von Mineralstabilitäten aus Wasseranalysen.

Für die Reaktion  $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^-$  ( $E_0 = 0,771$  V) bei 25 °C (VOIGT, 1989) kann theoretisch bei bekannten Aktivitäten der Eisen(II)- und Eisen(III)-Ionen das Redoxpotenzial nach folgender Beziehung ermittelt werden:

$$E_h(V) = 0,771 + 0,0591 \cdot \log \frac{(Fe^{3+})}{(Fe^{2+})} \quad (2-4)$$

Dies ist aber nur dann möglich, wenn beide Redoxpartner in Konzentrationen vorliegen, die deutlich über der Nachweisgrenze sind. In den im Allgemeinen im reduzierten Zustand vorliegenden Schichtwässern ist die Konzentration der Eisen(III)-Ionen so niedrig, dass eine Betrachtung des  $Fe^{2+}/Fe(OH)_3$  – Gleichgewichtes zur Ermittlung des Redoxpotenzials sinnvoller ist (KÖLLING, 1986).

Unter den oben genannten Bedingungen und der Reaktion  $Fe^{2+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+ + e^-$  mit  $E_0 = 1,056$  (VOIGT, 1989) ergibt sich für die Berechnung des Eh-Wertes folgende Beziehung:

$$E_h(V) = 1,056 - 0,177 \cdot pH - 0,0591 \cdot \log(Fe^{2+}) \quad (2-5)$$

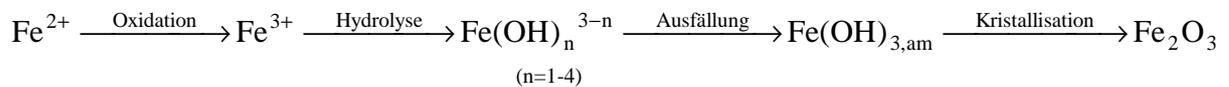
Der pH-Wert wird durch die Hydrolyse des dreiwertigen Eisens kontrolliert. Obwohl in den Wässern noch andere Ionen auf das Redoxpotenzial wirken können, ist eine Berechnung des Redoxpotenzials über das  $Fe^{2+}/Fe(OH)_3$  Redoxpaar relativ gut und genau (KÖLLING, 1986).

Schwierig ist die direkte Messung des Eh-Wertes mittels Sonden, insbesondere von Wässern, die im reduzierten Zustand vorliegen. Neben anderen die Eh-Messung beeinflussende Faktoren stellt ein Sauerstoffkontakt den bedeutendsten Störfaktor dar (GOHLKE & UNGETHÜM, 1975). Allgemein kann nur von einer maximalen Messgenauigkeit von +/-50 mV ausgegangen werden (KÖLLING, 1986).

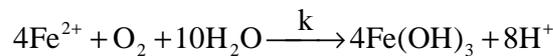
### 3 Kinetik der Eisenoxidation

#### 3.1 Einführung

Die Kenntnis des Ablaufes der Eisenoxidation ist notwendig, um die Wechselwirkungsreaktionen des Eisens in natürlichen Systemen verstehen zu können. Die Kinetik der Eisen(II)-Oxidation in wässrigen Medien wird dabei durch die Bildung und Hydrolyse von Eisen(III) und dem sich anschließenden Kristallisationsprozess der Hydrolyseprodukte kontrolliert:



Fe(II) ist in Anwesenheit von Sauerstoff (O<sub>2</sub>) bei neutralem pH-Wert thermodynamisch instabil. Theoretisch wird Fe(II) bei Vorliegen eines Überschusses an Sauerstoff (O<sub>2</sub>) nahezu vollständig oxidiert.



Tatsächlich ist aber diese Reaktion, die bei natürlichen und technologischen aquatischen Prozessen eine wichtige Rolle spielt, kinetisch stark inhibiert.

#### 3.2 Oxidation von Eisen(II) zu Eisen(III)

Die Kinetik der Eisen(II)-Oxidation in wässrigen synthetischen Lösungen war Gegenstand von zahlreichen Untersuchungen (DAVISON & SEED, 1983 und darin zitierte Literatur). Gleichung 3-1 gibt das Geschwindigkeitsgesetz 1. Ordnung der Oxidation von Eisenionen in wässrigen Lösungen bei einem pH-Wert um den Neutralpunkt an.

$$-\frac{d[\text{Fe}^{2+}]}{dt} = k \cdot [\text{Fe}^{2+}] \cdot p\text{O}_2 \cdot (\text{OH}^-)^2 \quad (3-1)$$

[Fe <sup>2+</sup> ]	Eisenkonzentration in mol dm <sup>-3</sup> oder M
pO <sub>2</sub>	Sauerstoffpotenzialdruck in bar
(OH <sup>-</sup> )	Aktivität der Hydroxyl-Ionen in M
k	Geschwindigkeitskonstante in s <sup>-1</sup>

Daraus folgt, dass die zeitliche Änderung der Eisenionenkonzentration eine Funktion der Eisenionenkonzentration selbst, der OH<sup>-</sup>-Konzentration und des Sauerstoffpartialdruckes ist. Die Geschwindigkeitskonstante k kann man experimentell bestimmen, indem man den Sauer-

stoffpartialdruck und den pH-Wert während des gesamten Versuches konstant hält. Gleichung 3-1 reduziert sich somit auf Gleichung 3-2:

$$\left(3 - \frac{d[\text{Fe}^{2+}]_t}{dt} = k_{\text{exp.}} \cdot [\text{Fe}^{2+}]_0 \right) \quad (k_{\text{exp.}} = k \cdot p\text{O}_2 \cdot (\text{OH}^-)^2) \quad (3-2)$$

$[\text{Fe}^{2+}]_0$  Eisenkonzentration zur Zeit  $t = 0$  in M

$[\text{Fe}^{2+}]_t$  gemessene Eisenkonzentration zur Zeit  $t$  in M

$t$  Reaktionszeit in s

$k_{\text{exp.}}$  experimentell bestimmte Geschwindigkeitskonstante in  $\text{M}^{-2} \text{bar}^{-1} \text{s}^{-1}$

Die Reaktionsgeschwindigkeit ist also proportional zur Ausgangskonzentration. Die in der Literatur angegebenen Werte für die experimentell ermittelte Geschwindigkeitskonstante der Eisen(II)-Oxidation für wässrige Lösungen des pH-Wert-Bereiches 6-8 stimmen gut überein und liegen zwischen  $1,5 - 5,0 \times 10^{13} \text{M}^{-2} \text{atm}^{-1} \text{min}^{-1}$ .

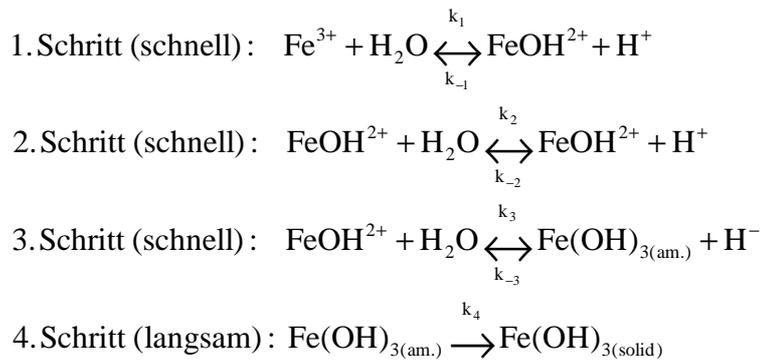
Mit dem integrierten Geschwindigkeitsgesetz (Gleichung 3-3) ist bei Kenntnis der Geschwindigkeitskonstanten  $k_{\text{exp.}}$  die Zeit berechenbar, die notwendig ist, um eine beliebige Eisen(II)-Ausgangskonzentration vollständig zu Eisen(III) zu oxidieren.

$$t = k_{\text{exp.}}^{-1} \cdot \ln([\text{Fe}^{2+}]_0 - [\text{Fe}^{2+}]_t) \quad (3-3)$$

Unter Annahme eines Gleichgewichtes und unter den Bedingungen, wie sie in Neubrandenburg bei einer Slopwasserverpressung vorlagen ( $[\text{Fe(II)}] = 12 \text{ g/l}$ ;  $[\text{O}_2] = 0,6 \text{ g/l}$ ;  $\text{pH} = 6,2$ ) (SEIBT ET AL., 1997), würden demzufolge in 1 Liter destilliertem Wasser in ca. 24 Tagen gerade 1 g Fe(III) gebildet werden.

### 3.3 Fällungsreaktion

Der Prozess der Eisenausfällung, der auch in Bohrungen auftreten kann, wird durch die Oxidation der Eisen(II)-Ionen zu Eisen(III)-Ionen eingeleitet. Danach hydrolysieren die Eisenionen. GRUNDL & DELWICHE (1993) untersuchten die Kinetik der Eisen(III)-hydroxidfällung in Eisen(III)-Chloridlösungen. Zunächst bilden sich kleine Polymere von Eisenhydroxiden, die kugelförmige kolloidale Partikel mit einem Durchmesser von wenigen Nanometern darstellen. Die Stabilität dieser Kolloide ist eine Funktion des Grades der Übersättigung der Ausgangslösung. Bei hoher Übersättigung entstehen viele Kernorte. Das Wachstum erfolgt durch Kondensation von zwei oder mehreren dieser Kerne. Diese Kolloide sind sehr stabil ( $> 2$  Jahre): Die gelösten Eisenhydroxide sind dabei  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3^0$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ ,  $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$ . Bei geringer Ausgangskonzentration werden weniger Ausgangskerne gebildet, so dass vorwiegend Monomere  $\text{Fe}(\text{OH})_3^0$  vorliegen, die durch eine schnelle Koagulation zu absetzfähigen Niederschlägen führen. Der Reaktionsmechanismus stellt sich wie folgt dar (GRUNDL & DELWICHE, 1993):

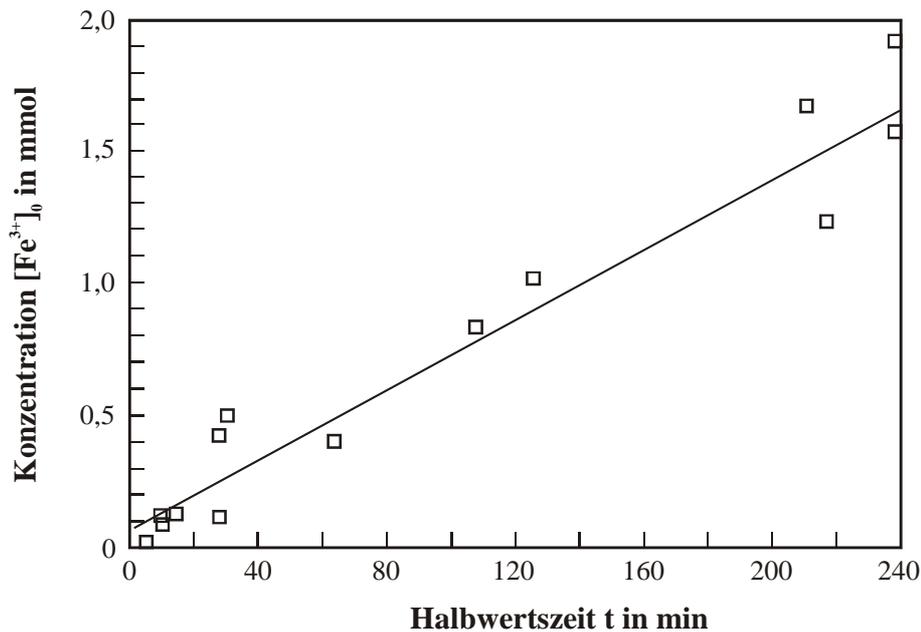


Die drei Hydrolysereaktionen (Schritt 1 bis Schritt 3) erfolgen dabei praktisch sofort, wobei davon ausgegangen werden muß, dass zu jeder Zeit ein Gleichgewicht vorliegt. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist die Fällung von Eisenhydroxid-Feststoff aus den neutralen, gelösten amorphen Eisen(III)-Hydroxid-Spezies. Die Ausfällungsrate entspricht der ersten Ordnung bezüglich  $\text{Fe(OH)}_{3(\text{am.})}$  und ist gekennzeichnet durch eine anfängliche Kristallbildung mit nachfolgendem Kristallwachstum. GRUNDL & DELWICHE (1993) formulierten folgende Geschwindigkeitsgleichung (3-4):

$$-\frac{d[\text{Fe}^{3+}]}{dt} = \frac{d[\text{Fe(OH)}_{3(\text{solid})}]}{dt} = -\frac{d[\text{Fe(OH)}_{3(\text{am.})}]}{dt} = k_4 \cdot [\text{Fe(OH)}_{3(\text{am.})}] \quad (3-4)$$

Die Kristallwachstumsrate verlangsamt sich entsprechend durch die Anwesenheit von Eisen(III)-Ionen (Abbildung 2) und ist weniger abhängig vom Betrag der  $\text{FeOH}^{2+}$ -Ionen in der Lösung. Die Wachstumsrate weist eine Halbwertszeit im Bereich von 5 min (totale Eisenkonzentration = 0,5 mmol = 27,9 mg/l) bis 240 min (totale Eisenkonzentration = 5 mmol = 279 mg/l) auf (GRUNDL & DELWICHE, 1993). Der Einbau von  $\text{Fe}^{3+}$  (und  $\text{FeOH}^{2+}$ ) an aktive Sorptionsplätze oder in die Kristallstruktur hemmt die Ausfällung und lässt vermuten, dass dies die Ursache für stöchiometrisch gemischte und reine kristalline Strukturen frisch gebildeter Eisenhydroxide, die in der Natur beobachtet werden, ist.

Einen inhibierenden Effekt haben sicherlich auch mitgefällte Kationen, die in natürlichen Eisenhydroxiden nachweisbar sind. Von den Hydroxiden können Metallionen eingeschlossen werden, insbesondere solche, die in Wasser hydrolysieren. Zusätzlich hat die Oberfläche der Eisenhydroxide eine hohe Sorptionsaktivität und ist somit in der Lage, Komplexe mit Alkali- und Erdalkalimetallen an der Außenfläche zu bilden. Beispielsweise werden Sulfatanionen ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) und Phosphatanionen ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) an der Eisenhydroxidoberfläche sehr schnell adsorbiert. Die Sorption und die Mitfällung durch feste Eisenhydroxide stellen die Hauptprozesse der Spurenmetalle in natürlichen wässrigen Systemen dar (EVANS, 1989).



**Abbildung 2:** Die Ausgangskonzentration von Eisen(III)-Ionen  $[Fe^{3+}]_0$  beim Start des Kristallwachstums in Abhängigkeit der Halbwertszeit  $t$  (d. h. die Hälfte an  $[Fe^{3+}]_0$  wurde umgesetzt) in  $FeCl_3$ -Lösungen (Daten aus GRUNDL & DELWICHE, 1993)

### 3.4 Einflussgrößen auf die Geschwindigkeitskonstante

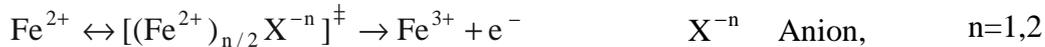
#### Salzgehalt des Fluides

Allgemein hängt die Geschwindigkeitskonstante  $k$  von der Ionenstärke  $I$  der Lösung ab. Dies wird oft als primärer kinetischer Salzeffekt bezeichnet (LOGAN, 1997).

Untersuchungen zur Kinetik der Eisenoxidation in Meerwasserproben ergaben eine geringere Geschwindigkeitskonstante als in unendlich verdünnten wässrigen Lösungen (KESTER ET AL., 1975, MURRAY & GILL, 1978, MILLERO, 1985). Die ermittelten Werte von KESTER ET AL. (1975) für natürliche Meerwässer einer Salinität von ca. 3 ‰ (pH-Wert 8,0) liegen zwischen  $6-10 \times 10^{11} \text{ M}^{-2} \text{ atm}^{-1} \text{ min}^{-1}$ , d. h. die Reaktion ist ca. einhundertmal langsamer als in Wasser oder in Natriumhydrogencarbonat-Lösungen. Anionen wie Chlorid, Hydrogencarbonat oder Sulfat beeinflussen die Rate unterschiedlich stark. LIANG & KESTER (1977) zeigten anhand ihrer Versuche, dass sich die Geschwindigkeit der Eisen(II)-Oxidation in einer Natriumsulfat-Lösung (0,03 molal = 4,3 g/kg Wasser) oder in einer Natriumchlorid-Lösung (0,48 molal = 28 g/kg Wasser) jeweils zu einer Natriumhydrogencarbonat-Lösung (2,3 mmolal = 193 mg/kg Wasser) gegeben, ähnlich der wie sie in Meerwasser beobachtet wurde verringert.

Der Effekt der Ionenstärke auf die Geschwindigkeit der Eisen(II)-Oxidation in Meerwasser lässt sich mit der Theorie des Übergangszustandes TÜZ erklären. Der TÜZ liegen die An-

nahmen zu Grunde, dass auf dem Weg der Reaktion zwischen den Ausgangsprodukten eine Anordnung der beteiligten Atome vorliegt, von der aus die Reaktion spontan weiterverläuft. Diese Kernanordnung wird als Übergangszustand der Reaktion bezeichnet und steht mit den Ausgangsstoffen im Gleichgewicht (LOGAN, 1997). Folgender Reaktionsmechanismus der Eisen(II)-Oxidation in salzhaltigen Lösungen kann angenommen werden:



Eine Änderung der Ionenstärke der Lösung führt zur Änderung der Gleichgewichtskonstanten  $K^{\ddagger}$  des anorganischen Eisenkomplexes, was wiederum die Geschwindigkeitskonstante beeinflusst (LANGEN ET AL., 1997):

$$k_s = k \frac{\gamma_A \gamma_B}{\gamma_{\ddagger}} \quad (3-5)$$

$k_s$  Geschwindigkeitskonstante in s (salinare Lösung)

$k$  Geschwindigkeitskonstante in s (unendlich verdünnte Lösung)

$\gamma_i$  Aktivitätskoeffizienten der Ausgangsstoffe (A=Eisen(II), B=Anion) und des anorganischen Eisenkomplexes  $\ddagger$

Mit der erweiterten DEBYE-HÜCKEL-Gleichung können die Aktivitätskoeffizienten  $\gamma_i$  in Abhängigkeit von der Ionenstärke der Lösungen bis  $I = 1$  hinreichend genau berechnet werden. Folgende Gleichung 3-6 kann für die Geschwindigkeitskonstante  $k_s$  mineralisierter Wässer formuliert werden (LOGAN, 1997):

$$\log k_s = \log k + 1,02 z_A z_B \frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} \quad (3-6)$$

$z$  Ladungszahl der beteiligten Ionen

$I$  Ionenstärke in M

Zur Berechnung der Aktivitätskoeffizienten höher konzentrierter Lösungen ( $I > 1$ ) sind die PITZER-Gleichungen anzuwenden, die mathematisch auch die tatsächlichen Wechselbeziehungen zwischen allen Ionenpaarkombinationen berücksichtigen.

## Organische Substanzen

In sauerstoffhaltigen Wässern mit einem hohen Anteil an organischen Stoffen wurde eine Stabilisierung der Fe(II)-Ionen beobachtet (MORGAN & STUMM, 1964). Diese sind in der Lage mit organischen Substanzen Komplexe zu bilden. Im Allgemeinen wird bei Anwesenheit von organischen Liganden (L) die Geschwindigkeitskonstante der Eisen(II)-Oxidation kleiner.

Untersuchungen von KRISHNAMURTI & HUANG (1991) zeigen dies am Beispiel der Fe(II)-Oxidation in Eisenperchlorat-NaOH Systemen bei verschiedenen Zitronensäurekonzentrationen. Dabei fällt die Oxidationsrate mit steigendem Molverhältnis Zitronensäure/Fe(II)-Ionen. Bei den von ihnen gewählten Bedingungen (pH = 6,00; T = 298,5 K; Lufteintrag = 5 ml/min) beträgt der bestimmte k-Wert ohne Zusatz von Zitronensäure  $41,2 \cdot 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ . Das nach 120 min abgetrennte Ausfällungsprodukt war hauptsächlich Goethit ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), ein

kleiner Anteil Lepidokrokit ( $\gamma$ -FeOOH) wurde nachgewiesen. Dieser erhöhte sich mit steigender Zitronensäurekonzentration und bei gleichzeitiger Abnahme der Reaktionsgeschwindigkeit. Die starke Komplexbildung der Fe(II)-Ionen durch die Zitronensäure hemmt die Eisen(II)-Oxidation und die Bildung sowie die Hydrolyse von Fe(III)-Ionen, so dass bereits bei einem Molverhältnis von 0,1 Zitronensäure/Fe(II)-Ionen keine Ausfällungsprodukte nachweisbar waren.

In den Schichtwässern des Mesozoikums wurde ein Gehalt an organischem Kohlenstoff bis 16 mg/L bestimmt (KÜHN, 1997). Dieser Wert bezieht sich auf eine Probenahme nach den Filtern an der Förderbohrung. Im Vergleich dazu wurden in Wässern, die vor den Filtern beprobt wurden, höhere Werte nachgewiesen. Auch differieren die Gehalte an organischen Kohlenstoffverbindungen in den Tiefenwässern von Lokation zu Lokation erheblich (pers. Mitteilung ROHSTOCK, GTN GmbH). Die derzeitigen Untersuchungen konzentrieren sich auf die Identifizierung der organischen Bestandteile. Erste Ergebnisse weisen auf niedermolekulare Carbonsäuren und Huminstoffe (pers. Mitteilung HOTH, BGR Hannover und LOBER, NORDUM GmbH). Aus der Grundwasseraufbereitung ist bekannt, dass die Huminstoffe auf die Oxidation der Eisen(II)-Ionen hemmend wirken (MUTSCHMANN & STIMMELMAYR, 1991).

In diesem Zusammenhang ist die Arbeit von SANTANA-CASIANO ET AL. (2000) interessant, die die Wirkung verschiedener natürlicher und synthetischer niedermolekularer Aminocarbonsäuren auf die Geschwindigkeitskonstante untersuchten. Die Autoren stellten fest, dass organische Verbindungen sehr unterschiedlich auf die Reaktion der Eisen(II)-Oxidation Einfluss nehmen. Um eine messbare Veränderung der Geschwindigkeitskonstanten zu bewirken, wurde mit einem Überschuss an organischer Komponente in Bezug auf Eisen(II) gearbeitet. Unter diesen Bedingungen sowie gleichbleibendem pH-Wert und Sauerstoffpartialdruck folgt die Geschwindigkeit der Reaktion einer pseudo 1. Ordnung (SANTANA-CASIANO ET AL., 2000):

$$-\frac{d[\text{Fe}^{2+}]_t}{dt} = k_{\text{org}} \cdot [\text{Fe}^{2+}]_0 \quad (3-7)$$

$k_{\text{org}}$  experimentell bestimmte Geschwindigkeitskonstante in  $\text{M}^{-2} \text{bar}^{-1} \text{s}^{-1}$  in Anwesenheit von organischen Verbindungen

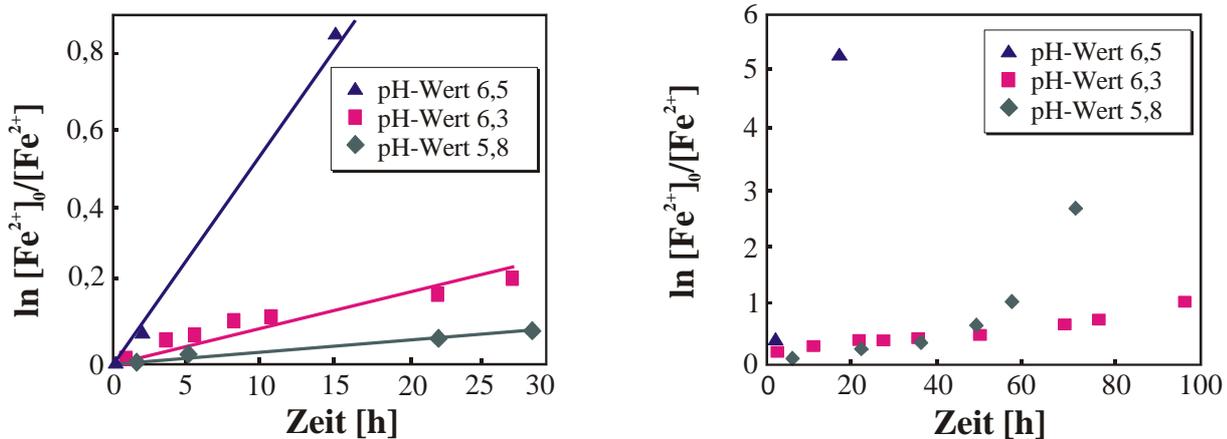
Für alle verwendeten organischen Verbindungen wurde der Umsatz zum Eisen(II)-Komplex, Fe(II)-L (L=Ligand), sowie die Komplexbildungskonstante bestimmt. Hier zeigte sich, dass insbesondere einfache Aminocarbonsäuren wie Alanin und Glutaminsäure nur zu 7,5 % mit Eisen(II) eine Verbindung unter den oben genannten Versuchsbedingungen eingehen. Somit war auch ein Einfluss auf die Geschwindigkeit der Gesamtreaktion nicht nachweisbar. Starke Komplexverbindungen hatten sowohl eine inhibierende als auch eine beschleunigende Wirkung auf die Eisen(II)-Oxidation (SANTANA-CASIANO ET AL., 2000).

## Eisenoxidierende Bakterien

In wässrigen Systemen kann die Oxidation von Eisen(II) zu Eisen(III) neben einer chemischen Reaktion auch das Resultat einer biologischen Aktivität sein. Die Anwesenheit autotropher Bakterien wie *Thiobacillus ferrooxidans* und *Leptospirillum ferrooxidans* führt zur Erhöhung der Geschwindigkeitskonstanten. Die *T. ferrooxidans* bevorzugen Temperaturen bis 30 °C und *L. ferrooxidans* bis 40°C. Das Wachstumsoptimum liegt bei niedrigen pH-Werten (2,2 bzw. 1,6) (Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH). Ihre Wirkung ist allgemein bei der Entstehung der sauren Grubenwässer im Bergbau bekannt. Deshalb wurde die Kinetik der Oxidation von Eisensulfiden (Pyrit und Markasit) mittels Bakterien in sauren Medien vielfach untersucht (u. a. NEMATI & WEBB, 1996; HARVEY & CRUNDWELL, 1997; BREED & HANSFORD, 1999). Vorstellbar ist, dass die Bakterien in den Elektronentransfer zwischen Fe(II) und Sauerstoff eingreifen (PUGH ET AL., 1982).

Von den diesbezüglichen Veröffentlichungen zur Rolle der Bakterien bei der Eisen(II)-oxidation sind die Experimente von DAVID & STEVENSON (1993) interessant, da hier Versuche bei pH-Werten zwischen 5,8 und 6,5 durchgeführt wurden. Gegenstand ihrer Studie waren die oft zu beobachtenden Blockierungen von Brunnen im Grundwasserbereich, der sogenannten Verockerungen. Zur Untermauerung ihrer Hypothese, dass Bakterien eine signifikante Rolle im Bohrschlamm bei der Geschwindigkeit der Eisenoxidation bei niedrigem Sauerstoffpartialdruck spielen, führten sie Versuche mit sterilen Proben und mit Bohrschlamm beimpften Medien durch. Die verwendeten rotbraunen Schlämme aus Bohrfiltern blockierter Bohrungen enthielten bewegliche Populationen an nicht näher bestimmten Mikroorganismen unterschiedlicher Formen (Kokken bis spiralförmig gedrehte Stäbchen). Die gewählten Versuchsbedingungen sollten dabei die Situation am Filterrohr widerspiegeln. Die synthetisch hergestellten Lösungen enthielten 15 ppm Eisen(II) und wenig gelöste Fremdionen (2 ppm  $\text{NH}_4^+$ , 1 ppm  $\text{PO}_4^{3-}$ , 0,5 ppm  $\text{Mg}^{2+}$ , 0,25 ppm  $\text{Ca}^{2+}$ ). In die sauerstofffreien Fluide wurden 5 ml/min eines sauerstoffhaltigen (1 %  $\text{O}_2$ ) Stickstoff-Kohlenstoffdioxid-Gasgemisches eingeleitet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Geschwindigkeit der Eisen(II)-oxidation in Gegenwart des Bohrschlammes sich gegenüber den sterilen Proben erhöht (s. Abbildung 3).

Die unter sterilen Bedingungen durchgeführten Eisen(II)-Oxidationen folgen der 1. Ordnung bezüglich  $\text{Fe}^{2+}$  innerhalb des Beobachtungszeitraums (30 h). Die Ergebnisse der Versuche mit den Bohrschlämmen weisen in der Anfangsphase (bis ca. 40 h) auch eine Reaktion 1. Ordnung auf. Danach erfolgt eine signifikante Erhöhung der Geschwindigkeit der Oxidationsreaktion. Offensichtlich setzt die biotische Oxidation von Eisen(II) zu Eisen(III) erst dann ein, wenn die Mikroorganismen sich ausreichend vermehrt haben (DAVID & STEVENSON, 1993). Bei niedrigeren pH-Werten geht dieser Wachstumsprozess schneller vonstatten. Somit ist es möglich, beide Reaktionsraten (abiotische und biotischen Oxidation) voneinander zu trennen (DAVID & STEVENSON, 1993).



**Abbildung 3:** Im linken Diagramm sind die Daten von DAVID & STEVENSON (1993) bei der sterilen Eisen(II)-Oxidation bei unterschiedlichen pH-Werten und im rechten die Ergebnisse entsprechender Versuche in Anwesenheit von Mikroorganismen aus Grundwasserbohrungen dargestellt

Für die Gesamtreaktion ergibt sich durch Erweiterung der Gleichung (3-2) durch die biotische Oxidation folgende Beziehung:

$$-\frac{d[\text{Fe}^{2+}]}{dt} = k_{\text{exp.}} \cdot [\text{Fe}^{2+}]_0 + k_{\text{bio}} \cdot [\text{Fe}^{2+}]_1 \quad (3-8)$$

$k_{\text{bio}}$  Geschwindigkeitskonstante in  $\text{M}^{-2} \text{bar}^{-1} \text{s}^{-1}$  der Eisen(II)-Oxidation, durch Mikroorganismen beeinflusst

$[\text{Fe}^{2+}]_1$  Eisenkonzentration in M nach Beendigung der abiotischen Oxidation

Dass Mikroorganismen auch unter extremen Bedingungen (hohe Temperatur, Salzgehalt und Druck) lebensfähig sind, wurde berichtet. Isoliert wurden z. B. thermophile Bakterien aus verschiedenen Ölbohrungen (MAGOT, 1996). Auch in den bislang geothermisch genutzten mesozoischen Tiefenwässern wurden Mikroorganismen nachgewiesen, die sich eng an die Aquiferbedingungen adaptiert haben (autochthone Mikroorganismen). Nach einer 4-wöchigen anaeroben Kultivierung dieser Bakterien in original Thermalwasserlösungen (Salinitäten bis 200 g/l) unter Zugabe von C-, N- und P-Quellen bei ca. 90°C wurden eisenhaltige Fällungsprodukte nachgewiesen (KÖHLER ET AL., 1997). Inwieweit diese Mikroorganismen auch unter oxidierenden Bedingungen lebensfähig sind, wurde nicht untersucht. Allgemein sind jedoch anaerobe Keime noch bei niedrigen Sauerstoffkonzentrationen (bis ca. 0,5 ppm) aktiv und produktiv (pers. Mitteilung KÖHLER, URST GmbH Greifswald).

## Sediment

Die Oxidation von Fe(II)-Ionen, welche an Feststoffoberflächen (einschließlich Fe(OH)<sub>3</sub>, was während der Reaktion gebildet wurde) adsorbiert sind, erfolgt viel schneller als von Fe(II)-Ionen in Lösung.

TUMARA ET AL. (1976) untersuchten die Oxidation von Eisen(II) in Lösungen bei verschiedenen pH-Werten unter Zugabe variierender Gehalte an Fe(OH)<sub>3</sub>. Unter Berücksichtigung der adsorbierten Eisen(II)-Ionen  $[\text{Fe}^{2+}]_{\text{ads}}$  an Fe(OH)<sub>3</sub> ergibt sich aus Gleichung 3-2 folgende Beziehung 3-9:

$$-\frac{d[\text{Fe}^{2+}]}{dt} = k_{\text{exp.}} \cdot [\text{Fe}^{2+}]_0 + k_{\text{solid}} \cdot [\text{Fe}^{2+}]_{\text{ads.}} \quad (3-9)$$

$k_{\text{solid}}$  Geschwindigkeitskonstante der Eisen(II)-Oxidation an einer Feststoffoberfläche in  $\text{M}^{-2} \text{bar}^{-1} \text{s}^{-1}$

$[\text{Fe}^{2+}]_{\text{ads.}}$  Eisenkonzentration an der Feststoffoberfläche adsorbiert in M

AHMAD & NYE (1990) und KIRK ET AL. (1990 und 1994) untersuchten die Oxidation von Eisen(II) bei Anwesenheit eines Feststoffes (Lehmböden von Reisanbaugebieten), der im reduzierten Zustand in einem offenen System vorlag. Die Ergebnisse ihrer Experimente zeigen, dass die Reaktionsgeschwindigkeit der Oxidation der adsorbierten Eisen(II)-Ionen der 1. Ordnung folgt. In einem pH-Bereich von 4,75-6,5 ist sie nahezu vom pH-Wert unabhängig. Allerdings bestimmt er die Verteilung von Eisen(II)-Ionen zwischen Feststoff und Lösung. Bei niedrigen pH-Werten nehmen H<sup>+</sup>-Ionen die Sorptionsplätze von Fe<sup>2+</sup> ein, so dass sich das Verhältnis zu Gunsten der in der Lösung befindlichen Eisen(II)-Ionen verschiebt. Beobachtet wurde, dass die Reaktion langsamer verlief, wenn nur Eisen(III)-Hydroxid ohne Feststoff in der Lösung vorhanden war. Hier ist die Reaktionsrate der Eisen(II)-Oxidation umgekehrt proportional zur H<sup>+</sup>-Ionen-Konzentration. Wichtig bei der Vorhersage der Umsetzung der Eisen(II)-Ionen in einem Boden ist, dass bei der Ermittlung der Reaktionsgeschwindigkeit die Versuche in mit Feststoff gefüllten Kolonnen und nicht in Suspensionen durchgeführt werden. Letztere Versuchsanordnung würde nicht die realen Verhältnisse widerspiegeln, da hier die Oxidationsrate viel höher liegen (KIRK ET AL., 1994). Die Autoren schlussfolgerten daraus, dass die Eisen(II)-Oxidation an der Feststoffoberfläche durch Diffusion von Sauerstoff gegenüber der Adsorption kontrolliert wird.

## 4 Fällungsprodukte

Welche festen Eisenoxidationsprodukte gebildet werden und in welchem Verhältnis diese zueinander vorliegen, hängt vom pH-Wert der Lösung, der Temperatur, den beteiligten Ionen, den organischen Bestandteilen und vom Oxidationsmittel ab.

Die langsame Oxidation von Eisen(II)-Ionen enthaltende Lösungen durch Lufteintrag ergibt verschiedene Produkte: Goethit, Lepidokrokit, Hämatit und Magnetit. Wird Wasserstoffperoxid als Oxidationsmittel verwendet, führt dies zur Ausfällung von Feroxyhit (FRINI &

MAAOUI, 1997 und darin zitierte Literatur). Tabelle 3 enthält eine Auflistung fester Oxidationsprodukte und deren Eigenschaften.

Verbindung	Molekulargewicht g/mol	Farbe	Dichte g/cm <sup>3</sup>	Bemerkungen
$\alpha$ -FeOOH (Goethit)	88,86	gelb bis schwarzbraun	4,28	langsame Oxidation durch Lufteintrag
$\gamma$ -FeOOH (Lepidokrokit)	88,86	gelb bis rubinrot	4,09	langsame Oxidation durch Lufteintrag
$\delta$ -FeOOH (Feroxyhit)	88,86	gelb		schnelle Oxidation z. B. durch Wasserstoffperoxid
$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Hämatit)	159,70	rot, metallisch schwarzgrau	4,9-5,3	langsame Oxidation durch Lufteintrag, gut löslich in HF
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (Magnetit)	231,55	schwarz bis blauschwarz	5,2	langsame Oxidation durch Lufteintrag, magnetisch relativ gut in HF löslich

**Tabelle 3:** Eigenschaften fester Fällungsprodukte

SCHWERTMANN (1999) berichtet, dass die Entstehung von verschiedenen Eisenfällungsprodukten in Grubenwässern ausschließlich vom pH-Wert und nicht von den eisenoxidierenden Bakterien bestimmt wird. Zwischen pH 2,5 und 4,0 wurde ein sulfathaltiges Eisenoxyhydroxid, das sogenannte Schwertmannit, identifiziert. Bei pH-Werten über 4,0 enthalten die „Ockerschlämme“ die bekannten Oxide Goethit und Ferrihydrit. In Laborversuchen bei Raumtemperatur fallen bei einem pH von 6-8 Goethit und Lepidokrokit aus, über 8 entsteht Magnetit (SCHWERTMANN & CORNELL, 1991).

FRINI & MAAOUI (1997) synthetisierten Goethit durch Oxidation von Eisen(II) mit Luftsauerstoff (1 l/min) in wässrigen sauren Lösungen (pH = 1-5) bei t = 70°C mit unterschiedlichen Gehalten an Salzen (Natriumsulfat, Ammoniumsulfat, Natriumchlorid und Ammoniumchlorid; c = 0,1 mol bis 1 mol), um den Einfluss von Anionen und Kationen auf die Reaktion zu untersuchen. Das Reaktionsprodukt ist Goethit, wenn nur Sulfat-Ionen in der Lösung vorliegen. Ein Gemisch aus Goethit und Lepidokrokit entsteht bei Zugabe von Chlorid-Ionen. Die Oxidationsrate verringert sich bei Erhöhung der Salzkonzentration. Unter den gleichen Versuchsbedingungen (pH-Wert, Temperatur, Luftsauerstoff) wurde in Anwesenheit von 0,1 mol Natriumnitrat (Oxidationsmittel) bei pH = 4, t = 70 °C ausschließlich Magnetit als Reaktionsprodukt erhalten und ein Ansteigen der Reaktionsgeschwindigkeit beobachtet (FRINI & MAAOUI, 1998).

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kinetik der Eisen(II)-Oxidation in wässrigen neutralen Systemen sowie in Lösungen, deren Salzgehalt ungefähr dem des Meerwassers entspricht, war Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Alle Ergebnisse bestätigen die Gültigkeit des Geschwindigkeitsgesetzes 1. Ordnung in Bezug auf Eisen(II).

Bei einem pH-Wert um den Neutralpunkt und konstantem Sauerstoffpartialdruck ist die Geschwindigkeitskonstante bestimmt worden. Auch der Einfluss gelöster Ionen auf die Geschwindigkeitskonstante der Reaktion ist bekannt. Über die Ermittlung der Aktivitätskoeffizienten der an der Reaktion beteiligten Ionen und des aktivierten anorganischen Eisenkomplexes kann die Geschwindigkeitskonstante aus der für unendlich verdünnte Lösungen berechnet werden, was für Ionenstärken bis 1 ohne weiteres möglich ist. Für ein hoch-mineralisiertes Wasser, wie es in der Bohrung Groß Schönebeck E GrSk 3/90 erwartet wird, dürfte sich dies aufgrund der zu beachtenden Wechselwirkungen zwischen den in der Lösung vorliegenden hohen Anzahl an Ionen als schwierig erweisen.

Anhand der Literaturdaten ist ersichtlich, dass eine Vielzahl von Faktoren auf die Reaktion Einfluss haben können. In einem natürlichen System kompliziert sich das Verständnis und die Erfassung der Rolle einzelner Parameter. Neben organischen Bestandteilen in den Wässern sowie der möglichen Existenz aktiver Mikroorganismen spielt hier die Feststoffmatrix eine entscheidende Rolle. In Auswertung der Literaturdaten muss unterschieden werden, ob die Eisen(II)-Oxidation in einer Feststoffsuspension oder in einer festen Gesteinsmatrix abläuft.

Für die ablaufenden Vorgänge bei der Nutzung der hochsalinaren Wässer des Buntsandsteins werden zunächst Experimente zur Eisen(II)-Oxidation in Lösung durchgeführt werden, um den Einfluss relevanter Parameter auf die Reaktion zu erfassen. Der Einfluss des Sediments auf die Reaktionsgeschwindigkeit kann anhand von Versuchen in Sandsteinsuspensionen unterschiedlicher Kornfraktionen von Originalkernen ermittelt werden. Da hier die Oxidationsrate größer als in Säulenversuchen sein soll, würde dies im Fall der Reinjektion geothermisch genutzter Wässer den ‚worst case‘ im bohrlochnahen Bereich beschreiben.

## 6 Literatur

- AHMAD, A.R. & NYE, P.H. (1990): Coupled diffusion and oxidation of ferrous iron in soils: I. Kinetic of oxygenation of ferrous iron in soil suspension. *J. of Soil Science*, **41**: 395-409
- BREED, A.W. & HANSFORD, G.S. (1999): Effect of pH on ferrous-iron oxidation kinetics of *Leptospirillum ferrooxidans* in continuous culture. *Biochem. Eng. J.*, **3**: 193-201
- BRENNAN, E.W. & LINDSAY, W.L. (1998): Reduction and oxidation effect on the solubility and transformation of iron oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **62**: 930-937
- DAVID, E.R. & STEVENSON, W.L. (1995): The role of bacteria in well clogging. *Wat. Res.*, **29** (1): 35-369

- DAVISON, W. & SEED, G. (1983): The kinetics of oxidation of ferrous iron in synthetic and natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**: 67-69
- Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH-DSMZ, Braunschweig, <http://www.dsmz.de>.
- EGGERT, B. (1976): Abschlussbericht der TB E Grueneberg 2/74.- Erdöl-Erdgas Stendal, unveröff.
- EVANS, L.J. (1989): Chemistry of metal retention by Soil. *Environ. Sci. Technol.*, **23**: pp. 1046-1056
- FALCKE, H. (1990): Untersuchungen zur Kinetik der Oxidation von zweiwertigem Eisen durch Ozon in wässriger Lösung. Diss., 201 S.
- FRINI, A. & EL MAAOUI, V (1997) Kinetics of the formation of goethite in the presence of sulfates and chlorides of monovalent cations. *J. Colloid Interface Sci.*, **190**: 269-277
- FRINI, A. & MAAOUI, M. EL (1998): Influence of nitrate and perchlorate anions on the kinetics of the goethite formation. *J. Colloid Interface Sci.*, **208**: 373-378
- GOHLKE, W. & UNGETHÜM, H. (1975): Zur Messung des Redoxpotenzials im Grundwasser, *Zeitschrift für angewandte Geologie*, 21 (4), S. 180-184, 1975.
- GRUNDL, T. & DELWICHE, J. (1993): Kinetics of ferric oxyhydroxide precipitation. *J. Contaminant Hydrology*, **14**: 71-97
- HAMANN, M & KUHLEE, R. (1991): Geologisch-technisch-ökonomischer Abschlußbericht der Bohrung E Groß Schönebeck 3/90. Erdöl-Erdgas Gommern GmbH, (unveröff. Ber.)
- HARVEY, P.I. & CRUNDWELL, F.K. (1997): Growth of *Thiobacillus ferrooxidans*: a novel experimental design for batch growth and bacterial leaching studies. *Appl. Environ. Microbiol.*, **63**: 2586-2592
- JANECKY, D.R., SEYFRIED, W.E. JR. & BERNDT, M.E. (1986): Fifth International Symposium on Water-Rock Interaction. Extended Abstracts: 282-285
- KIRK, G.J.D., AHMED, A.R. & NYE, P.H. (1990): Coupled diffusion and oxidation of ferrous iron in soils: II. A model of diffusion and reaction of O<sub>2</sub>, Fe<sup>2+</sup>, H<sup>+</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in soils and a sensitivity analysis of the model. *J. of Soil Science*, **41**: 411-431
- KIRK, G.J.D. & SOLIVAS, J L. (1994): Coupled diffusion and oxidation of ferrous iron in soils: III. Further development of the model and experimental testing. *J. of Soil Science*, **45**: 369-378
- KÖHLER, M., BOCHNIG, S., VÖLSGEN, F. & HOFMANN, K. (1997): Mikrobiologie der Thermalwässer und Untersuchungsmethoden zur geomikrobiologischen Charakterisierung der Thermalwässer. In: HUENGES, E., HOTH, P., SEIBT, A. & KELLNER, T. (eds.): Geothermie. Report 97-1 Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrogeothermaler

- Ressourcen in Norddeutschland, GeoForschungsZentrum Potsdam, Scientific Technical Report, **STR97/15**: 95-108
- KÖLLING, M. (1986): Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung des Redoxpotenzials natürlicher Wässer. *Meyniana* **38**: 1-19
- KÜHN, M. (1997): Geochemische Folgereaktionen bei der hydrothermalen Energiegewinnung. Diss., Universität Bremen: 129 S.
- KRISHNAMURTI, G. S. R. & HUANG, P. M. (1991): Influence of citrate on the kinetics of Fe(II) oxidation and the formation of iron oxyhydroxides. In: *Clays-and-Clay-Minerals*, **39 (1)**: 28-34
- LANGEN VON, P.J., KENNETH, S.J., KENNETH, H.C. & VIRGINIA, A.E. (1997): Oxidation kinetic of manganese(II) in seawater at nanomolar concentrations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61 (23)**: 4945-4954
- LOGAN, S.R.(1997): Grundlagen der chemischen Kinetik. Wiley-VCH, Weinheim: 282 S.
- LIANG, Y.J. & KESTER, D.R. (1977): Kinetics of ferrous oxygenation in aqueous media. *Am. Geophys. Union*, **58 (12)**: 1168
- LUTHER III, G.W., SHELLENBARGER, P.A. & BRENDEN, P.J. (1996): Dissolved organic Fe(III) and Fe(II) complexes in salt marsh porewaters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60 (6)**: 951-960
- MAGOT, M (1996): Similar bacteria in remote oil fields. *Nature*, **379 (6567)**: 681
- MILLERO, F.J. (1985): The effect of ionic interactions on the oxidation of metals in natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**: 547-553
- MORGAN, J.J. & STUMM, W. (1964): The role of multivalent metal oxides in limnological transformations, as exemplified by iron and manganese. In: *Adv. Water Pollution Res.*, **1**: 103-131
- MUTSCHMANN, J & STIMMELMAYR, F. (1991): Taschenbuch der Wasserversorgung. 10. völlig überarb. und aktualisierte Aufl., Franck-Kosmos, Stuttgart, S.180
- NEMATI, M. & WEBB, C. (1996): Effect of ferrous iron concentration on the catalytic activity of immobilized cells of *Thiobacillus ferrooxidans*. *Appl. Microbiol. Biotech.*, **46**: 250-255
- PEHKONEN, S. (1995): Determination of the oxidation states of iron in natural waters; a review. In: *Analyst (London), Chem. Soc.*, **120 (11)**: 2655-2663
- PUGH, C.E., HOSSNER, L.R. & DIXON, J.B. (1984): Oxidation rate of iron sulfides as affected by surface area, morphology, oxygen concentration, and autotrophic bacteria. *Soil Science*, **137, 5**: 309-314
- RIEDEL, G.-R. (1977): Abschlussbericht der regionalen Suchbohrung TB E Grueneberg 3/76. Erdöl Ergas Stendal, unveröff.

- ROEKENS, E.J. & VAN-GRIEKEN, I.E. (1983): Kinetics of iron (II) oxidation in seawater of various pH. *Marine Chem.* **13(3)**: 195-202
- SANTANA-CASIANO, J.M., GONZALEZ-DAVILA, M., RODRIGUEZ, M.J. & MILLERO, F.J. (2000): *Marine Chem.*, **70**: 211-222
- SCHWERTMANN, U. (1999): Giftfänger im Bergbauabraum. *Mitteilungen der TU München*, **4**
- SCHWERTMANN, U. & CORNELL, R.M. (1991): Iron oxides in the laboratory: Preparation and characterization. VCH, Weinheim/New York/Basel/Cambridge, zitiert in: FRINI, A. & MAAOUI, M. (1997)
- SEIBT, A., NAUMANN, D. & HOTH, P. (1999): Lösung und Entlösung von Thermalwassergasen – Konsequenzen für den Anlagenbetrieb. In: SCHALLENBERG, K., HUENGES, E., ERBAS, K. & MENZEL, H. (eds.): Geothermisches Heizwerk Neustadt-Glewe: Zustands- und Stoffparameter, Prozeßmodellierungen, Betriebserfahrungen und Emissionsbilanzen. Geothermie Report 99-1, GeoForschungsZentrum Potsdam, Scientific Technical Report, **STR99/04**: 63-86
- SEIBT, A. & HOTH, P. (1997): Untersuchungen im Thermalwasserkreislauf. In: HUENGES, E., HOTH, P., SEIBT, A. & KELLNER, T. (eds.): Geothermie. Report 97-1 Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen in Norddeutschland, GeoForschungsZentrum Potsdam, Scientific Technical Report, **STR97/15**: 116-133
- SMITH, C.F., CROWE, C.W. & NOLON, T.J. (1969): Secondary Deposition of Iron Compounds Following Acidizing Treatments. *J. of Petroleum, Tech.*: 1121-1129
- VOIGT, H.-J. (1989): Hydrogeochemie. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1.Auflage, S.69

# Gas monitoring, fluid flux and fluid sampling at well GPK-2 (Soultz-sous-Forêts, France) – First results from the 5000 m production test

*Dirk Naumann, Martin Zimmer, Jörg Erzinger and Thomas Wiersberg, GeoForschungsZentrum Potsdam, Section 4.2,*

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>73</b>
<b>2</b>	<b>Set up and operation of monitoring equipment.....</b>	<b>73</b>
<b>3</b>	<b>Results and discussion.....</b>	<b>75</b>
<b>4</b>	<b>References: .....</b>	<b>83</b>

## Abstract

Water and gas fluxes as well as gas composition were monitored during a production test performed at the GPK-2 well in Soultz-sous-Forêts, France (November, 12-30, 1999). A quadrupole gas mass-spectrometer provided gas analyses (H<sub>2</sub>, He, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, Ar, CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>) at one minute intervals. Samples were taken from the gas separator and from the casing. The measurements show that contamination of the brine by drilling mud and borehole fluid fill diminished over time. Variations in pumping rates were reflected by varying gas composition. N<sub>2</sub> is estimated to begin degassing at a depth of 20 m below the water level. CO<sub>2</sub> and trace gases in the casing were stripped of by the degassing nitrogen. We estimate the water column above the submersible pump to be 20 – 15 m high.



## 1 Introduction

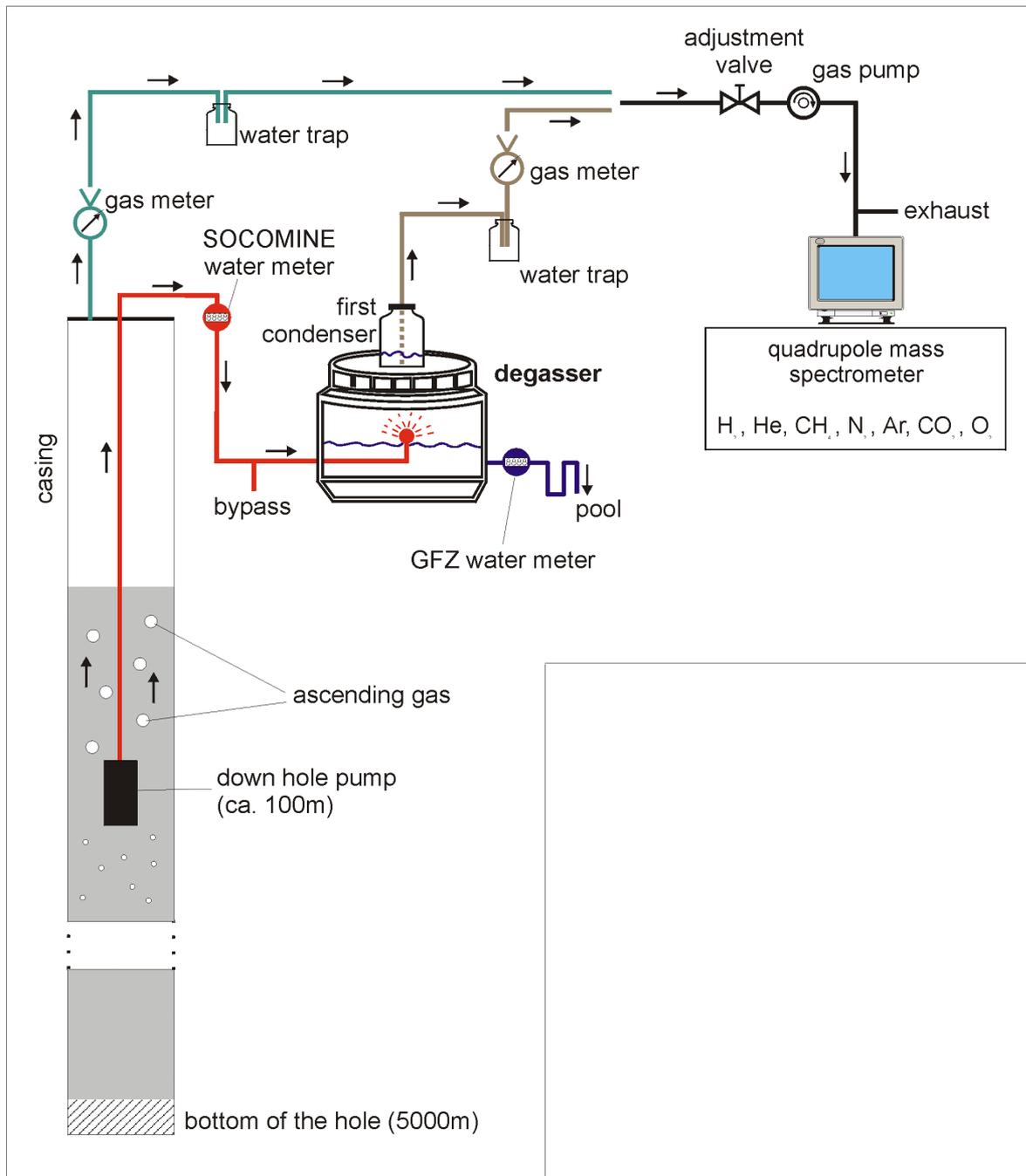
The investigation of the chemistry of geothermal brines is essential to evaluate the exploitation potential of geothermal energy resources. Here, the concentration and composition of gases dissolved in the brine is an important parameter. For example, decreasing pressure causes degassing of the brine which is dangerous if combustible gases are released. Degassing may also lead to serious technical problems due to the formation of two-phase fluids and the precipitation of solid matter and scaling (e.g. STEFÁNSSON, 1997; COLLINS, 1975; SCHÖN & ROCKEL, 1991, GARAGUNIS, 1980).

During a production test in November 1999, scientists from the GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) in cooperation with SOCOMINE monitored the water and gas flux as well as the gas composition of brine from 5000 m depth in the GPK-2 well in Soultz-sous-Forêts, France. For details on the hydraulic evaluation of the production test see WEIDLER & JUNG (2000).

## 2 Set up and operation of monitoring equipment

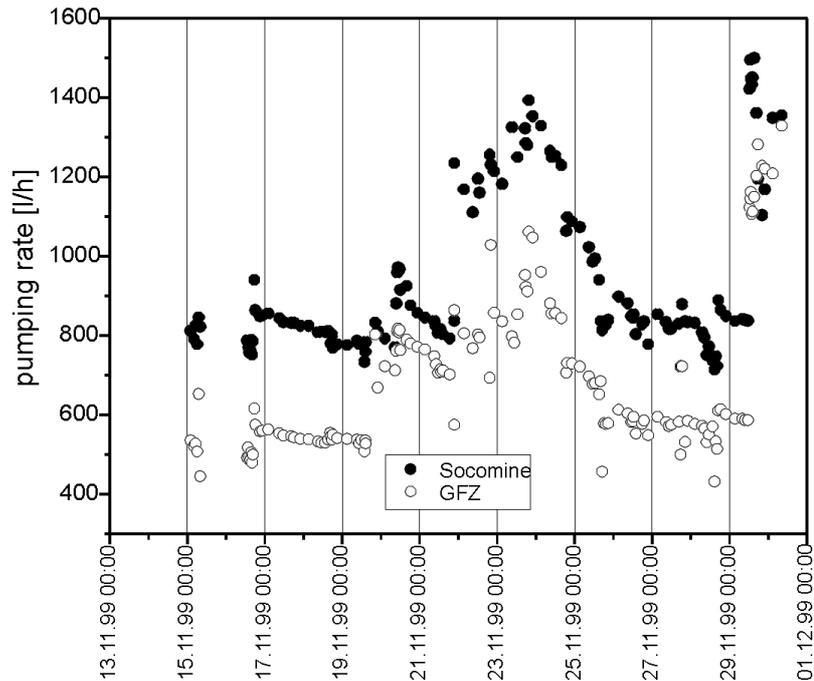
The monitoring equipment was set up and optimized on 11<sup>th</sup> November 1999. Monitoring started on November 12<sup>th</sup> and was completed on November 30<sup>th</sup>. The monitoring system Figure 1 is composed of two units: (1) a gas separator including water traps, gas meters, a bypass pipe, down-hole assembly, and (2) the gas analyzer system consisting mainly of a portable quadrupole gas mass spectrometer (QMS, OmniStar™ from Pfeiffer Vacuum Technology). The brine was pumped via the bypass line into the gas separator from where the liberated gas was lead to the mass spectrometer. Alternatively gases liberated in the casing were pumped directly to the mass spectrometer. Flow meters monitored the pumped brine flow, the accumulative brine volume as well as the gas flows and volumes. As only one mass spectrometer was available the gas concentrations of the two sources were measured alternately. The gas was analyzed for H<sub>2</sub>, He, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, Ar, CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> at intervals of one minute. For details of the analytical procedure see NAUMANN (2000).

The brine flow recorded by GFZ scientists at the by-pass line differed significantly from that measured by SOCOMINE. The GFZ flow meter was installed behind the gas separator and, thus, measured the amount of degassed water, whereas SOCOMINE had installed their water flow meter before the degasser (Figure 1) and, thus, measured a foamy two-phase water-gas mixture resulting in an unrealistic high flow rate. Data from both meters are shown in Figure 2. For calculating the water-gas ratio we used the data from the GFZ water flow meter.



**Figure 1:** Sketch of the gas monitoring system at GPK2

SOCOMINE personnel confirmed that up to the 24<sup>th</sup> of November the top flange of the casing was not gas-tight. The “true” gas contents and gas compositions could only be accurately calculated after the casing had been properly sealed.

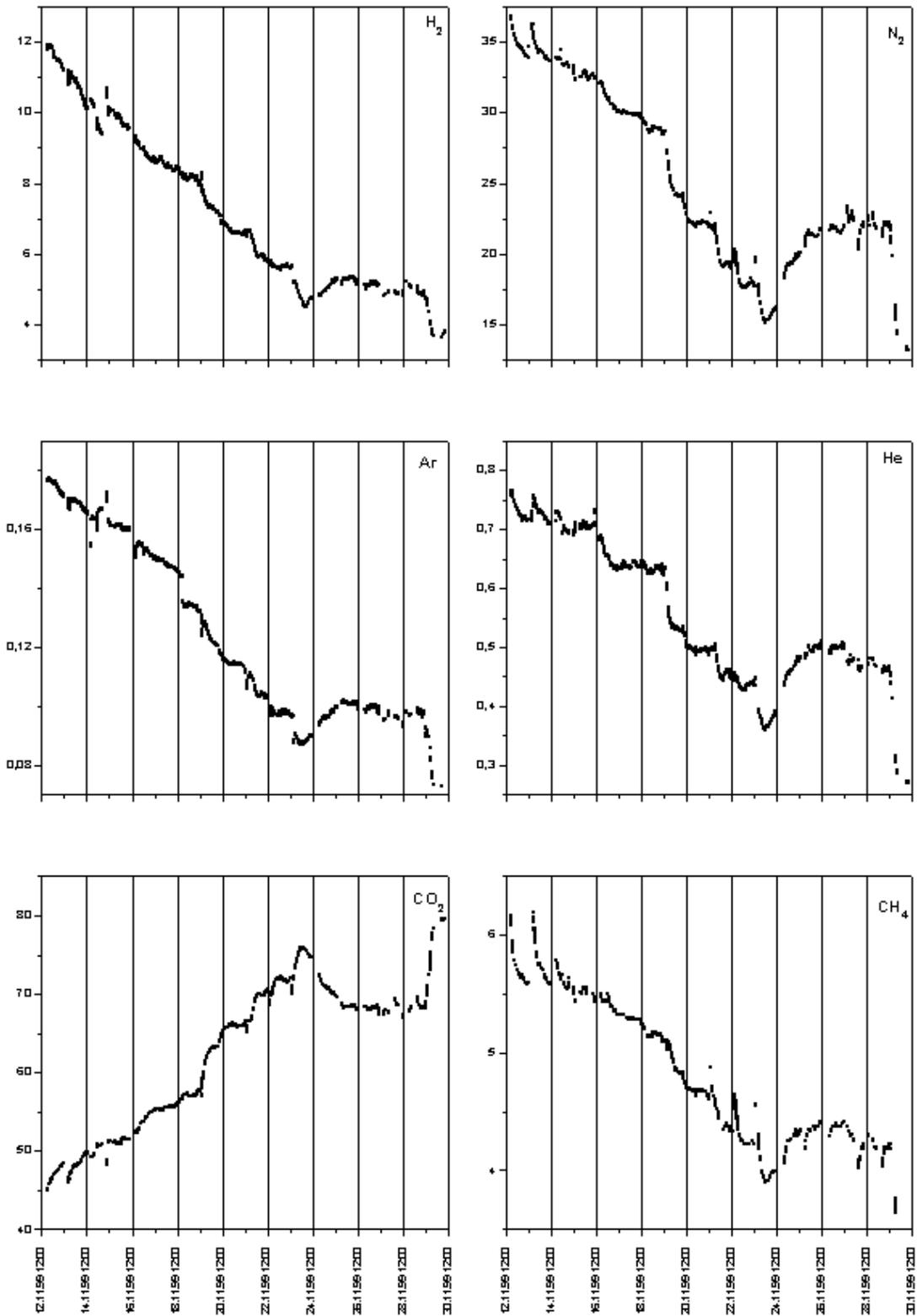


*Figure 2: Pumping rates measured with the water meters of SOCOMINE and GFZ*

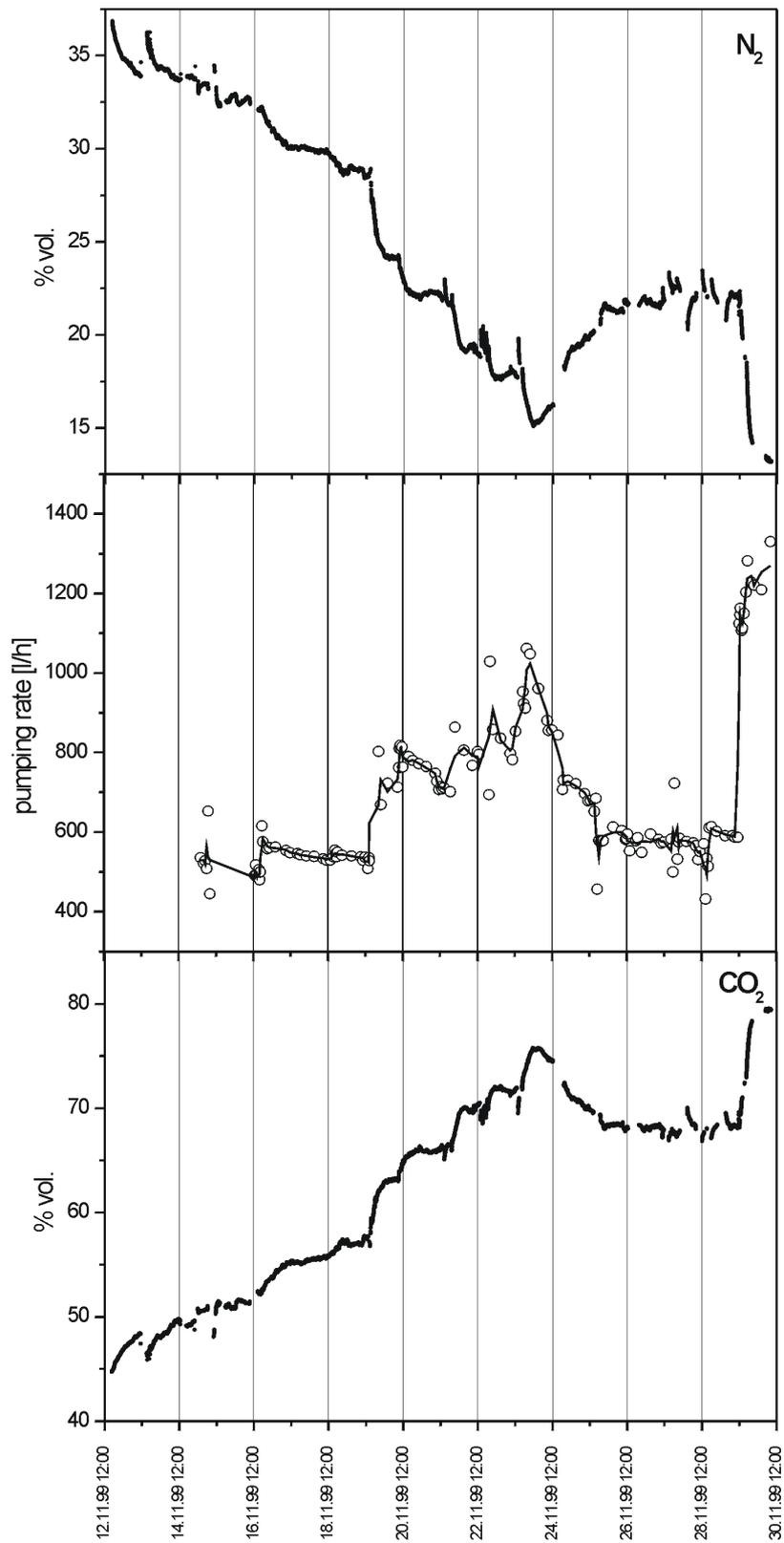
### 3 Results and discussion

Figure 3 shows the concentrations of  $H_2$ ,  $N_2$ , Ar, He,  $CO_2$  and  $CH_4$  versus time in the pumped brines degassed at the surface. To correct the measurements for contamination by air, we realistically assumed that there is nearly no gaseous oxygen dissolved in the formation brine (e.g. SEIBT & HOTH, 1997). The interpretation of the  $H_2$  values has to be careful. Thermal decomposition of hydrocarbons and traces of water vapor produces significant amounts of hydrogen ions during the ionization process in the mass spectrometer's ion source (BACH & ERZINGER, 1995). In addition to the natural occurrence of hydrogen in deep seated crustal fluids, hydrogen may also be produced during a chemical reaction of the hot brines with the iron casing material. Therefore the  $H_2$  values comprise a mixture from several sources and most probably do not represent only brine.

Firstly, the gas concentration versus time plots in Figure 3 can be explained by a decrease in contamination of gas-rich formation brine by gas-poor drilling mud and aqueous borehole fill. The borehole fluids were gradually replaced by formation brines pumped from the open section at the bottom of the well. Secondly, variable pumping rates strongly influenced the gas composition. This behavior is displayed in Figure 4, which shows the pumping rate as well as  $N_2$  and  $CO_2$  concentrations versus time. The pumping rate and  $CO_2$  exhibit a positive correlation, whereas  $N_2$  correlates negatively. The higher the pumping rate the lower the water level in the borehole and the resulting water pressure at the submersible pump become. Because the solubility of  $N_2$  (as well as  $H_2$ , Ar, He,  $CH_4$ ) in water is significantly lower than that of  $CO_2$ , the  $CO_2/N_2$  ratio of the dissolved gas phase in the brine increases with decreasing pressure. The gases in the open space of the casing, between water level and well head, have a complementary composition (Table 1).



**Figure 3:** Real-time analyses of H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar, He, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> at the gas separator versus time (% vol.)



**Figure 4:** Real-time analyses of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> (% vol.) at the gas separator and pumping rate versus time. The line in the central diagram represents a smoothing line calculated by moving window averaging with  $N = 3$

Component	Degasser (vol.-%)	Casing (vol.-%)	Total (i.e. 87.5 % from the degasser and 12.5 % from the casing)
CO <sub>2</sub>	65-70	19-22	62
N <sub>2</sub>	19-25	60-63	27
H <sub>2</sub>	4.5-6.5	9.0-12.0	6
CH <sub>4</sub>	4.0-5.5	6.0-8.0	5
He	0.45-0.60	1.3-1.9	0.65
Ar	0.05-0.15	0.15-0.25	0.15

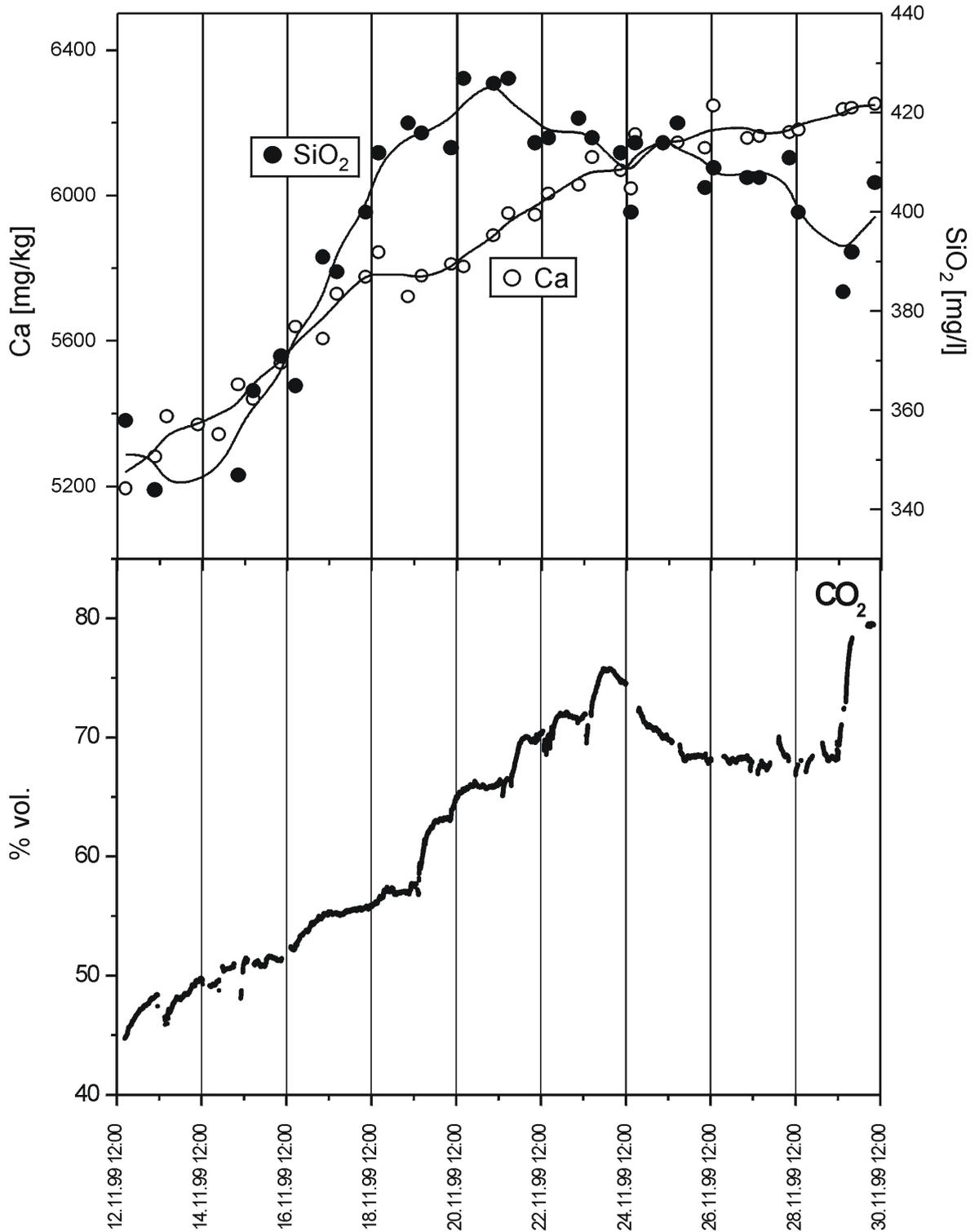
**Table 1:** Composition of gases from the gas separator (degasser) and the casing during the period November 25 at 6 p.m. until November 29, 1999 at 11 a.m.. The flow rates were: brine 540-600 l/h,  $gas_{degasser}$  140 l/h,  $gas_{casing}$  20 l/h

We conclude that the continuous increase in CO<sub>2</sub> and dissolved Ca and SiO<sub>2</sub> concentrations up to 21<sup>st</sup> November (Figure 5) is due to decreasing dilution of the aqueous borehole fill as the “5000 m” brine successively replaced the borehole fluid.

A decrease in dissolved SiO<sub>2</sub> was observed after November 21<sup>st</sup> when the pumping rate increased causing the pressure to diminish and a larger fraction of CO<sub>2</sub> to be liberated into the casing. Hereby the carbonate-bicarbonate equilibrium in the brine was disturbed leading to silica scaling. Eight days later (November 29<sup>th</sup>), the pumping rate was increased again inducing an even stronger silica scaling and thus a further drop in dissolved SiO<sub>2</sub>. A reduction of the pumping rate on November 24<sup>th</sup> caused a prompt increase of dissolved SiO<sub>2</sub>.

Figure 6 shows the water-gas ratio measured at the gas separator together with the pumping rate versus time. At low fluid flow rates the water-gas ratio is smaller, whereas at higher pumping rates (low pressure at the submersible pump) less gas was dissolved in the brine resulting in a higher water-gas ratio at the gas separator. Up to November 24<sup>th</sup>, most of the released gas escaped from the casing because of leakage at the well head. Thus the amount and composition of the gas released into the casing could only be determined after the casing was properly sealed.

Figure 7 depicts the gas flux data from the casing and the brine pumping rate versus time. A negative correlation exists between the gas flow and the pumping rate. An increase in the pumping rate caused stops and even negative gas flows in the casing: the water level in the casing sank so fast, that occasionally air was sucked into the casing. After a new equilibrium was reached, the gas flux increased to an higher level than before, because of the lower water pressure at the submersible pump. During decreased pumping rates the gas flux behaved in the opposite manner (e.g. November 25<sup>th</sup>).



**Figure 5:** Concentration of CO<sub>2</sub> and the variation of dissolved Ca and SiO<sub>2</sub> (measured by SOCOMINE) versus time. The lines in the upper diagram are calculated by moving window averaging ( $N = 3$ )

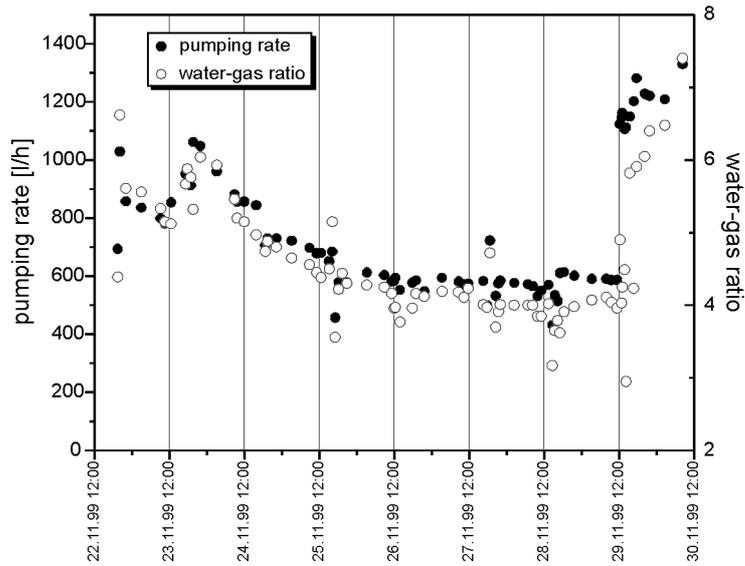


Figure 6: Pumping rate of the brine versus water-gas ratio measured at the gas separator

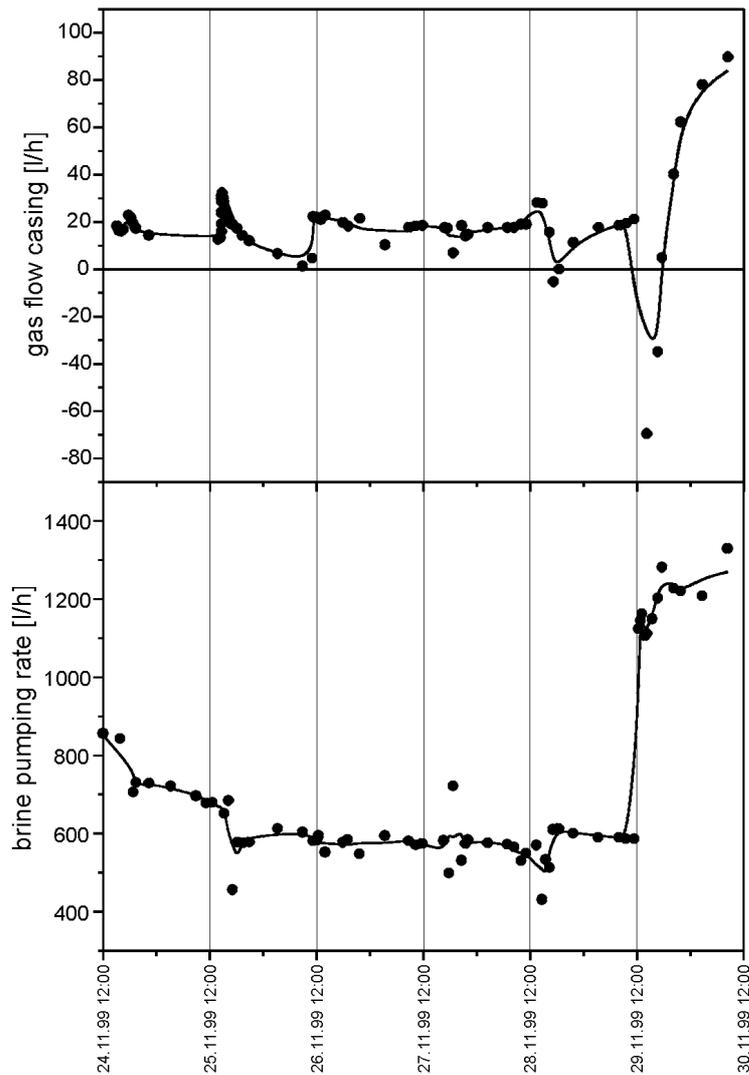


Figure 7: Gas flux from the casing and the brine pumping rate versus time

The composition of the gas phase dissolved in the brine and from the casing is shown in Table 1. In the casing less soluble gases dominated. The data were obtained during a low-pumping-rate-period from November 25<sup>th</sup> (6 p.m.) until November 29<sup>th</sup>, 1999 (11 a.m.) with a relatively constant brine pumping rate of 540-600 l/h. The gas flows at the degasser and from the casing were about 140 l/h and 20 l/h, respectively. The water-gas ratio was 3.5.

The main objective of the field experiment was to monitor real-time variations in the gas compositions and gas fluxes. For detailed analyses of trace gases and noble gas isotope ratios, off-line gas samples were collected in the gas separator and in the casing outflow line for laboratory investigations at the GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ).

Table 2 shows the results of the “separator gas” and “casing gas” analyzed using a quadrupole gas mass spectrometer in the laboratory. For analytical details see BACH et al. (1999) and NAUMANN (2000). Generally, the laboratory measurements show no significant differences from the field analyses confirming the accuracy of the on-site monitoring.

sample	SSF IV		SSF V		SSF VI		SSF XXII		SSF XIII		SSF VII		SSF VIII	
type of gas	degasser													
time	14.11.99 10:30		14.11.99 10:40		14.11.99 13:15		15.11.99 21:00		16.11.99 21:45		18.11.99 18:05		21.11.99 12:30	
	% vol.	±												
H <sub>2</sub>	12.0	0.9	12.1	0.9	12.3	0.9	12.2	0.9	11.4	0.8	10.5	0.8	8.56	0.61
He	0.84	0.06	0.85	0.06	0.87	0.06	0.89	0.06	0.83	0.06	0.79	0.06	0.62	0.04
CH <sub>4</sub>	6.67	0.48	6.75	0.48	6.95	0.5	7.12	0.51	6.78	0.49	6.49	0.46	5.69	0.41
N <sub>2</sub>	29.4	2.6	29.7	2.6	31.2	2.6	31.3	2.7	28.9	2.6	27.1	2.5	20.8	2.1
Ar	0.20	0.01	0.2	0.01	0.21	0.02	0.21	0.02	0.20	0.01	0.19	0.01	0.16	0.01
CO <sub>2</sub>	50.9	4.3	50.4	4.4	48.4	3.8	48.2	3.4	51.9	3.8	55	3.9	64.2	4.5

sample	SSF IX		SSF X		SSF XII		SSF XIII		SSF XIV		SSF XV		SSF XVI	
type of gas	degasser		degasser		degasser		degasser		casing		casing		casing	
time	24.11.99 12:15		27.11.99 09:00		29.11.99 03:50		30.11.99 02:15		24.11.99 19:00		28.11.99 14:10		29.11.99 02:05	
	% vol.	±												
H <sub>2</sub>	4.92	0.35	6.54	0.48	6.22	0.44	4.03	0.29	11	0.8	12.0	0.9	11.7	0.9
He	0.41	0.03	0.61	0.04	0.56	0.04	0.32	0.02	1.58	0.11	1.92	0.14	1.72	0.12
CH <sub>4</sub>	4.15	0.30	5.25	0.38	4.92	0.35	3.46	0.25	7.7	0.55	7.81	0.56	7.80	0.56
N <sub>2</sub>	14.9	1.8	20.8	2.1	19.2	2.1	19.9	1.6	51.7	3.9	59.1	4.4	58.8	4.3
Ar	0.12	0.01	0.14	0.01	0.13	0.01	0.17	0.01	0.21	0.01	0.2	0.01	0.25	0.02
CO <sub>2</sub>	75.4	5.3	66.7	4.7	68.9	5.3	72.1	6.1	27.8	2.0	19.0	1.3	19.7	1.4

**Table 2:** Composition of gas samples taken from the gas separator and the casing gas tube determined by quadrupole gas mass spectrometry in the GFZ laboratories

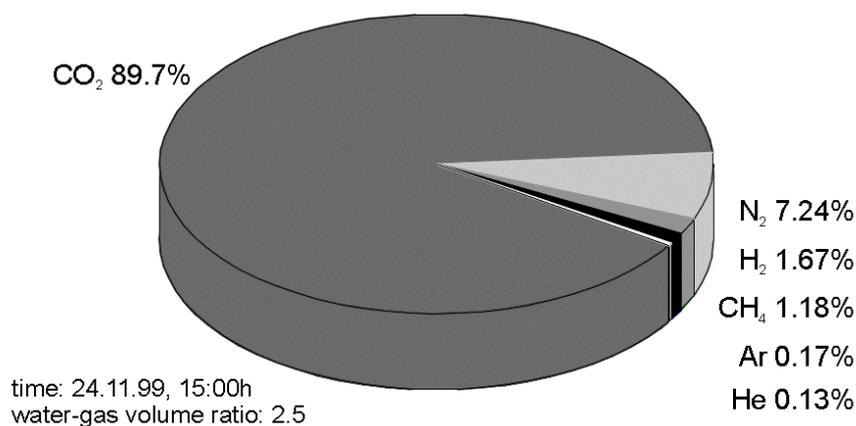
Furthermore, to determine the collective water-gas ratio and the gas composition of the formation brine two samples were completely degassed in the GFZ laboratories under vacuum and with ultra-sonic treatment (NAUMANN, 2000; COLLINS, 1975). Results are listed in Table 3.

sample	SSF XIX		SSF XX		mean values
	24.11.99 15:00		24.11.99 15:00		
	% vol.	±	% vol.	±	% vol.
H <sub>2</sub>	1.21	0.09	1.29	0.09	1.25
He	720 vpm	50	770 vpm	60	750 vpm
CH <sub>4</sub>	0.90	0.07	0.96	0.07	0.93
N <sub>2</sub>	4.79	0.47	4.91	0.50	4.85
Ar	0.25	0.03	0.08	0.03	0.17
CO <sub>2</sub>	92.8	<sup>+7.2</sup> <sub>-7.8</sub>	92.7	6.7	92.8

**Table 3:** Gas composition of formation fluid samples completely degassed in the laboratory under vacuum and with ultrasonic treatment. The water-gas ratio is 2.6

Compared with the data in Table 1, the water-gas ratio is now 2.6, while the concentrations of CO<sub>2</sub> (high solubility), N<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> (low solubility) are higher and lower, respectively.

The brine samples were taken at the inlet of the gas separator. Part of the original gas phase had been liberated into the casing before reaching the submersible pump. In order to recalculate the collective water-gas ratio and the true composition of the gas phase of the brine, the following data from the 24<sup>th</sup> of November at 3 p.m. were used: *Laboratory values from Table 3; pumping rate: 850 l/h; gas flux from the casing: 16 l/h; amount of gases theoretically extractable in the gas separator: 327 l/h; on-site measured composition of “casing” gas (% vol.): H<sub>2</sub> = 10.1, He = 1.31, CH<sub>4</sub> = 6.2, N<sub>2</sub> = 55.8, Ar = 0.16, and CO<sub>2</sub> = 26.4.* The final result is given in Figure 8.



**Figure 8:** Composition of the total gas phase of GPK-2 5000 m formation fluids (see text for explanation)

With these data, an approximate depth where the brine starts to liberate its gas may be calculated theoretically. According to BGR (WEIDLER & JUNG, 2000) and information from SOCOMINE it was not possible to measure the water level draw down at steady-state conditions. Furthermore, in-situ temperature and water chemistry data were not available impeding reliable calculations. Nevertheless we offer the statements below.

Most likely nitrogen will degas first because of its low solubility of 14 ml N<sub>2</sub> in one liter pure water at 40 °C and 1 bar partial pressure (MESSER GRIESHEIM). The true solubility is about 25 % lower in brines with about 100 g of total dissolved solids (TDS). The CO<sub>2</sub> equilibrium solubility of 605 ml per liter will not be reached even at surface conditions. This also holds for the measured trace gases. The total N<sub>2</sub> content of the brine was about 29 ml (Figure 8). This means the N<sub>2</sub> started degassing about 20 m below the water level. This calculation does not consider bubble formation thermodynamics and kinetics, nor mixed-gas behavior. According to these data the water column above the submersible pump was roughly between 20 and 15 m. This range agrees with the water level draw down on 24<sup>th</sup> November 1999 calculated by WEIDLER & JUNG (2000). CO<sub>2</sub> and trace gases in the “casing” gas have been stripped off by the degassing nitrogen.

#### 4 References:

- BACH, W. & ERZINGER, J. (1995): Volatile components in basalts and basaltic glasses from the EPR at 9°30'N.- *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **142**: 23-29.
- BACH, W., NAUMANN, D. & ERZINGER J. (1999): A helium, argon, and nitrogen record of the upper continental crust (KTB drill holes, Oberpfalz, Germany): Implications for crustal degassing.- *Chem. Geol.*, **160**, 1-2: 81-101.
- COLLINS, A.G. (1975): *Geochemistry of oilfield waters.- Developments in Petroleum Science*, **1**, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 496 p.
- GARAGUNIS, C. (1980): Technische Probleme bei der Nutzung der gasführenden Thermen in Bas Edipsos/Griechenland.- *bbr*, **31**,12: 520-524.
- MESSER GRIESHEIM: *Gase-Handbuch*, 3. Auflage (Broschüre 90.1001), Hrg. Messer Griesheim GmbH, Frankfurt, 338 p
- NAUMANN, D. (2000): *Salinare Tiefenwässer in Norddeutschland: Gas- und isotopengeochemische Untersuchungen zur Herkunft und geothermischen Nutzung.- Doctoral thesis*, University of Potsdam, 115 p.
- SCHÖN, M. & ROCKEL, W. (1991): Nutzung niedrigthermaler Tiefenwässer - Geologische Grundlagen.- In: BUSSMANN, W. (Eds.): *Geothermie - Wärme aus der Erde.- C.F. Müller*, Karlsruhe, 20-50.
- SEIBT, A. & HOTH, P. (1997): *Untersuchungen im Thermalwasserkreislauf.- In: HOTH, P., SEIBT, A., KELLNER, T. & HUENGES, E. (Eds.): Geothermie Report 97-1: Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen in Norddeutschland.- Scientific Technical Report STR97/15*, 116-131, Potsdam.
- STEFÁNSSON, V. (1997): Geothermal reinjection experience.- *Geothermics*, **26**,1: 99-139.

WEDLER, R. & JUNG, R. (2000): Production test in the undisturbed openhole section of deepened well GPK-2 – Hydraulic evaluation.- unpublished BGR report, Federal Institute for Geosciences, Hannover, 16 p.

# Technische Machbarkeit eines Untertägig Geschlossenen Geothermischen Wärmetauschersystems (UGGW) für die standortunabhängige Energiegewinnung

*Björn Legarth und Helmut Wolff, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Berlin*

<b>1</b>	<b>Geothermische Energiegewinnung.....</b>	<b>87</b>
<b>2</b>	<b>Zielvorstellungen für das geschlossene System.....</b>	<b>88</b>
<b>3</b>	<b>Systemvarianten des UGGW .....</b>	<b>89</b>
<b>4</b>	<b>Thermodynamische Kriterien der Auslegung .....</b>	<b>93</b>
<b>5</b>	<b>Technische Durchführung .....</b>	<b>97</b>
5.1	Zielbohrtechnik und andere innovative Bohrtechniken.....	101
5.2	Fluidzirkulation in Verbundsystemen .....	104
<b>6</b>	<b>Energieertragsbewertung .....</b>	<b>105</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>107</b>
<b>8</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>108</b>

## Abstract

To reduce effectively gas emissions with global warming potential caused by conventional energy production, CO<sub>2</sub>-neutral energy systems will play a major role in the future global energy supply.

Geothermal energy production is environmentally tolerable and economically feasible. Conventional geothermal systems usually depend on geologic location where either hot water can be extracted from porous and permeable (hydrothermal) aquifers or where crystalline rock can be hydraulically stimulated at a reasonable depth to create a large underground heat exchanger. In this artificial reservoir cold fluids are injected and extracted later at a higher temperature. Severe constraints have to be imposed on fluid composition and permeability of the reservoir if economic production is to be achieved.

To overcome these constraints and bring geothermal energy closer to the customer, concepts of an independent Closed Loop Geothermal Systems (CLGS) are presented.

A CLGS does neither depend on the characteristics of geologic formations nor on the presence of a geothermal fluid. It consists of a connected system of horizontal boreholes with hydraulically tight completions to inhibit fluid-rock interaction. With this concept, corrosive fluids due to high temperature and mineralisation can be banished from all production units. Disposal or re-injection of the fluid into the formation becomes unnecessary. This fact reduces the environmental impact of the concept to a minimum. The system is designed to allow a maximum residence time of the working fluid (water) in the high temperature region underground so that the final energy output is maximized.

The Closed Loop Geothermal System assumes a gradient of 3°C/100m in the earth's upper crust. A higher gradient affords shallower vertical drilling which reduces the risk and drilling effort to reach the zone of temperature for effective geothermal heat exchange (pay-zone). Upon completion of the wells a fluid under optimized conditions is run through the underground system so that maximum heat transfer over a long production period is established. Since the system can reach a high load, it can be employed for large scale heat systems or power supply.

The development of the CLGS involves research not only on drilling and completion technology but also on hydraulics. State-of-the-art drilling technologies usually are designed for oil and gas industry. Special innovative concepts need to be examined to meet the technical requirements and reduce time, risks and costs for geothermal development.

Finally, the effectiveness and maximum capacity of the CLGS is estimated with an energy net profit analysis. The system is expected to provide longer and steady production capacity because of the closed fluid cycle. Moreover, it requires little maintenance needs during its lifespan.

## 1 Geothermische Energiegewinnung

Für eine großkapazitäre geothermische Strom- und Wärmeerzeugung werden heutzutage tief-liegende Gesteinsformationen mit einem hohen Temperaturniveau genutzt. Primär beruhen alle diese Systeme auf der Nutzung von der in einem Wärmeträgerfluid (WTF) gespeicherten Energie in Form von Wärme. Je nach Teufenlage oder geothermischer Anomalie des Förderhorizontes werden Fluide mit Temperaturen von teilweise mehr als 200 °C über eine oder mehrere Bohrungen gefördert und nach ihrem Durchgang durch ein übertägiges Wärmetauschersystem in den tiefen Untergrund reinjiziert.

Für eine großkapazitäre Nutzung eines WTF zur Wärme- oder gar Strombereitstellung wird bislang zwischen zwei Arten von oberflächenfernen, geothermalen Vorkommen differenziert. Diese unterscheiden sich nicht nur untereinander, sondern auch innerhalb der jeweiligen Technologie von Fall zu Fall hinsichtlich ihrer Prozessparameter sowie in ihrer Durchführung angepasst auf die lokalen Verhältnisse im Untergrund.

Die beiden Kategorien gliedern sich in:

- Systeme, die ein in der Tiefe, in Aquiferen oder anderen porösen Gesteinsstrukturen gespeichertes Thermalwasser nutzen, um es ähnlich den aus der Kohlenwasserstoffindustrie bekannten Verfahren zu fördern und anschließend in übertägigen Wärmetaucheranlagen energetisch umzuwandeln. Je nach Temperatur und Druck in der Lagerstätte kann das Fördermedium einer direkten oder indirekten Nutzung zugeführt werden. Bei einer direkten Nutzung im energetischen Sinne wird das geförderte Thermalfluid als Arbeitsmittel zum Antrieb einer Turbinen-Generatoreinheit eingesetzt. Als indirekt wird hier das Zwischenschalten eines Wärmetauschers verstanden, durch den die gewonnene Wärme an einen sekundären Arbeitsmittelkreislauf übergeben wird. Das gewonnene und übertägig abgekühlte Thermalfluid wird letztendlich in die untertägigen Horizonte reinjiziert.  
Es wird von hydrothermalen Systemen gesprochen.
- Systeme, die vorrangig die Nutzung von heißen, kristallinen Gesteinsformationen zum Ziel haben (GEOTHERMISCHE VEREINIGUNG, 2000). Diese Formationen sind auf Grund sehr geringer Permeabilitäten (im Zweifelsfall impermeable Gesteinsmatrix) und zu geringer Fluidgehalte primär nicht förderbar. Um eine Förderbarkeit zu erreichen, wird ein künstliches großvolumiges Riß- und Kluftnetzwerk durch eine gezielte massive hydraulische Stimulation des Untergrundes erzeugt. Dieser Vorgang erfordert das Verpressen großer Fluidmengen unter hohen Fließraten (50 l/s) in den entsprechenden Nutzhorizont über eine Injektionsbohrung. Es werden weitere Förderbohrungen in diesen stimulierten Gebirgsbereich vorangetrieben, so dass ein untertägiger Wärmetauscherkreislauf zwischen einer oder mehreren Injektions- und Förderbohrungen entsteht. Es wird von Hot Dry Rock (HDR) Systemen gesprochen.

Im Allgemeinen gilt für beide Fälle, dass die lokale geologische Situation, die Art der anwendbaren Technologie bestimmt. Dies impliziert eine Standortgebundenheit, die so auch auf konventionelle Energierohstoffgewinnungsbetriebe zutrifft. Der Unterschied von geo-

thermischen Systemen ist nur, dass der „Energierohstoff“ auch gleichzeitig am Gewinnungsstandort zur Wärmenutzung verwendet wird. Dies beruht auf der Tatsache, dass die in Fluiden gespeicherte Wärme im Gegensatz zu traditionellen Energierohstoffen (Erdöl, Erdgas, Kohle und Uran) nicht wirtschaftlich über längere Strecken zu transportieren ist. Diese Tatsachen führen zur Einschränkung der oben geschilderten Formen geothermischer Energieerzeugungskonzepte für eine nachfrage- bzw. abnehmerorientierte Anwendbarkeit. Um die Abhängigkeit der großkapazitären geothermischen Energiegewinnung von einer spezifischen Lokation zu verringern und somit das Angebot zu erweitern, wird die Aufmerksamkeit auf bislang fördertechnisch unproduktive (geringpermeabel) jedoch Thermalwasser führende Lagerstätten in Teufenbereichen zwischen 3000 und 5000 m gerichtet. Die Gebirgstemperaturen liegen in diesen Bereichen i.d.R. über 100 °C und können nach dem Stand der Bohrtechnik in diesen Teufen problemlos erschlossen werden. Anschließend bietet sich ähnlich dem HDR Konzept die Nutzbarmachung dieser Gebirgsschichten mittels geeigneter Stimulationsmaßnahmen an, um über die Schaffung künstlicher Fließwege ausreichende Förderraten eines geothermalen Fluids erzielen zu können.

Unabhängig von den Reservoireigenschaften und des Verhaltens des Gebirges während und nach der Stimulation, besteht eine weitere Möglichkeit eines Konzeptes ähnlich den bisher bekannten Formen von Erdwärmesonden. Ein solches stellt der Untertägig Geschlossene Geothermische Wärmetauscher (UGGW) dar. Der geothermische Nutzhorizont wird dabei dreidimensional von einem System aus fluiddicht komplettierten Tiefbohrungen erschlossen. Das Hauptunterscheidungsmerkmal dieses Konzeptes zu denjenigen, die auf die Förderung eines unterirdisch vorhandenen oder zirkulierenden Thermalwassers angewiesen sind, ist die Vermeidung jeglichen stofflichen Kontaktes zwischen Wärmeträgerfluid und Gebirge für ein Maximum an lokationsspezifischer Unabhängigkeit.

Als eines der möglichen Konzepte zur Erweiterung des geothermischen Energieangebots wird dieses im Folgenden auf seine technische Realisierbarkeit unter Berücksichtigung unterschiedlicher Systemvarianten überprüft und eine Energieertragserwartung formuliert.

## **2 Zielvorstellungen für das geschlossene System**

Das Funktionsprinzip eines untertägig geschlossenen geothermischen Wärmetauschers (UGGW) kann wie folgt beschrieben werden:

- Gesamtsystem aus über- und untertägigen Konfigurationen bildet einen geschlossenen Kreislauf (siehe Abbildung 3 a, Abbildung 4 a)
- Wärmeentzug über ein dicht an das Gebirge angeschlossenes System von verrohrten Bohrungen, durch welches ein WTF zirkuliert
- Förderung des erhitzten Fluids über vertikale oder abgelenkte Hauptbohrungen nach über Tage
- Energieübertragung an einen sekundären, übertägigen Kreislauf, Energieumwandlung durch geeignete, angepasste Verfahrenstechnik
- Rückführung des WTF in untertägiges Horizontal- bzw. Lateralbohrsystem
- dauerhafte, verlustfreie Zirkulation

Damit verbunden sind einige Systemvorteile:

- Standortunabhängigkeit (Geologie, Infrastruktur)
- geringer Wartungsaufwand lediglich für eingesetzte Förder- und Umwälzpumpen
- kein Stoffaustausch von Fluid mit Gebirge (Reduzierung der Gefahr von Ausfällungen sowie des Ausmaßes an ökologischer Beeinträchtigung während des Betriebes)
- laterale Erschließung vervielfacht die Wärmeausbeute auf Grund einer längeren Verweilzeit des WTF auf einem konstanten, hohen Temperaturniveau im Nutzhorizont und einer größeren Wärmeaustauschfläche
- emissionsarm
- geringe Betriebsplatzgröße

Nicht zu vernachlässigen sind jedoch die zentralen Untersuchungspunkte, die jeweils kritische Aspekte für ein solches System beinhalten. Um eine generelle Aussage über die Realisierbarkeit machen zu können, steht die Problemanalyse folgender Parameter im Vordergrund:

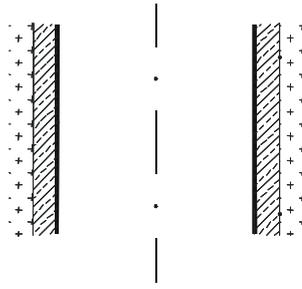
- Bohrtechnik zur Herstellung „komplizierter“ Bohrverläufe (Zielbohrtechnik)
- Komplettierungstechnik zur Herstellung einer dichten Verrohrung inklusive deren dichte Anbindung an das Gebirge zur Vermeidung luft- oder gasgefüllter Hohlräume
- Optimierung des WTF (Strömungsgeschwindigkeit, Zulauftemperatur, Eigenschaften)
- Energieertrag
- Kosten, Risiko

Die Bohr- und Komplettierungstechnik bildet die Basis der systemtechnischen Untersuchungen. Beruhend auf der Notwendigkeit eines weitläufigen untertägigen Rohrsystems als Wärmeübertragungsfläche, um entsprechende Wärmemengen aus dem Gebirge über das zirkulierende Medium abführen zu können, müssen einerseits Technologiekonzepte aus verwandten Industriebereichen (Kohlenwasserstoffindustrie) übertragen, erweitert, aber letztendlich auch neu konzipiert werden. Es müssen hierfür zusätzlich innovative Verfahren der Bohr-, Komplettierungs- und Fördertechnik auf ihre Anwendbarkeiten innerhalb der Konzepte untersucht werden.

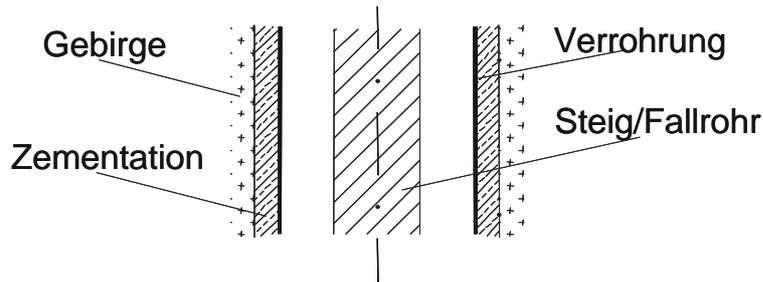
### 3 Systemvarianten des UGGW

Das untertägige Wärmetauschersystem beinhaltet zwei grundsätzliche Auslegungsalternativen bezüglich der Komplettierung und damit der Zirkulation eines WTF:

- Normale Verrohrung, anwendbar bei Verbundsystemen (Abbildung 1),
- koaxiale Verrohrung nach dem Rohr-in-Rohr Prinzip (Abbildung 2).



**Abbildung 1:** Normale Verrohrung bei Verbundsystemen



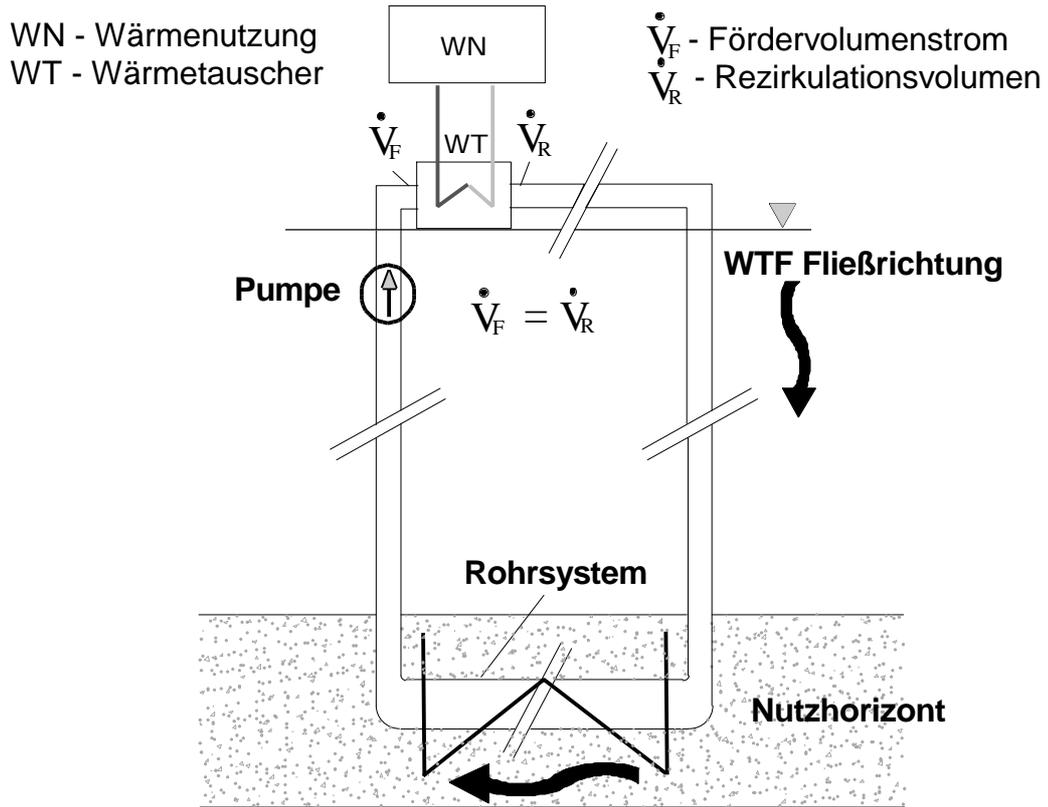
**Abbildung 2:** Koaxialer Fördersondenabschnitt (Rohr-in-Rohr Prinzip)

Zur Realisierung des Verbundkonzeptes (Abbildung 3) werden mindestens zwei miteinander verbundene Bohrungen benötigt. Nur so kann die Förderung des Fluides durch den vollen, komplettierten Querschnitt ermöglicht werden. Konventionelle Verfahren aus der Erdöl-Erdgasindustrie zur Herstellung von Fördersonden müssen deshalb überarbeitet und auf ihre Anwendbarkeit überprüft werden. Nicht die Förderung eines Fluids aus einer Lagerstätte spielt eine Rolle, sondern vielmehr die Förderung eines Fluids durch einen Trägerhorizont ohne einen stofflichen Kontakt.

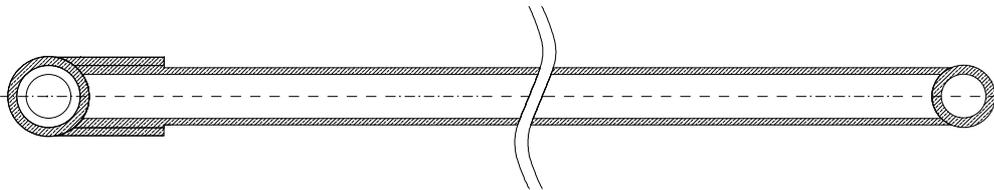
Die Verhinderung des Stoffaustausches von WTF mit dem umgebenden Gebirgskörper besitzt aus Gründen der Vermeidung von wechselseitigen Beeinflussungen, speziell im Falle des Einsatzes eines alternativen WTF, sowie von Fluidverlusten höchste Priorität.

Solche Systeme sind in ähnlicher Form wiederum sowohl aus der geothermischen Industrie (Tiefe Einzelsonde) (GEOTHERMISCHE VEREINIGUNG, 2000), (EUGSTER, 1991) als auch aus dem Bergbau (Gefrierschachtbau) (KLEIN, 1985) bekannt. Das hier vorgestellte geothermale Wärmetauschersystem geht jedoch einen Schritt weiter. Es sieht abgelenkte oder horizontale Bohrkonfigurationen vor, die folglich einen sich in einer bestimmten Teufe und demnach in einem geeigneten Temperaturniveau befindlichen Nutzhorizont in lateraler Erstreckung erschließen. Somit verbleibt das zirkulierende WTF je nach angelegten Fließraten grundsätzlich länger in dem für den Wärmeübertrag entscheidenden Gebirgsbereich als dies bei herkömmlichen vertikalen Wärmesonden der Fall sein kann.

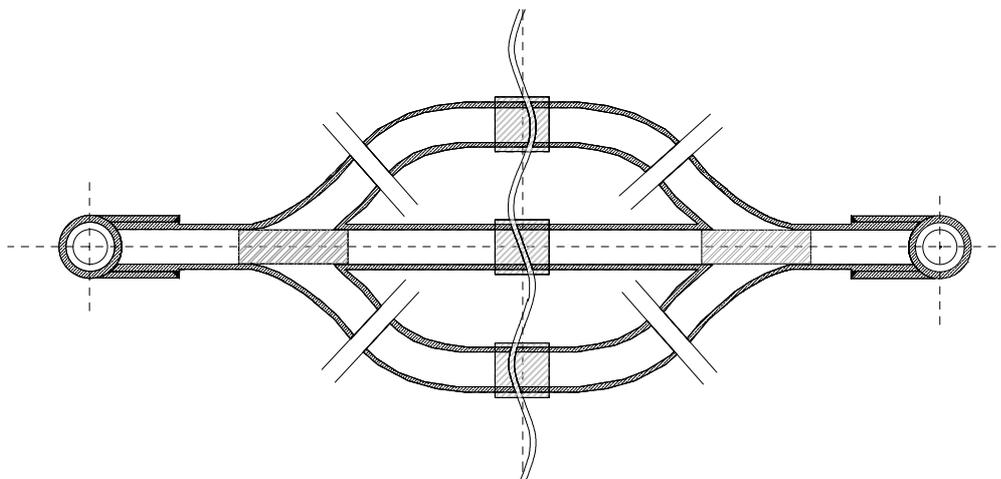
a)



b)



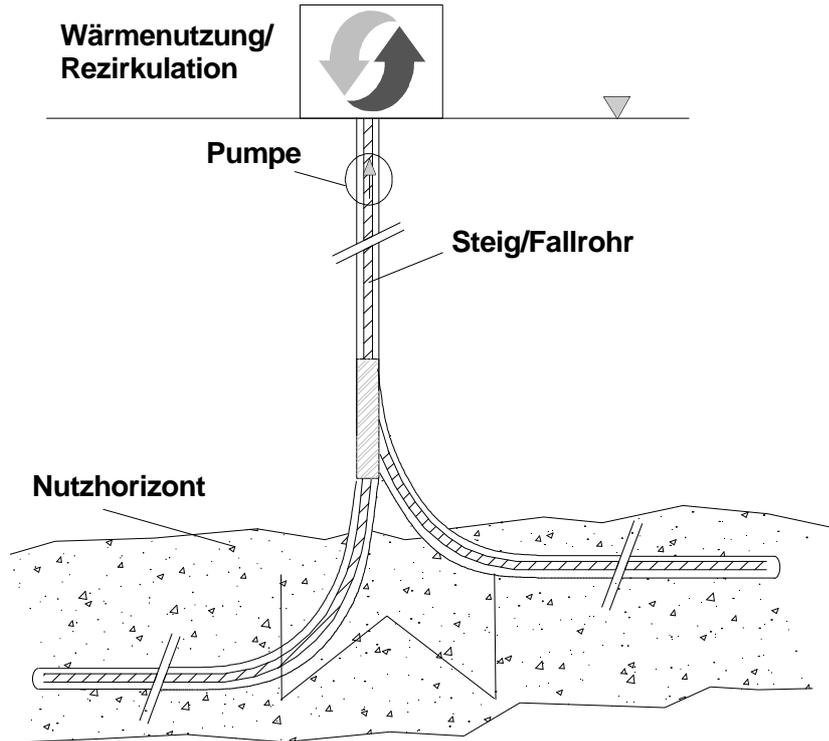
c)



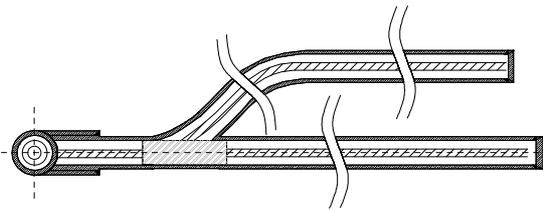
**Abbildung 3:** Verbundsystem des UGGW aus zwei Bohrungen

a) Schema, b) Schnitt in der Ebene des Nutzhorizontes, eine horizontalen Bohrung c) Schnitt in der Ebene des Nutzhorizontes, zwei oder mehr horizontale Bohrungen

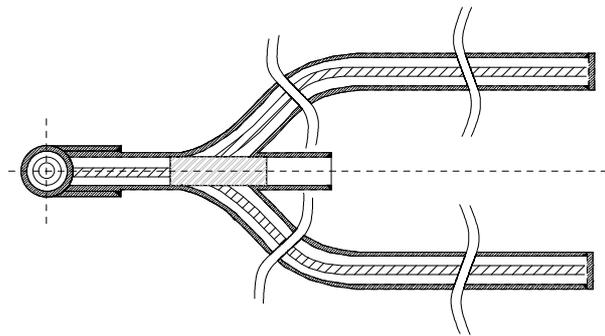
a)



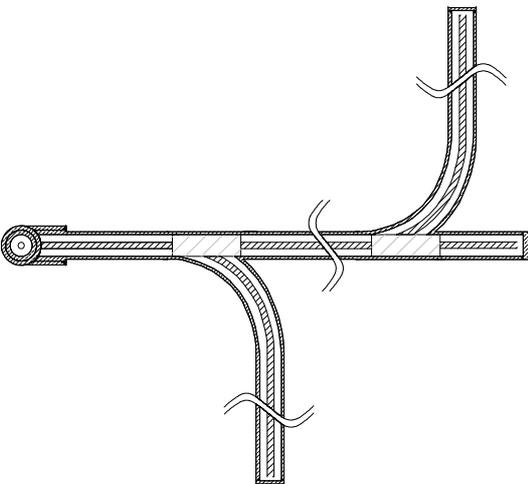
b)



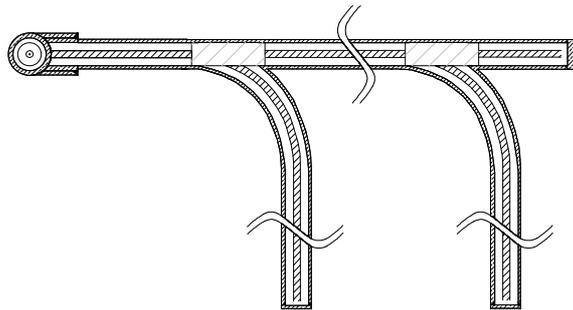
c)



d)



e)



**Abbildung 4:** a) Profilschnitt eines coaxialen Wärmetauschersystems, b) – e) Möglichkeiten der lateralen Erschließung des Nutzhorizontes mit primären und sekundären Ablenkungen in der Ebene

Der zu erwartende Aufwand hinsichtlich der Bohr- und Komplettierungstechnik ist dabei schon allein aus dem Grund der teilweise nicht vorhandenen Vergleichsanwendungen entschieden höher. Gefragt ist folglich die generelle Machbarkeit mit entsprechenden Lösungsansätzen für dieses Konzept. In den folgenden Konzeptskizzen wird die Art und Unterschiedlichkeit der Systeme verdeutlicht. Die schraffierten Rechtecke in den Abbildungen stellen multilaterale Kreuzungsbereiche dar. Diese beinhalten je nach Anzahl und Art der zu komplettierenden lateralen Stränge unterschiedliche Ausführungsvarianten (DIGGINS, 1997). Bereits in der Kohlenwasserstoffindustrie zur Herstellung hydraulisch dichter und der Realisierung einer Förderung aus selektiv ansteuerbaren lateralen Einzelsträngen vorhandene Methoden der Komplettierung wie der Formation Junction<sup>TM</sup> (BAKER OIL TOOLS, 1998) der Firma Baker Oil Tools könnten hier in angepasster Form zum Einsatz kommen (siehe Abschnitt 5).

#### 4 Thermodynamische Kriterien der Auslegung

Die Art der Erschließung des Nutzhorizontes ist neben den möglichen Varianten im wesentlichen eine Frage der erzielbaren Produktivität des Gesamtsystems. Die Produktivität, gemessen anhand der maximal zu erzielenden Temperatur des WTF und der Wärmemenge im Thermalwasserkreislauf, hängt dabei von weiteren Kriterien, als einzig von der erzeugten Wärmetauscherfläche (Rohrmantelfläche) und des erschlossenen Gebirgsvolumens ab.

Berechnet wurden hierfür die maximal gewinnbaren Temperaturen bzw. Wärmemengen pro Zeiteinheit aus exemplarischen, horizontalen Rohrabschnitten von 0 bis 10 km Länge. Dabei wurden verschiedene Fördervolumenströme des WTF (hier: reines Wasser mit  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ ) berücksichtigt. Für die Berechnung wurden mittlere Gebirgstemperaturen ( $T_{\text{Geb}}$ ) von 120 °C und 150 °C angenommen. Diese entsprechen damit vertikalen Teufen von 3 - 5 km.

Zur prinzipiellen Darstellung der notwendigen minimalen Horizontalabschnitte bei Rohrendurchmessern von 20 cm (entspricht in etwa 9 5/8“ Verrohrung) und entsprechenden Querschnitten wurden die Gebirgstemperatur über die horizontale Strecke als konstant angenommen. Obwohl dies zu einer starken Vereinfachung des Sachverhaltes führt, können daraus die maximal erzielbaren Energiemengen aus dem System für eine quantitative Abschätzung berechnet werden. Orientiert man sich an vorliegenden Berechnungen zum Langzeitverhalten tiefer Einzelsonden (RÄDLER, 1998), entspräche ein realer Output einem prozentualen Anteil dieser Menge in der Größenordnung von 40 - 50%. Nicht berücksichtigt sind dabei Regenerationsphasen, die die Auskühlungserscheinungen im Gebirge begrenzen würden. Die Darstellung solcher Betriebszustände muss somit das Ziel weiterer Untersuchungen sein.

Den Berechnungen des Wärmeübergangs von Gebirge an das zirkulierende Fluid liegt ein Modell zugrunde, welches die natürlichen Zustände simuliert. Es wird der Wärmedurchgang durch ein System aus Beton, Zementmörtel und Stahlrohr berechnet, um letztendlich eine Aussage über den Wärmefluss durch diese Schichten machen zu können. Die Betonschicht stellt das Gebirge dar, von deren Leitfähigkeitseigenschaften und Mächtigkeit die maximale Wassererwärmung abhängig ist. Es wird vorausgesetzt, dass eine vollständige dichte Zementation ohne Gaseinschlüsse oder Klüftung vorliegt, was optimalen Bedingungen entspricht.

Demzufolge kann ein k-Wert für das mehrschichtige Rohr, je nach Leitfähigkeitseigenschaften und Schichtdicke des Zementmörtels, in der Größenordnung zwischen 20 und  $100 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  angenommen werden. Hierzu wurden die Wärmeleit- und Wärmeübergangswiderstände unter der Annahme einer mehrschichtigen Zylinderwand nach Formel (1) berechnet.

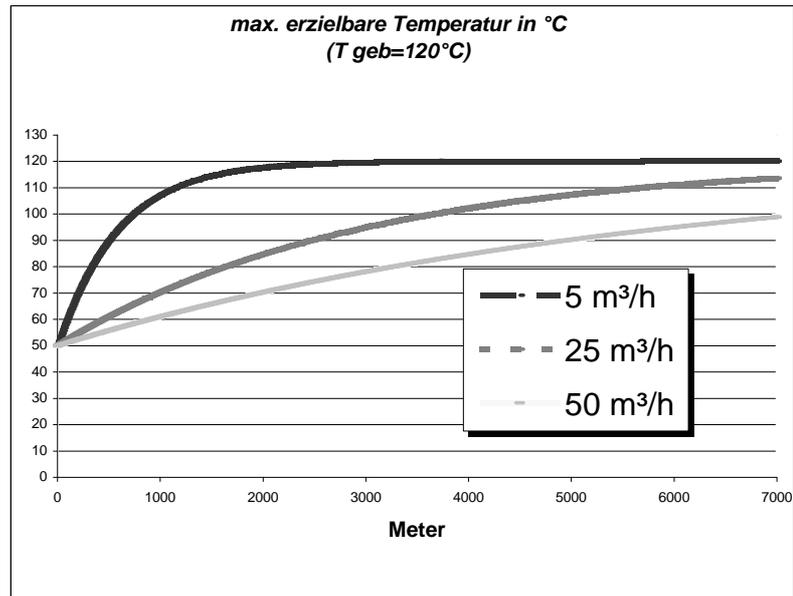
$$R_{Rohr} = \sum_n \frac{\ln d_a / d_i}{2 \cdot p \cdot l \cdot I_n} + \frac{1}{p \cdot l \cdot a \cdot d_A} \quad (1)$$

Es steht  $d_i$  für den Innen- und  $d_a$  als Außendurchmesser der einzelnen Rohrschichten (Zement und Stahl) sowie  $l$  für die Länge des betrachteten Rohrabschnittes (hier: 10 m),  $I_n$  für die Wärmeleitfähigkeit der Schicht,  $a$  für den Wärmeübergangskoeffizienten (Rohr-Fluid),  $d_A$  für den Außendurchmesser des Gesamtsystems und letztendlich  $R_{Rohr}$  für den reziproken Wert des k-Wertes bezogen auf die betrachtete Außenfläche des Rohres (BAEHR, 1994). Der k-Wert verhält sich in diesem Zusammenhang nahezu umgekehrt proportional zur Schichtdicke des Zementmörtels und nahezu direkt proportional zur Leitfähigkeit des Materials. Letztere Aussage legt eine Komplettierung der Sonde mit einem schmalen Ringraum nahe, deren Machbarkeit jedoch weiteren Optimierungsfragen (Rohrverbinder, Zentrierung der Rohre, Einbringen der Zementsuspension etc.) unterworfen bleibt. Die Rohrkrümmung kann für die überschlägige Berechnung des k-Wertes auf Grund der Modellcharakteristik mit einer sehr dünnen Zementschicht gegenüber dem Rohrradius vernachlässigt werden.

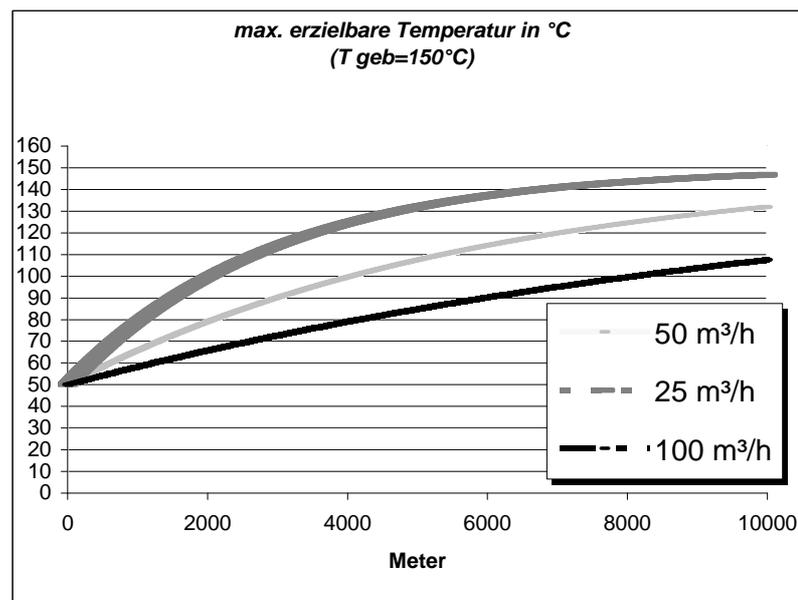
Eine weitergehende Analyse müsste die stationären Annahmen durch eine dynamische Betrachtung des Gesamtsystems ablösen. Zu berücksichtigen wären dann die zeitliche und räumliche Abkühlung des Gebirgskörpers bei einerseits unterschiedlichen Konfigurationen der untertägigen Auslegung und andererseits bei der Berücksichtigung des Einflusses und der Auswirkungen der Qualität und Beschaffenheit der hergestellten Wärmeübertragungsflächen (feste Anbindung (bond), umströmtes Rohr). Möglich ist dann auch die Simulation mit verschiedenen Wärmeträgermedien im Kreislauf und die Bestimmung ihrer Eigenschaften zur Optimierung der Prozessparameter mit dem Ziel eines dauerhaften Betriebes mit konstanter, maximaler Leistung.

So ergeben sich vorerst folgende Darstellungen, die hier im Wesentlichen die Auswirkungen unterschiedlicher Volumenströme auf erreichbare Temperaturen und Wärmemengen darstellen. Es können daraus erste Informationen für übertägige energietechnische Belange zur Nutzung des WTF abgeleitet werden.

a)



b)



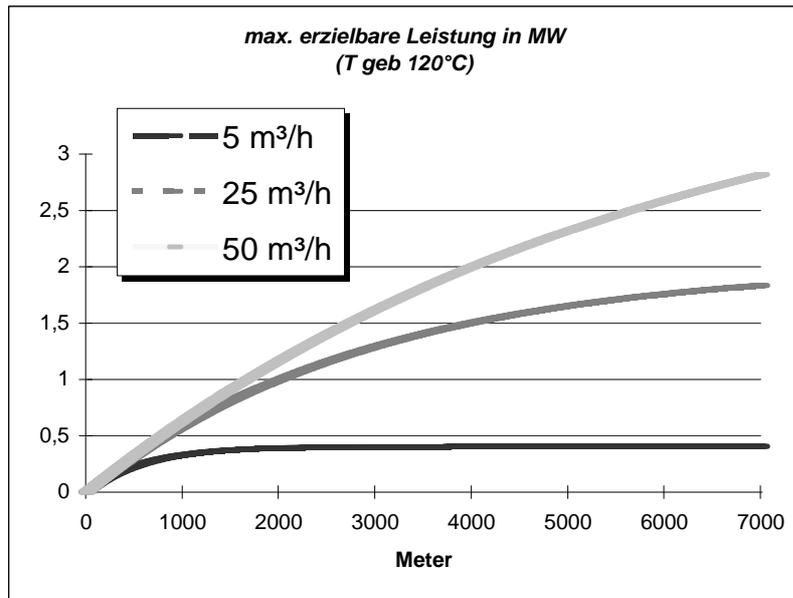
**Abbildung 5:** Maximal erzielbare Temperaturen bei unterschiedlichen Volumenströmen und Gebirgstemperaturen

Bei geringen Volumenströmen erreicht das WTF bereits nach kürzerer Distanz höhere Temperaturen. So werden in Abbildung 5 bei  $\dot{V}_1 = 5\text{ m}^3/\text{h}$  schon nach einer Strecke von rund 750 m Temperaturen von  $100^{\circ}C$  bei mittleren Zulauftemperaturen von  $50^{\circ}C$  erreicht. Für  $\dot{V}_2 = 25\text{ m}^3/\text{h}$  ist erst nach ca. 3600 m, bei  $\dot{V}_3 = 50\text{ m}^3/\text{h}$  sogar erst nach ca. 7300 m bei gleichen Zulauftemperaturen die  $100^{\circ}C$  Grenze erreicht.

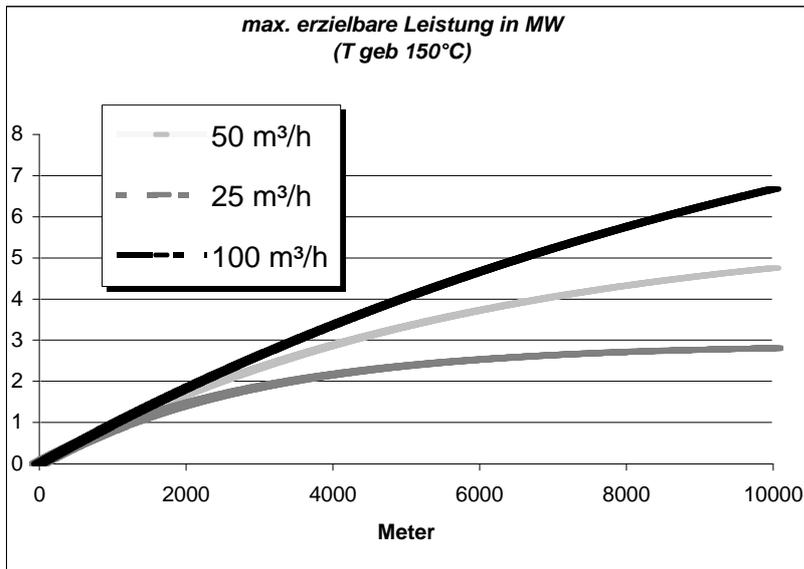
Anders verhält es sich mit der maximalen Leistung. Diese setzt sich aus dem Produkt aus Fördervolumenstrom  $\dot{V}$ , der Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , zwischen Fluid<sub>Eingang</sub> und Fluid<sub>Ausgang</sub>, der Dichte des Fluids  $\rho_{\text{Fluid}}$  und seiner spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  zusammen (2).

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \Delta T \cdot \rho_{\text{fluid}} \cdot c_p \quad (2)$$

a)



b)



**Abbildung 6:** Maximal erzielbare Leistungen bei unterschiedlichen Volumenströmen und Gebirgstemperaturen

In Abbildung 6 a) wird deutlich, dass zwar die maximale Leistung bei  $\dot{V}_1$  schon nach kurzer Distanz verfügbar ist, sich jedoch nach ca. 2000 m Rohrlänge asymptotisch auf einen Grenz-

wert zu bewegt. Bei  $\dot{v}_2$  verdreifacht sich die zur Verfügung stehende Leistung nach gleicher Distanz. Für  $\dot{v}_3$  gelten anfangs ähnliche Verhältnisse jedoch werden hier die im Vergleich höchsten (ca. 2,8 MW) Leistungen nach einer Strecke von 7000 m erzielt. Alle Kurven zeigen demnach einen logarithmischen Verlauf, deren Steigung abhängig von den Prozessparametern (hier: Volumenstrom) ist. Bei  $\dot{v}_2$  und  $\dot{v}_3$  sind für diese Distanz die maximalen Leistungen noch nicht erreicht. Die gleichen Beobachtungen gelten auch bei anderen Endwerten auf Grund höherer Gebirgstemperaturen für Abbildung 6 b). Es sind hier deutlich größere Leistungen erzielbar. Im Falle eines mittleren Fördervolumenstroms von 50 m<sup>3</sup>/h kann eine Leistung von etwa 5 MW bei WTF Temperaturen größer 130 °C untertage erzielt werden. Diese Zahlen gelten in erster Linie für den vollen Rohrquerschnitt. Das Koaxialsystem ist hierbei vorerst nicht berücksichtigt. Durch den Einbau geeigneter Wärmeisolierungen in die Hauptförderstränge wie GFK Rohre, doppelwandige Stahlrohre oder die Verfüllung des Ringraums mit isolierenden Zementmaterialien (Schaumzemente, Glaskugelmzemente), könnte das WTF bei gleichen Fördervolumenströmen mit nur geringen Temperaturverlusten nach übertage gefördert werden.

Schlussfolgernd ist festzuhalten, dass folgerichtig mit geringen Volumenströmen höhere Temperaturen des WTF nach kürzeren Distanzen erzielt werden können. Maximale Leistungen werden jedoch nur bei hohen Volumenströmen erzielt. Für 50 und 100 m<sup>3</sup>/h ist dabei selbst für Distanzen bis zehn Kilometern noch kein Grenzwert erreicht.

Je länger die Strecke im Nutzhorizont, desto höher die erzielbare Leistung. Längere, laterale Strecken bedeuten eine Erhöhung der Verweilzeit des WTF in Bereichen hoher Gebirgstemperaturen. Folglich können so auch die Volumenströme bei gleichbleibenden Temperaturen gesteigert werden. Durch die Erschließung des Gebirges in der horizontalen Ebene erhöht sich zudem die Wärmeübertragungsfläche und vergrößert das Gebirgvolumen aus dem die Erdwärme kontinuierlich in das System nachströmen kann.

Die durchgeführten Berechnungen gelten jedoch vorerst in idealisierter Weise für konstante Gebirgstemperaturen auf dem betrachteten Abschnitt. In Realität werden diese jedoch längs des Nutzhorizontes graduell mit zunehmender Abkühlung des Gebirges durch den Eintrag des kalten WTF abnehmen. Dieser Effekt ist für die Berechnung der realen Verhältnisse zu berücksichtigen.

Insgesamt dienen diese Darstellungen und Berechnungen für eine erste, grobe Abschätzung der sinnvollen Auslegung und Dimensionierung von Lateralbohrstrecken für den untertägig geschlossenen Wärmetauscher. Es wird deutlich, dass offensichtlich im Idealfall ungewöhnlich lange laterale Abschnitte, wie sie bislang nur von der Erdöl- Erdgasindustrie hergestellt werden (VIGHETTO, 1999), für die Konzepte notwendig werden.

## 5 Technische Durchführung

Wie oben dargestellt gilt: Je größer der erbohrte Querschnitt und die laterale Ausbreitung im Zielhorizont ist, desto größer wird auch die zur Wärmeübertragung nutzbare Fläche und somit

die erzielbare Wärmeleistung aus dem System. Die Bohrlochgeometrien sind im Allgemeinen abhängig von dem eingesetzten Kaliber des Bohrwerkzeuges. Übliche erreichbare Enddurchmesser bei solchen Bohrungen liegen bei 8 ½“ bis 12 ¼“ OH (open hole) und entsprechend 7“ bis 9 5/8“ Liner. Folglich sind für diesen Bereich die benötigten, gängigen Materialien verfügbar (SURDON, 1999).

Größere Querschnitte bedeuten höheren Materialkosten für Bohrwerkzeug und Komplettierung, da diese normalerweise in kleineren Stückzahlen aufwendiger produziert werden müssen. Zusätzlich fallen bei überdurchschnittlich großen Querschnitten auch größere Mengen von durch die Spülung kontaminiertem Bohrklein an, das es zu entsorgen gilt. Letztendlich sind größere Anlagen mit entsprechenden Leistungskapazitäten und Platzbedarf notwendig, um die resultierenden Lasten und Volumina bewältigen zu können. Eine wichtige Grenze liegt zwischen den Kategorien der stationären und mobilen Anlagen. Letztere können i.d.R. nur eine maximale Hakenlast von 170 t bewältigen. Die realistische Planung solcher Vorhaben sollte diesbezüglich einen Kompromiss zwischen größtmöglichen Querschnitten bei vertretbaren Kosten, mit entsprechender Verfügbarkeit der am Prozess beteiligten Produktionsmittel finden.

Entsprechend der Systemskizzen ist die Herstellung einer oder mehrerer Ablenkungen aus einer Hauptbohrung notwendig, um den Nutzhorizont lateral erschließen zu können. Das Abteufen solcher multilateralen Bohrprofile entspricht, insbesondere bei der Feldesentwicklung im Offshore Bereich, dem Stand der Technik (SCHOENMAKERS, 1997) (SUGIYAMA, 1997). Der nächste Schritt ist eine weitere Ablenkung, diesmal in der Ebene des Nutzhorizontes (sekundäre Ablenkung). Grundsätzlich ergeben sich hierbei für das Bohren keine unlösbaren Probleme, da die flexiblen Techniken zur Herstellung der ersten Ablenkung, auch für weitere Ablenkungen an einer anderen Lokation im Bohrloch verwendet werden können. Durch das Erschließen des Nutzhorizontes in verschiedenen Richtungen können folglich auch die Probleme, die mit der Herstellung einer extrem langen Horizontalbohrung für Bohrgerät, Steuerungstechnik und Komplettierung auftreten, geschickt umgangen werden.

Letztendlich spielt allein die Größe der untertägig erschlossenen Wärmetauscherfläche eine Rolle. Es ist vorerst nicht von Bedeutung, ob diese durch eine sehr lange oder mehrere kürzere Bohrungen realisiert wurde. Um so verzweigter das System jedoch ist, desto komplizierter auch die technische Durchführung. Die Realisierung eines derartig komplexen Bohrverlaufs stellt allerdings aus rein bohrtechnischer Sicht durchaus lösbare Probleme dar. Sowohl die Technologie als auch die Erfahrung stehen in der Kohlenwasserstoffindustrie im Zusammenhang mit der Erschließung dünnmächtiger Erdöllagerstätten zur Verfügung (STOLTE, 2000).

Größere Probleme entstehen bei der Verfügbarkeit geeigneter Komplettierungstechniken. Grenzen bestehen zunächst für Verrohrungs- und Zementationstechniken, die ein geschlossenes System ermöglichen sollen. Dies ist jedoch Voraussetzung für die Zirkulation des WTF ohne Stoffaustausch mit dem Gebirge.

Die Art und der prinzipielle Aufwand für die Herstellung eines multilateralen Fördersystems steigt mit den Anforderungen an die Komplettierung definiert durch die spätere Nutzung.

Diese lauten für diesen Fall:

- Druckabdichtung der Einzelstränge
- Möglichkeit eines vereinfachten Wiedereinfahrens in die Einzelstränge zum Einbau der Steigrohrstränge
- wahlweise gesammelte oder selektive Förderung

Für die Komplettierung multilateraler Fördersysteme existiert eine Klassifikation der TAML<sup>1</sup>. Diese basiert auf einer Komplexitäts- sowie Funktionalitätseinstufung unterschiedlicher Anordnungen anhand einer Skala von eins bis sechs. Ein Level sechs multilateral entspricht dabei der höchsten Komplexitätsstufe (DIGGINS, 1997).

Prinzipiell sind für einfache Anordnungen des UGWT bereits TAMLs des Levels vier anwendbar, die sowohl einen verrohrten Kreuzungsbereich als auch eine verrohrte und zementierte Lateralbohrstrecke zulassen. Nur ein Level sechs multilateral gewährleistet jedoch eine Druckdichtigkeit des Systems, die allein über die Verrohrung erreicht wird (MACARTHUR, 1999). Dies ist letztendlich die Voraussetzung für die vollkommene Geschlossenheit des Systems.

Eingesetzt wird ein Verfahren mit vorgefertigten, verformbaren multilateralen Kreuzungsbereichen. Die Verwendung dieser Garnituren kann nach dem Stand der Technik auch in horizontalen Strecken erfolgen. So könnten in einer Ebene des Nutzhorizontes mehrere solcher Kreuzungsbereiche nacheinander installiert werden, um daraus weitere Bohrarmlen (bisher maximal zwei aus jeder Kreuzung) abzuteufen (siehe Abbildung 4 b-e). Aus bohrtechnischer Sicht können die skizzierten Systeme folglich realisiert werden.

Auch die Güte der Zementation spielt für das Gesamtsystem eine entscheidende Rolle. Hierbei kommt es besonders hinsichtlich der Notwendigkeit einer dichten Anbindung von Verrohrung an das Gestein auf die Zentrität der eingebrachten Rohre an. Bei der Platzierung der ohnehin für das Einbringen erforderlichen Zentralisatoren entlang der Rohre muss darauf geachtet werden, dass diese nicht den Ablauf und letztlich die Güte der Zementation beeinträchtigen. Dies kann der Fall sein, wenn entweder die Anzahl oder der durch die Zentralisatoren verursachte Widerstand auf den Fluidstrom nicht nur beim Austrag des restlichen Bohrkleins (inklusive der Säuberung der Bohrlochwand von Spülungsresten), aber auch beim Zementationsprozess als solchem negative Einflüsse aufzeigt. Andererseits muss eine zentrische Lage der Rohre für die Ausbildung eines Zementmantels konstanter Stärke durch eine hinreichende Anzahl von Zentralisatoren gewährleistet sein. Eine genaue Planung angepasst auf die spezifischen Verhältnisse im Bohrloch und das umgebene Gebirge (z.B. an den Druck angepasste Statik) ist daher für eine erfolgreiche Komplettierung langer Horizontalbohrstrecken unumgänglich. Darüber hinaus können durch die Zugabe von Additiven mit speziellen Eigenschaften zur Zementsuspension einerseits die Erfolgsaussichten, aber auch

<sup>1</sup> Technical-Advancement-Multi-Lateral Forum

die endgültige Qualität und Eigenschaft der Zementation verbessert werden. Zu solchen besonderen Anforderungen im Rahmen geothermischer Bohrungen zählen dabei:

- Temperaturbeständigkeit
- erhöhte Zugfestigkeit und Elastizität für eine längere Lebensdauer auch bei temperaturbedingten Wechsellasten
- effektivere Anbindung der Verrohrung an das Gebirge (bond)
- erhöhte chemische Resistenz gegen korrosive Formationsfluide

Zusätze wie Latex- (Latexzemente) oder Magnesiumoxid (Quellzemente) können zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit und Langlebigkeit der Zementation beitragen (NELSON 1990). Die Erhöhung der Temperaturbeständigkeit wird durch die Verwendung von geothermischen Zementsuspensionen mit erhöhtem Silikatanteil erreicht. Diese haben darüber hinaus eine höhere chemische Resistenz gegenüber salzhaltigen Formationswässern und erhalten so die geforderten Festigkeitseigenschaften über die Lebensdauer der geothermischen Förder sonden aufrecht (BERRA, 1988).

Sekundäre Ablenkungen in der horizontalen Ebene werden in der Kohlenwasserstoffindustrie als offenes Loch oder mit geschlitzten Linern komplettiert. Die Ausführung eines fluiddicht komplettierten Lateralstranges hat verständlicherweise aus fördertechnischen Gründen keine Relevanz, es sei denn der laterale Abschnitt wird zuerst verrohrt und anschließend perforiert (cased hole completion).

Die selektive Förderung aus jedem einzelnen Bohrarm ist bei einfacheren Systemen bereits praktikabel. Doppelrohrförderstränge könnten eine solche Zirkulation möglich machen.

Weiterhin befinden sich aber auch Ventilsysteme in Entwicklung, die die selektive Förderung sowohl in verschiedenen Ebenen, als auch bei verschiedenen lateralen Entfernungen vom Hauptfördererstrang ermöglichen sollen. Wahlweise kann so eine separate oder kombinierte Ansteuerung der lateralen Förderstränge erfolgen. Lösungsansätze aus der Erdöl-Erdgasindustrie existieren hierfür im Zusammenhang mit dem Einsatz von elektrischen Unterwassermotorpumpen sowie untertägigen Durchflußmengenmessungen (RHODES, 1999).

Das Koaxialprinzip ist folglich bereits für multilaterale Bohrkonzepte nicht nur bohrtechnisch, sondern auch hinsichtlich der notwendigen Komplettierung zu einem geschlossenen Wärmetauschersystem für einfache Anordnungen umsetzbar. Es ist nur eine Frage der Zeit, dass Weiterentwicklungen, speziell im Bereich von Komplettierungstechnologien, auch andere, komplizierte Systeme realisierbar werden lassen.

Die anderen Alternativen sind die in den Konzeptskizzen dargestellten, untertägig verbundenen Systeme. Es existieren hierbei i.d.R. zwei vertikale Bohrungen, die den Nutzhorizont primär erschließen. Die Installation von isolierten Steigrohren (Abbildung 2) wird dadurch überflüssig. Folglich könnten zwei in der Ebene aufeinander zulaufende Bohrungen oder das Anbohren einer bereits bestehenden Horizontalbohrung durch eine zweite Vertikale für die Realisierung der Verbindung denkbar sein.

Vergleichbare Ansätze liefert die Kohlenwasserstoffindustrie nur im Zusammenhang von durchgeführten sogenannten relief-well Operationen im Falle der blowout Bekämpfung. Dabei wird jedoch die Ausgangsbohrung i.d.R. nicht unmittelbar erschlossen. Es kommt lediglich zum Abteufen einer Bohrung, deren Ziel das direkte Umfeld der eruptiven Bohrung ist. Durch massive Stimulation (in diesem Fall hydraulic fracturing) des Zielbereiches werden die Bohrungen miteinander verbunden woraufhin die eruptive Bohrung totgepumpt werden kann.

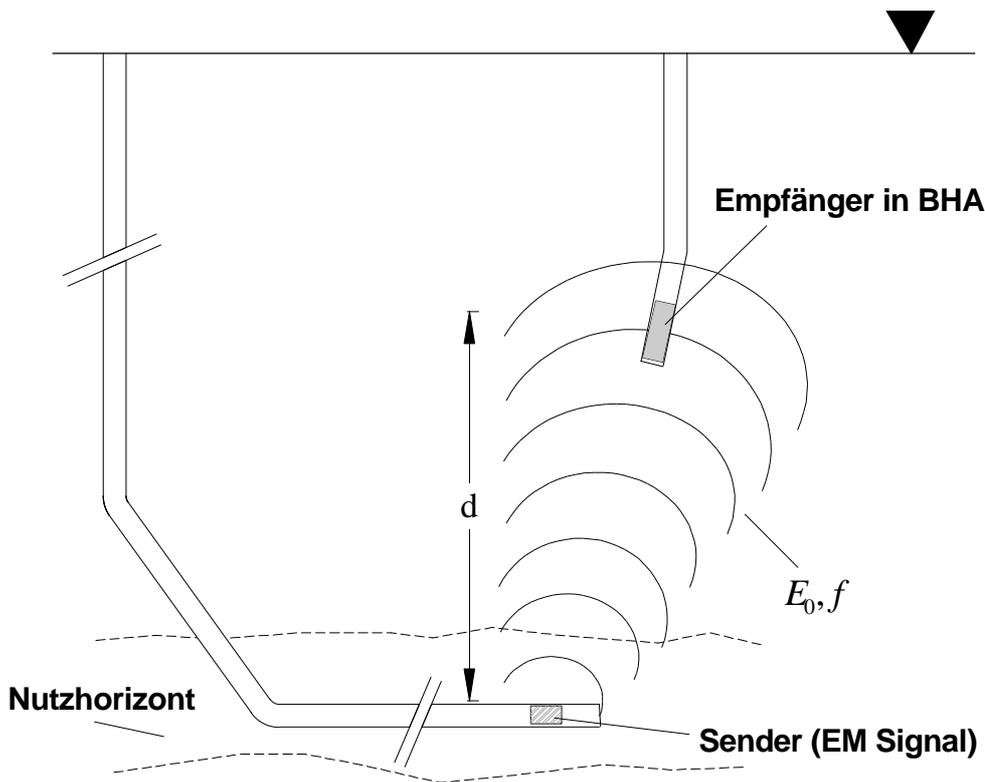
### 5.1 Zielbohrtechnik und andere innovative Bohrtechniken

Um zwei Bohrungen miteinander zu verbinden, ist eine hochpräzise Zielbohrtechnik notwendig. Ähnliche Steuerungskonzepte wurden mit der Entwicklung der Vertikalbohrsysteme für den Einsatz bei der KTB realisiert (ENGESER, 1996). Hier war das Erzeugen einer möglichst lotrechten Bohrung zur Vermeidung problemhafter Bohrlochkrümmungen erforderlich. Die Weiterentwicklung dieser Technologie wird von der Firma Baker Hughes als AutoTrak<sup>SM</sup> (BAKER HUGHES, 2000) erfolgreich für die Erstellung komplexer dreidimensionaler Bohrverläufe angewendet. Sie ist in der Lage projektierten Bohrverläufen mit Abweichungstoleranzen im Zentimeterbereich zu folgen.

Die Systeme wurden jedoch nicht darauf ausgelegt, exakt ein unterirdisches Ziel wie etwa den Endpunkt einer Bohrung anzu steuern zu können. Dieser muß vorher genau geortet werden. Für die zielgenaue Ortung und den Aufschluß einer untertägigen Lokation eignen sich elektromagnetische Messverfahren, die zusammen mit dem für die Ausführung der Bohrung nötigen Richtbohrgerät kombiniert werden müssen.

Für die mögliche Anwendung in Zielbohrsystemen ist jedoch der umgekehrte Fall des geophysikalischen Messverfahrens von Interesse (siehe Abbildung 7). Das magnetische Feld wird demnach nicht an der Oberfläche erzeugt, sondern in der Bohrung selbst von wo aus es in Richtung Erdoberfläche (dem jeweiligen Empfänger) gesendet wird. Dafür müssen die geologischen und geophysikalischen Parameter des Zielhorizontes und der überlagernden Schichten durch ein umfangreiches Messprogramm im Verlauf der ersten Bohrung weitestgehend bekannt sein. Um diese Bohrung nun mit einer zweiten zu verbinden, muss die schon vorhandene Bohrung in ihrer Lage genau detektiert werden. Hierzu wird ein Sender elektromagnetischer Wellen (EM Wellen) in der Bohrung an einer bestimmten Stelle installiert. Um diesen wiederum zielgenau orten zu können, muss das von ihm ausgesendete Signal eine gerichtete Abstrahlcharakteristik aufweisen. Als Sender würde sich dafür eine Spule mit spezifischer Frequenz  $f$  und hoher Signalstärke  $E_0$  eignen. Das erzeugte magnetische Feld durchdringt den Gebirgskörper und kann zunächst an der Erdoberfläche detektiert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Amplituden elektromagnetischer Felder mit der Entfernung abnehmen.

Die Teufe, nach der die Ausgangsamplitude des Feldes auf  $e^{-1}$  (ca. 37%) ihres Wertes reduziert ist, wird als Eindringtiefe einer EM Welle bezeichnet und gilt als ein Erfahrungswert. Sie stellt die maximale Entfernung für ein noch zu detektierendes elektromagnetisches Signal dar.



**Abbildung 7:** Funktionsprinzip eines Zielbohrverfahrens

Empirisch abgeschätzt ist die Eindringtiefe  $d$  einer EM Welle in nicht magnetische Medien:

$$d = 504 \left( \frac{\rho}{f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

mit:  $\rho = 1/\sigma$  ( $\sigma$  = elektrische Leitfähigkeit) als spezifischer elektrischer Widerstand (in Ohm m) und  $f$  als Frequenz (in Hz) der EM Welle (SHARMA, 1997).

In den ersten Kilometern der oberen Erdkruste übt das in der Gesteinsmatrix vorhandene Wasser mit verschiedenen Salzgehalten den größten Einfluss auf die Leitfähigkeitseigenschaften aus (SCHÖN, 1996). Zur Beschreibung solcher wassergesättigter oder wasserführender Gesteine beschreibt Archie's Gesetz (3) als eine empirische Formel die Beziehung zwischen Widerstand und Porosität sowohl des Formationswassers als auch der Gesteinsmatrix.

$$\rho_G = a \cdot \rho_w \cdot \Phi^{-m} \quad (4)$$

$\rho_G$  elektrischer Widerstand der Gesteinsmatrix (in Ohm m)

$\rho_w$  elektrischer Widerstand des Formationswassers (in Ohm m)

$\phi$  Porosität (in Vol%)

$a, m$  empirische dimensionslose Konstanten für unterschiedliche Gesteinsformation

Niedrige Frequenzen und hohe Widerstände führen somit zu hohen Eindringtiefen der EM Welle. Enthielten die Formationen nur sehr wenig Wasser oder wiesen nur sehr geringe Porositäten auf, würde dies zu einer Erhöhung der Eindringtiefen führen.

Die Eindringtiefe des Signals kann jedoch auch durch zwischengeschaltete Horizonte hoher Leitfähigkeit, wie Graphit-Lagen, wassergefüllte Scherzonen oder Klüfte sowie anthropogene Veränderungen des Untergrundes, beeinflusst werden, da sich dort die Dämpfung erhöht. Die Signalstärke des Senders müsste demnach erhöht werden, um diesen noch detektieren zu können.

Für den Einsatz in Zielbohrsystemen befindet sich der Empfänger nicht wie gewöhnlich an der Erdoberfläche, sondern würde in der BHA der Bohrgarnitur mitgeführt werden. Integriert beispielsweise in der Steuereinheit könnte dieser entsprechende Signale direkt an die anfangs erwähnte Richtbohrgarnitur weiterleiten, um die kontinuierlich exakten Richtungsänderungen des Bohrverlaufes mit Hilfe von expandierbaren Stabilisatorrippen vorzunehmen. Das System würde dabei grundsätzlich versuchen, dem stärksten Signal entgegen zu steuern. Prinzipiell könnte dies ein denkbarer Ansatz für die Funktionsweise einer möglichen Zielbohrereinrichtung sein.

Abgesehen von den angesprochenen technischen Notwendigkeiten befindet sich das Hauptanliegen eines nicht wissenschaftlichen Bohrvorhabens auf Seiten der Kostenreduzierung bzw. maximalen Effizienz des Bohrvorgangs. Die einzigen aktiven Möglichkeiten zur Kostensenkung bestehen in der Verbesserung der Planung und des Managements (Risikoabschätzung, strategische Planung, Logistik) sowie der Steigerung der Effektivität des Bohrvorganges.

Letzterem Aspekt kommt in diesem Rahmen eine besondere Bedeutung zu. Bei allen vorgestellten Konzepten sollte grundsätzlich auf die Verwendung von Technologien geachtet werden, die wesentliche Vorteile gegenüber konventioneller Technik aufweisen könnten. Diese Vorteile zeigen sich in Verbindung mit:

- Reduzierten Verschleißerscheinungen an Bohrwerkzeug und Bohrgarnitur (*Drehschlagbohrverfahren* (ROWLEY, 2000), (FINGER, 1984); (HAHNE, 2000) hohe Bohrfortschritte in mittelharten bis harten Gesteinen),
- Zeit- und Kostenersparnis durch reduzierte Bohr- und Roundtripzeiten (*Einziehbare Bohrmeißel* (GELFGAT, 1998), *Casing Drilling* (TESSARI, 1999)),
- Bohrlochstabilitätsproblemen (*innovative Spülsysteme* (HOLT, 1997); (MENG, 1996); (SANTOS, 1997), *Casing Drilling* (HAHN, 2000)),
- besseren Möglichkeiten zur Kontrolle des Bohrregimes für einen effektiveren Bohrprozess (*Elektrische Bohrlochsohlenantriebe* (GADDY, 1999)).

Alle diese Verfahren gelten als innovative Bohrverfahren oder als deren Komponenten. Die eigentliche Anwendung ist i.d.R. auf Grund von technischen Mängeln limitiert auf Sonder-einsätze. Mängel resultieren aus einer unzureichenden Erprobung und Standardisierung, die nur durch repräsentative Feldversuche zur Überprüfung der Funktionalität gewährleistet werden kann und muss. Die damit verbundenen hohen Anfangsinvestitionen und somit die Steigerung des Risikos des Vorhabens stellen bei einem gleichzeitigen globalen Wettbewerb direkte monetäre Belastungen für die Unternehmen dar, die schwer zu kompensieren sind. Demnach wird auch im Rahmen geothermischer Bohrprojekte in den meisten Fällen auf konventionelle Verfahren zurückgegriffen.

Die erhöhte Effizienz innovativer Verfahren trägt jedoch langfristig zu einer Minderung des Gesamtaufwandes bei. Nicht nur dieser ist alleine von entscheidender Bedeutung, sondern auch die Qualität der erzeugten Leistung. Dies gilt insbesondere dann, wenn wie im Falle des UGGW sehr hohe Anforderungen an die Bohrtechnik im Sinne der Zielgenauigkeit und der Qualität (Kaliberhaltigkeit) des fertigen Bohrlochs gestellt werden.

## 5.2 Fluidzirkulation in Verbundsystemen

Obwohl sich die Zirkulation des WTF im untertägigen Bereich im Vergleich zum Koaxialprinzip als wesentlich einfacher und effektiver (Ausnutzung des vollen Rohrquerschnittes) darstellen ließe, entstehen prozesstechnische Probleme bei der Rezirkulation des WTF nach dem Wärmeentzug in oberirdischen Wärmetauschersystemen.

Für einen genügend großen Wärmeertrag (siehe Abschnitt 0) ist eine untertägige Konfiguration vorgesehen, die entweder aus mindestens einer sehr langen Horizontalbohrstrecke oder mehrerer kürzerer im Nutzhorizont parallellaufender Abschnitte besteht. Der Abstand zwischen den Einzelbohrungen voneinander müsste dabei inklusive der prozesstechnischen Parameter (Temperaturdifferenz, Fördervolumenstrom; siehe Abschnitt 0) so gewählt werden, dass ein thermischer Durchbruch während der Lebensdauer der Anlage ausgeschlossen werden kann.

Da sich im Falle einer langen Horizontalbohrung im Untergrund die Förder- und Injektionsbohrung räumlich weit voneinander getrennt befinden, müsste das Fluid nach erfolgter über-tägiger Wärmeabgabe über ein oberirdisches Rohrleitungssystem zum Injektionsort zurücktransportiert werden. Der Transport muss dann so energieneutral wie möglich ablaufen. Durch die Ausnutzung eines natürlichen Gefälles oder der Förderung eines Zweiphasengemisches könnten solche Ziele erreicht werden. Dies würde einen zusätzlichen Aufwand für die Verlegung der notwendigen Pipeline zur Gewährleistung der über-tägigen Geschlossenheit des Systems bedeuten.

Befindet sich reines Wasser im WTF-Kreislauf, könnte dieser durch ein oberirdisches Vorflutsystem geschlossen werden. Die Injektionsbohrung befindet sich in diesem Fall stromabwärts und würde das WTF im geschlossenen System untertage, entgegengesetzt der Fließrichtung übertage, zur Förderbohrung transportieren. Prinzipiell wäre dieses Verfahren bei stehenden Gewässern mit einem ausreichend großen Volumen oder eventuell sogar oberflächennahen Aquiferen mit hohen Permeabilitäten denkbar. Hierbei dürfen jedoch keine Verunreinigungen des Mediums der Anlage untertage (z.B. verursacht durch Korrosions- oder Erosionserscheinungen von Anlagenteilen) sowie drastische Temperaturerhöhungen - speziell bei Oberflächen- und Grundwässern - auftreten. Analogien und Grenzen der Machbarkeit ergeben sich im Zusammenhang mit der Frischwasserkühlung bei konventionellen Kraftwerken (STRAUB, 1997). Natürliche Wasserreservoirs bedeuten jedoch im Regelfall eine Senkung der WTF Eintrittstemperatur auf ein für den Gesamtprozess ungünstiges Niveau. Reinjizierte Fluidmengen müssten folglich vorher auf ein höheres, im Idealfall für den Gesamtprozess optimales Temperaturniveau durch die Verwendung zusätzlicher solarthermischer Aggregate oder der Abwärmenutzung gebracht werden.

## 6 Energieertragsbewertung

Im Gegensatz zu jeder anderen Art der Energiegewinnung ist der untertägig geschlossene Wärmetauscher ein standortunabhängiges System. Es existieren lediglich günstige und weniger günstige Standorte.

Vorausgesetzt eines durchschnittlich geothermischen Gradienten von 0,03 K/m kann an einer beliebigen Lokation eine solche Anlage mit unterschiedlich hohem technischem Aufwand errichtet werden. Sind Temperaturen und Fließraten im WTF Kreislauf erreichbar, die für eine Stromerzeugung in binären Anlagen ausreichen (s. KÖHLER & SAADAT, dieser Report), verringert sich die Standortabhängigkeit um die Notwendigkeit eines vorhandenen Wärmeabnehmers. Bezogen auf die Standortfrage eignen sich primär solche Lokationen, bei denen ein angemessenes Temperaturniveau bereits in geringeren Teufen auf Grund lokaler geothermischer Anomalien verfügbar ist. Dies würde zu einer Verringerung des Bohraufwandes und somit zu einer unmittelbaren Ertragssteigerung führen.

Der größte Energieertrag aus einem geschlossenen System dieser Art ist zu erwarten, wenn einerseits ein großes Gebirgsvolumen über die Wärmetauscherflächen erschlossen wird und andererseits die thermodynamischen und verfahrenstechnischen Bedingungen bei der Förderung des WTF optimiert werden.

Prinzipiell gilt für alle Systeme, dass mit Zuwachs der künstlich erzeugten Flächen untertage auch die kumulierte Wärmemenge aus dem System steigt. Da keine weiteren Zuflüsse in das System ermöglicht werden, kann auch nur soviel gefördert werden wie übertägig eingeleitet wurde bzw. es die untertägigen Kapazitäten erlauben. Ist der gewünschte Nutzhorizont durch eine oder mehrere Bohrungen erschlossen, bietet sich dessen Erschließung in der horizontalen Ebene an. Die Gründe dafür sind einerseits die mehr oder weniger gleichbleibenden und damit voraussehbaren geologischen und gebirgsmechanischen Verhältnisse. Andererseits kann somit eine Fläche für den Wärmeaustausch erschlossen werden, die nicht nur ein konstantes und hohes Temperaturniveau aufweist, sondern auch optimale Voraussetzungen für die Regeneration des Systems schafft. Der Wärmefluss verläuft aus tiefen Erdschichten bis an die Erdoberfläche und somit an den Austauschflächen des UGGW vorbei. Der Eintrag eines im Verhältnis zu den umgebenen Gesteinstemperaturen kalten WTF führt zu einer Abkühlung der betroffenen Gebirgsbereiche. Der konduktive Wärmetransport im Gebirge ist sehr gering entsprechend langsam regenerieren sich stark ausgekühlte Bereiche. Ein weit verzweigtes System hat dabei bezogen auf den Energieertrag wesentliche Vorteile gegenüber einem System mit im einfachsten Fall nur einer zentralen Hauptförderstrecke mit großem Querschnitt. Wo der Ertrag anfangs noch sehr hoch ist, sinkt er mit zunehmender Betriebsdauer bis zu einem sich einstellenden Temperaturniveau. Eine thermische Regeneration des Gebirges ist nur durch eine vollständige Einstellung des Förderbetriebes zu erreichen.

Selektiv ansteuerbare, multilaterale Stränge, könnten den dauerhaften Betrieb bei gleichzeitiger Regeneration einzelner Teilstrecken ermöglichen. Es ist folglich aus energetischer Sicht der Aufschluss in mindestens zwei Richtungen zweckmäßig, wobei sich eine um 180° versetzte Doppelkonfiguration (opposed laterals) als ideal erwies. Die Abkühlungserscheinun-

gen des Gebirges wären dadurch weniger eng begrenzt und könnten besser über eine breite Front der nachströmenden Wärme kompensiert werden.

Ein untertägig verbundenes Rohrsystem bringt Vorteile gegenüber der Koaxialausführung, da hier der Umlauf größerer Volumenströme möglich ist. Diese Vorteile sind jedoch gegen die zusätzlichen Energie- und Kostenaufwände im Zusammenhang mit der Herstellung bzw. Machbarkeit eines Verbundsystems abzuwägen.

Der Austausch von reinem Wasser gegen ein anderes WTF im Kreislauf ist nur bedingt sinnvoll. Der Wärmeertrag ließe sich unter Beibehaltung der Prozessparameter, speziell der Temperaturdifferenz und des Fördervolumenstroms, nur dann steigern, wenn das alternative Medium eine deutlich höhere Wärmekapazität und/oder Dichte hätte. In bezug auf die Wärmekapazität weist reines Wasser jedoch mit  $c_p = 4,183 \text{ kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$  (bei 25 °C und 1 bar) schon sehr gute Eigenschaften auf. Die Mehrzahl der alternativen technischen Wärmeträger (organisch, auf Mineralölbasis oder synthetisch) besitzen entweder geringere Wärmekapazität und/oder geringere Dichte (VDI WÄRMEATLAS, 1997). Bei höherer Dichte steigt allerdings auch die Viskosität und damit die erforderliche Pumpenleistung, um turbulente Strömungsverhältnisse für die Steigerung des Wärmeertrages zu ermöglichen.

Ein WTF alternativ zu Wasser ist ein solches, welches die Eigenschaft besitzt, im zentralen, vertikalen Förderrohr, auf Grund der dort eintretenden Druckentlastung in die gasförmige Phase überzugehen. Dadurch werden Dichteunterschiede in der Fluidsäule hervorgerufen, die einen zusätzlichen Auftrieb bewirken. Nach dem Prinzip eines Lufthebeverfahrens kann dies die Förderung des WTF erleichtern, ohne dabei zusätzlich eine gasförmige Phase in den Förderstrom injizieren zu müssen. Weiterhin ist auch die vollständige Verdampfung des eingebrachten Fluids an der Bohrlochsohle denkbar. Im Steigrohr wird folglich eine gasförmige Phase gefördert, die dann übertage z.B. einer direkten Nutzung in einer Turbine zugeführt wird. Dazu bedarf es der chemischen Einstellung des Fluides, um eine Verdampfung erst im Tiefsten des Bohrloches erfolgen zu lassen. Hierzu sind geeignete Ventile für eine geregelte Zufuhr des Fluidstromes in den Verdampfungsbereich erforderlich, so dass eine Gasbildung und damit eine Auftriebswirkung im deszendenten Volumenstrom ausgeschlossen werden kann. Das Steigrohr ist darüber hinaus so zu isolieren, dass der Wärmefluss durch die Wandung an das umgebende Fluid weitestgehend verhindert wird. Eine effektive Isolierung kann durch größere Wandstärken der Förderrohre realisiert werden (GFK Rohre oder doppelwandige Rohre). Diese Anwendung erreicht bei dem nur sehr begrenzt zur Verfügung stehenden Platzbedarf schnell ihre Grenzen, es sei denn alternative Materialien mit ähnlichen wärmeisolierenden Eigenschaften jedoch geringerem Platzbedarf (ähnlich der Polyäthylenrohre im Gefrierschachtbau) kämen für einen Einsatz auch bei hohen Temperaturen in Frage. Wasser ist jedoch selbst in großen Mengen überall mehr oder weniger gut verfügbar und deshalb kostengünstig und umweltverträglich. Alternative Fluide müssen aufbereitet bzw. speziell entsorgt werden. Der Einsatz eines anderen WTF in einem solchen System erscheint daher bis auf weiteres als weniger praktikabel.

Bei einem Fördervolumenstrom von 50 m<sup>3</sup>/h kann eine maximale Leistung von etwa 5 MW erzielt werden. Die benötigte Leistung für Förderhilfsmittel beträgt demgegenüber einige

hundert Kilowatt. Die hierbei benötigte Länge der Wärmetauscherstrecke im Reservoir, beträgt jedoch rund 10 km. Eine solche Strecke kann jedoch alternativ und effektiver mittels kürzerer lateraler Teilstrecken (Abbildung 4 b-e) realisiert werden. Die Werte entsprechen demnach nur einem Zehntel der hydrothermalen Ausbeute. Konsequenterweise müssen jedoch einerseits die weitgehende Standortunabhängigkeit, sowie das unproblematische WTF im Falle des vorgestellten Alternativsystems als auch der Wärmeübergang in den vertikalen Abschnitten in die Berechnung, für eine aussagefähigere Analyse einfließen.

Schließlich darf bei den Untersuchungen zum untertägig geschlossenen Wärmetauscher nicht vernachlässigt werden, dass dieser im Bedarfsfall, unabhängig von jedem anderen zu fördern- und zu entsorgenden Primärenergieträger (fossil oder hydrothermal) bei der Berücksichtigung von Regenerationsphasen in einem Jahresdauerbetrieb gefahren werden könnte. Den vorerst mäßigen Leistungsdaten stünden dann hohe Arbeitszahlen gegenüber.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Der untertägig geschlossene Wärmetauscher ist aus heutiger Sicht ein bereits unter gewissen Voraussetzungen technisch machbares regeneratives Energieerzeugungskonzept, welches ein Potenzial besitzt in Zukunft das Angebot der Konzepte zur Erdwärmegewinnung aus tiefen Gesteinsformationen zu erweitern. Die Standortunabhängigkeit des Systems kann dabei ein direkter Wettbewerbsvorteil und das wichtigste Entscheidungskriterium insbesondere in Regionen werden, die die natürlichen geologischen Voraussetzungen für eine Erdwärmegewinnung auf konventionelle Art vermissen lassen.

Der Aufwand zur Herstellung eines solchen Systems übertrifft jedoch die bisher angewandten Methoden deutlich. Dies ist speziell auf den Mangel an übertragbaren Technologien aus anderen Industriebereichen, speziell der Kohlenwasserstoffindustrie, zurückzuführen, die zwar wertvolle Erfahrungen in Teilbereichen der bohrtechnischen Durchführung bereitstellen, jedoch letztendlich nicht genügend Lösungsansätze für die Errichtung der untertägig dichten Konfiguration bzw. Komplettierung liefern. Hierfür mussten und müssen auch in Zukunft Ideen aus weiteren Bereichen in die konzeptionelle Umsetzung einfließen. Dies muß speziell im Zusammenhang mit Fragen zur Auswahl des Wärmeträgerfluides als auch zur Thematik der Fluidsteuerungs- sowie Werkstofftechnik erfolgen.

Der untertägig geschlossene Wärmetauscher sollte daher nicht als Konkurrenz angesehen, sondern vielmehr als Ergänzung der erneuerbaren Energiekonzepte angesehen werden. Die direkten Vorteile sind durch seine Emissionsneutralität, die Standortunabhängigkeit und die Dauerlastfahrweise mit geringen Wartungsintervallen gegeben. Diese können dazu beitragen die optimistische Vorgaben zur Reduzierung der klimaschädlichen Emissionen im Energieerzeugungssektor eines Tages zu erreichen.

Die Effektivität ist dabei nicht alleine an den heutigen unmittelbaren Kosten festzumachen. Insbesondere ist der langfristige ökologische Nutzen für eine Volkswirtschaft als auch der zukünftig wirksame mikroökonomische Nutzen durch eine sich eventuell stark verändernde Lage auf dem Energiemarkt zu berücksichtigen. Nach dem Vorschlag der Gründung einer

deutschen „Emissions Trading Group“ sowie dem Pilotvorhaben „Nationaler Emissionshandel“, initiiert durch das Bundesumweltministerium als eine Alternative zur Ökosteuer (SCHAFHAUSEN, 2000), besteht die Möglichkeit der Einführung eines Handels mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten (BERLINER ZEITUNG, 2000). Die damit verbundenen Kostensteigerungen konventioneller Energieerzeugung als auch die Marktanreize für emissionsarme Technologien sind dabei selbst im Hinblick auf ein System wie den UGGW nicht zu vernachlässigen.

## 8 Literatur

BAEHR, H. D. & STEPHAN, K. (1999): Wärme- und Stoffübertragung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

BERLINER ZEITUNG (2000): Lizenzhandel mit Treibhausgasen. Artikel aus der Berliner Zeitung, 17.07.00

BERRA, M., FABBRI, F., FACOETTI, M., NORIS, A., PEZZUOLI, M., RICCIARDULLI, R., ROMANO, G. & TARQUINI, B. (1988): Behaviour of a cementing hydraulic binder under severe geothermal conditions. Geothermics, Vol. 17, No. 5/6, S. 785-813

BAKER HUGHES (2000): Produktinformation: AutoTrak<sup>SM</sup>, Rotary Closed Loop Drilling System. Baker Hughes, Celle

BAKER OIL TOOLS:APPLICATION REPORT (Nov. 1999): Multilateral Systems, TAML Level 6 Multilateral Systems. Baker Hughes, Celle

CERBE, G. & HOFFMANN, H.-J. (1999): Einführung in die Thermodynamik. 12. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien

DIGGINS, E. (1997): Classification provides framework for ranking multilateral complexity and welltype, Oil&Gas Journal, Vol. 95, Issue 52, Dec. 29

ENGESER, B. (1996): KTB Report 95-3, Das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB Bohrtechnische Dokumentation, Kapitel C-1.3, NLFb, Hannover

EUGSTER, W.J. (1991): Erdwärmesonden – Funktionsweise und Wechselwirkung mit dem geologischen Untergrund. Feldmessungen und Modellsimulation. ETH-Dissertation Nr. 9524, ETH Zürich

FINGER, J. T. (1984): Investigation of Percussion Drills for Geothermal Applications, Journal of Petroleum Technology, Dec., pp 2128-2136

GADDY, D.E. (1999): Russia Shares technical know-how with U.S., Oil & Gas Journal, Vol. 97, Issue 10, Mar. 08

GELFGAT, M. & ALIKIN, R. (1998): Retractable Bits Development and Application, in Journal of Energy Resources Technology, June

- GEOHERMISCHE VEREINIGUNG E.V. (2000). <http://www.geothermie.de/>
- HAHN, D. (2000): Abteufen von Bohrungen in Lagerstätten mit stark gesenktem Formationsdruck – Casing-while-Drilling. Erdöl Erdgas Kohle, 116. Jhg, Heft 7/8, Juli/Aug.
- HAHNE, U., ERIKSEN, T.J. & LEA, E. (2000): Directional Drilling of Geothermal Wells in Hard Rock Formation. IADC/SPE Paper 59195, IADC/SPE Drilling Conf., New Orleans, Louisiana, 23-25 Feb.
- HOLT, C.A. & FALMY, H. (1997): The successful application of Diesel as horizontal drilling fluid. SPE/IADC Paper 39283, SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conf., Bahrain, 23-25 Nov.
- KLEIN, J. (1985): Handbuch des Gefrierschachtbaus im Bergbau. Glückauf-Betriebsbücher, Band 31, Verlag Glückauf GmbH, Essen
- LEGARTH, B. (2000): Systemtechnische Untersuchungen zur Erstellung eines untertägig geschlossenen Wärmetauschers. Diplomarbeit am Institut für Angewandte Geowissenschaften I, FG: Entsorgungs- und Rohstofftechnik, Technische Universität Berlin (unveröffentlicht)
- MACARTHUR, J. (1998): Multi-Lateral well technology. SPE Review, Issue 102, Mar., S. 12-14
- MENG, Y.F., LOU, P.Y., JIAO, D. & LAO, R.K. (1996): Horizontal Drilling Technology with Cycling Using of Inert Foam. SPE Paper 37078, Proceedings of SPE International Conf. on Horizontal Well Technology, Calgary, Canada, 18-20 Nov.
- NELSON, E.B. (1990): Well Cementing. Developments in Petroleum Science, Vol. 28, Elsevier Science Publishers B.V., Netherlands
- RÄDLER, J. (1998): Modellierung und Simulation einer geothermischen Tiefensonde zur Untersuchung eines kombinierten geo- und solarthermischen Energieversorgungssystems. Diplomarbeit am Institut f. Energietechnik, Technische Universität Berlin (unveröffentlicht)
- RHODES, A. (1999): Intelligent completions advances poised to catapult production technology forward. Oil&Gas Journal, Vol. 97, Issue 49, 06. Dec.
- ROWLEY, J., SAITO, S. & LONG, R. (2000): Advanced Drilling System for drilling geothermal wells an estimate of cost savings. World geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, Proceedings, 28. -10.Juni
- SANTOS, H. & FONTOURA, S.A.B. (1997): Concepts and Misconceptions of Mud Selection Criteria: How to minimize borehole stability problems? SPE Paper 38644, Proceedings of SPE Annual Technical Conf. and Exhibition, San Antonio, Texas, 5-8 Oct.

- SCHAFHAUSEN (2000): CO<sub>2</sub>-Lizenzhandel. Schriftliche Anfrage vom 19.07.2000 an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Expertengruppe Emissionshandel – Ziele und Hintergründe, Berlin
- SCHOENMAKERS, M. (1997): Introduction of Game-changing Drilling Technology. SPE/IADC Paper 37635, Proceedings of SPE/IADC Drilling Conf., Amsterdam, Netherlands, 4-6 Mar.
- SCHÖN, J.H. (1996): Handbook of Geophysical Exploration, Vol. 18: Physical Properties of Rocks, Fundamentals and Principles of Petrophysics, Redwood Books, Trowbridge, S. 397
- SHARMA, PREM V. (1997): Environmental and engineering geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, UK, S. 268-269
- STOLTE, D. (2000): Product Engineer bei: Baker Hughes, (mündl. Information), Celle
- STRAUB, K. (1997): Kraftwerkstechnik. 3. Neubearb. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- SUGIYAMA, H., TOCHIKAWA, T., PEDEN, J.E. & NICOLL, G. (1997): The Optimal Application of Multi-Lateral / Multi-Branch Completions. SPE Paper 38033, Proceedings of SPE Asia Pacific Oil and Gas Conf., Kuala Lumpur, Malaysia, 14-16 Apr.
- SURDON, K., BERNERS, H., FRANK, U., SICKLINGER, W., HADOW, A. & KLOP, G. (1999): Dieksand 2; an Extended Well Through Salt, Increase Production from an Environmentally Protected Field. SPE/IADC Paper 52854, Proceedings of SPE/IADC Drilling Conf., Amsterdam, Holland, 9-11 Mar.
- TESSARI, B. & MADELL, G. (1999): Casing Drilling a Revolutionary Approach to Reducing Well Costs. SPE/IADC Paper 52789, SPE/IADC Drilling Conf., Amsterdam, Holland 9-11 March, S. 221-229
- VDI WÄRMEATLAS (1997): VDI- Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, VDI-gesellschaft f. Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 8. Auflage
- VIGHETTO, R., NAEGEL, M. & PRADI, E. (1999): Total drills extended-reach record in Tierra del Fuego. Oil&Gas Journal, Vol. 97, Issue 20, May 17